

เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดสำหรับเพิ่มศักยภาพในการวัด  
ของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ

นายเอกภพ ศรีจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2556  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Point Cloud Interpolation Technique for Enhancing Measurement of A 3-D  
Coordinate Measuring Machine

Mr. Ekkaphob Srichandra

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2013  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดสำหรับเพิ่มศักยภาพในการวัดของเครื่องวัดพิคตสามมิติ
โดย	นายเอกภพ ศรีจันทร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.พงศกร บำรุงไทย)

เอกภพ ศรีจันทร์ : เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดสำหรับเพิ่มศักยภาพในการวัดของเครื่องวัด  
พิกัดสามมิติ (A Point Cloud Interpolation Technique for Enhancing  
Measurement of A 3-D Coordinate Measuring Machine)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 68 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการนำเสนอเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด (Point Cloud Interpolation Technique) จากกลุ่มจุดที่วัดพิกัดของผิวชิ้นงานตามแนวระนาบการวัดที่กำหนดโดยใช้เครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น จุดประสงค์เพื่อเพิ่มศักยภาพในการวัดพิกัดของพื้นผิวที่มีความไม่ต่อเนื่อง และเพิ่มรายละเอียดข้อมูลพิกัดตรงบริเวณที่มีความไม่ต่อเนื่อง เช่นที่ขอบมุมแหลมของชิ้นงานที่ทำการวัด กลุ่มจุดที่วัดได้มีข้อจำกัดความละเอียดเนื่องจากกล้องที่ใช้ในการถ่ายภาพของเครื่องมือวัดพิกัด ประกอบกับสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ตามปกติของเครื่องมือวัด จากสาเหตุทั้งสองดังกล่าวส่งผลให้ กลุ่มจุดที่ได้จากการวัดไม่สามารถแสดงรายละเอียดของขอบมุมแหลมได้ชัดเจน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงขอเสนอเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด เทคนิคนี้จะประมาณรูปร่างหน้าตัดของชิ้นงานจากกลุ่มจุดภายในแต่ละระนาบการวัดที่กำหนดด้วยเส้นที่ต่อเนื่องเป็นช่วง เส้นที่ต่อเนื่องแต่ละช่วงนี้ถูกสร้างขึ้นโดยวิธีการประมาณค่าแบบกำลังสองน้อยที่สุดโดยฟังก์ชันพื้นฐานอยู่ในรูปพหุนาม (polynomial) เส้นโค้งต่อเนื่องเป็นช่วงจะถูกแบ่งเป็นจุดอีกครั้งเพื่อให้ได้กลุ่มจุดที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับแสดงรายละเอียดชิ้นงานขอบมุมแหลม และกลุ่มจุดที่ได้นี้ยังสะดวกสำหรับการนำไปยังโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD)

จากการทดลองกลุ่มจุดที่ได้รับการปรับปรุงด้วยเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดมีค่าความผิดพลาดลดน้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มจุดที่ได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติโดยตรง และเมื่อนำพิกัดจุดที่ได้รับการปรับปรุงมาสร้างพื้นผิว mesh ด้วยโปรแกรม CATIA เปรียบเทียบกับพื้นผิว mesh ที่สร้างจากพิกัดจุดจากการวัดโดยตรง สังเกตพื้นผิว mesh ได้จากจุดที่ได้รับการปรับปรุงแล้วมีความราบเรียบและบริเวณขอบมุมแหลมของชิ้นงานสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่า

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2556.....

# # 5270844421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : POINT CLOUD INTERPOLATION TECHNIQUE (PCIT), CURVE RECONSTRUCTION, COORDINATE MEASURING MACHINE (CMM).

EKKAPHOB SRICHANDRA : A POINT CLOUD INTERPOLATION TECHNIQUE FOR ENHANCING MEASUREMENT OF A 3-D COORDINATE MEASURING MACHINE.

ADVISOR : PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 68 pp.

This paper presents a Point Cloud Interpolation Technique (PCIT) to enhance the resolution of point cloud measured by using an automatic laser scanning Coordinate Measuring Machine (CMM). This CMM machine is developed in-house. This technique is to increase a number of points contained in any sets of point cloud which represent the cross section profiles of an object surface. The resolution of raw data obtained from scanner is limited by a resolution of the camera used for digitizing points. To enhance resolution of point cloud will help to increase detail or information of shape especially when high slope area occurred in the measured object surface. High slope area is not easy to measure with typical low resolution CMM. To overcome this problem, PCIT can divide the raw data point cloud (low resolution point cloud) into a number of point sets. These point sets are used to generate piecewise smooth curves by applying least square fitting. Then the curves are resampling to obtain higher resolution point cloud or modified point cloud. The new point cloud obtained by combining these point sets can be used to represent high slop areas or to generate cloud points for discontinuing surface. The new point cloud can be imported to commercial CAD systems and can be used in reverse engineering application.

Department : Mechanical Engineering.....Student's Signature.....

Field of Study : Mechanical Engineering.....Advisor's Signature.....

Academic Year : 2013.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากการสนับสนุนและคำแนะนำอย่างดียิ่งของ ศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ ซึ่งให้คำแนะนำด้านการวิจัยและข้อคิดเห็นต่างๆที่มีประโยชน์ รวมทั้งสนับสนุนด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่น้องในแลปทุกท่านที่ให้คำแนะนำ และการช่วยเหลือตลอดมา โดยเฉพาะ ดร. พงศกร บำรุงไทย ที่ให้คำปรึกษาในการทำการวิจัยเสมอมา และขอบคุณกำลังใจที่ได้จากครอบครัวอันเป็นที่รักของข้าพเจ้า

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์ .....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 เครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบสเตอริโอวิชชั่น .....	4
2.1 คำนำ.....	4
2.2 โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ.....	4
2.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์.....	6
2.4 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเครื่องวัดพิกัดสามมิติ .....	8
2.5 ขั้นตอนการสแกนชิ้นงาน.....	12
2.6 การนำเข้าไฟล์ผลการวัดในโปรแกรม CATIA .....	13
บทที่ 3 ระบบสเตอริโอวิชชั่น .....	15
3.1 คำนำ.....	15
3.2 การหาจุดที่สอดคล้อง.....	15
3.3 การหาค่าพิกัดสามมิติ (3D reconstruction).....	17
3.4 การหาจุดที่สอดคล้องโดยใช้แถบแสงเลเซอร์ในระบบสเตอริโอ.....	19
บทที่ 4 การสร้างเส้นจากกลุ่มจุด .....	24
4.1 คำนำ.....	24
4.2 วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น (linear least square) .....	24
4.3 การสร้างสมการปกติของสมการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น .....	28
4.4 การหาค่าจากสมการโพลีโนเมียล.....	29
บทที่ 5 เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด .....	31
5.1 คำนำ.....	31
5.2 ขั้นตอนของเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด.....	32
5.3 การแบ่งกลุ่มจุด (point cloud classification).....	33

	5.4 การสร้างเส้นจากกลุ่มจุด (curve reconstruction).....	38
บทที่ 6	การทดลอง.....	39
	6.1 คำนำ.....	39
	6.2 การทดลองที่ 1.....	41
	6.3 การทดลองที่ 2.....	42
	6.4 การทดลองที่ 3.....	44
บทที่ 7	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	59
	7.1 สรุปผลงานวิจัย .....	59
	7.2 ข้อเสนอแนะ.....	60
	ภาคผนวก .....	62
	รายการอ้างอิง.....	67
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	68

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 6.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ของกล้องสแตอริโอในการทดลอง.....	39
---	----

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบภาพสเตอริโอ .....	4
รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ควบคุมและขับเคลื่อนของแกนเคลื่อนที่.....	5
รูปที่ 2.3 กล้อง CCD Pulnix รุ่น TM300 และ การรับข้อมูลภาพ DT3155.....	5
รูปที่ 2.4 แหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบเส้นของบริษัท Lasic รุ่น KML-3503.....	6
รูปที่ 2.5 แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์เครื่องวัดพิกัดสามมิติ .....	7
รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อสายสัญญาณวีดีโอ EP306 กับการ์ดรับข้อมูลภาพ DT3155.....	7
รูปที่ 2.7 ลักษณะของโปรแกรม StereoCMM.....	8
รูปที่ 2.8 แถบควบคุมการทำงาน.....	8
รูปที่ 2.9 ปุ่มเปิด - ปิดการทำงานของมอเตอร์ .....	9
รูปที่ 2.10 กลุ่มการทำงาน Scan .....	9
รูปที่ 2.11 หน้าต่างการทำงานของกลุ่ม Image Functions.....	11
รูปที่ 2.12 หน้าต่างการทำงานของกลุ่มคำสั่ง MotionControl.....	12
รูปที่ 2.13 ไฟล์ผลการวัดที่อยู่ในรูปรหัสแอสกี.....	13
รูปที่ 2.14 ไฟล์ผลการวัดพิกัดจุดในโปรแกรม CATIA.....	14
รูปที่ 2.15 พื้นผิว Mesh จากกลุ่มจุด .....	14
รูปที่ 3.1 ภาพจากระบบสเตอริโอวีซีเอ็นที่ถ่ายภาพวัตถุในสามมิติเดียวกันแต่ต่างมุมมอง .....	15
รูปที่ 3.2 epipolar geometry ของระบบสเตอริโอวีซีเอ็น .....	16
รูปที่ 3.3 การสร้างเส้น epipolar line.....	17
รูปที่ 3.4 รังสีจากจุดภาพที่ตรงกันทั้งสองเส้นไม่ตัดกัน .....	18
รูปที่ 3.5 การหาค่าพิกัดสามมิติจากจุดภาพที่ตรงกัน.....	18
รูปที่ 3.6 การสแกนของระบบสเตอริโอวีซีเอ็นร่วมกับแถบเลเซอร์ .....	19
รูปที่ 3.7 ภาพขาวดำแบบ grey scale จากกล้องแสดงแนวเส้นเลเซอร์ที่พาดลงบนชิ้นงาน .....	20
รูปที่ 3.8 การกำหนดค่าขีดระดับความเข้มของภาพในระบบสเตอริโอ .....	21
รูปที่ 3.9 การใช้แถบแสงเลเซอร์ในระบบสเตอริโอ .....	21
รูปที่ 3.10 พิกัดจุดของผลการวัดในระนาบการวัดที่กำหนดมุมมองขนานระนาบการวัด .....	22
รูปที่ 3.11 พิกัดจุดของผลการวัดในระนาบการวัดที่กำหนดมุมมองตั้งฉากกับระนาบการวัด.....	23
รูปที่ 3.12 กลุ่มจุดของผลการวัดของระนาบการวัดทั้งหมดที่ครอบคลุมชิ้นงาน .....	23
รูปที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดตามแนวตั้งและ ค่าความผิดพลาดตามแนวตั้งฉาก .....	25
รูปที่ 4.2 วิธีกำลังสองน้อยสุดโดยการหาฟังก์ชันของเส้นจากชุดของข้อมูล .....	26
รูปที่ 4.3 รหัสเทียมของการสร้างสมการปกติในรูปเมทริกซ์แต่งเติม .....	29
รูปที่ 4.4 ค่าของสมการโพลีโนเมียล ณ ตำแหน่ง $x_i$ .....	30
รูปที่ 5.1 เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด .....	31

รูปที่ 5.2 ขั้นตอนของเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด ..... 32

รูปที่ 5.3 การเรียงลำดับของกลุ่มจุดภายในระนาบการวัด ..... 33

รูปที่ 5.4 กลุ่มจุดภายในระนาบการวัด ..... 34

รูปที่ 5.5 ขั้นตอนของวิธี robust estimation technique (1) ..... 35

รูปที่ 5.6 ขั้นตอนของวิธี robust estimation technique (2) ..... 36

รูปที่ 5.7 ขั้นตอนของวิธี robust estimation technique (3) ..... 37

รูปที่ 5.8 กลุ่มจุดย่อยจากขั้นตอนแบ่งกลุ่มจุด ..... 37

รูปที่ 5.9 การสร้างเส้นจากกลุ่มจุด ..... 38

รูปที่ 6.1 การตั้งระยะและมุมกล้องในการทดลอง ..... 40

รูปที่ 6.2 ชิ้นงานลักษณะระนาบ ..... 41

รูปที่ 6.3 การหาค่าความผิดพลาดของการวัดเทียบกับพื้นผิวระนาบ ..... 42

รูปที่ 6.4 แบบจำลองของพื้นผิวรูปสามเหลี่ยม ..... 42

รูปที่ 6.5 กลุ่มจุดจำลองการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติตามแนวระนาบที่กำหนด ..... 43

รูปที่ 6.6 การใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดกับกลุ่มจุดที่ได้จากการจำลอง ..... 43

รูปที่ 6.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดการจำลองกับกลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณ  
กลุ่มจุด ..... 44

รูปที่ 6.8 ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู ..... 45

รูปที่ 6.9 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิตหัวตัด ..... 45

รูปที่ 6.10 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิตหัวตัด ..... 46

รูปที่ 6.11 ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู แนวระนาบการวัดที่ 0 องศา ..... 47

รูปที่ 6.12 ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู แนวระนาบการวัดที่ 30 องศา ..... 48

รูปที่ 6.13 ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู แนวระนาบการวัดที่ 60 องศา ..... 49

รูปที่ 6.14 ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู แนวระนาบการวัดที่ 90 องศา ..... 50

รูปที่ 6.15 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิตหัวตัด แนวระนาบการวัดที่ 0 องศา ..... 51

รูปที่ 6.16 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิตหัวตัด แนวระนาบการวัดที่ 30 องศา ..... 52

รูปที่ 6.17 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิตหัวตัด แนวระนาบการวัดที่ 60 องศา ..... 53

รูปที่ 6.18 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิตหัวตัด แนวระนาบการวัดที่ 90 องศา ..... 54

รูปที่ 6.19 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิต แนวระนาบการวัดที่ 0 องศา ..... 55

รูปที่ 6.20 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิต แนวระนาบการวัดที่ 30 องศา ..... 56

รูปที่ 6.21 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิต แนวระนาบการวัดที่ 60 องศา ..... 57

รูปที่ 6.22 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิต แนวระนาบการวัดที่ 90 องศา ..... 58

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

งานทางด้านการผลิตเมื่อต้องการผลิตสินค้าชนิดใหม่ที่ได้รับการออกแบบแล้วจะต้องให้นักเขียนแบบสร้างแบบบนคอมพิวเตอร์ โดยการใช้โปรแกรมประเภท CAD ซึ่งต้องอาศัยทักษะของผู้เขียนแบบเพื่อให้ได้แบบที่ถูกต้อง ตรงตามที่ได้รับการออกแบบไว้ ในกรณีที่ต้องการสร้างต้นแบบให้ได้เหมือนหรือใกล้เคียงกับต้นแบบจริงๆนั้น การเขียนแบบบนคอมพิวเตอร์อาจทำได้ยากและใช้เวลานานอีกทั้งยังมีความผิดพลาดสูง

วิธีการหนึ่งที่จะช่วยในการสร้างต้นแบบ คือ การวัดขนาดของชิ้นงานต้นแบบโดยตรงโดยใช้เครื่องวัดพิกัดสามมิติ เพื่อนำข้อมูลนั้นไปสร้างต้นแบบบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะช่วยให้การสร้างต้นแบบบนคอมพิวเตอร์ทำได้สะดวกเร็วขึ้น ลดความผิดพลาด และสามารถสร้างแบบของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ง่ายขึ้น

ข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติ เป็นกลุ่มจุดซึ่งแสดงข้อมูลของรูปร่างบางส่วนบนพื้นผิวชิ้นงานต้นแบบจากกลุ่มจุดเหล่านี้สามารถนำไปประมาณรูปร่างของชิ้นงานต้นแบบ ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า การสร้างใหม่จากกลุ่มจุด (Point cloud reconstruction)

สำหรับเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบวัดตามแนวระนาบการวัดที่กำหนด อย่างเช่นเครื่องวัดพิกัดสามมิติโดยใช้ภาพสเตอริโอร่วมกับแถบเลเซอร์ [4] สามารถวัดพิกัดของหน้าตัดตามแนวที่เส้นเลเซอร์พาดบนพื้นผิวชิ้นงานต้นแบบ ด้วยอุปกรณ์สำหรับเลื่อนแถบเลเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องวัดพิกัดแบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น จึงทำให้สามารถวัดพิกัดที่ครอบคลุมพื้นผิวชิ้นงานทั้งหมด

ความละเอียดของกลุ่มจุดภายในแต่ละระนาบการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติที่วัดพิกัดตามแนวระนาบการวัดที่กำหนดจะขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ในการวัด ตัวอย่างเช่นเครื่องวัดพิกัดสามมิติโดยใช้ภาพสเตอริโอ ความละเอียดในการวัดขึ้นอยู่กับความละเอียดของกล้อง ถ้ากล้องความละเอียดต่ำจะไม่สามารถแสดงรายละเอียดรูปร่างขอบมุมแหลมของชิ้นงานได้ และผลกระทบจากสัญญาณรบกวนที่มีอยู่ตามปกติของเครื่องมือวัดจะส่งผลให้กลุ่มจุดที่วัดได้มีความผิดพลาด จึงทำให้รูปร่างโดยเฉพาะที่ขอบมุมแหลมมีความไม่ชัดเจนและอาจจะไม่สามารถนำไปใช้งานอื่นต่อไปได้

การเพิ่มรายละเอียดและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนของเครื่องวัดพิกัดสามมิติที่วัดพิกัดตามแนวระนาบการวัดที่กำหนดนั้น สามารถใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด (Point Cloud Interpolation Technique : PCIT) โดยการนำจุดที่ได้จากการวัดโดยตรงมาทำการเพิ่มความละเอียดของจุดโดยใช้วิธีการ PCIT เพื่อเพิ่มความละเอียดของกลุ่มจุดที่ได้จากการวัดโดยตรง ผลลัพธ์

ของการเพิ่มความละเอียดดังกล่าวนี้จะช่วยให้การนำไปใช้ในการขึ้นรูป สามมิติโดยใช้โปรแกรม CAD มีคุณภาพดียิ่งขึ้นและใกล้เคียงกับความจริงมากขึ้น

จากที่กล่าวมางานวิจัยนี้มีแนวคิดในการเพิ่มจำนวนกลุ่มจุดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติโดยใช้ภาพสเตอริโอ ด้วยเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดจากพิกัดจุดที่วัดได้ในแต่ละระนาบการวัดของชิ้นงานต้นแบบ เพื่อสามารถแสดงรูปร่างขอบมุมแหลมของชิ้นงานต้นแบบและลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน สำหรับเส้นที่ได้จะถูกแปลงเป็นกลุ่มจุดซึ่งเป็นรูปแบบที่สามารถนำเข้าโปรแกรม CAD เพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิวได้ง่าย

## 1.2 วัดจุดประสงค์

เพิ่มจำนวนจุดในกลุ่มจุดที่ได้จากการวัดพิกัดผิวชิ้นงานโดยใช้เครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบใช้กล้องสองตัวร่วมกับแถบแสงเลเซอร์ ด้วยเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดจากพิกัดจุดที่วัดได้ในแต่ละหน้าตัดของชิ้นงานเพื่อเพิ่มศักยภาพ (Enhanced) ของการวัดพิกัดของผิวชิ้นงานและเพิ่มรายละเอียดข้อมูลพิกัดของชิ้นส่วนที่มีส่วนของการหักมุม นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลจุดที่ได้ไปใช้ในการจำลองภาพสามมิติของชิ้นงานที่ทำการวัดโดยใช้โปรแกรม CATIA

## 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.) พัฒนาเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด (Point Cloud Interpolation Technique : PCIT) เพื่อเพิ่มจำนวนจุดพิกัดของกลุ่มจุดที่วัดได้โดยใช้เครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบใช้กล้องสองตัว เพื่อให้กลุ่มจุดที่ปรับปรุงแล้วมีศักยภาพมากขึ้น (Enhanced measurement)
- 2.) พัฒนาโปรแกรมสำหรับเครื่องวัดพิกัดสามมิติ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องและใช้คำนวณพิกัดพื้นผิวชิ้นงานและเพิ่มส่วนที่มีการคำนวณด้วยเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด
- 3.) สามารถนำข้อมูลกลุ่มจุดที่ปรับปรุงแล้วไปใช้ในการขึ้นรูปสามมิติได้โดยใช้โปรแกรม CATIA

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.) ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัดพิกัดสามมิติชนิดต่างๆ
- 2.) ศึกษาระบบ Vision และหลักการคำนวณระยะทางแบบ Stereo Vision
- 3.) ศึกษาวิธี Curve Fitting จากกลุ่มจุด เพื่อใช้ในการประมาณรูปร่างของชิ้นงาน
- 4.) เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ ทั้งในส่วนที่เป็นการควบคุมเครื่องและส่วนที่ใช้ในการคำนวณหาพิกัดพื้นผิว
- 5.) ทดสอบการทำงาน และปรับปรุงแก้ไขโปรแกรม
- 6.) วิเคราะห์และสรุปผลการดำเนินงาน

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการทำวิทยานิพนธ์

- 1.) ได้เครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบใช้กล้องสองตัวร่วมกับแถบแสงเลเซอร์ สำหรับวัดพื้นผิวชิ้นงาน โดยมีจำนวนกลุ่มจุดมากขึ้น สามารถแสดงรายละเอียดข้อมูลพิกัดของชิ้นส่วนที่มีส่วนของการหักมุม สามารถเชื่อมโยงข้อมูลที่ได้ไปเข้าโปรแกรม CATIA
- 2.) ได้โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบกล้องสองตัวสำหรับใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องและใช้เก็บพิกัดพื้นผิวชิ้นงาน
- 3.) สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่เปราะบาง เนื่องจากใช้การวัดแบบไม่สัมผัสผิวชิ้นงาน

### 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

S.Fleishman, D.Cohen-Or, C.Silva [1] เสนอวิธีการสร้างพื้นผิวชิ้นใหม่ (surface reconstruction) จากกลุ่มจุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดแบบเคลื่อนที่โรบัสต์ (robust moving least square) พื้นผิวที่ได้เป็นแบบราบเรียบและต่อเนื่องเป็นช่วงที่สามารถแสดงขอบมุมแหลมของชิ้นงานได้

Anthony C. Atkinson, Marco Riani, Andrea Cerioli [2] เสนอวิธีฟอเวิร์ดเสิร์ช (Forward search) เพื่อตรวจจับค่าผิดปกติ (outlier) และโครงสร้างแนวโน้มของข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองโรบัสต์

K.Sareen, K.Knopf, R.Canas [5] เสนอวิธีการสร้างพื้นผิวใหม่ด้วยกลุ่มจุดที่ถูกแบ่งเป็นระนาบ โดยวิธีนี้จะสร้างระนาบที่ระยะห่างเท่ากัน แล้วฉายกลุ่มจุดใกล้เคียงลงบนระนาบ สร้างเส้นขึ้นใหม่จากกลุ่มจุดภายในระนาบที่มีการเรียงตัวด้วยเส้นสไปลน์และ สร้างพื้นผิวใหม่จากเส้นสไปลน์เหล่านั้น

FenghuaGuo [6] เสนอการสร้างเส้นขึ้นใหม่จากกลุ่มจุดภายในระนาบ โดยกลุ่มจุดไม่มีการจัดเรียงและมีความผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวน ด้วยเส้นโค้งกำลังสองที่ต่อเนื่องเป็นช่วง เส้นที่สร้างขึ้นจะสามารถประมาณกลุ่มจุดได้

In-Kwon Lee [9] ใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเคลื่อนที่กับกลุ่มจุดภายในสามมิติที่ไม่ได้มีการจัดเรียงเพื่อสร้างเส้นโค้งขึ้นใหม่จากกลุ่มจุดเหล่านั้น เส้นโค้งที่ได้สามารถประมาณรูปร่างของกลุ่มจุด

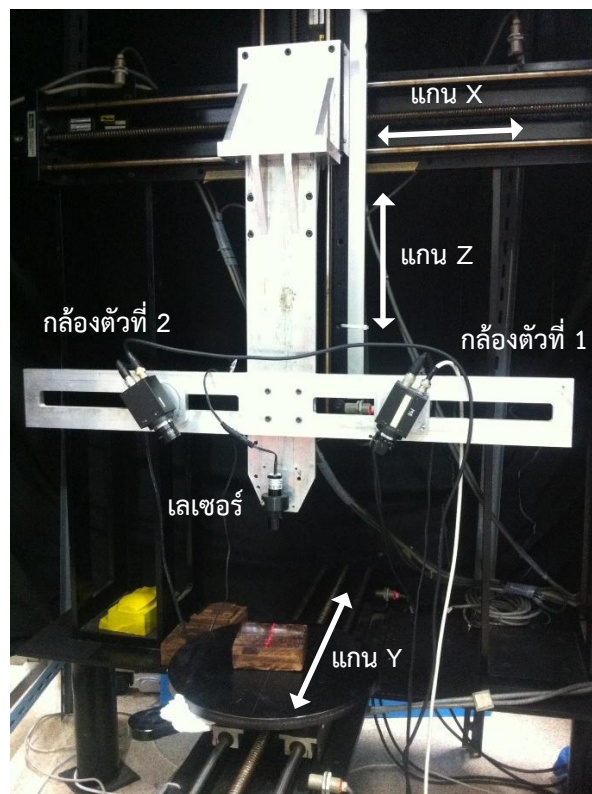
## บทที่ 2

### เครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบสเตอริโอวิชั่น

#### 2.1 คำนำ

ภายในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบสเตอริโอวิชั่น โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ อุปกรณ์หลักของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ การเชื่อมต่ออุปกรณ์ การใช้โปรแกรมวัดพิกัดสามมิติ คำสั่งต่างๆของโปรแกรมและขั้นตอนการวัดพิกัดสามมิติเพื่อให้ได้ผลการวัดในรูปของรหัสแอสกี การนำเข้าไฟล์รหัสแอสกีและการสร้างพื้นผิว mesh สำหรับโปรแกรม CATIA

#### 2.2 โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบภาพสเตอริโอ

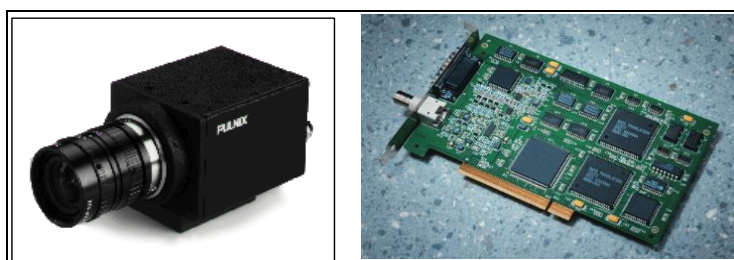
เครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบภาพสเตอริโอที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ถูกสร้างและพัฒนาต่อเพื่อให้สามารถวัดพิกัดพื้นผิวชิ้นงาน โดยชิ้นงานที่ทำการวัดจะต้องมีขนาดไม่เกิน 200×150×120 มิลลิเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) [4] โครงสร้างเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบภาพสเตอริโอตามรูปที่ 2.1 ประกอบด้วยแกนเคลื่อนที่สามแกน กล้องสองตัว และเครื่องกำเนิดเลเซอร์แบบเส้น แกนเคลื่อนที่ทั้งสามแกน

สามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y และ Z และตั้งฉากซึ่งกันและกัน แต่ละแกนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบ Brushless DC Servomotor ผ่านชุดบอลสกรู บนแกน Z ติดโครงสำหรับติดตั้งกล้องทั้งสองตัว และ เครื่องกำเนิดเลเซอร์ แกน Z และโครงดังกล่าวจะติดตั้งบนแกน X สำหรับแกน Y จะติดตั้งโต๊ะวางชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานที่ต้องการวัด แกน Z ทำหน้าที่ปรับระยะความสูงของกล้องเทียบกับโต๊ะวางชิ้นงาน แกน X ใช้สำหรับเลื่อนแถบเส้นเลเซอร์เมื่อทำการวัดชิ้นงาน แกนเคลื่อนที่ทั้งสามจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมสองตัว คือตัวควบคุม BLX 30 สำหรับขับเคลื่อนแกน X และ ตัวควบคุมรุ่น 6250 ทำหน้าที่เพื่อควบคุมอุปกรณ์ขับเคลื่อน BL30 สำหรับขับเคลื่อนทั้งแกน Y และแกน Z ตัวควบคุมทั้งสองเป็นของบริษัท Parker Compumotor การควบคุมการเคลื่อนที่ทั้งสามแกน จะใช้คอมพิวเตอร์ควบคุมโดยส่งคำสั่งผ่านพอร์ต RS 232 ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมทั้งสองตัว คือ BLX 30 และ 6250



รูปที่ 2.2 อุปกรณ์ควบคุมและขับเคลื่อนของแกนเคลื่อนที่

กล้องที่ใช้เป็นกล้องยี่ห้อ pulnix รุ่น TM300 เป็นกล้อง CCD แบบขาวดำ ขนาดพิกเซล 752 (H) × 582(V) อาศัยการ์ดรับข้อมูลภาพ (Frame grabber) รุ่น DT 3155 ของบริษัท Data Translation โดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต PCI การ์ดรับข้อมูลภาพทำหน้าที่รับข้อมูลอนาล็อกวีดีโอจากกล้องและเปลี่ยนเป็นข้อมูลภาพดิจิทัล



รูปที่ 2.3 กล้อง CCD Pulnix รุ่น TM300 และ การ์ดรับข้อมูลภาพ DT3155

แหล่งกำเนิดเลเซอร์สำหรับเครื่องวัดพิกัดสามมิติเป็นแหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบเส้น (line laser) ของบริษัท Lasic รุ่น KML-3503 ขนาดกำลัง 3 มิลลิวัตต์ ระยะการทำงานไม่เกิน 1 เมตร ความหนาของเส้นเลเซอร์น้อยกว่า 0.5 mm และ สามารถปรับความยาวโฟกัสได้ ความยาวคลื่น 635-670 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในย่านแสงสีแดง

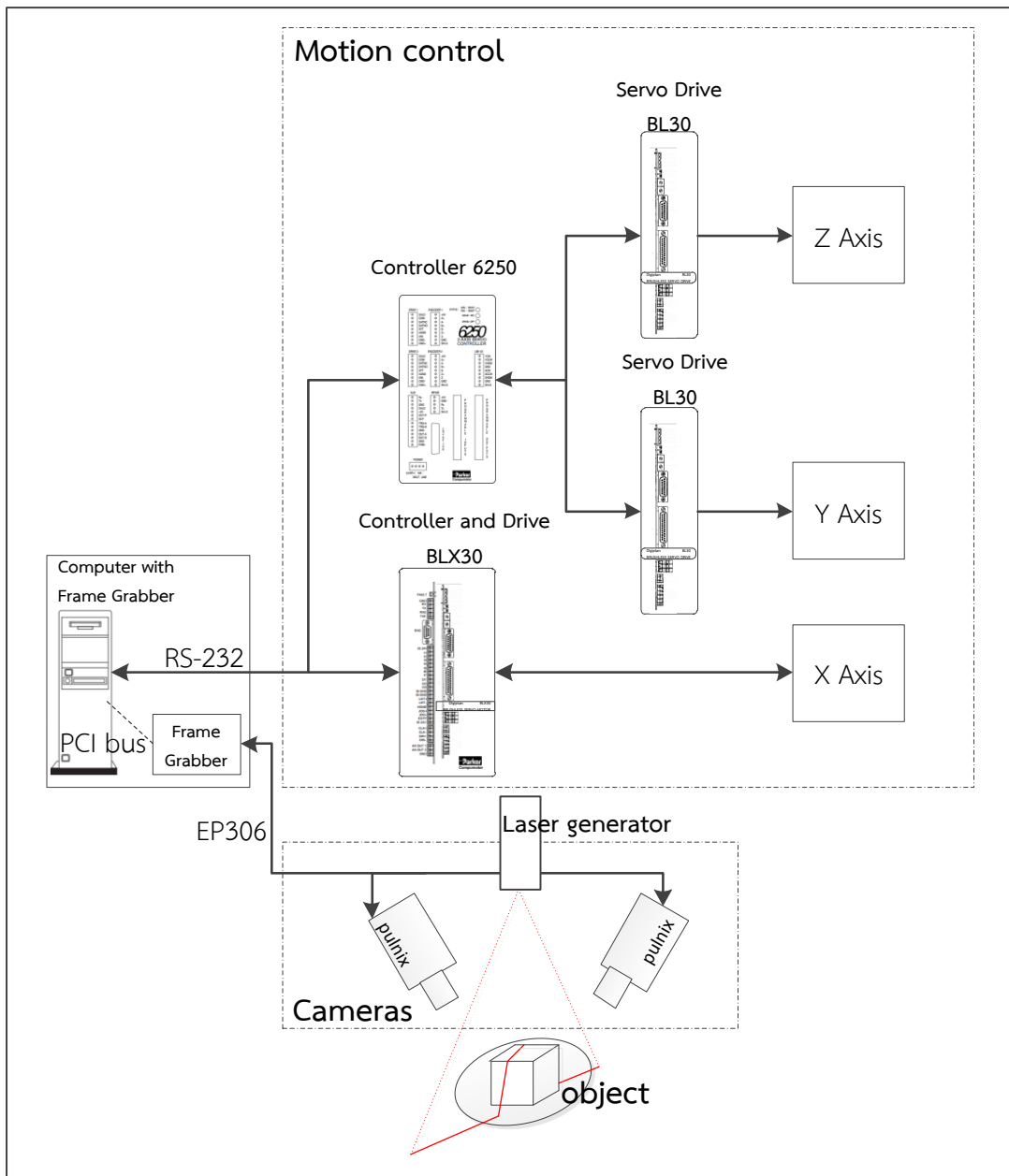


รูปที่ 2.4 แหล่งกำเนิดเลเซอร์แบบเส้นของบริษัท Lasic รุ่น KML-3503

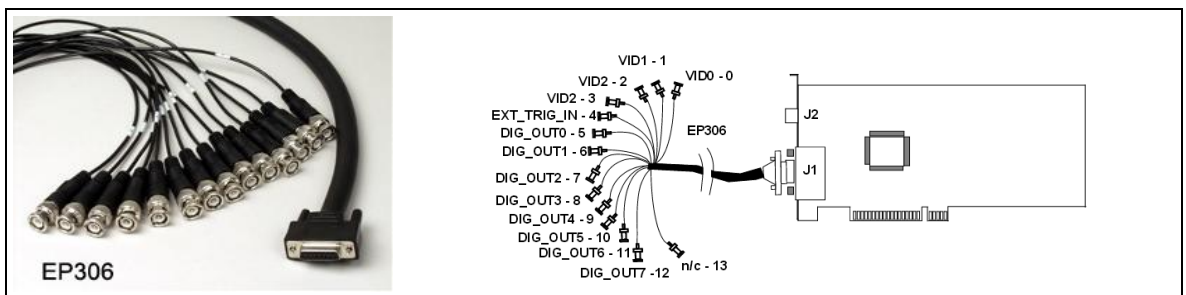
### 2.3 การเชื่อมต่ออุปกรณ์

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ เป็นดังรูปที่ 2.5 การทำงานแบ่งเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่เป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับภาพ และส่วนการเชื่อมต่อกับแกนเคลื่อนที่ ทั้งสองส่วนสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ สำหรับส่วนการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์รับภาพประกอบด้วยการ์ดรับข้อมูลภาพ DT3155 ซึ่งติดตั้งภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต PCI สายส่งสัญญาณวิดีโอ EP306 ทำหน้าที่เชื่อมต่อการ์ดรับข้อมูลภาพกับกล้องทั้งสองตัว ส่วนการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แกนเคลื่อนที่ที่จะเชื่อมต่อผ่านพอร์ต RS232 สำหรับส่งคำสั่งในรูปแบบรหัสแอสกีไปยังตัวควบคุมทั้งสองตัวคือตัวควบคุม 6250 และ BLX30 ตัวควบคุม 6250 ทำหน้าที่สั่งงานอุปกรณ์ขับเคลื่อน BL30 สองตัว ซึ่งแต่ละตัวจะทำการขับเคลื่อน Z และ แกน Y คอนโทรลเลอร์อีกตัวคือ BLX30 ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวควบคุมและอุปกรณ์ขับเคลื่อนในตัวในการขับเคลื่อนแกน X

การเชื่อมต่อสายสัญญาณวิดีโอ EP306 กับการ์ดรับข้อมูลภาพ DT3155 ทำโดยการเสียบหัวคอนเนคเตอร์ 15 พินของสายสัญญาณ EP306 เข้ากับช่อง J1 ด้านหลังของการ์ดรับข้อมูลภาพสายสัญญาณ VIDO-0 สำหรับเชื่อมต่อกับกล้องตัวที่หนึ่ง และสายสัญญาณ VIDO-1 สำหรับเชื่อมต่อกับกล้องตัวที่สอง



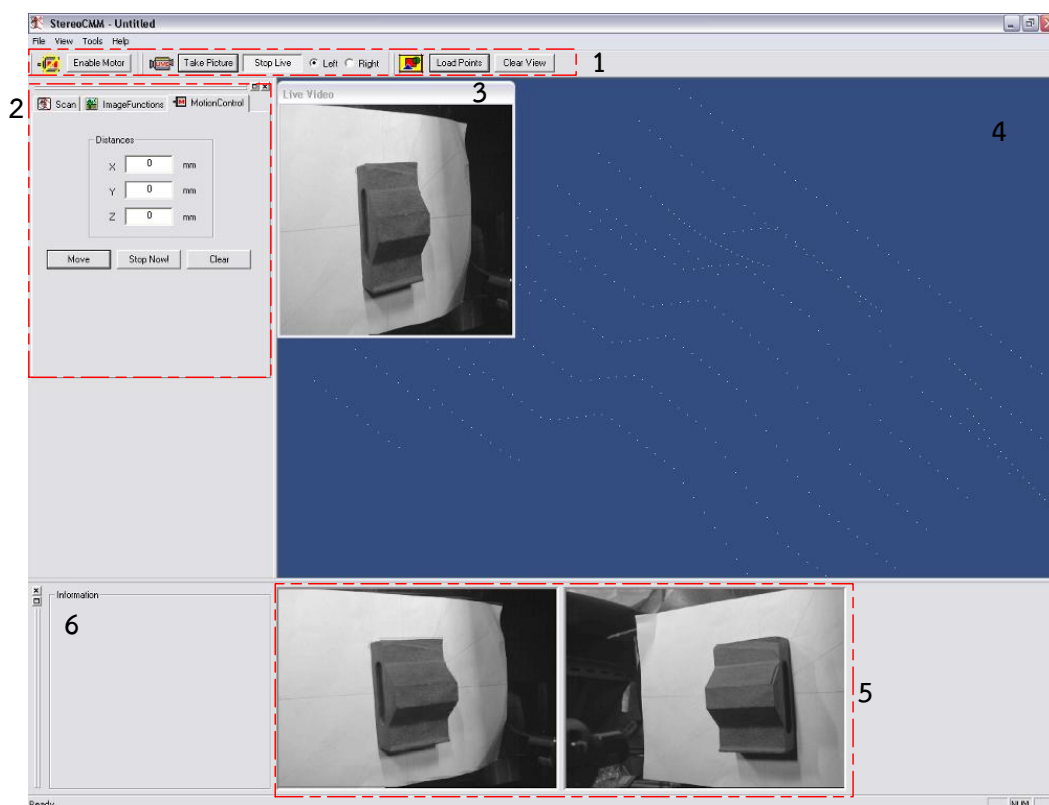
รูปที่ 2.5 แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์เครื่องวัดพิกัดสามมิติ



รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อสายสัญญาณวิดีโอ EP306 กับการ์ดรับข้อมูลภาพ DT3155

## 2.4 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเครื่องวัดพิกัดสามมิติ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานการใช้โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเครื่องวัดพิกัดสามมิติ เรียกว่า โปรแกรม StereoCMM โปรแกรมนี้ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ แสดงพิกัดจุดที่ได้จากการวัดและสามารถบันทึกพิกัดจุดเหล่านี้ในรูปแบบของข้อมูลรหัสแอสกี (ASCII code)



รูปที่ 2.7 ลักษณะของโปรแกรม StereoCMM

ลักษณะหน้าต่างของโปรแกรมเป็นดังรูปที่ 2.7 หน้าต่างของโปรแกรมแบ่งเป็น 6 ส่วนหลัก โดยส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์และโปรแกรม ส่วนที่ 1 คือแถบควบคุมการทำงาน ส่วนที่ 2 คือ หน้าต่างควบคุมการทำงาน ส่วนที่ 3 เป็นหน้าต่างสำหรับแสดงภาพวิดีโอจากกล้องโดยสามารถเลือกกล้องวิดีโอที่ต้องการแสดงได้จากแถบควบคุมการทำงาน ส่วนที่ 4 สำหรับแสดงกลุ่มจุดที่ได้จากการวัด ส่วนที่ 5 สำหรับแสดงผลภาพถ่ายจากจากกล้องตัวที่หนึ่งและกล้องตัวที่สอง และส่วนที่ 6 เป็นหน้าต่างแสดงสถานะของการสแกน

### 2.4.1 แถบควบคุมการทำงาน

แถบควบคุมการทำงานแบ่งหน้าที่เป็นสามกลุ่ม คือ กลุ่มควบคุมการเปิด-ปิดของมอเตอร์ กลุ่มควบคุมการทำงานด้านภาพ และ กลุ่มสำหรับการทำงานด้านพิกัดจุด



รูปที่ 2.8 แถบควบคุมการทำงาน

กลุ่มแรกมีเพียงปุ่มเดียวสำหรับเปิด-ปิดการทำงานของมอเตอร์ทั้งสามแกน กดปุ่ม Enable Motor เพื่อเปิดการทำงานของมอเตอร์ และ กดปุ่ม Disable Motor เพื่อปิดการทำงานของมอเตอร์ สำหรับการสแกนต้องทำการเปิดมอเตอร์ไว้เสมอ



รูปที่ 2.9 ปุ่มเปิด - ปิดการทำงานของมอเตอร์

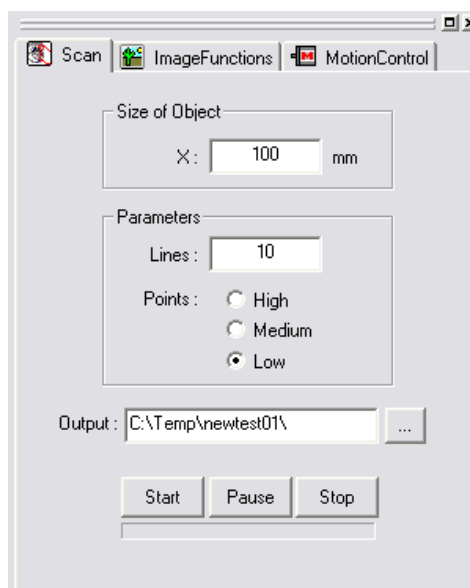
กลุ่มที่สองสำหรับควบคุมการทำงานด้านภาพ กดปุ่ม Take Picture เพื่อถ่ายภาพจากกล้องทั้งสองตัว ภาพจะปรากฏที่หน้าต่างแสดงผลภาพถ่าย ภาพจากกล้องตัวที่ 1 จะอยู่ทางด้านซ้ายและภาพจากกล้องตัวที่สองจะอยู่ทางด้านขวาของหน้าต่างแสดงผลภาพถ่าย

กลุ่มสุดท้ายสำหรับการทำงานด้านพิกัดจุด กดปุ่ม Load Points สำหรับนำเข้าไฟล์พิกัดจุด ไฟล์พิกัดจุดนี้จะต้องเป็นไฟล์ที่อยู่ในรูปแบบรหัสแอสกีจึงจะสามารถนำเข้าโปรแกรม StereoCMM พิกัดจุดที่นำเข้าจะแสดงผลในหน้าต่างของโปรแกรม กดปุ่ม Clear View สำหรับลบการแสดงผลพิกัดจุดที่หน้าต่างของโปรแกรม

#### 2.4.2 หน้าต่างควบคุมการทำงาน

หน้าต่างควบคุมการทำงานของโปรแกรม StereoCMM แบ่งการทำงานได้ 3 กลุ่ม คือ Scan, Image Functions และ Motion Control โดยแต่ละกลุ่มจะมีหน้าที่ดังนี้

กลุ่มการทำงาน Scan เป็นกลุ่มการทำงานที่ใช้สำหรับควบคุมการสแกน หรือการวัดพิกัดสามมิติ ก่อนการสแกนจะต้องทำการกำหนดค่าต่างๆที่จำเป็นดังนี้



รูปที่ 2.10 กลุ่มการทำงาน Scan


### Size of Object

กำหนดขนาดของวัตถุตามแนวแกน X ของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ ในหน่วย มิลลิเมตร

### Parameter

เป็นกลุ่มสำหรับการกำหนดความละเอียดของการวัด ในช่อง Lines เป็นการกำหนดจำนวนเส้นของการสแกน (จำนวนหน้าตัดที่ต้องการสแกน) และ Points สามารถเลือก High, Medium และ Low เพื่อกำหนดจำนวนจุดในแต่ละหน้าตัด การเลือก High สำหรับจำนวนจุดมาก 576 จุด Medium สำหรับจำนวนจุดปานกลาง 238 จุด และ Low สำหรับจำนวนจุดน้อย 60 จุด

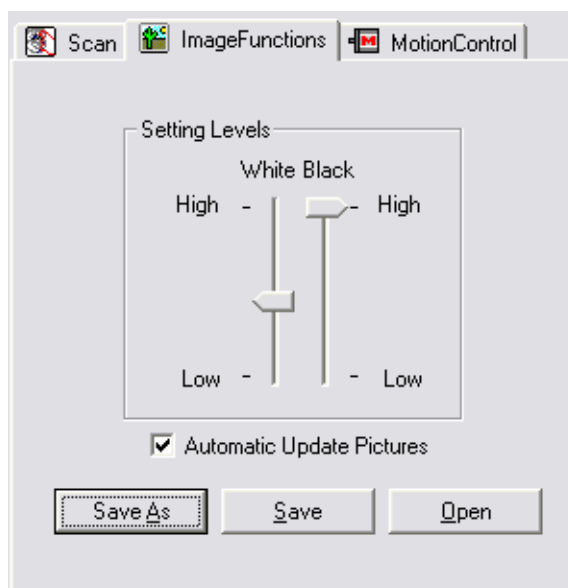
### Output

ช่อง Output สำหรับกำหนดไดเรกทอรีที่ต้องการเพื่อบันทึกไฟล์ผลการวัด พิกัด หรือกดปุ่มบราวส์  เพื่อเลือกไดเรกทอรีที่ต้องการ

### Start, Pause, Stop

กดปุ่ม Start เพื่อเริ่มการสแกนหลังจากกำหนดค่าพารามิเตอร์และไดเรกทอรี แต่ก่อนการสแกนจะต้องเปิดการทำงานของมอเตอร์เสมอ เมื่อเริ่มการสแกน สถานะของการสแกนจะแสดงที่หน้าต่างแสดงสถานะการสแกนว่า Start Scan ความคืบหน้าของการสแกนสังเกตได้จากโปรเกรสบาร์ด้านล่าง ปุ่ม Pause สำหรับพักการทำงานและะ ปุ่ม Stop สำหรับหยุดการทำงาน

กลุ่มการทำงาน Image Function เป็นกลุ่มการทำงานสำหรับการทำงานด้านภาพ โดยกลุ่มการทำงานนี้จะทำการส่งคำสั่งไปที่การ์ดรับข้อมูลภาพเพื่อเซฟหรือเปิดรูปภาพ หรือปรับระดับความเข้มของภาพ



รูปที่ 2.11 หน้าต่างการทำงานของกลุ่ม Image Functions

### Setting Levels

สำหรับปรับระดับความเข้มของสีขาวและดำเพื่อใช้ในการตัดค่าสีขาวและดำ เพื่อปรับภาพให้มีความคมชัดขึ้นถ้าต้องการปรับค่าความเข้มของสีขาวให้ปรับตัวเลื่อนด้าน White ถ้าต้องการปรับความเข้มของสีดำให้ปรับตัวเลื่อนด้าน black

### Save As, Save, Open

สำหรับบันทึกและเปิดรูปภาพในไดเรกทอรีที่กำหนด

กลุ่มการทำงาน Motion Control แสดงในรูปที่ 2.12 เป็นกลุ่มคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกน มีรายละเอียดการใช้งานดังนี้

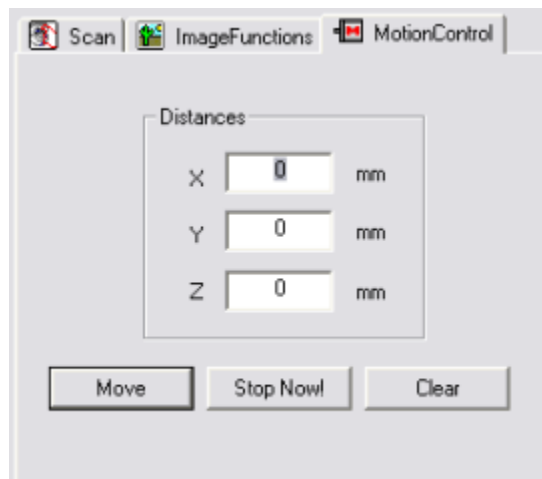
### Distance

เป็นกลุ่มสำหรับใส่ค่าระยะทางที่ต้องการให้เคลื่อนที่ในแนวแกน X, Y, Z แต่ละแกนจะมีช่องสำหรับใส่ค่าแยกกัน ค่าระยะทางมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

### Move, Stop Now!, Clear

ปุ่มคำสั่ง Move สำหรับสั่งแกนเคลื่อนที่เลื่อนไปเป็นระยะทางที่กำหนดตามระยะทางกำหนดในช่อง Distances การใช้ปุ่มคำสั่ง Move เพื่อเลื่อนแกนเคลื่อนที่ที่จะต้องเปิดการทำงานของมอเตอร์ (Enable Motor) ก่อนเสมอ ปุ่มคำสั่ง Stop Now! เพื่อหยุดการเคลื่อนที่ของแกนเคลื่อนที่ทั้งหมด เป็นคำสั่งสำหรับหยุด

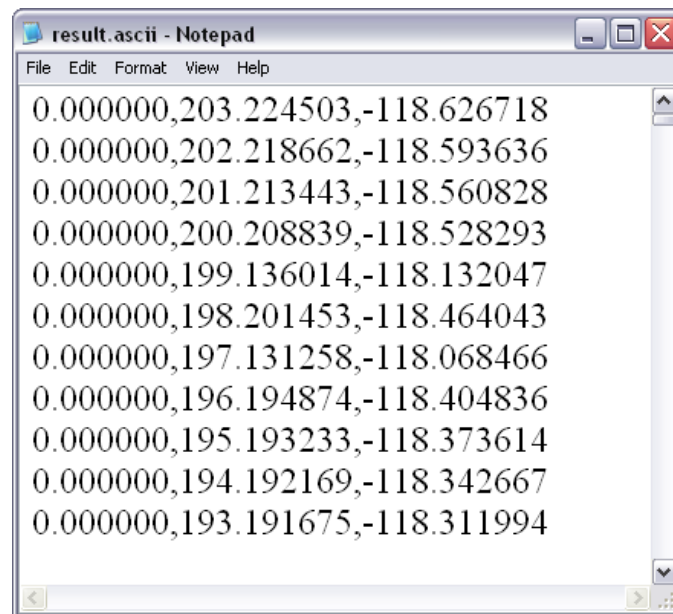
การเคลื่อนที่ของมอเตอร์ทั้งสามแกนทันที และปุ่มคำสั่ง Clear สำหรับลบค่าทั้งหมดจากช่อง Distance



รูปที่ 2.12 หน้าต่างการทำงานของกลุ่มคำสั่ง MotionControl

## 2.5 ขั้นตอนการสแกนชิ้นงาน

- 1.) เมื่อเปิดโปรแกรม StereoCMM แล้ว กดปุ่ม Enable motor สำหรับเริ่มการทำงานของมอเตอร์
- 2.) ไปที่แถบ Motion Control เลื่อนแกน Z ด้วยกลุ่มคำสั่ง Move ขึ้นไปที่ตำแหน่งสูงสุด (Home) แล้วเลื่อนลงมาตามระยะที่ได้ทำการสอบเทียบกล้อง
- 3.) เปิดเลเซอร์ เลื่อนแกน X โดยให้แนวเส้นเลเซอร์พาดแนวกึ่งกลางของโต๊ะวางชิ้นงาน นำชิ้นงานวางลงบนโต๊ะวางชิ้นงาน จัดตำแหน่งชิ้นงานโดยให้แนวเส้นเลเซอร์พาดบริเวณกึ่งกลางของชิ้นงาน กดปุ่ม Take Picture เพื่อถ่ายภาพ สังเกตภาพที่หน้าต่างแสดงผลภาพ เลื่อนแกน Y โดยให้ภาพชิ้นงานที่ต้องการวัดอยู่บริเวณกึ่งกลางของภาพ
- 4.) ไปที่แถบ Scan กำหนดขนาดชิ้นงาน ค่าพารามิเตอร์ และ ไดเรคทอรีที่ต้องการบันทึกผลการวัด เมื่อกำหนดหนดค่าพารามิเตอร์ครบถ้วนกดปุ่ม Start เพื่อเริ่มการสแกน หน้าต่างแสดงสถานะของการสแกนจะแสดง Start Scan ความคืบหน้าของการสแกนสังเกตได้จากโพรเกรสบาร์ด้านล่างของหน้าต่าง Scan
- 5.) เมื่อการสแกนเสร็จสิ้น หน้าต่าง Information จะแสดงผล Scan finished ผลของการวัดจะแสดงบนหน้าต่างแสดงพิกัดจุด และ ไฟล์ผลการวัดรูปรหัสแอสกีจะอยู่ในไดเรคทอรีที่กำหนด

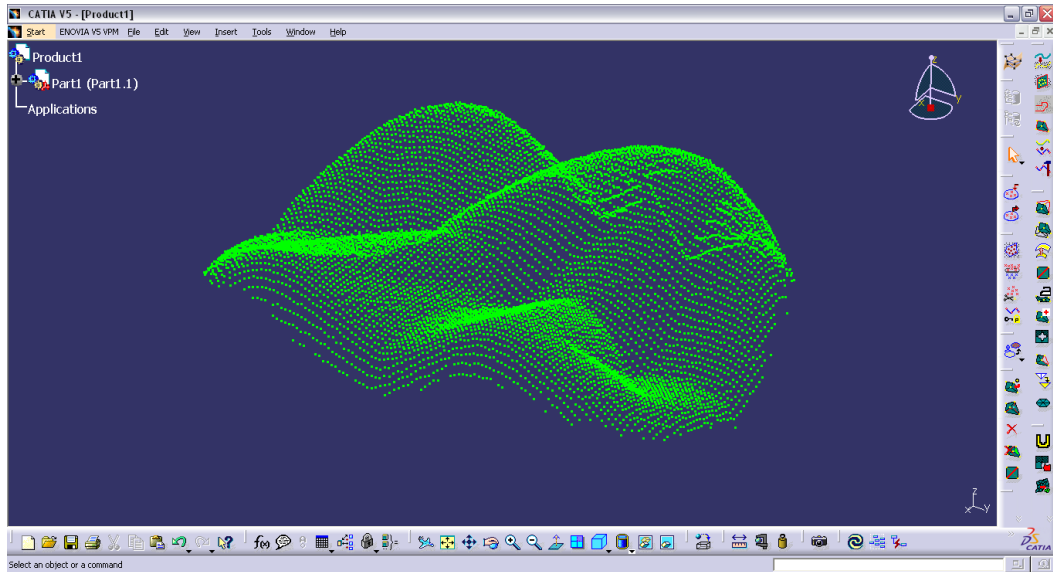


รูปที่ 2.13 ไฟล์ผลการวัดที่อยู่ในรูปรหัสแอสกี

## 2.6 การนำเข้าไฟล์ผลการวัดในโปรแกรม CATIA

ไฟล์ผลการวัดแสดงพิกัดจุดที่วัดได้ในรูปของตัวเลข ตัวเลขในแต่ละบรรทัดคือพิกัดจุดที่วัดได้ ประกอบด้วยตัวเลขสามชุดคั่นด้วยเครื่องหมาย “ , ” ตัวเลขแต่ละชุดคือค่าพิกัด X, Y และ Z ตามลำดับ ตัวเลขแต่ละชุดประกอบด้วยตัวเลขสามตัวและทศนิยมหกตำแหน่ง โปรแกรมที่ใช้ช่วยในการออกแบบ CATIA สามารถนำเข้าไฟล์ผลการวัดพิกัดจุดที่อยู่ในรูปรหัสแอสกีได้ การนำเข้าไฟล์ผลการวัดเข้าสู่โปรแกรม CATIA สามารถทำได้โดยในกลุ่มการทำงาน Digitized Shape Editor เลือกคำสั่ง Import และเลือกไฟล์ผลการวัดพิกัดจุดที่ต้องการ พิกัดจุดจะแสดงบนหน้าต่างของโปรแกรม CATIA ดังรูปที่ 2.14

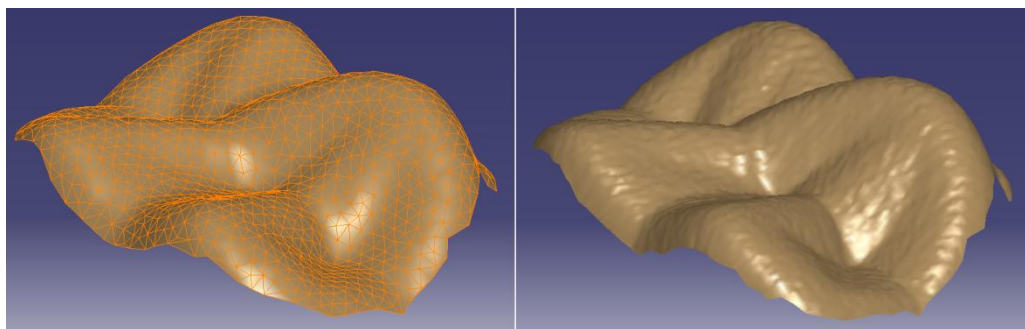
ผลการวัดพิกัดจุดเหล่านี้สามารถปรับปรุงหรือแก้ไขได้ภายในโปรแกรม CATIA เนื่องจากโปรแกรม CATIA มีเครื่องมือสำหรับการทำงานกับกลุ่มจุด การแก้ไขกลุ่มจุดมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงผลการวัดเพื่อให้เหมาะสมในการสร้างพื้นผิว (Surface Reconstruction)



รูปที่ 2.14 ไฟล์ผลการวัดพิกัดจุดในโปรแกรม CATIA

การสร้างพื้นผิวจากกลุ่มจุดภายในโปรแกรม CATIA มีสองวิธีคือ หนึ่งการสร้างพื้นผิวภายในกลุ่มการทำงาน Generative Shape Design เป็นการสร้างพื้นผิวโดยอาศัยพิกัดจุดในการอ้างอิงรูปร่างของชิ้นงาน และอีกวิธีหนึ่งของการสร้างพื้นผิวโดยอาศัยพิกัดจุดที่วัดได้มาสร้างเป็นพื้นผิว Mesh การสร้างพื้นผิว Mesh จากกลุ่มจุดใช้คำสั่ง Mesh Creation ซึ่งอยู่ภายในกลุ่มการทำงาน Digitized Shape Editor

ค่าของพิกัดจุดที่ได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติจะมีความผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวน (noise) ซึ่งมีอยู่ตามปกติของเครื่องมือวัด ดังนั้นพื้นผิว Mesh ที่สร้างจากพิกัดจุดเหล่านี้จึงมีความผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวนรวมอยู่ด้วย พื้นผิว Mesh จึงมีความราบเรียบไม่สม่ำเสมอ ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 พื้นผิว Mesh จากกลุ่มจุด

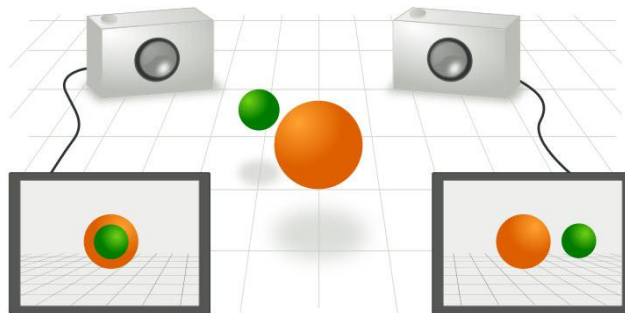
## บทที่ 3

### ระบบสเตอริโอวิชั่น

#### 3.1 คำนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงระบบสเตอริโอวิชั่น (stereo vision system) เป็นระบบสำหรับหาค่าพิกัดสามมิติ ซึ่งใช้กล้องสองตัวถ่ายภาพวัตถุเดียวกันจากมุมมองที่แตกต่าง ภาพทั้งสองสามารถนำมาคำนวณหาค่าพิกัดสามมิติ (3D reconstruction) ซึ่งค่าพิกัดสามมิติคือระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ

ขั้นตอนแรกของการหาค่าพิกัดสามมิตินั้นต้องทำการหาจุดที่สอดคล้อง (correspondence Point) ซึ่งเป็นตำแหน่งพิกัดของจุดภาพ (pixel) ของกล้องแต่ละตัวที่ฉายจากจุดเดียวกันของวัตถุ จุดที่สอดคล้องแต่ละคู่สามารถคำนวณย้อนกลับเพื่อได้ค่าพิกัดสามมิติของจุดบนวัตถุนั้น



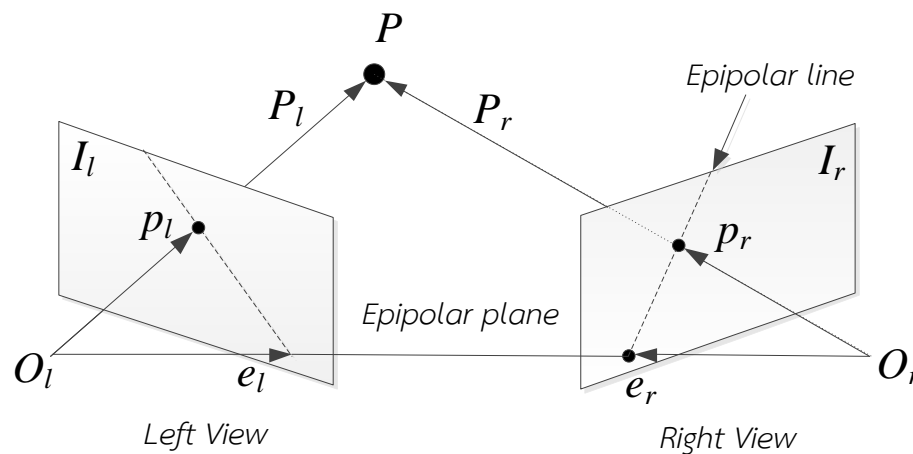
รูปที่ 3.1 ภาพจากระบบสเตอริโอวิชั่นที่ถ่ายภาพวัตถุในสามมิติเดียวกันแต่ต่างมุมมอง

#### 3.2 การหาจุดที่สอดคล้อง

การหาจุดที่สอดคล้องของระบบสเตอริโอวิชั่น คือการหาค่าตำแหน่งพิกัดภาพ (pixel coordinate) ของกล้องซ้ายและขวาที่ฉายจุดเดียวกันในสามมิติ โดยปกติจะเริ่มจากการกำหนดจุดภาพที่ต้องการค้นหาในภาพทางซ้าย แล้วทำการสืบค้นภาพทางขวา สำหรับในกรณีที่ไม่มีทราบบริเวณหรือแนวที่จะทำการสืบค้นจะทำการสืบค้นโดยเริ่มจากพิกเซลซ้ายบนสุดเรื่อยไปจนกว่าจะครบทุกพิกเซลของภาพ แต่เนื่องจากมี epipolar geometry ช่วยในการแก้ปัญหา ทำให้การสืบค้นอยู่ในแนวเส้นตรงที่เรียกว่า epipolar line เท่านั้น ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการคำนวณหาจุดที่สอดคล้อง และลดความผิดพลาดในการจับคู่จุดภาพผิด

### 3.2.1 Epipolar Geometry

epipolar geometry คือ ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบสเตอริโอวิชั่น เมื่อกล้องทั้งสองถ่ายภาพวัตถุในสามมิติจากมุมที่ต่างกัน ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างจุดในสามมิติและภาพฉายของจุดบนพิกัดภาพสองมิติทั้งซ้ายและขวานั้นทำให้เกิดเงื่อนไขบังคับระหว่างจุดภาพทั้งสองจุด โดยการสมมุติว่ากล้องเป็นกล้องแบบจำลองกล้องรูเข็ม (pinhole camera model)

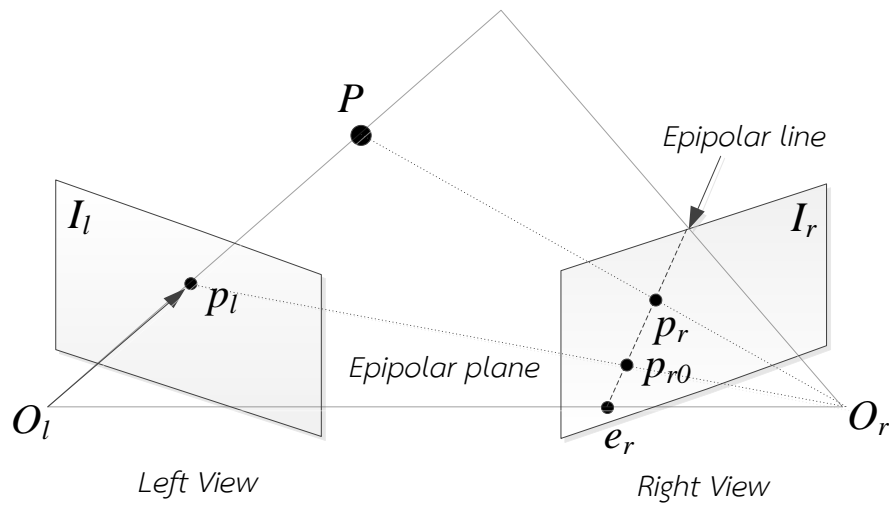


รูปที่ 3.2 epipolar geometry ของระบบสเตอริโอวิชั่น

จากรูปที่ 3.2 ให้จุด  $P$  คือจุดที่ต้องการหาค่าพิกัดสามมิติ โดยเวกเตอร์  $P_l = [X_l, Y_l, Z_l]^T$  และ  $P_r = [X_r, Y_r, Z_r]^T$  จะตัดกันที่จุด  $P$  เมื่อเทียบกับระบบพิกัดของกล้องซ้ายและขวาตามลำดับ  $p_l = [x_l, y_l, z_l]^T$  และ  $p_r = [x_r, y_r, z_r]^T$  เป็นเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังจุดที่ได้จากการฉายจุด  $P$  บนระนาบภาพของกล้องซ้ายและขวาตามลำดับจะเห็นได้ว่าเมื่อกำหนดจุดภาพจากกล้องซ้าย  $p_l$  เพื่อเริ่มทำการหาจุดที่สอดคล้องในภาพทางด้านขวา จุด  $P$  จะอยู่บนรังสีที่เกิดจาก  $O_r$  ไปยัง  $p_l$  แต่เนื่องจากภาพของรังสีเมื่อฉายลงบนระนาบภาพทางด้านขวา ซึ่งก็คือ epipolar line จะผ่านจุด  $p_r$  เสมอ ดังนั้นถ้าสามารถสร้างเส้น epipolar line ในภาพทางด้านขวาแล้วทำการค้นหาตามแนวเส้น epipolar line จะพบจุดที่สอดคล้องเสมอ ซึ่งเรียกว่าหลักการ epipolar constraint

เราสามารถสร้าง epipolar line ของภาพทางด้านซ้ายได้โดยการกำหนดจุดที่ต้องการจะหาจุดที่สอดคล้องจากจุดภาพทางด้านขวารังสีที่เกิดจากจุด  $O_r$  และ จุด  $O_r$  เมื่อฉายลงบนระนาบภาพทางด้านซ้ายคือเส้น epipolar line

จุด epipole ( $e_r, e_l$ ) เป็นจุดที่เกิดจากเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางของกล้องทั้งสองตัว ( $O_l, O_r$ ) หรือเรียกว่าเส้น baseline ตัดกับระนาบภาพทั้งสอง เส้น epipolar line ทั้งหมดจะผ่านจุด epipole เสมอ



รูปที่ 3.3 การสร้างเส้น epipolar line

ขั้นตอนในการสร้างเส้น epipolar line ในภาพของกล้องตัวขวา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

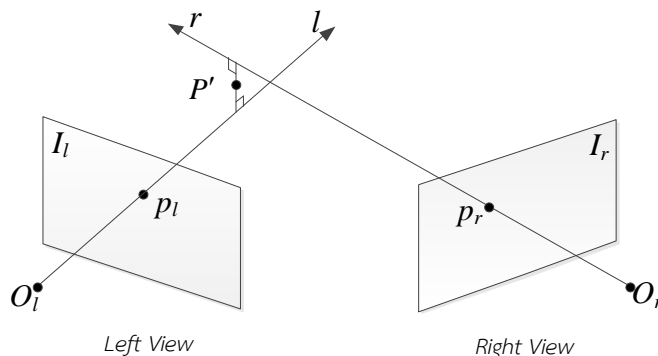
1. กำหนดจุดที่ต้องการค้นหาจากภาพในกล้องตัวซ้าย หรือจุด  $p_l$  ซึ่งจุดดังกล่าวจะอยู่ในพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ (pixel coordinate)
2. แปลงพิกัดจุดภาพ  $p_l$  จากพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ให้อยู่ในพิกัดกล้องตัวซ้าย ซึ่งมีจุด  $O_l$  เป็นจุดกำเนิด โดยใช้สมการการแปลงพิกัดซึ่งกล่าวในภาคผนวก ก
3. แปลงพิกัดจุด  $O_l, p_l$  ให้อยู่ในพิกัดกล้องของกล้องตัวขวาที่มีจุด  $O_r$  เป็นจุดกำเนิด โดยใช้สมการแปลงพิกัดระหว่างกล้องซึ่งกล่าวในภาคผนวก ก
4. นำพิกัดจุดจากข้อ 3 คำนวณหาค่าพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ ในระนาบภาพของคอมพิวเตอร์ทางด้านขวาคือจุด  $e_r$  และ  $p_{r0}$
5. สามารถสร้างเส้น epipolar line ในภาพของกล้องตัวขวา โดยการสร้างเส้นตรงระหว่างจุด  $e_r$  และ  $p_{r0}$

ขั้นตอนดังกล่าวยังสามารถใช้ในการหาสมการ epipolar line ของภาพในกล้องซ้ายมือได้ โดยเริ่มจากการกำหนดจุดที่ต้องการค้นหาจากภาพทางด้านขวา

### 3.3 การหาค่าพิกัดสามมิติ (3D Reconstruction)

การหาค่าพิกัดสามมิติ (3D Reconstruction) ทำได้โดยการนำจุดภาพที่สอดคล้องกันหรือ correspondence point แต่ละคู่มาสร้างรังสีเริ่มจากจุดกึ่งกลางเลนส์ของกล้องแต่ละตัวไปยังตำแหน่งของจุดภาพที่ตรงกัน ซึ่งเส้นรังสีนี้จะตัดกันที่จุดๆหนึ่งในสามมิติ แต่เนื่องจากความผิดพลาดในการหาจุดภาพที่สอดคล้อง และความผิดพลาดในการหาค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองของกล้อง ทำ

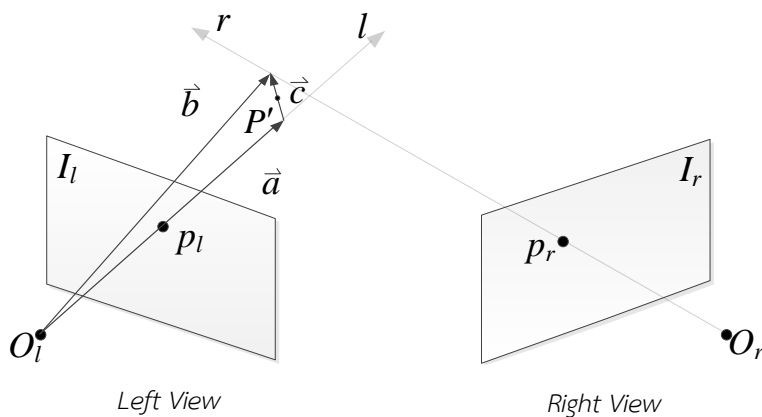
ให้รังสีที่สร้างขึ้นไม่ตัดกันดังนั้นการหาพิกัดในสามมิติจะหาได้จากกึ่งกลางของเวกเตอร์ที่มีความยาวน้อยที่สุดและตั้งฉากกับรังสีทั้งสอง ซึ่งคือจุด  $P'$  ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 รังสีจากจุดภาพที่สอดคล้องกันทั้งสองเส้นไม่ตัดกัน

จุด  $p_l$  และ  $p_r$  เป็นคู่จุดของภาพที่สอดคล้องกัน รังสี  $l$  สร้างจากจุดภาพที่สอดคล้องกันของกล้องทางด้านซ้าย โดยรังสี  $l$  มีจุดกำเนิดที่  $O_l$  และผ่านจุด  $p_l$  เช่นเดียวกันกับการสร้างรังสี  $r$  จุดกำเนิดของรังสี  $r$  อยู่ที่  $O_r$  และผ่านจุด  $p_r$  ซึ่งเป็นจุดภาพที่สอดคล้องกันของกล้องทางด้านขวา

วิธีการหาค่าพิกัดสามมิติเริ่มจากการกำหนดให้  $p_l$  และ  $p_r$  เป็นคู่จุดของภาพที่สอดคล้องกันที่อยู่ในระบบพิกัดของกล้องตัวซ้ายและขวาตามลำดับ เวกเตอร์  $\vec{a}$  เป็นเวกเตอร์ที่เริ่มจากจุด  $O_l$  และอยู่ในพิกัดของกล้องตัวซ้าย เวกเตอร์  $\vec{b}$  เป็นเวกเตอร์ที่เริ่มจากจุด  $O_l$  และอยู่ในพิกัดของกล้องตัวซ้าย เวกเตอร์  $\vec{b}$  หาได้จากการแปลงพิกัดเวกเตอร์  $p_r$  ให้อยู่ในพิกัดของกล้องตัวซ้ายและคูณด้วยสเกลเฟคเตอร์  $b$  เวกเตอร์  $\vec{b}$  สามารถเขียนได้ในรูปสมการดังนี้  $\vec{b} = T + bRp_r$  ค่าของ  $R$  และ  $T$  หาได้จากสมการการแปลงพิกัดระหว่างกล้องซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของตำแหน่งและมุมของพิกัดกล้องซ้ายและขวา และเวกเตอร์  $\vec{c}$  คือเวกเตอร์ที่สั้นที่สุดและตั้งฉากกับเวกเตอร์  $\vec{a}$  และ  $\vec{b}$  ที่จุดกึ่งกลางของเวกเตอร์  $\vec{c}$  คือผลลัพธ์ของจุดที่ได้จากการหาค่าพิกัดสามมิติ



รูปที่ 3.5 การหาค่าพิกัดสามมิติจากจุดภาพที่สอดคล้องกัน

พิจารณาเวกเตอร์ดังรูปที่ 3.5 จะได้สมการ

$$\vec{a} + \vec{c} = \vec{b} \tag{3.1}$$

$$ap_i + c(p_i \times Rp_r) = bRp_r + T \tag{3.2}$$

$$ap_i - bRp_r + c(p_i \times Rp_r) = T \tag{3.3}$$

ค่าของ  $a$ ,  $b$  และ  $c$  เป็นค่าจำนวนจริงใดๆที่มากกว่า 0  
 เวกเตอร์  $p_i$  และ  $p_r$  คือเวกเตอร์ของคู่จุดภาพที่สอดคล้องกันซึ่งอยู่ในพิกัดภาพซ้ายและขวาตามลำดับ

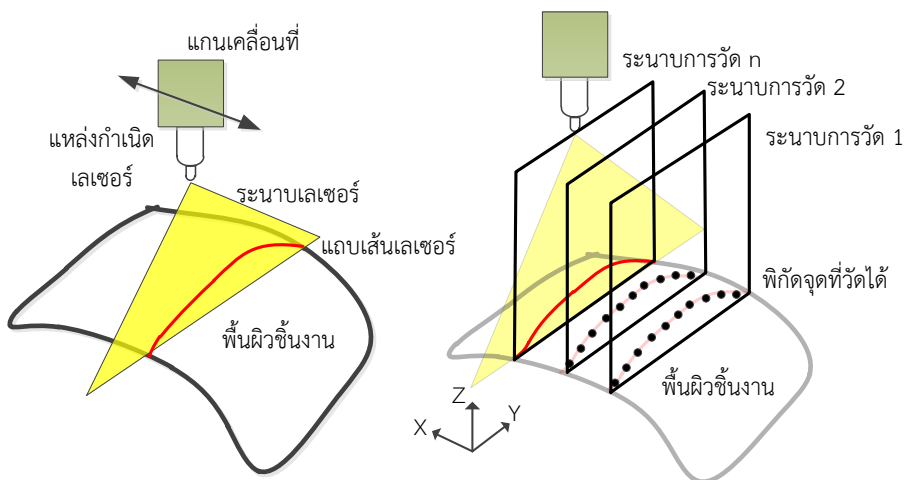
แก้สมการ (3.3) เพื่อหาค่า  $a$   $b$  และ  $c$  แล้วนำมาหาค่าพิกัดของจุด  $P'$  ซึ่งหาได้จากสมการ

$$P' = ap_i + \frac{c}{2}(p_i \times Rp_r) \tag{3.4}$$

ซึ่งค่าพิกัดหรือจุด  $P'$  คือกึ่งกลางของเวกเตอร์ที่มีความยาวน้อยที่สุดและตั้งฉากกับรังสีทั้งสอง

### 3.4 การหาจุดที่สอดคล้องโดยใช้แถบแสงเลเซอร์ในระบบสเตอริโอ

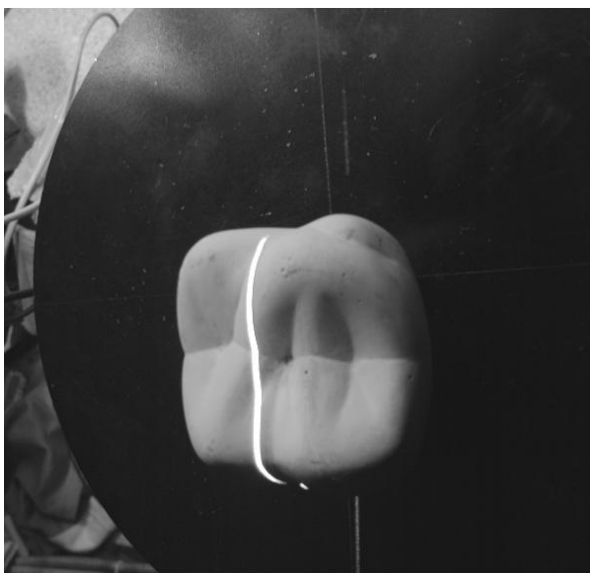
เครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบภาพสเตอริโอและแถบแสงเลเซอร์เป็นเครื่องวัดพิกัดสามมิติที่วัดตามแนวระนาบการวัดที่กำหนด เมื่อฉายระนาบเลเซอร์ลงบนชิ้นงานจะปรากฏแถบของเส้นเลเซอร์บนพื้นผิวของชิ้นงาน แถบเส้นเลเซอร์นี้ไปคำนวณหาค่าพิกัดสามมิติด้วยระบบสเตอริโอวิชั่น ค่าพิกัดสามมิติของพื้นผิวที่ได้จะอยู่ภายในระนาบของเลเซอร์ซึ่งเป็นระนาบการวัดที่กำหนดโดยอาศัยแกนเคลื่อนที่เพื่อเลื่อนระนาบของการวัดเพื่อให้ได้พิกัดจุดที่ครอบคลุมพื้นผิวทั้งหมดของชิ้นงาน



รูปที่ 3.6 การสแกนของระบบสเตอริโอวิชั่นร่วมกับแถบเลเซอร์

การหาพิกัดสามมิติในแต่ละระนาบการวัดจะเริ่มจากการฉายแถบเลเซอร์ลงบนชิ้นงานภายในระนาบการวัดที่กำหนด แล้วจึงทำการบันทึกภาพด้วยกล้องทั้งสองตัว นำภาพที่ได้จากกล้องซ้ายมาหาจุดที่สอดคล้องของจุดในแนวกึ่งกลางเส้นเลเซอร์โดยเปรียบเทียบกับภาพทางขวา โดยหาค่าพิกัดสามมิติจาก จุดที่สอดคล้องกันตามสมการ (3.4) ค่าพิกัดสามมิติที่ได้จะอยู่ภายในระนาบการวัดที่กำหนด

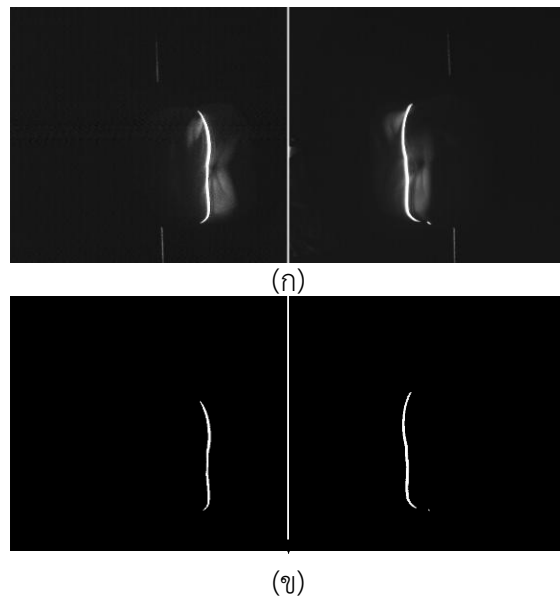
การใช้แถบแสงระบบสเตอริโอ คือการฉายเลเซอร์แบบเส้นลงบนพื้นผิวของวัตถุที่ต้องการวัด รูปร่างของเส้นเลเซอร์ที่พาดบนพื้นผิวชิ้นงานจะมีลักษณะตามรูปร่างของพื้นผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.7 ดังนั้นเราสามารถใส่ตำแหน่งของเส้นเลเซอร์ที่ปรากฏในภาพแทนแทนตำแหน่งของพื้นผิวชิ้นงานที่เส้นถูกเส้นเลเซอร์พาดผ่านได้ การหาตำแหน่งของเส้นเลเซอร์ทำได้โดยการเปรียบเทียบความสว่างของภาพเนื่องตำแหน่งของเส้นเลเซอร์ในภาพจะสว่างกว่าส่วนอื่น



รูปที่ 3.7 ภาพขาวดำแบบ grey scale จากกล้องแสดงแนวเส้นเลเซอร์ที่พาดลงบนชิ้นงาน

ภาพที่ได้จากกล้องเป็นภาพแบบขาวดำแบบ grey scale ซึ่งมีค่าความเข้มตั้งแต่ 0 ถึง 255 ค่า 0 คือค่าสีดำไล่สว่างขึ้นเรื่อยๆจนเป็นสีขาวที่ค่า 255 เราสามารถเปลี่ยนภาพ grey scale เป็นภาพ binary ได้โดยการกำหนดค่าขีดระดับความเข้ม (threshold) ถ้าค่าความเข้มของจุดภาพที่มากกว่าค่าขีดระดับความเข้มจะถูกปรับเป็นค่าความเข้ม 255 และส่วนของจุดภาพที่ค่าความเข้มน้อยกว่าค่าขีดระดับความเข้มจะถูกปรับเป็นค่าความเข้มที่ 0 ดังนั้นภาพไบนารี binary ที่ได้มีค่าความเข้มสองระดับ คือ 0 และ 255

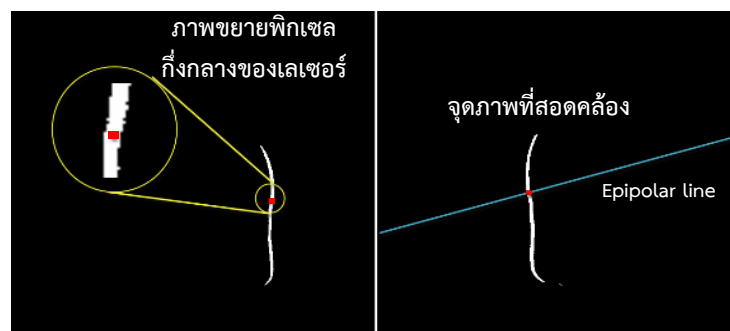
การใช้ภาพแบบไบนารีในภาพของระบบสเตอริโอวิชชันร่วมกับแถบเลเซอร์ จะสามารถแสดงเฉพาะส่วนของเลเซอร์ที่พาดบนชิ้นงานแยกกับส่วนอื่นๆ ส่วนที่เป็นเส้นเลเซอร์ในภาพไบนารีจะถูกแสดงด้วยสีขาว ส่วนอื่นๆของภาพจะเป็นสีดำ ดังรูปที่ 3.8 (ข)



รูปที่ 3.8 การกำหนดค่าขีดระดับความเข้มของภาพในระบบสเตอริโอ  
 (ก) ภาพ grey scale ในระบบภาพสเตอริโอ  
 (ข) ภาพ binary จากภาพสเตอริโอ

การหาพิกัดสามมิติจะใช้ภาพไบนารีในการคำนวณ ซึ่งขั้นตอนการหาค่าพิกัดสามมิติของภาพสเตอริโอ ดังนี้

1. เริ่มจากการหาจุดพิกเซลกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์ในแต่ละแถวของพิกเซลภาพในคอมพิวเตอร์
2. จากจุดพิกเซลกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์ในภาพซ้ายนำไปสร้าง epipolar line ในภาพทางขวา
3. จุดตัดระหว่างเส้น epipolar line กับ แนวเส้นเลเซอร์ของภาพด้านขวา คือ correspondence point ของภาพทางขวา
4. แต่ละคู่จุด correspondence point สามารถนำไปหาค่าพิกัดสามมิติ ด้วยวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติในหัวข้อ 3.3



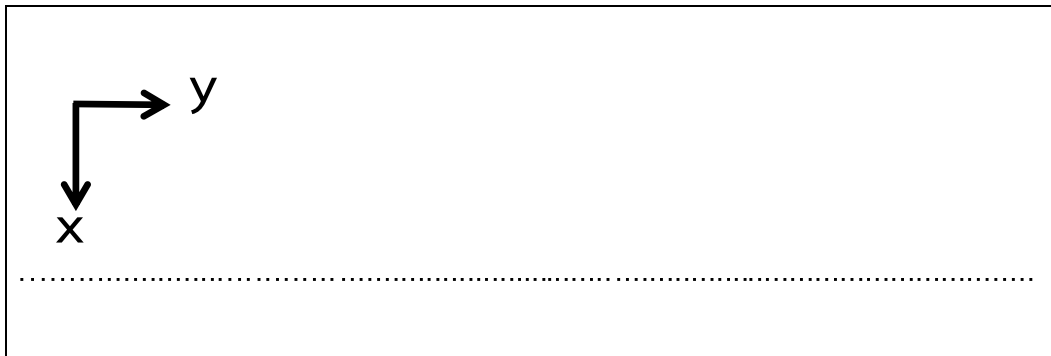
รูปที่ 3.9 การใช้แถบแสงเลเซอร์ในระบบสเตอริโอ

การใช้แถบเส้นเลเซอร์ในระบบสเตอริโอสามารถลดเวลาในการคำนวณ เนื่องจากสืบค้นหาจุดที่สอดคล้องในแนวเส้น epipolar line เท่านั้น ไม่ต้องค้นหาทุกพิกเซลภาพ และ ลดความผิดพลาดในการหาจุดที่สอดคล้อง เนื่องจากจุดตัดระหว่างเส้น epipolar line กับเส้นเลเซอร์คือจุดที่สอดคล้องกัน

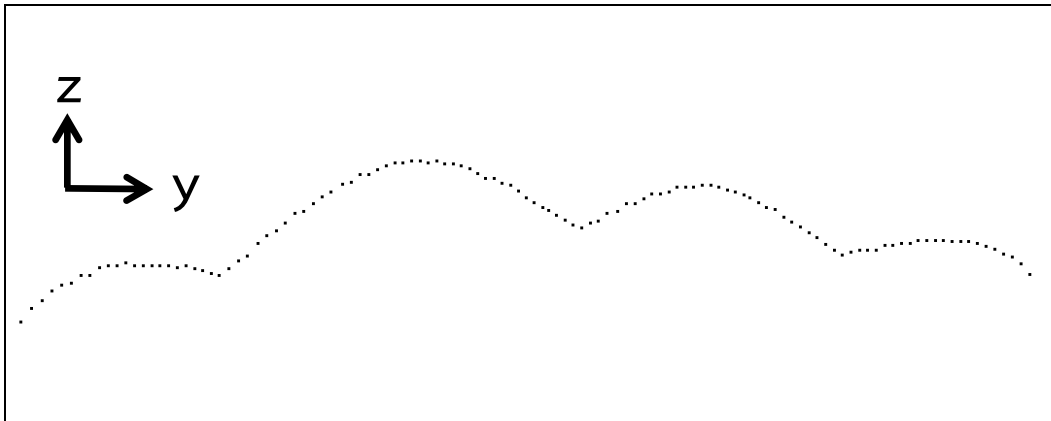
ในรูปภาพที่ถ่ายได้จากกล้องในระบบแสงเลเซอร์จะมีความหนามากกว่า 1 พิกเซล เนื่องจากการกระจายออกของเส้นเลเซอร์ตามระยะทาง คุณสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นผิวชิ้นงาน และ ลักษณะทางกายภาพของแผงรับภาพ CCD จึงต้องทำการหาจุดกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์เพื่อทำการหาจุด correspondence point ในกรณีที่ความหนาของเส้นเลเซอร์เป็นเลขคู่ อย่างเช่น 4 ตำแหน่งกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์จะอยู่ที่พิกเซล 2.5

พิกัดจุดของผลการวัดภายในระนาบการวัดที่กำหนด แสดงดังรูปที่ 3.10 และ รูปที่ 3.11 ระนาบการวัดที่กำหนดจะตั้งฉากกับแกนการเคลื่อน X ของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ รูปที่ 3.10 แสดงพิกัดจุดภายในระนาบการวัดที่กำหนด เมื่อมองจากมุมมองขนานกับระนาบการวัด รูปที่ 3.11 แสดงพิกัดจุดของระนาบการวัดเดียวกันเมื่อมองจากมุมมองตั้งฉากกับระนาบการวัด ซึ่งพิกัดจุดจะแสดงรูปร่างหน้าตัดบนพื้นผิวของชิ้นงาน

ค่าพิกัด X ของพิกัดจุดทั้งหมดภายในระนาบการวัดที่กำหนดจะมีค่าเท่ากัน โดยค่าพิกัด X อ้างอิงจากตำแหน่งของแกนเคลื่อนที่ X ของเครื่องวัดพิกัดจุด ค่าพิกัด Y และ Z ของแต่ละจุดหาได้จากการหาค่าพิกัดสามมิติของระบบสเตอริโอ

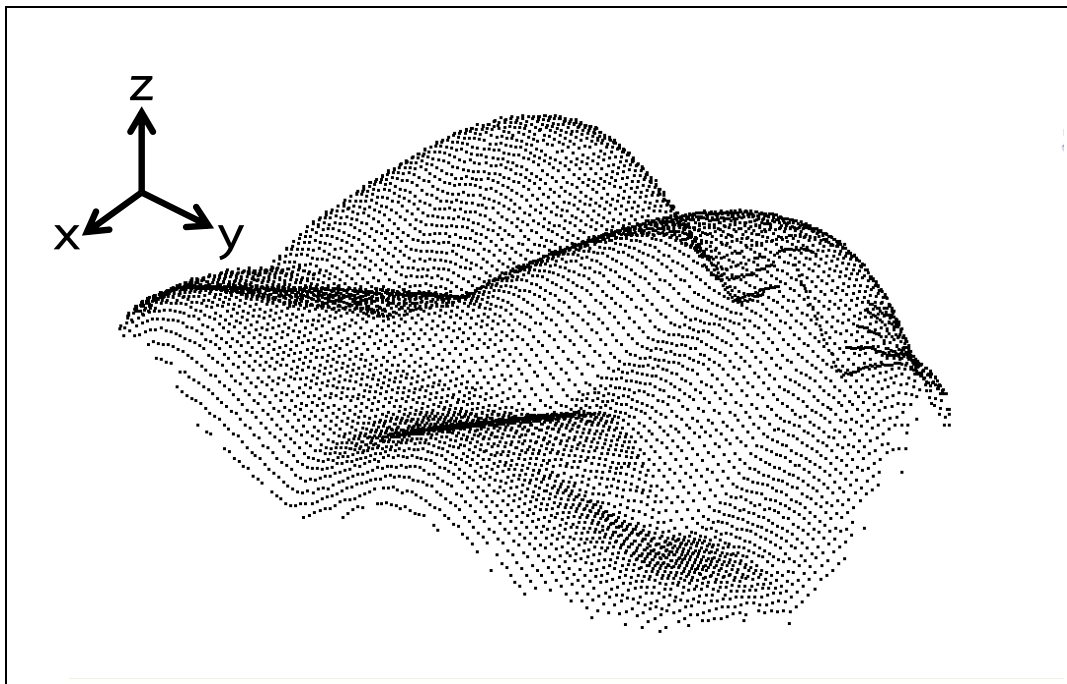


รูปที่ 3.10 พิกัดจุดของผลการวัดในระนาบการวัดที่กำหนดมุมมองขนานระนาบการวัด



รูปที่ 3.11 พิกัดจุดของผลการวัดในระนาบการวัดที่กำหนดมุมมองตั้งฉากกับระนาบการวัด

ผลการวัดของเครื่องวัดแบบสเตอริโอร่วมกับแถบเลเซอร์แสดงในรูปที่ 3.12 ผลการวัดที่ได้คือ กลุ่มจุด (point cloud) ซึ่งได้แก่ข้อมูลพิกัดสามมิติที่แสดงตำแหน่งของพื้นผิวภายนอกของวัตถุ



รูปที่ 3.12 กลุ่มจุดของผลการวัดของระนาบการวัดทั้งหมดที่ครอบคลุมชิ้นงาน

## บทที่ 4

### การสร้างเส้นจากกลุ่มจุด

#### 4.1 คำนำ

กระบวนการรีคอนสตรัคชัน คือกระบวนการสร้างรูปร่างหรือลักษณะภายนอกของชิ้นงานจริง โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัด สำหรับเครื่องวัดพิกดสามมิติข้อมูลที่วัดได้คือกลุ่มจุดซึ่งเป็นข้อมูลพิกดจุดบนพื้นผิวชิ้นงานซึ่งพิกดจุดที่วัดได้จะเป็นข้อมูลเพียงบางส่วนของพื้นผิวชิ้นงาน การหารูปร่างจริงหรือพื้นผิวของชิ้นงานจึงอาศัยกระบวนการรีคอนสตรัคชันเพื่อสามารถย้อนกลับไปหารูปร่างจริงของพื้นผิวชิ้นจากพิกดจุดที่วัดได้

จุดที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกดสามมิติตามแนวระนาบการวัดที่กำหนดนั้น กลุ่มจุดภายในของแต่ละระนาบการวัดนั้นเป็นข้อมูลบางส่วนของพิกดหน้าตัดพื้นผิวชิ้นงาน เราสามารถประมาณรูปร่างหน้าตัดพื้นผิวของชิ้นงานได้จากกระบวนการรีคอนสตรัคชัน

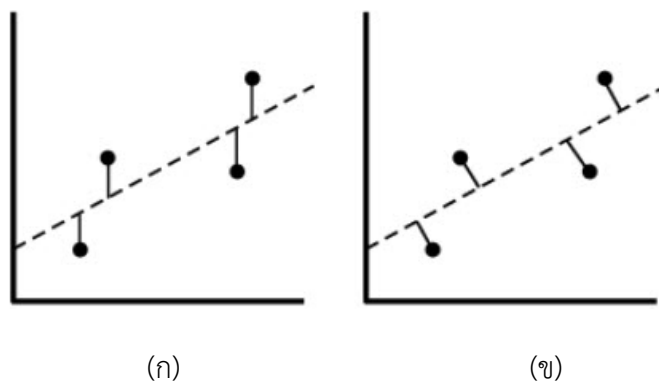
กระบวนการสร้างเส้นจากกลุ่มจุด (curve reconstruction) เป็นการคำนวณหาเส้นจากกลุ่มจุด โดยกลุ่มจุดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจากการวัดพิกดของเครื่องวัดพิกดสามมิติแบบวัดตามแนวระนาบการวัดที่กำหนด โดยจุดที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกดนี้เป็นจุดที่อยู่ในระนาบของการวัด ดังนั้นเราสามารถประมาณรูปร่างของหน้าตัดของพื้นผิวชิ้นงานจากกลุ่มจุดภายในแต่ละระนาบการวัด ด้วยเส้นที่อยู่ภายในระนาบ 2 มิติได้

ในงานวิจัยนี้กระบวนการ curve reconstruction จะใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น (linear least square) โดยใช้ฟังก์ชันพื้นฐานเป็นสมการพหุนาม (polynomial)

#### 4.2 วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น (linear least square)

ระเบียบวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น เป็นการหาฟังก์ชันของเส้นจากชุดของข้อมูลด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดของค่าความผิดพลาด (residual) ฟังก์ชันของเส้นที่ได้เป็นการประมาณชุดของข้อมูล ซึ่งชุดของข้อมูลภายในงานนี้คือกลุ่มจุดภายในระนาบการวัดที่กำหนด ฟังก์ชันของเส้นที่หาได้จากกลุ่มจุดภายในระนาบจะแทนรูปร่างของหน้าตัดพื้นผิวชิ้นงานภายในระนาบการวัดที่กำหนด

ค่าความผิดพลาดคือค่าความแตกต่างระหว่างจุดที่วัดได้กับฟังก์ชันของเส้นที่หาได้ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติจะใช้ค่าความผิดพลาดในแนวตั้งมากกว่าความผิดพลาดในแนวตั้งฉาก เนื่องจากการใช้ค่าความผิดพลาดในแนวตั้งจะทำให้การคำนวณง่ายกว่า ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ค่าความผิดพลาด (ก) ตามแนวตั้งและ (ข) ตามแนวตั้งฉาก

#### 4.2.1 การกระจายตัวของค่าความผิดพลาด

สำหรับระเบียบวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น ข้อมูลจุดที่ได้จากการวัดจะมีค่าความผิดพลาดเนื่องจากสัญญาณรบกวนของเครื่องมือซึ่งมีอยู่ตามปกติข้อ สมมุติฐานสองข้อที่ใช้ในการกำหนดค่าความผิดพลาด

1. ค่าความผิดพลาดจะปรากฏเฉพาะตัวแปรตาม แต่ไม่ปรากฏในตัวแปรต้น
2. ค่าความผิดพลาดจะเป็นแบบสุ่มที่มีการกระจายตัวแบบปกติ (normal distribution) คือ ค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และค่าความแปรปรวน ( $\sigma^2$ , variance) คงที่โดยมีสมการอธิบายข้อสมมุติฐานทั้งสองดังนี้

$$error \sim N(0, \sigma^2) \quad (4.1)$$

การสมมุติให้ค่าความผิดพลาดมีการกระจายตัวแบบปกติเพราะเพียงพอสำหรับประมาณการกระจายตัวของค่าส่วนมากที่ได้จากการวัด ถึงแม้ว่าการหาผลเฉลยระเบียบวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นไม่ได้กำหนดว่าค่าความผิดพลาดจะต้องเป็นการกระจายตัวแบบปกติก็ตาม แต่วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดนี้เหมาะสำหรับประมาณข้อมูลที่มีการกระจายตัวแบบปกติ ซึ่งการกระจายตัวแบบปกตินั้นเป็นรูปแบบหนึ่งของการกระจายตัวของความน่าจะเป็นที่ค่าผิดปกติ (outlier) มีโอกาสพบได้น้อย

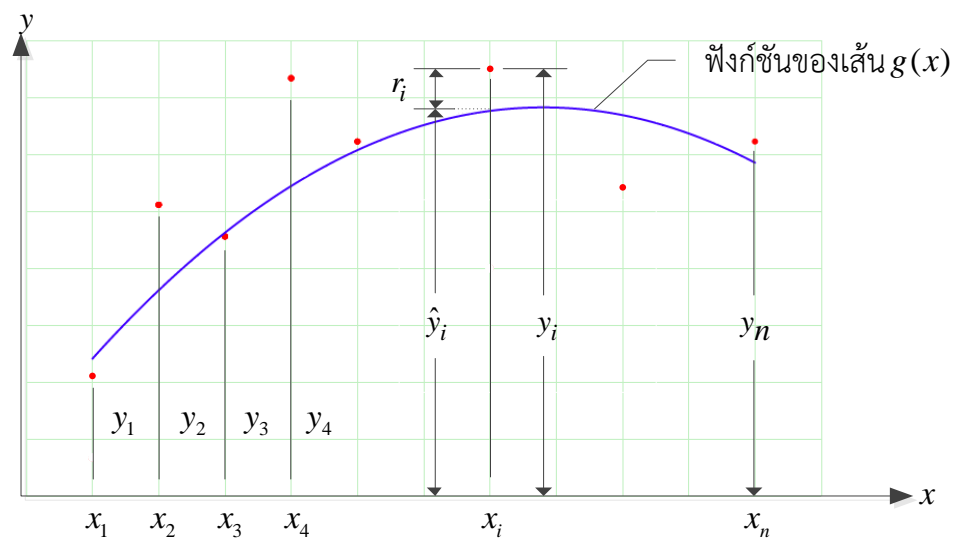
#### 4.2.2 วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นโดยใช้ฟังก์ชันโพลิโนเมียล

กำหนดให้กลุ่มจุด  $P$  มีจำนวน  $n$  ตัว โดยแต่ละจุดของกลุ่มจุดแสดงด้วย  $p_i = (x_i, y_i)$  โดย  $p_i \in P$  การหาฟังก์ชันของเส้นจากกลุ่มจุดดังแสดงในรูปที่ 4.2 ประกอบด้วยข้อมูลของกลุ่มจุดทั้งหมด  $n$  ตัว โดยฟังก์ชันของเส้นจะอยู่ในรูปสมการโพลิโนเมียลอันดับ  $m$  ดังนี้

$$g(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \quad (4.2)$$

โดย  $a_0, a_1, \dots, a_m$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียล ดังนั้นผลเฉลยของวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้นคือการหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการโพลิโนเมียลที่ทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด สำหรับสมการโพลิโนเมียลอันดับ 1 คือสมการเส้นตรงเขียนได้ในรูป

$$g(x) = a_0 + a_1x \quad (4.3)$$



รูปที่ 4.2 วิธีการกำลังสองน้อยที่สุดโดยการหาฟังก์ชันของเส้นจากชุดของข้อมูล

จากรูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดของข้อมูลตัวที่  $i$  เขียนแทนด้วย  $r_i$  โดยนิยามคือผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากการวัด  $y_i$  กับค่าที่ได้จากการประมาณด้วยฟังก์ชัน  $g(x)$  ณ ตำแหน่ง  $x_i$  หรือเขียนแทนด้วย  $\hat{y}_i$  ค่าความผิดพลาดของข้อมูลตัวที่  $i$  เขียนอยู่ในรูปแบบดังนี้

$$r_i = y_i - \hat{y}_i \quad (4.4)$$

ผลรวมกำลังสองของค่าความผิดพลาด  $S$  จากชุดข้อมูลทั้งหมด  $n$  ตัวเขียนได้ว่า

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4.5)$$

การใช้ผลรวมกำลังสองของความผิดพลาดแทนที่จะเป็นผลรวมค่าสัมบูรณ์ของความผิดพลาดเนื่องจากต้องการให้เมื่อหาค่าดิฟเฟอเรนเชียลแล้วได้ผลลัพธ์เป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่อง

ค่า  $\hat{y}_i$  คือค่าที่ได้จากการประมาณด้วยฟังก์ชัน  $g(x)$  ณ ตำแหน่ง  $x_i$  จากสมการ (4.5) จะได้

$$S = \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_m x_i^m)]^2 \quad (4.6)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์  $a_0, a_1, \dots, a_m$  ทั้งหมด  $m + 1$  ค่าด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาในรูปแบบของสมการกำลังสองน้อยที่สุด (quadratic minimization problem) วิธีการนี้เป็นการหาค่าต่ำสุดของค่าความผิดพลาดกำลังสอง  $S$  โดยการทำอนุพันธ์ย่อยเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ นั่นคือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial(S)}{\partial a_0} &= -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_m x_i^m)] = 0 \\ \frac{\partial(S)}{\partial a_1} &= -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_m x_i^m)] x_i = 0 \\ \frac{\partial(S)}{\partial a_m} &= -2 \sum_{i=1}^n [y_i - (a_0 + a_1 x_i + \dots + a_m x_i^m)] x_i^m = 0 \end{aligned} \quad (4.7)$$

จัดรูปสมการข้างต้นจะได้สมการเชิงเส้น  $m + 1$  สมการ หรือเรียกว่าสมการปกติกำลังสองน้อยที่สุด

$$\begin{aligned} a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + \dots + a_m \sum_{i=1}^n x_i^m &= \sum_{i=1}^n y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \dots + a_m \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^m + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^{m+1} + \dots + a_m \sum_{i=1}^n x_i^{2m} &= \sum_{i=1}^n x_i^m y_i \end{aligned} \quad (4.8)$$

สามารถเขียนสมการปกติในรูปแบบเมทริกซ์

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_i & \cdots & \sum x_i^m \\ \sum x_i & \sum x_i^2 & \cdots & \sum x_i^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_i^m & \sum x_i^{m+1} & \cdots & \sum x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_i y_i \\ \vdots \\ \sum x_i^m y_i \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

หรือ สมการ (4.9) สามารถเขียนโดยย่อ ดังนี้

$$\mathbf{X}\boldsymbol{\beta} = \mathbf{y} \quad (4.10)$$

โดยเมทริกซ์  $\mathbf{X}$  เป็นเมทริกซ์จัตุรัสขนาด  $(m+1) \times (m+1)$  อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์สมมาตรที่รู้ค่า และเวกเตอร์  $\mathbf{y}$  เป็นเวกเตอร์ขนาด  $(m+1) \times (1)$  ทางด้านขวาของสมการที่รู้ค่าเช่นกัน และเวกเตอร์  $\boldsymbol{\beta}$  เป็นเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าขนาด  $(m+1) \times (1)$  ซึ่งสมาชิกของเวกเตอร์  $\boldsymbol{\beta}$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่า  $a_0, a_1, \dots, a_m$  ทั้งหมด  $m+1$  ค่า

#### 4.3 การสร้างสมการปกติของสมการกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น

ลำดับขั้นตอนในการสร้างสมการปกติเพื่อหาค่าของเวกเตอร์สัมประสิทธิ์ เริ่มจากต้องกำหนดอันดับของสมการโพลีโนเมียล  $m$  ที่ต้องการสำหรับการประมาณค่าของกลุ่มจุด และต้องทราบจำนวนกลุ่มจุดทั้งหมด  $n$  แล้วทำการตรวจสอบว่าจำนวนจุด  $n$  ต้องมีตั้งแต่  $m+1$  ขึ้นไป ถ้าจำนวนจุดน้อยกว่า  $m+1$  จะไม่สามารถคำนวณได้ หากสมาชิกแต่ละตัวของสมการปกติในรูปแบบเมทริกซ์ในรูปแบบของเมทริกซ์เสริม (augmented matrix)  $\mathbf{A}$  ซึ่งเป็นการรวมกันของเมทริกซ์  $\mathbf{X}$  และเวกเตอร์  $\mathbf{y}$  ที่มีจำนวนแถวเท่ากัน ดังนี้

$$\mathbf{A} = [\mathbf{X} \mid \mathbf{y}] \quad (4.11)$$

โดยสมาชิกแต่ละตัวของสมการปกติในรูปแบบเมทริกซ์แต่งเติมแทนด้วย  $a_{ij}$  ตำแหน่งของสมาชิกกำหนดด้วย  $i$  คือตำแหน่งของแถว ส่วน  $j$  แทนตำแหน่งของหลักในเมทริกซ์ ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & a_{ij} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

ซูโดโค้ด (pseudo code) ของการสร้างเมทริกซ์แต่งเติมของสมการปกติกำลังสองน้อยที่สุด แสดงในรูปที่ 4.3

```

Do i = 1 , Order + 1
  Do j = 1, i
    K = i + j - 2
    Sum = 0
    Do l = 1, n
      sum = sum + xlk
    END DO
    ai,j = sum
    aj,i = sum
  END DO
  sum = 0
  DO l = 1, n
  END DO
  ai,order+2 = sum
END DO

```

รูปที่ 4.3 รหัสเทียมของการสร้างสมการปกติในรูปเมทริกซ์แต่งเติม

หลังจากสามารถหาสมการปกติในรูปเมทริกซ์แต่งเติม สามารถนำไปหาค่าเวกเตอร์สัมประสิทธิ์  $\beta$  เนื่องจากสมการปกติเป็นระบบสมการเชิงเส้น ใช้ระเบียบวิธีการเชิงเส้นในการแก้สมการปกติเพื่อหาเวกเตอร์สัมประสิทธิ์

#### 4.4 การหาค่าจากสมการโพลิโนเมียล

หลังจากสามารถหาเวกเตอร์สัมประสิทธิ์  $\beta$  ของสมการโพลิโนเมียล เราสามารถทำการหาค่า  $\hat{y}_i$  หรือค่าที่ได้จากสมการโพลิโนเมียลซึ่งแทนด้วยเวกเตอร์สัมประสิทธิ์  $\beta$  โดยการกำหนดตำแหน่ง  $x_i$  ดังนี้

$$\hat{y}_i = \mathbf{b}\beta \quad (4.13)$$

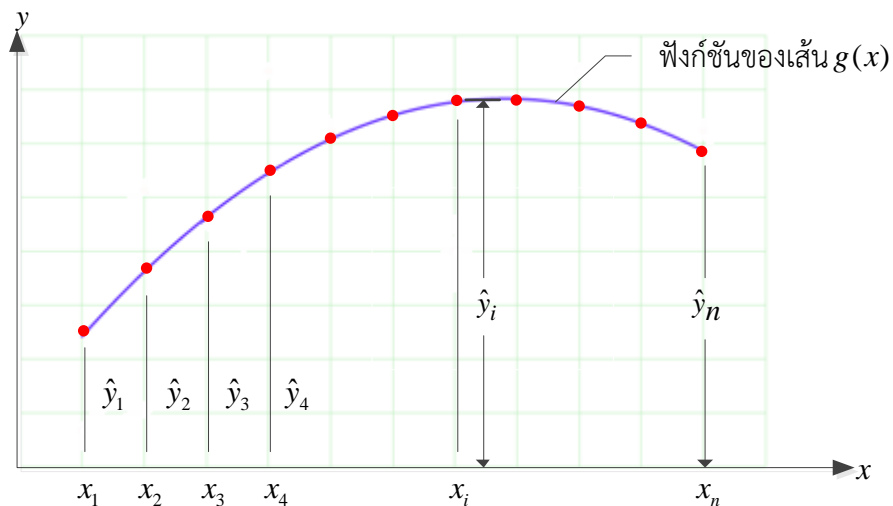
ซึ่ง เวกเตอร์  $\mathbf{b}$  คือ basis polynomial vector ขนาด  $(1) \times (m+1)$  หรือมีรูปแบบดังนี้

$$\mathbf{b} = [1 \quad x_i \quad x_i^2 \quad \cdots \quad x_i^m] \quad (4.14)$$

เราสามารถ หาค่า  $\hat{y}_i$  หลายค่าโดยการกำหนดค่า  $x_i$  ณ ตำแหน่งที่ต้องการ จำนวน  $n$  ตำแหน่ง จากสมการ (4.12) สามารถเขียนได้ในรูปแบบ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \vdots \\ \hat{y}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & \cdots & x_1^m \\ 1 & x_2 & \cdots & x_2^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & \cdots & x_n^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

ค่า  $\hat{y}_i$  ที่ได้จากการกำหนดค่า  $x_i$  ณ ตำแหน่งที่ต้องการ โดยค่า  $\hat{y}_i$  จะอยู่บนฟังก์ชันของเส้นที่เป็นสมการโพลิโนเมียล ดังรูปที่ 4.4



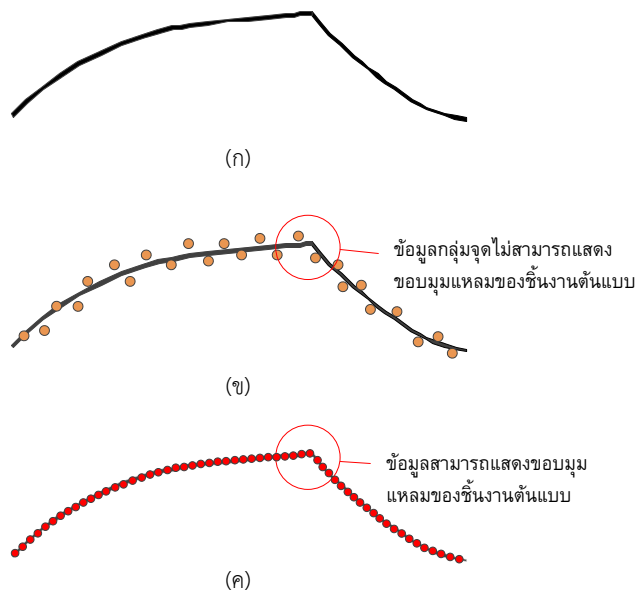
รูปที่ 4.4 ค่าของสมการโพลิโนเมียล ณ ตำแหน่ง  $x_i$

## บทที่ 5

### เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

#### 5.1 คำนำ

หน้าตัดของพื้นผิวชิ้นงานต้นแบบภายในระนาบการวัดที่กำหนด แสดงในรูปที่ 5.1 (ก) ข้อมูลดิบของกลุ่มจุด (raw data point cloud) ที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบวัดตามแนวระนาบการวัดที่กำหนด ความละเอียดของข้อมูลดิบของกลุ่มจุดที่ได้จากการวัดจะขึ้นกับความละเอียดของกล้องที่ใช้ในการรับข้อมูลภาพในเครื่องวัดพิกัดสามมิติ [7] ดังนั้นการใช้กล้องความละเอียดต่ำในการรับข้อมูลภาพ ข้อมูลดิบของกลุ่มจุดจากเครื่องวัดพิกัดสามมิติจะไม่สามารถแสดงรายละเอียดรูปร่างขอบมุมแหลมของชิ้นงานต้นแบบ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ข) ในการแก้ปัญหาดังกล่าวเราจึงใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดสำหรับการเพิ่มความละเอียดของจุดที่ได้จากการวัดภายในแต่ละระนาบการวัด เพื่อให้สามารถแสดงรายละเอียดรูปร่างขอบมุมแหลมของชิ้นงานได้ เมื่อใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดจะได้กลุ่มจุดหนาแน่นที่ความละเอียดของกลุ่มจุดจะมากขึ้นและเพียงพอสำหรับแสดงรายละเอียดรูปร่างขอบมุมแหลมของชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 (ค)



รูปที่ 5.1 เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

(ก) หน้าตัดของพื้นผิวชิ้นงานต้นแบบภายในระนาบการวัดที่กำหนด

(ข) ข้อมูลดิบของกลุ่มจุดเมื่อวัดด้วยเครื่องวัดพิกัดสามมิติ

(ค) กลุ่มจุดหนาแน่นจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

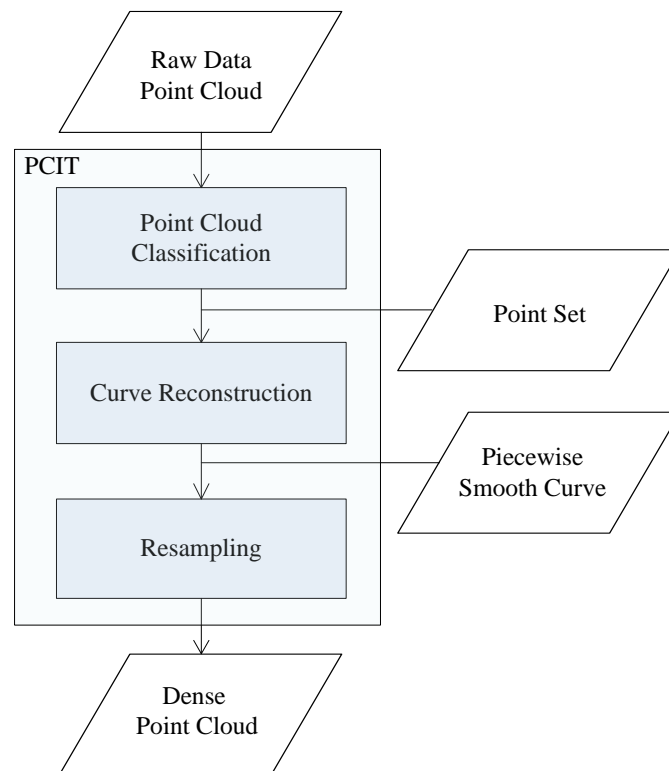
## 5.2 ขั้นตอนของเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

ขั้นตอนของเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ (ดังรูปที่ 5.2)

1.) ขั้นตอนแรก คือขั้นตอนการแบ่งกลุ่มจุด (point cloud classification) เป็นขั้นตอนที่แบ่งข้อมูลดิบของกลุ่มจุดภายในแต่ละระนาบการวัด เป็นกลุ่มจุดย่อยๆ (point set) ด้วยวิธี robust estimation technique ดังจะกล่าวในหัวข้อ 5.3.2

2.) หลังจากนั้นเป็นขั้นตอนการสร้างเส้นจากกลุ่มจุด (curve reconstruction) ขั้นตอนนี้จะสร้างเส้นจากกลุ่มจุดย่อยแต่ละกลุ่ม เพื่อสร้างเป็นเส้นที่ต่อเนื่องเป็นช่วง (piecewise smooth curve)

3.) ขั้นตอนสุดท้ายคือ ขั้นตอนการสร้างจุดจากเส้น (resampling) เพื่อแปลงเส้นที่ต่อเนื่องเป็นช่วงให้เป็นกลุ่มจุดหนาแน่น กลุ่มจุดหนาแน่นเหล่านี้จะมีความละเอียดมากกว่าข้อมูลดิบของกลุ่มจุด ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดขอบบวมแหลมของชิ้นงานต้นแบบได้



รูปที่ 5.2 ขั้นตอนของเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

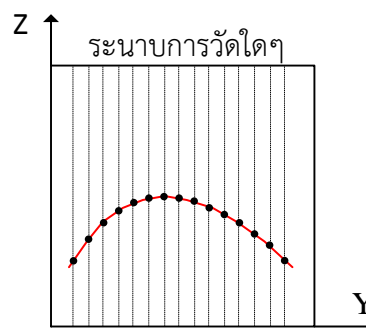
### 5.3 การแบ่งกลุ่มจุด (point cloud classification)

การแบ่งกลุ่มจุดนั้นใช้วิธี Robust estimation technique สำหรับการแบ่งข้อมูลดิบภายในแต่ละระนาบการวัดของกลุ่มจุดเป็นกลุ่มจุดย่อยๆ วิธีการนี้ยังสามารถตรวจจับจุดที่มีค่าความผิดพลาดมาก หรือเรียกว่าค่าผิดปกติ (outlier) ซึ่งจุดที่มีค่าความผิดพลาดมากจะทำให้การหารูปร่างหน้าตัดขึ้นงานมีความผิดพลาดตามไปด้วย

แต่ก่อนขั้นตอนการแบ่งกลุ่มจุดจะมีการเรียงลำดับของจุดภายในแต่ละระนาบการวัดเพื่อให้สะดวกสำหรับการคำนวณด้วยวิธี Robust estimation technique

#### 5.3.1 การเรียงลำดับของกลุ่มจุดภายในระนาบการวัด

กลุ่มจุดภายในแต่ละระนาบการวัดจะมีการเรียงลำดับของจุด ระนาบของการวัดในวิทยานิพนธ์นี้จะอยู่ภายในระนาบ YZ โดยจุดแรกจะอยู่ทางด้านซ้ายสุดของแกน Y จุดถัดมาคือจุดที่ใกล้สุดทางด้านขวาของจุดแรก และเรียงลำดับของจุดถัดไปเรื่อยๆ จนจุดลำดับสุดท้ายคือจุดทางด้านขวาสุด ดังนั้นจุดภายในแต่ละระนาบการวัดจะมีการเรียงลำดับจากซ้ายไปขวา ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การเรียงลำดับของกลุ่มจุดภายในระนาบการวัด

#### 5.3.2 Robust Estimation Technique

ข้อเสียของการสร้างเส้นจากกลุ่มจุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือ ถ้าข้อมูลภายในกลุ่มจุดมีจุดที่มีค่าความผิดพลาดมาก เส้นที่ได้จากการประมาณรูปร่างด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะเข้าใกล้จุดที่มีค่าความผิดพลาดมาก เนื่องจากอิทธิพลของกำลังสองของค่าความผิดพลาดในวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ทำให้เส้นที่ได้จากการประมาณรูปร่างด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดมีความผิดพลาดมากตามไปด้วย ดังรูปที่ 5.4 (ก) .ในการแก้ปัญหานี้เราใช้วิธี Robust estimation technique ในการตรวจจับจุดค่าที่มีความผิดพลาดมาก จุดที่มีความผิดพลาดมากจะไม่นำมาคำนวณในการสร้างเส้นจากกลุ่มจุด ทำให้เส้นที่ได้จากการประมาณรูปร่างด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดมีความใกล้เคียงกับรูปร่างชิ้นงานต้นแบบ ดังรูปที่ 5.4 (ข)

ในการบ่งชี้จุดที่มีค่าความผิดพลาดมาก (outlier) จะใช้ค่าความผิดพลาด (residual) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการสร้างเส้นจากกลุ่มจุดด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด [1-3]



รูปที่ 5.4 กลุ่มจุดภายในระนาบการวัด

- (ก) การประมาณรูปร่างของข้อมูลกลุ่มจุดที่ประกอบด้วยจุดที่มีค่าความผิดพลาดมาก  
 (ข) การประมาณรูปร่างของข้อมูลกลุ่มจุดที่ไม่นำจุดที่มีค่าความผิดพลาดมากคำนวณ

### 5.3.3 ขั้นตอนการแบ่งกลุ่มจุด

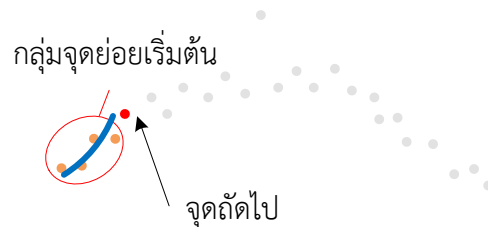
หลักการของวิธีการ Robust estimation technique เริ่มจากการสร้างเส้นจากกลุ่มจุดย่อยเริ่มต้น ซึ่งกลุ่มจุดย่อยเริ่มต้นนี้จะมีจำนวนจุดน้อย ดังรูปที่ 5.5 (ก) ทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาดระหว่างเส้นกับจุดถัดไป หากค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงระดับค่าความผิดพลาดของความไม่ต่อเนื่อง (Discontinuity Threshold) ดังรูปที่ 5.5 (ข) เพิ่มจุดนั้นเข้ากลุ่มจุดย่อย นำกลุ่มจุดย่อยกลุ่มใหม่ที่ได้ไปสร้างเส้นโค้ง ดังรูปที่ 5.5 (ค) ทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาดระหว่างเส้นกับจุดถัดไปจนกระทั่งจุดสุดท้ายภายในระนาบการวัด [2]

หากค่าความผิดพลาดของจุดใดๆอยู่เกินกว่าระดับของค่าความผิดพลาดนอกการประมาณ (Outlier Threshold) กำหนดให้จุดนั้นเป็นจุดที่มีค่าความผิดพลาดมากและไม่นำมาคำนวณในการสร้างเส้นจากกลุ่มจุด ดังรูปที่ 5.6

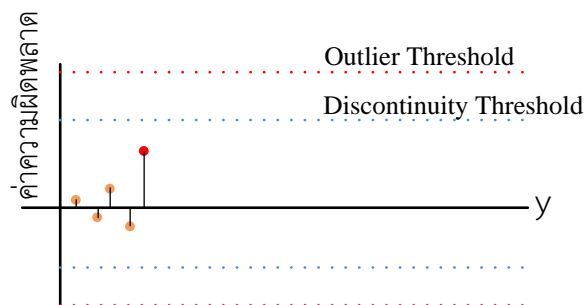
หากค่าความผิดพลาดของจุดใดๆอยู่เกินกว่าระดับของค่าความผิดพลาดของความไม่ต่อเนื่องแต่ไม่เกินระดับค่าความผิดพลาดนอกการประมาณ กำหนดจุดนั้นเป็นจุดที่มีความไม่ต่อเนื่อง (discontinuity point) และสร้างกลุ่มจุดย่อยเริ่มต้นใหม่โดยที่จุดที่มีความไม่ต่อเนื่องเป็นจุดแรกของกลุ่มจุดย่อยเริ่มต้น ดังรูปที่ 5.7

จำนวนของกลุ่มจุดย่อยเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับอันดับของสมการโพลิโนเมียลที่ใช้ของการสร้างเส้นจากกลุ่มจุด โดยถ้าใช้สมการโพลิโนเมียลอันดับ  $m$  จำนวนจุดของกลุ่มจุดย่อยเริ่มต้นจะต้องมีอย่างน้อย  $m + 1$  จุด [3]

ผลลัพธ์ของขั้นตอนการแบ่งกลุ่มจุดจะได้กลุ่มจุดย่อย กลุ่มจุดย่อยเหล่านี้จะไม่มีจุดที่มีค่าความผิดพลาดมารวมอยู่ด้วยเนื่องจากแบ่งจุดด้วยวิธี Robust estimation technique ดังรูปที่ 5.8



(ก)



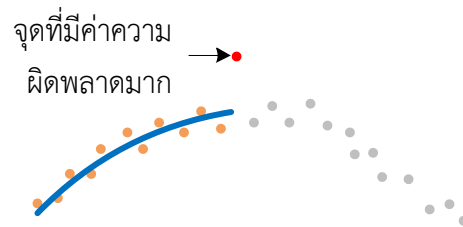
(ข)



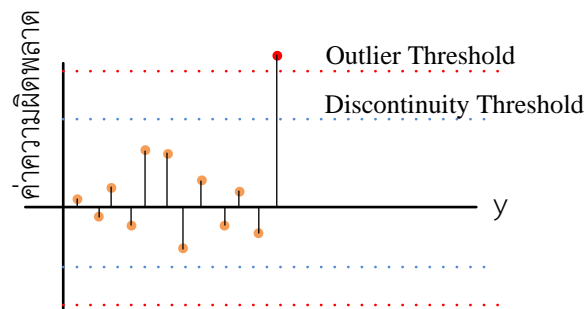
(ค)

รูปที่ 5.5 ขั้นตอนของวิธี robust estimation technique (1)

ในขั้นตอนการแบ่งกลุ่มจุดเริ่มจากการสร้างเส้นจากกลุ่มจุดย่อยเริ่มต้น (ก) แล้วทำการหาค่าความผิดพลาดของจุดถัดไปเปรียบเทียบกับเส้นที่สร้างขึ้น โดยใช้กราฟค่าความผิดพลาด (ข) จุดที่มีค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงระดับค่าความผิดพลาดของความไม่ต่อเนื่องจะนำไปรวมกับกลุ่มจุดย่อยเริ่มต้นจะได้กลุ่มจุดย่อยกลุ่มใหม่ (ค) ทำการสร้างเส้นจากกลุ่มจุดย่อยกลุ่มใหม่ทำการตรวจสอบค่าความผิดพลาดระหว่างเส้นกับจุดถัดไปจนกระทั่งจุดสุดท้ายภายในระนาบการวัด

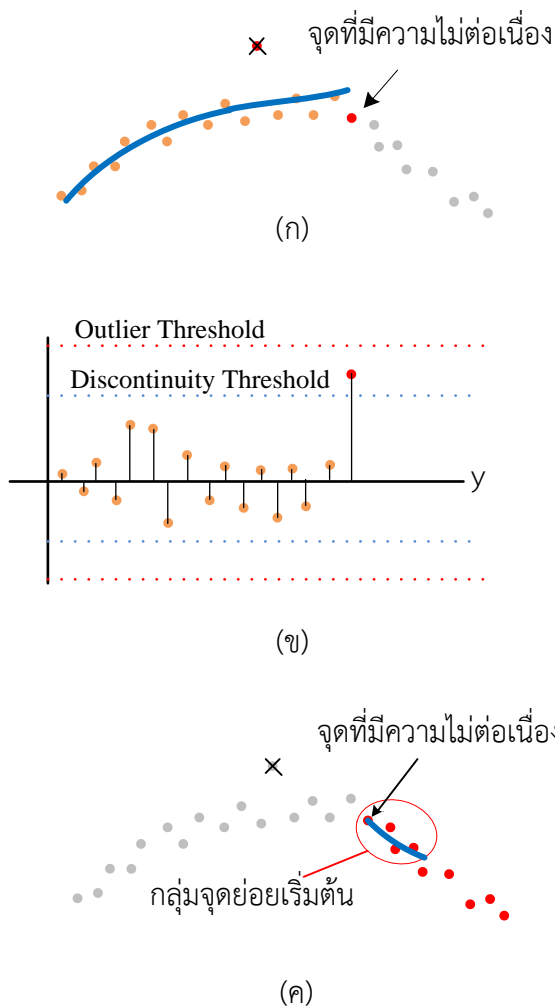


(ก)



(ข)

รูปที่ 5.6 ขั้นตอนของวิธี robust estimation technique (2)  
กรณีที่จุดถัดไปเป็นจุดที่มีค่าความผิดพลาดมาก (ก) โดยสังเกตจากกราฟค่าความผิดพลาด จุดที่ค่าความผิดพลาดมีค่ามากเกินกว่าระดับของค่าความผิดพลาดนอกการประมาณ (Outlier threshold) (ข) จะไม่นำมารวมกับกลุ่มจุดย่อย และทำการหาค่าความผิดพลาดของจุดถัดไปแทน



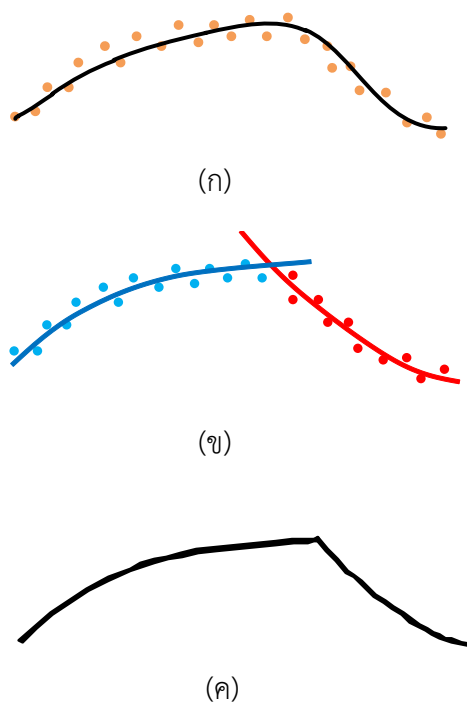
รูปที่ 5.7 ขั้นตอนของวิธี robust estimation technique (3)  
 กรณีที่จุดถัดไปเป็นจุดที่มีความไม่ต่อเนื่อง (ก) โดยสังเกตจากกราฟค่าความผิดพลาด ค่าความผิดพลาดของจุดที่มีความไม่ต่อเนื่องจะอยู่เกินระดับค่าความผิดพลาดของความไม่ต่อเนื่องแต่อยู่ในช่วงระดับของค่าความผิดพลาดนอกการประมาณ (ข) กำหนดให้จุดที่มีความไม่ต่อเนื่องเป็นจุดแรกของกลุ่มจุดย่อยเริ่มต้นกลุ่มใหม่ (ค)



รูปที่ 5.8 กลุ่มจุดย่อยจากขั้นตอนแบ่งกลุ่มจุด

#### 5.4 การสร้างเส้นจากกลุ่มจุด (curve reconstruction)

ถ้าหากข้ามขั้นตอนการแบ่งกลุ่มจุด เส้นที่ได้จากขั้นตอนการสร้างเส้นจากกลุ่มจุดนี้จะเป็นเส้นที่มีความราบเรียบและไม่ปรากฏข้อมูลของขอบมุ่มแหลมดังรูปที่ 5.9 (ก) เราสามารถสร้างขอบมุ่มแหลมของชิ้นงานจากการสร้างเส้นของแต่ละกลุ่มจุดย่อย ขอบมุ่มแหลมคือส่วนที่ติดกันของเส้นที่สร้างจากกลุ่มจุดย่อยที่อยู่ติดกัน ดังรูปที่ 5.9 (ข) เมื่อหาจุดตัดระหว่างเส้นสองเส้นที่ติดกันสามารถสร้างเส้นต่อเนื่องเป็นช่วง ดังรูปที่ 5.9 (ค)



รูปที่ 5.9 การสร้างเส้นจากกลุ่มจุด

(ก) การสร้างเส้นจากกลุ่มจุดกลุ่มเดียว (ข) การสร้างเส้นจากกลุ่มจุดย่อย (ค) เส้นต่อเนื่องเป็นช่วง

#### 5.5 การสร้างจุดจากเส้น (resampling)

จากเส้นโค้งต่อเนื่องเป็นช่วงเราสามารถนำมาหาจุดได้เนื่องเส้นแต่ละเส้นเป็นสมการพอลิโนเมียล ดังนั้นใช้การหาค่าจากสมการพอลิโนเมียลดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.4 เพื่อหาจุดบนเส้นพอลิโนเมียลในแต่ละช่วง โดยสามารถกำหนดความละเอียดที่ต้องการได้ กลุ่มจุดที่ได้เป็นกลุ่มจุดหนาแน่นสามารถแสดงส่วนขอบมุ่มแหลมชิ้นงานและสะดวกสำหรับการนำเข้าไปรแกรมที่ช่วยในการออกแบบอื่นๆ

## บทที่ 6

### การทดลอง

#### 6.1 คำนำ

การทดลองทั้งหมดจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของกล้องค่าเดียวกัน โดยหาค่าพารามิเตอร์จากการสอบเทียบกล้องด้วยวิธีของของ Tsai [14] โดยค่าพารามิเตอร์ได้มาจากการสอบเทียบกล้องที่ระยะ 100 มิลลิเมตรจากจุดบนสุดของแกน Z ระยะห่างระหว่างกล้อง 350 มิลลิเมตร มุมของกล้องทั้งสองตัวทำมุม 30 องศากับแนวตั้งและหันหน้าเข้าหาโต๊ะวางชิ้นงาน ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกล้องแต่ละตัวดังแสดงในตารางที่ 6.1 ดังนั้นการวัดในการทดลองทั้งหมดจะวัดที่ตำแหน่งที่ได้ทำการสอบเทียบเอาไว้ คือ ระยะ 100 มิลลิเมตรจากบนสุดของแกน Z ก่อนทำการวัดต้องทำการจัดแนวของแถบเส้นเลเซอร์ให้ขนานกับแนวแกน Y ของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ เพื่อให้ระนาบการวัดและระนาบการฉายของเลเซอร์อยู่ในระนาบเดียวกัน

ตารางที่ 6.1 ตารางค่าพารามิเตอร์ของกล้องสเตอริโอในการทดลอง

พารามิเตอร์	กล้องตัวซ้าย	กล้องตัวขวา
$f$	7.827617	7.858423
kappal	4.2970809e-004	1.823274e-003
$s_x$	1.000000	1.000000
$c_x$	383.500000	383.500000
$c_y$	287.500000	287.500000
$r_x$	-59.588313	-123.670303
$r_y$	3.604511	0.130077
$r_z$	-91.494283	-91.738265
$T_x$	-19.492294	52.684168
$T_y$	87.345757	90.519231
$T_z$	356.553534	344.522689

ค่าพารามิเตอร์ 11 ตัวของแบบจำลองกล้องด้วยวิธีการสอบเทียบของ Tsai

$f$  : ระยะโฟกัสของกล้อง

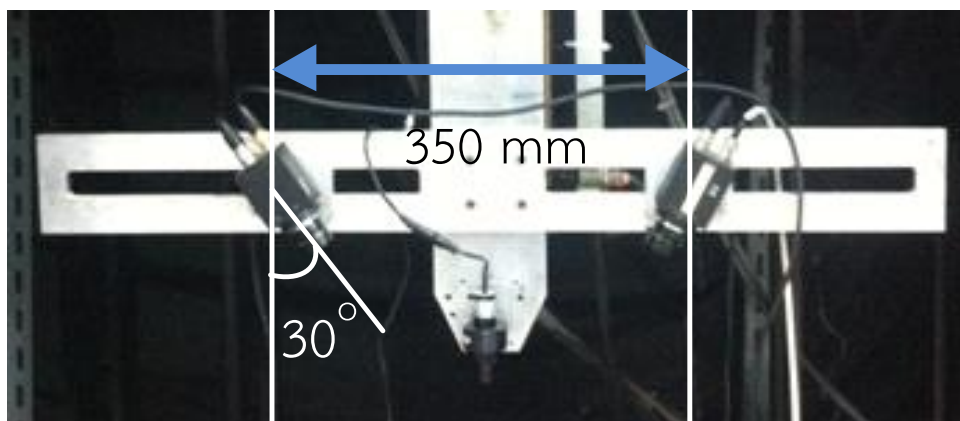
$k_{\text{appal}}$  : สัมประสิทธิ์การบิดเบี้ยวในแนวรัศมีของเลนส์ (radial lens distortion coefficient)

$s_x$  : ความไม่แน่นอนของสัญญาณในระบบการรับข้อมูลภาพ

$c_x, c_y$  : จุดพิกัดกึ่งกลางของการบิดเบี้ยวในแนวรัศมีของเลนส์

$r_x, r_y, r_z$  : องศาของการเปลี่ยนมุมในการแปลงพิกัดระหว่างพิกัดของโลก และ พิกัดของกล้อง

$T_x, T_y, T_z$  : ระยะการเลื่อนแกนขนานในการแปลงพิกัดระหว่างพิกัดของโลก และ พิกัดของกล้อง



รูปที่ 6.1 การตั้งระยะและมุมกล้องในการทดลอง

การทดลองที่ 1 เป็นการหาค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดที่ได้จากการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติโดยการวัดชิ้นงานลักษณะระนาบ ซึ่งค่าความผิดพลาดเป็นสิ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำในการวัด ค่าความผิดพลาดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบใช้ภาพสเตอริโอร่วมกับแถบเลเซอร์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย แต่ปัจจัยสำคัญคือลักษณะการสะท้อนแสงของพื้นผิวชิ้นงาน พื้นผิวชิ้นงานที่มีความมันวาวจะทำให้แสงเลเซอร์มีการสะท้อนพื้นผิวชิ้นงานส่งผลให้ค่าความผิดพลาดในการวัดมีค่ามาก เราสามารถเคลือบผิวชิ้นงานด้วยสเปรย์เพื่อลดการสะท้อนของแสงเลเซอร์และลดค่าความผิดพลาดในการวัด

การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดจำลองการวัดกับกลุ่มจุดจำลองการวัดหลังใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด กลุ่มจุดจำลองการวัดสร้างจากแบบจำลองพื้นผิวรูปสามเหลี่ยมที่สร้างจากโปรแกรม CATIA

การทดลองที่ 3 เป็นการใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดกับกลุ่มจุดที่ได้จากการวัดชิ้นงานต้นแบบด้วยเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบภาพสเตอริโอร่วมกับแถบเลเซอร์ แล้วทำการเปรียบเทียบพื้นผิว mesh ที่สร้างจากกลุ่มจุดทั้งสองแบบ รูปร่างของชิ้นงานต้นแบบที่ทำการวัดจะมี 3 ลักษณะคือ ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู ชิ้นงานรูปร่างพีระมิดหัวตัด และ ชิ้นงานรูปร่างพีระมิด การวัดชิ้นงานแต่ละลักษณะจะมีการเปลี่ยนแนวระนาบการวัดที่ 0, 30, 60, 90 องศา เทียบกับแนวกึ่งกลางชิ้นงาน

## 6.2 การทดลองที่ 1

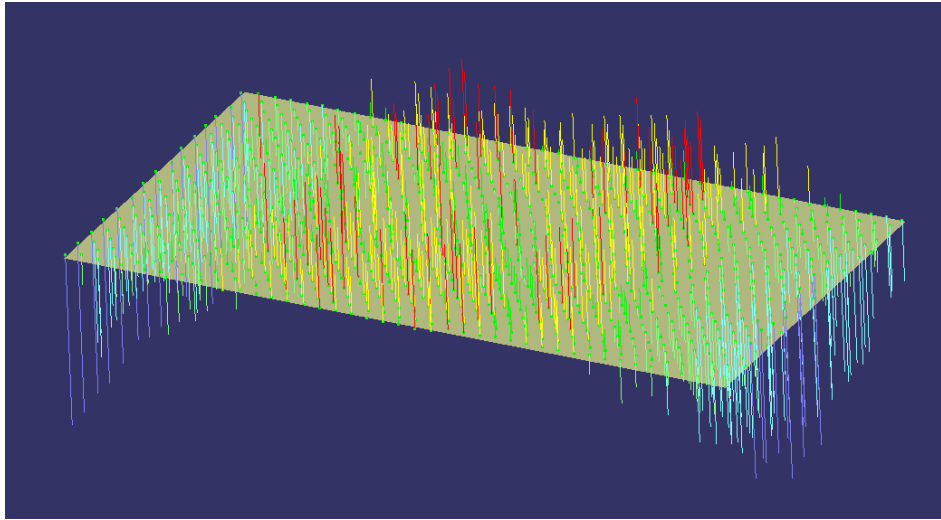
### : การหาค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดที่ได้จากการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ

การทดลองนี้เป็นการหาค่าความผิดพลาด ของกลุ่มจุดที่ได้จากการวัดจากเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบภาพสเตอริโอร่วมกับแถบแสงเลเซอร์ โดยทำการวัดพิกัดของ ชิ้นงานลักษณะเป็นระนาบ ดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ชิ้นงานลักษณะระนาบ

นำกลุ่มพิกัดจุดที่วัดได้นำมาสร้างพื้นผิวระนาบด้วยโปรแกรม CATIA ค่าความผิดพลาด คือ ระยะห่างระหว่างพิกัดจุดที่วัดได้กับพื้นผิวระนาบภายในแนวพิกัดฉาก ทำการเปรียบเทียบระยะห่างของแต่ละจุดกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นจะพบว่าค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 0.2408 มิลลิเมตร และเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.3 มิลลิเมตร และค่าความผิดพลาดมากที่สุดเท่ากับ 0.8962 มิลลิเมตร

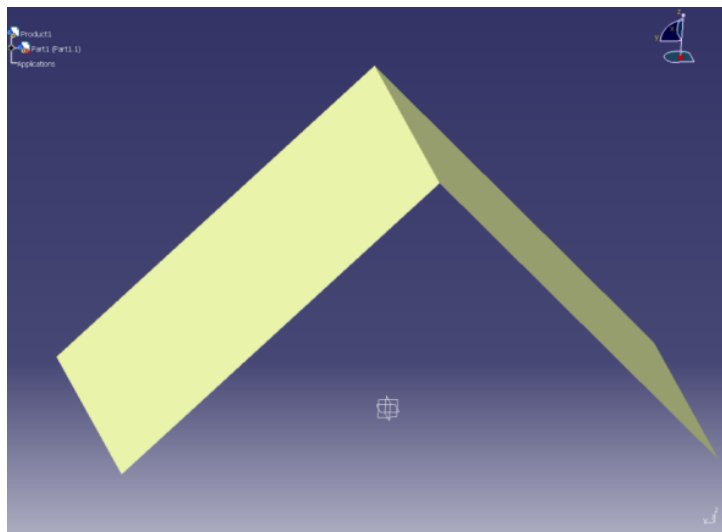


รูปที่ 6.3 การหาค่าความผิดพลาดของการวัดเทียบกับพื้นผิวระนาบ

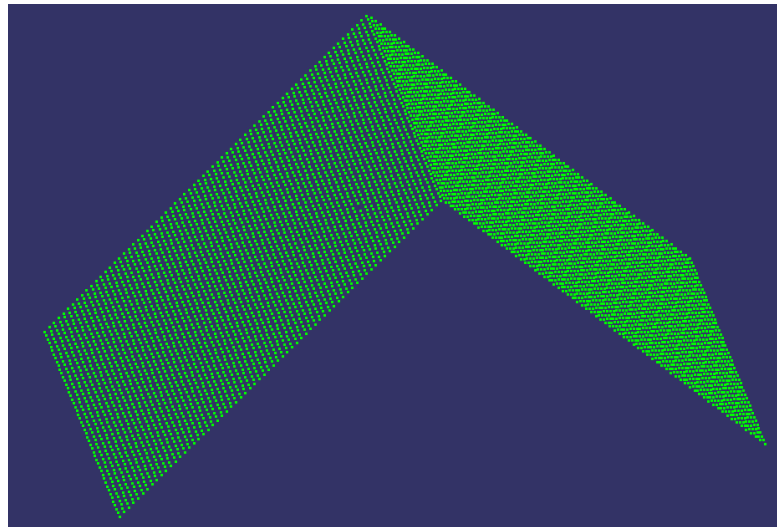
### 6.3 การทดลองที่ 2

: การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดจำลองการวัดกับกลุ่มจุดจำลองการวัดหลังใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

สร้างแบบจำลองของพื้นผิวรูปสามเหลี่ยมจากโปรแกรม CATIA ดังรูปที่ 6.4 สร้างกลุ่มจุดจำลองการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบวัดตามแนวระนาบที่กำหนด ระนาบการวัดกำหนดเป็นระนาบ YZ ของพิกัดชิ้นงาน ระนาบการวัดแต่ละระนาบห่างกัน 1 มิลลิเมตรในแนวแกน X ของพิกัดชิ้นงาน กลุ่มจุดภายในแต่ละระนาบการวัดจะมีค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายตัวแบบปกติ ค่าความผิดพลาดจะปรากฏเฉพาะแกน Z ของพิกัดชิ้นงาน กลุ่มจุดที่ได้จากการจำลองเป็นดังรูปที่ 6.5



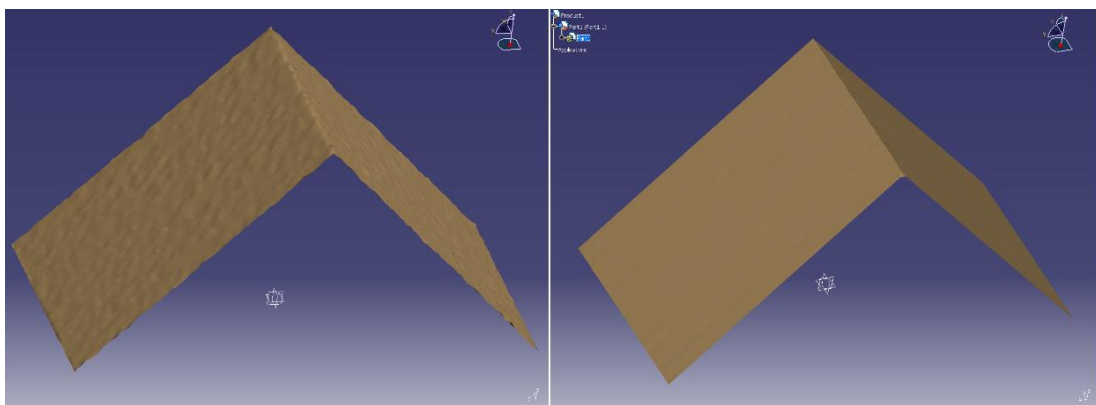
รูปที่ 6.4 แบบจำลองของพื้นผิวรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 6.5 กลุ่มจุดจำลองการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติตามแนวระนาบที่กำหนด

สร้างพื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดจำลองการวัดด้วยโปรแกรม CATIA พื้นผิวที่ได้จะมีความไม่ราบเรียบ และบริเวณขอบมุมแหลมของพื้นผิวรูปสามเหลี่ยมสังเกตเห็นได้ไม่ชัดเจน ซึ่งเกิดจากค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดจำลองการวัด ดังรูปที่ 6.6 (ก)

เมื่อใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มกับกลุ่มจุดจำลองการวัด นำกลุ่มจุดที่ได้ไปสร้างพื้นผิว mesh ด้วยโปรแกรม CATIA พื้นผิวที่ได้จะมีความราบเรียบกว่าพื้นผิวที่สร้างจากกลุ่มจุดจำลองการวัดโดยตรง และ ขอบมุมแหลมของพื้นผิวสามเหลี่ยมสามารถสังเกตเห็นได้ชัดเจน ดังรูปที่ 6.6 (ข)



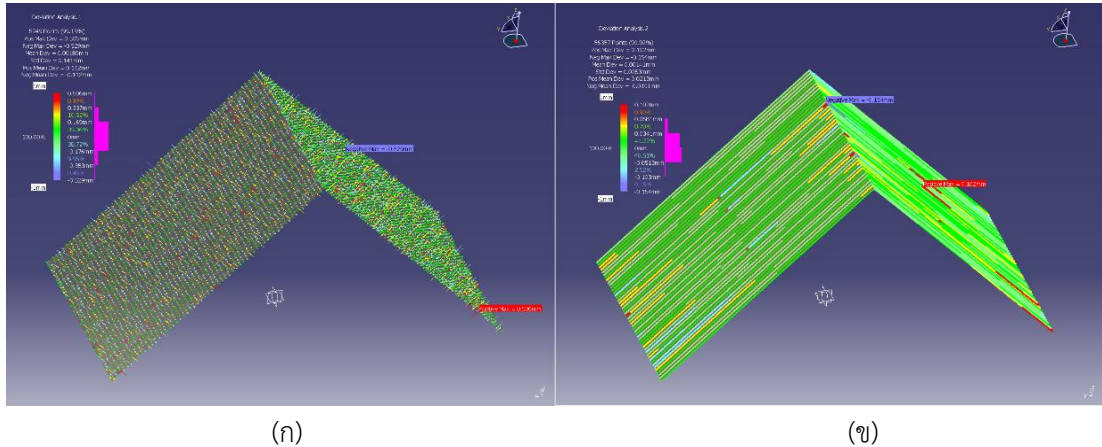
(ก)

(ข)

รูปที่ 6.6 การใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดกับกลุ่มจุดที่ได้จากการจำลอง

จากรูปที่ 6.7 (ก) แสดงการหาค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดการจำลองมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.141 มิลลิเมตรและค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 0.529 มิลลิเมตร รูปที่ 6.7 (ข) แสดงการหาค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดที่ได้จากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

0.0263 มิลลิเมตรและค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 0.154 มิลลิเมตร กลุ่มจุดที่ได้จากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดจะมีค่าความผิดพลาดลดลงเมื่อเทียบกับค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดจำลอง



รูปที่ 6.7 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดจำลองกับกลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

#### 6.4 การทดลองที่ 3

: การใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุดกับจุดที่ได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติ

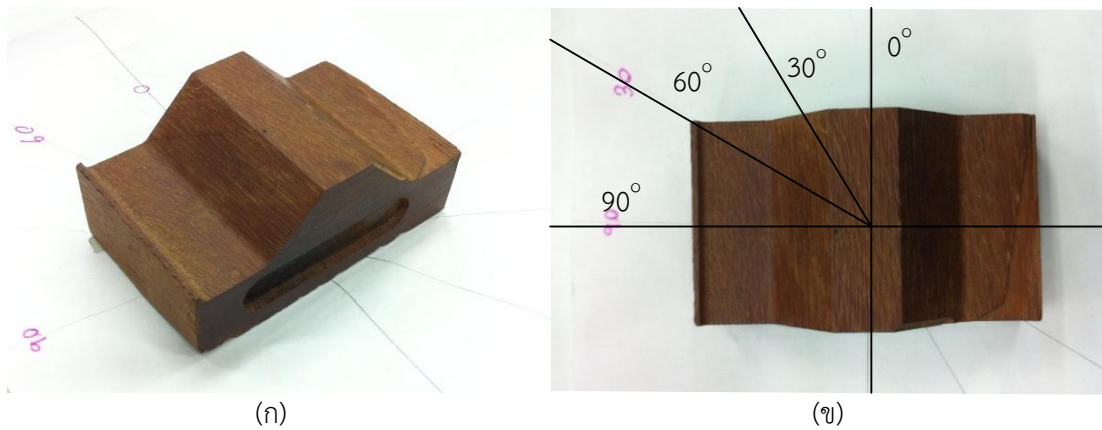
การทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบพื้นผิว mesh ที่สร้างจากกลุ่มจุดที่ได้จากเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบสเตอริโอร่วมกับแถบเลเซอร์ กับ พื้นผิว mesh ที่สร้างจากกลุ่มจุดที่ได้จากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด โดยความละเอียดของกลุ่มจุดที่ได้จากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดภายในแต่ละระนาบการวัดจะมีค่า 0.01 มิลลิเมตร

ชิ้นงานที่นำมาทดลองจะมี 3 ลักษณะคือ ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู ชิ้นงานรูปร่างพีระมิดหัวตัด และ ชิ้นงานรูปร่างพีระมิด ชิ้นงานแต่ละลักษณะจะทำการวัด 4 ครั้ง โดยเปลี่ยนมุมของระนาบการวัดหรือมุมของแนวเส้นเลเซอร์ที่ 0, 30, 60, 90 องศา ดังแสดงในรูปที่ 6.8 (ข) จากนั้นจึงนำกลุ่มจุดของการวัด และกลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดมาสร้างพื้นผิว mesh ด้วยโปรแกรม CATIA เปรียบพื้นผิว mesh ทั้งสองจากลักษณะภายนอก

##### 6.4.1 ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู

ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู วัสดุทำจากไม้ มุมเอียงบนผิวชิ้นงานประมาณ 40 องศา กับแนวระดับ ขนาดของชิ้นงานโดยประมาณ กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 65 × 110 × 50 มิลลิเมตร

กลุ่มจุดและพื้นผิว mesh จากแนวระนาบการวัดที่ 0, 30, 60, 90 องศา เป็นดังรูปที่ 6.11 ถึงรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.8 ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู

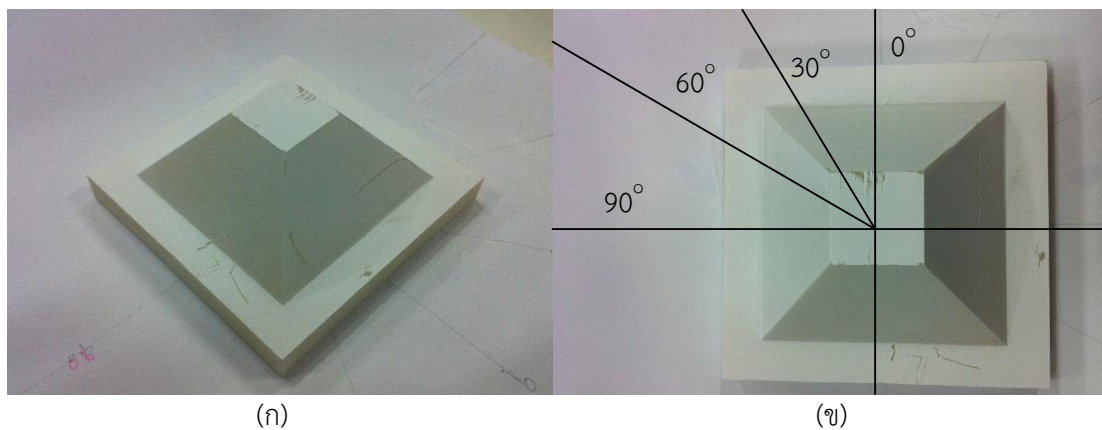
(ก) ลักษณะพื้นผิวของชิ้นงาน

(ข) มุมของระนาบการวัด ณ องศาต่างๆ

#### 6.4.2 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิดหัวตัด

ชิ้นงานรูปร่างพีระมิดหัวตัด วัสดุทำจากวัสดุเลียนแบบพลาสติก ABS ขนาดของชิ้นงานโดยประมาณ กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 80 × 80 × 40 มิลลิเมตร

กลุ่มจุดและพื้นผิว mesh จากแนวระนาบการวัดที่ 0, 30, 60, 90 องศา เป็นดังรูปที่ 6.13 ถึงรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.9 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิดหัวตัด

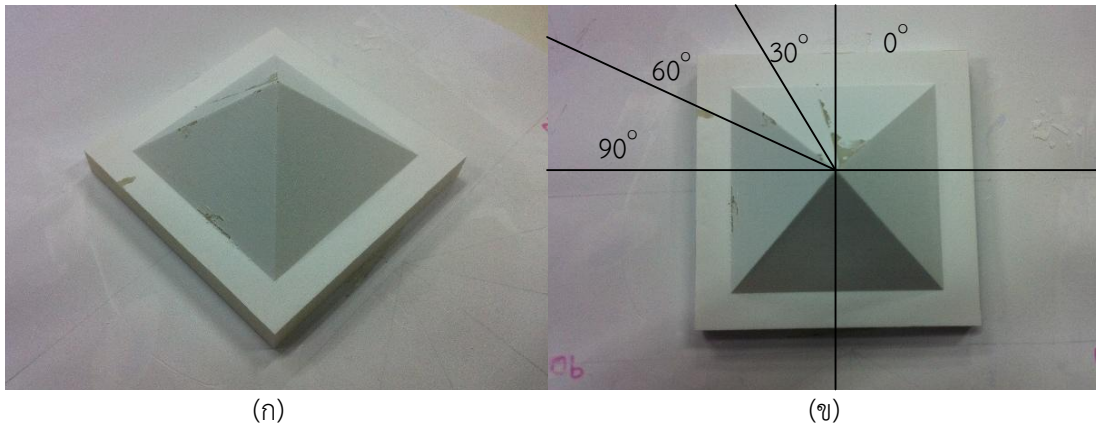
(ก) ลักษณะภายในพื้นผิวของชิ้นงาน

(ข) มุมของระนาบการวัด ณ องศาต่างๆ

### 6.4.3 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิด

ชิ้นงานรูปร่างพีระมิด วัสดุทำจากวัสดุเลียนแบบพลาสติก ABS ขนาดของชิ้นงาน โดยประมาณ กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 80 × 80 × 40 มิลลิเมตร

กลุ่มจุดและพื้นผิว mesh จากแนวระนาบการวัดที่ 0, 30, 60, 90 องศา เป็นดังรูปที่ 6.16 ถึงรูปที่ 6.19



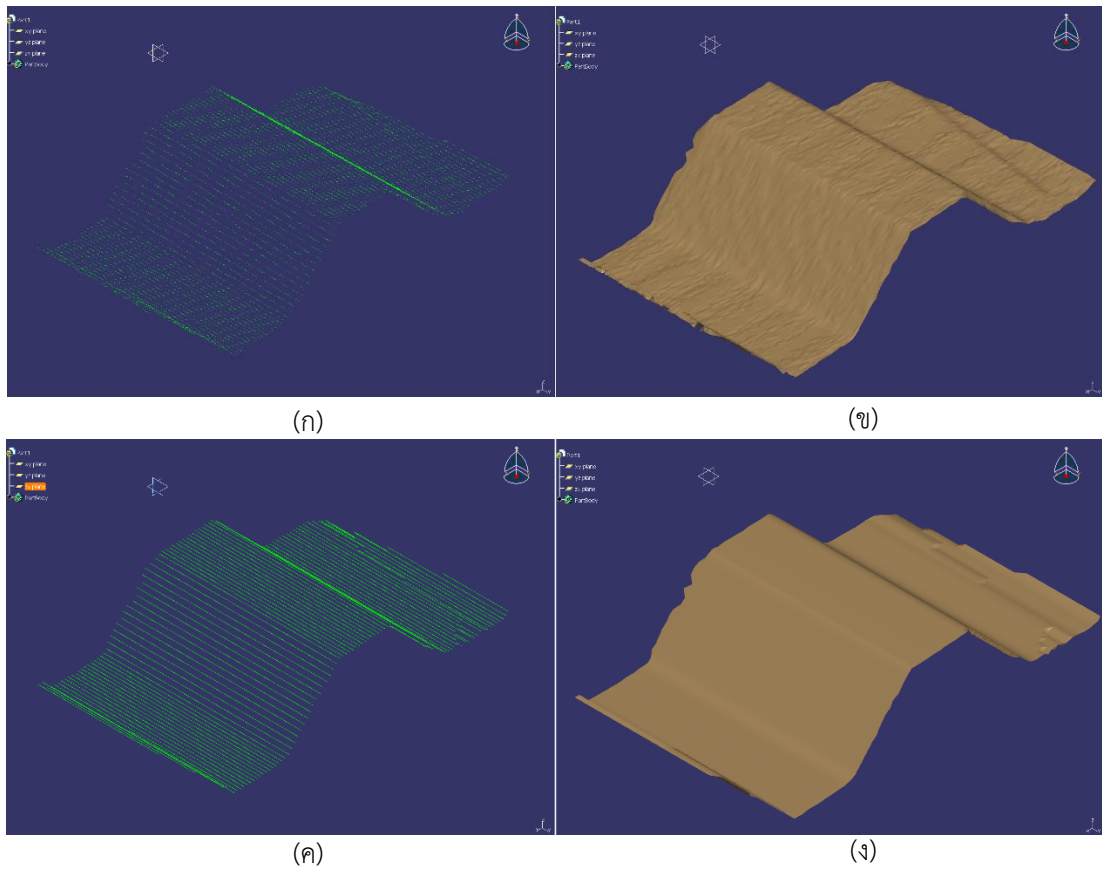
(ก)

(ข)

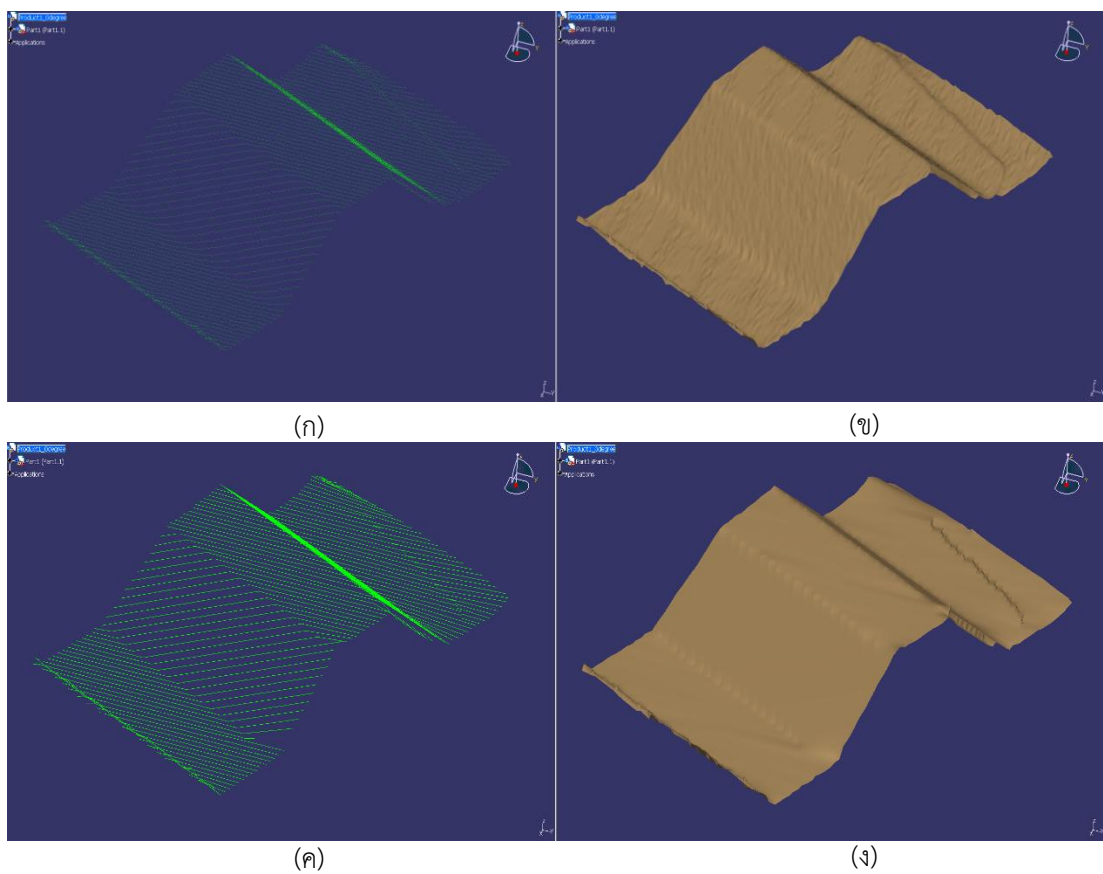
รูปที่ 6.10 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิด

(ก) ลักษณะภายในพื้นผิวของชิ้นงาน

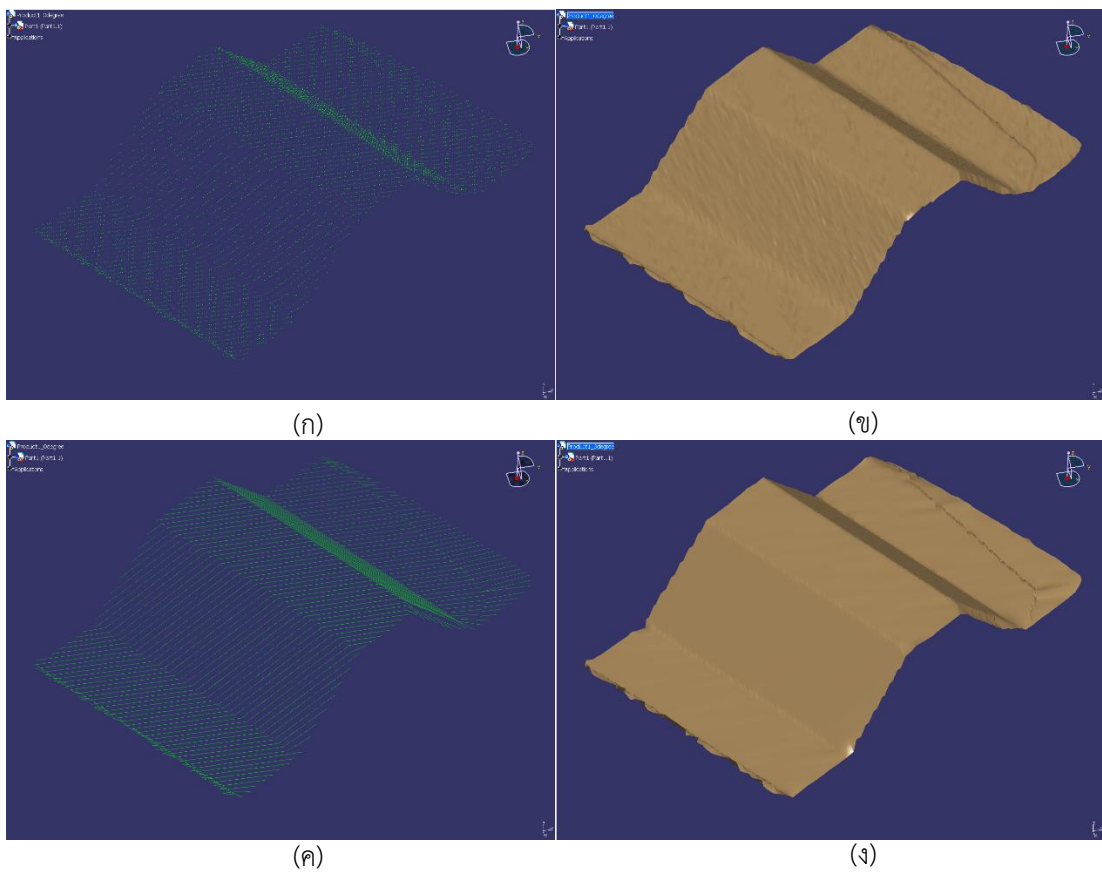
(ข) มุมของระนาบการวัด ณ องศาต่างๆ



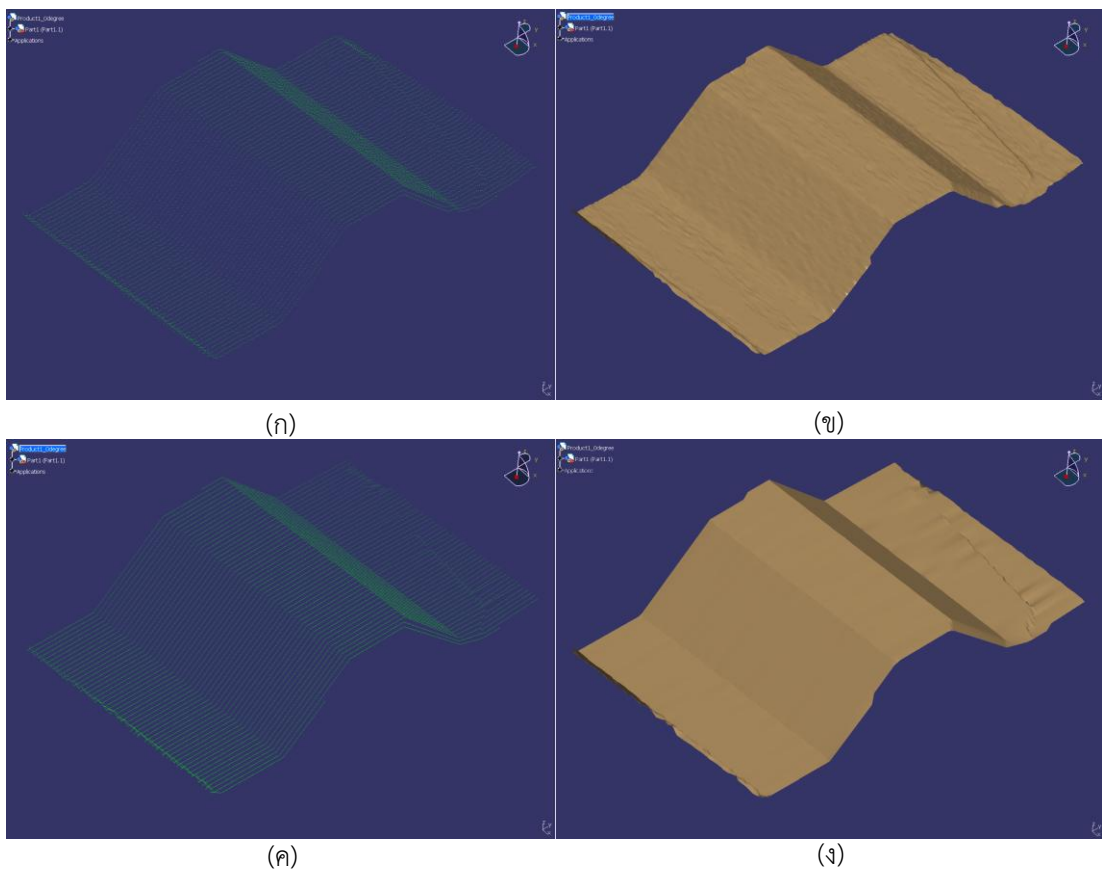
- รูปที่ 6.11 ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู แนวระนาบการวัดที่ 0 องศา
- (ก) กลุ่มจุดจากการวัด
- (ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด
- (ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด
- (ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



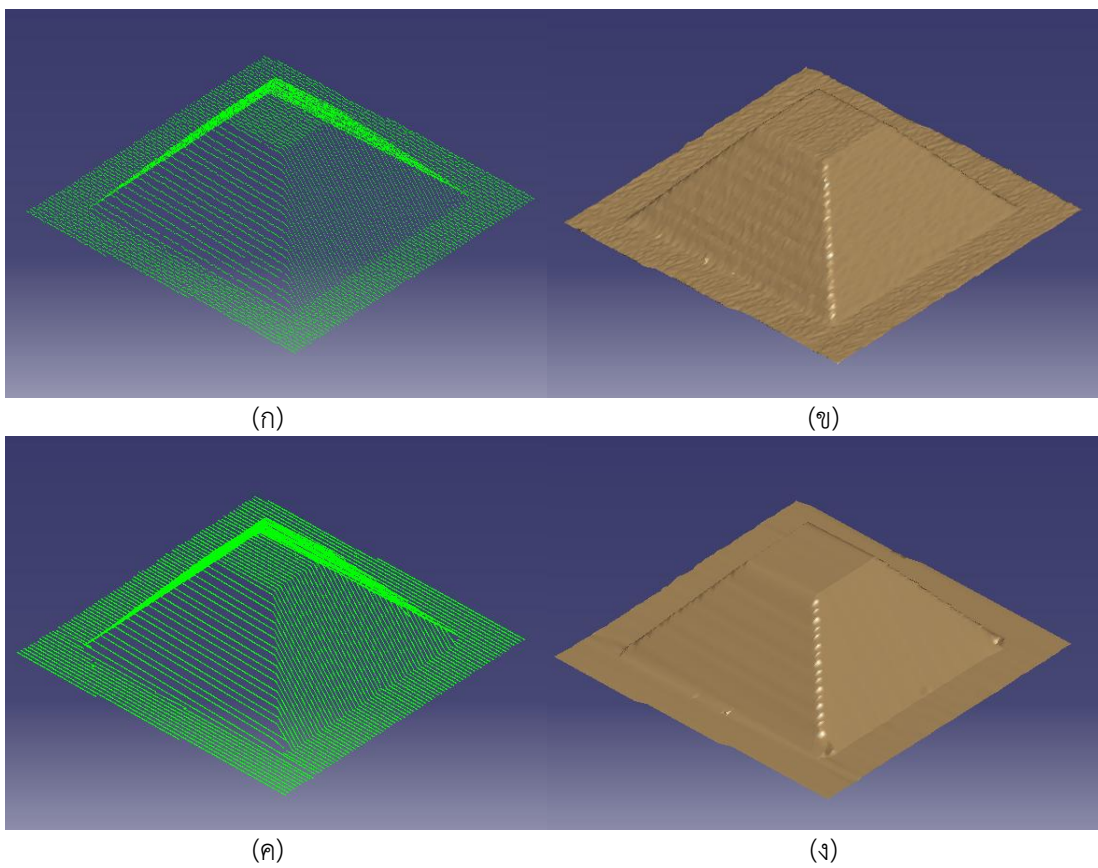
รูปที่ 6.12 ชั้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู แนวระนาบการวัดที่ 30 องศา  
 (ก) กลุ่มจุดจากการวัด  
 (ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



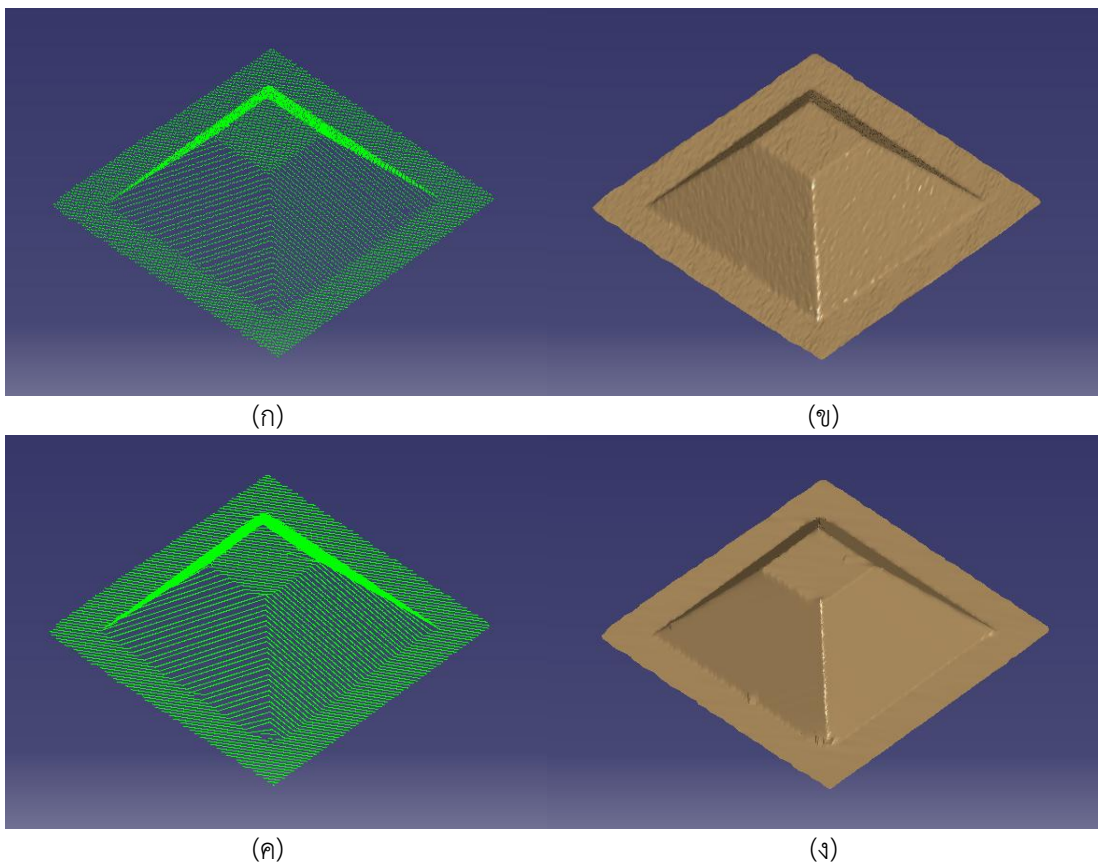
รูปที่ 6.13 ชิ้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู แนวระนาบการวัดที่ 60 องศา  
 (ก) กลุ่มจุดจากการวัด  
 (ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



รูปที่ 6.14 ชี้นงานรูปร่างสี่เหลี่ยมคางหมู แนวระนาบการวัดที่ 90 องศา  
 (ก) กลุ่มจุดจากการวัด  
 (ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



รูปที่ 6.15 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิดหัวตัด แนวระนาบการวัดที่ 0 องศา  
 (ก) กลุ่มจุดจากการวัด  
 (ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



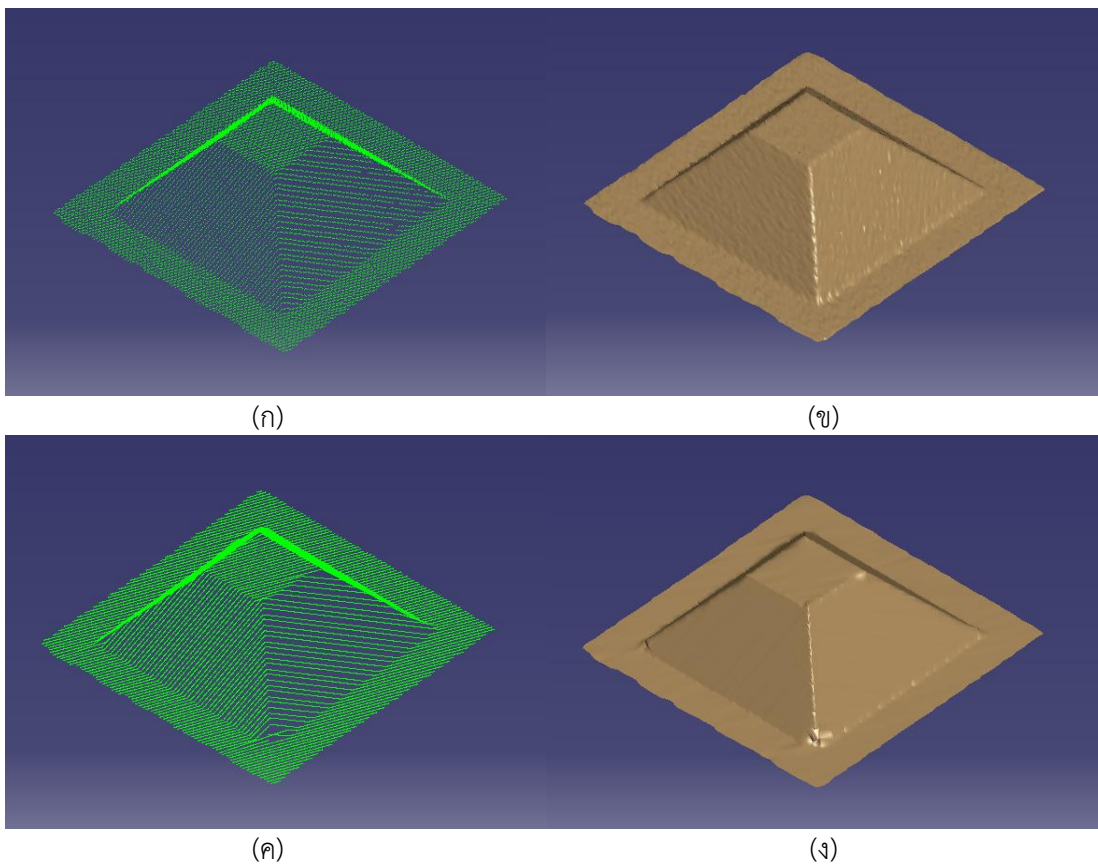
รูปที่ 6.16 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิดหัวตัด แนวระนาบการวัดที่ 30 องศา

(ก) กลุ่มจุดจากการวัด

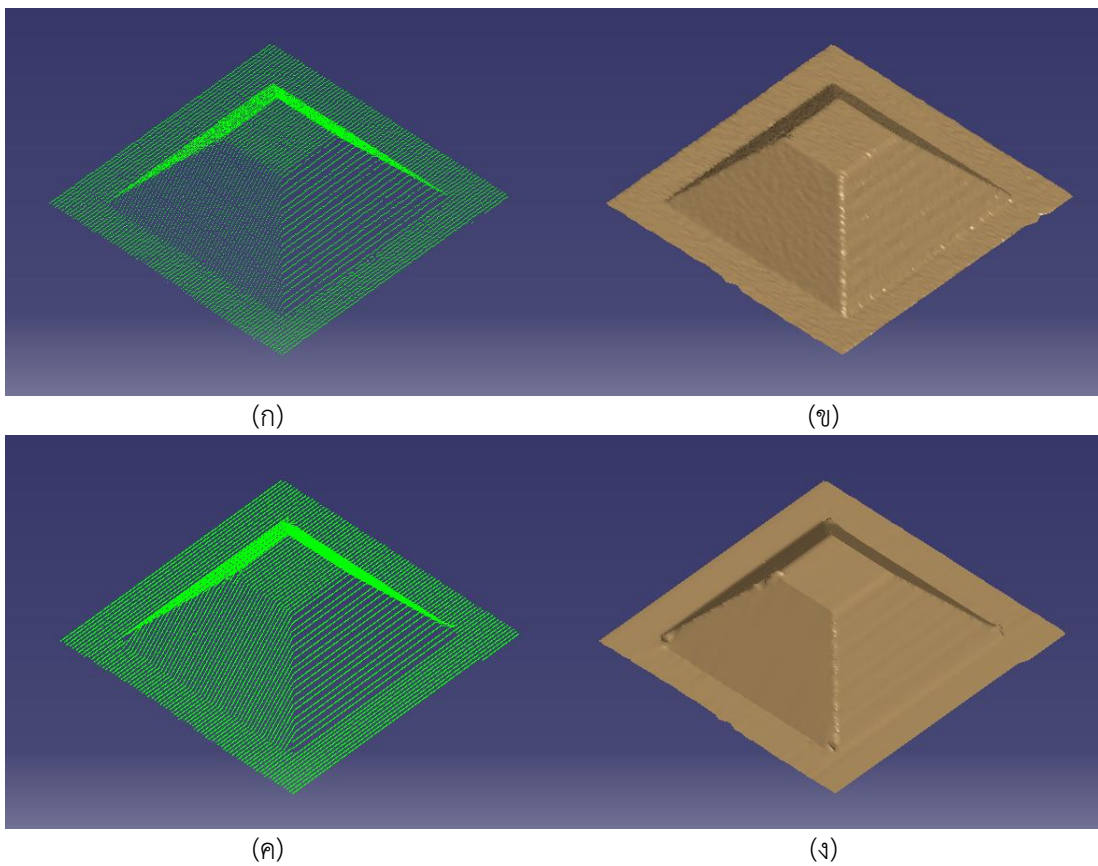
(ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

(ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

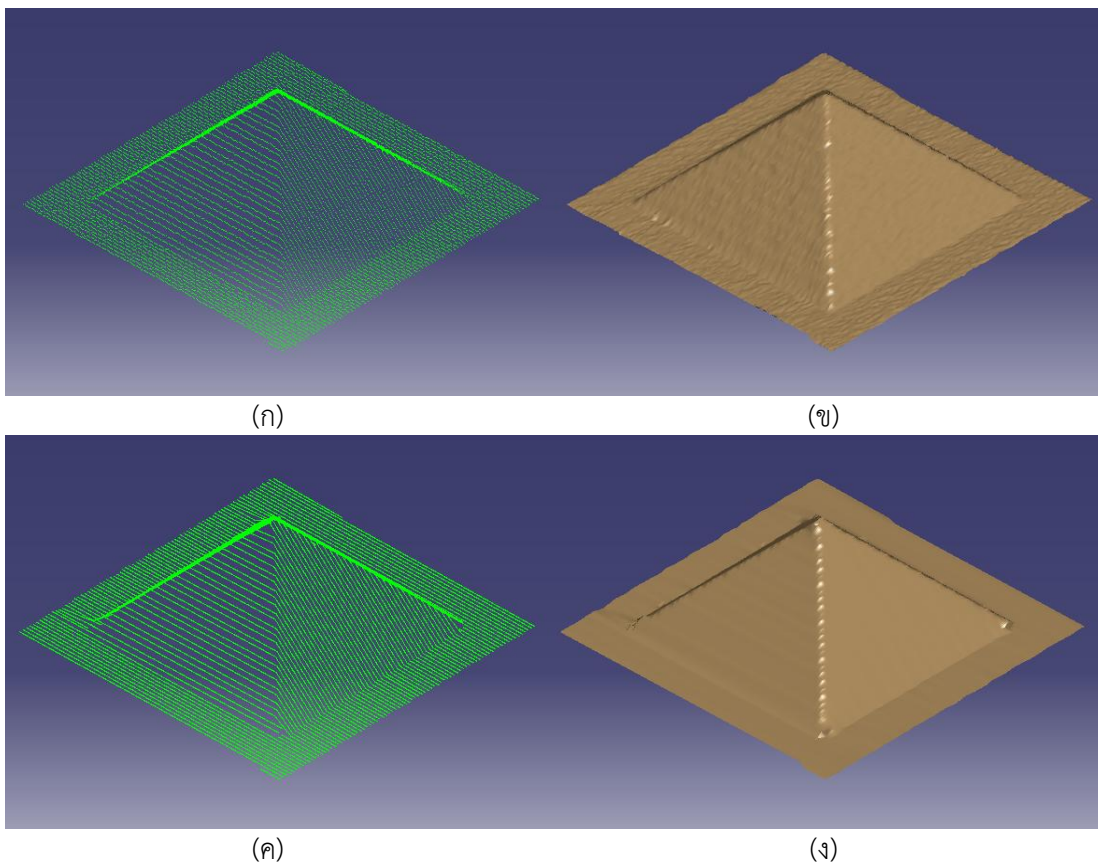
(ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



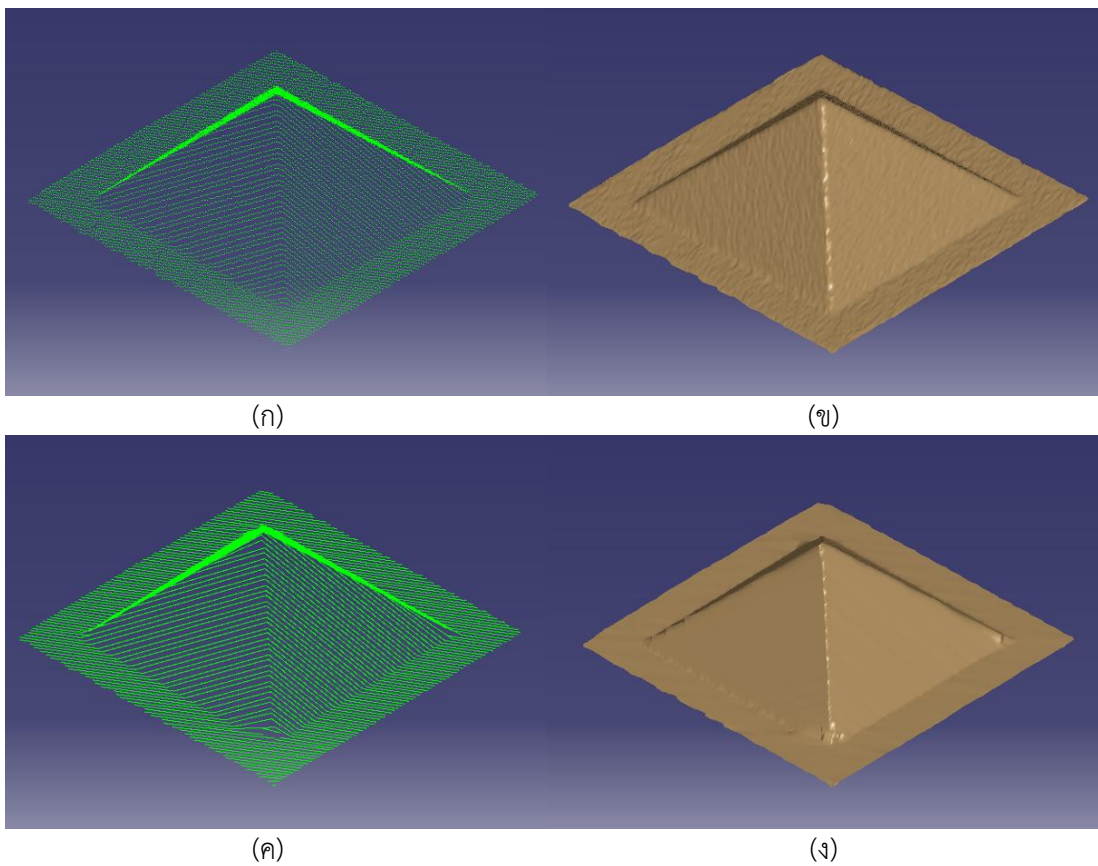
รูปที่ 6.17 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิดหัวตัด แนวระนาบการวัดที่ 60 องศา  
 (ก) กลุ่มจุดจากการวัด  
 (ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



รูปที่ 6.18 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิดหัวตัด แนวระนาบการวัดที่ 90 องศา  
 (ก) กลุ่มจุดจากการวัด  
 (ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



รูปที่ 6.19 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิต แนวระนาบการวัดที่ 0 องศา  
 (ก) กลุ่มจุดจากการวัด  
 (ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



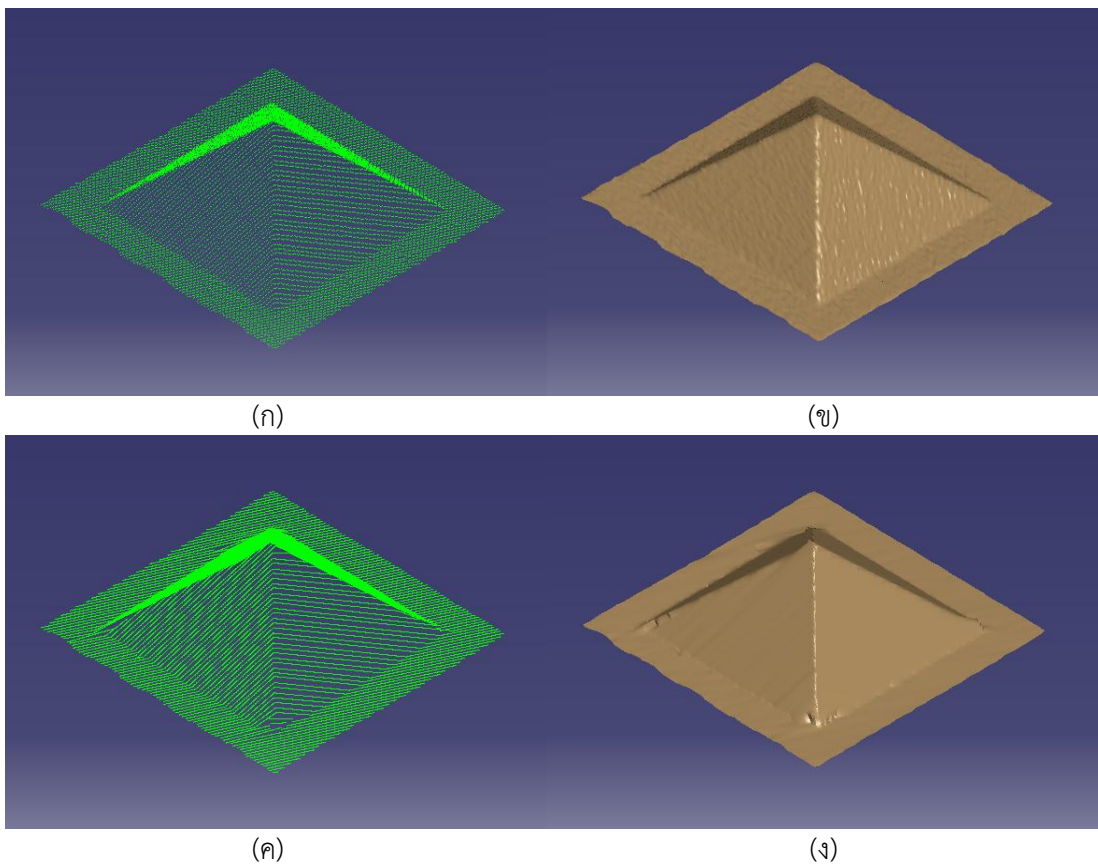
รูปที่ 6.20 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิด แนวระนาบการวัดที่ 30 องศา

(ก) กลุ่มจุดจากการวัด

(ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

(ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

(ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



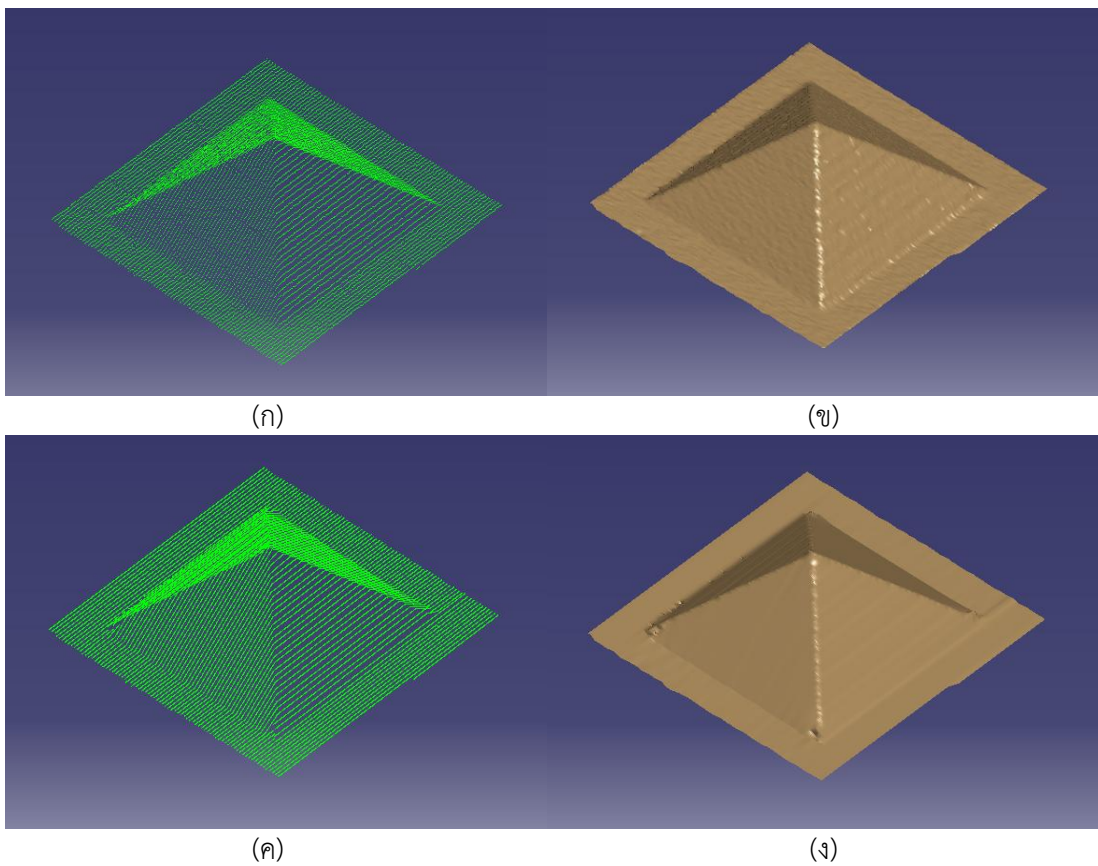
รูปที่ 6.21 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิด แนวระนาบการวัดที่ 60 องศา

(ก) กลุ่มจุดจากการวัด

(ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

(ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

(ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด



รูปที่ 6.22 ชิ้นงานรูปร่างพีระมิด แนวระนาบการวัดที่ 90 องศา  
 (ก) กลุ่มจุดจากการวัด  
 (ข) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ไม่ได้ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ค) กลุ่มจุดจากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด  
 (ง) พื้นผิว mesh จากกลุ่มจุดการวัดที่ใช้เทคนิคการประมาณกลุ่มจุด

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นพัฒนาเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดเพื่อปรับปรุงศักยภาพในการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติแบบวัดตามแนวระนาบการวัดที่กำหนด เนื่องจากกลุ่มจุดจากการวัดไม่สามารถแสดงรายละเอียดบริเวณขอบมุมของชิ้นงานได้ชัดเจนเนื่องจากความละเอียดของกลุ่มจุดจากการวัดและความผิดพลาดของการวัดเนื่องจากสัญญาณรบกวน ความละเอียดของกลุ่มจุดจากการวัดภายในวิทยานิพนธ์นี้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของกล้องที่ใช้ในการถ่ายภาพ โดยจำนวนจุดที่ได้จากการวัดจะขึ้นอยู่กับจำนวนพิกเซลของกล้อง

การใช้เทคนิคประมาณกลุ่มจุดสามารถลดค่าความผิดพลาดของกลุ่มจุดที่ได้จากการวัดของเครื่องวัดพิกัดสามมิติ เนื่องจากกลุ่มจุดที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัดจะมีสัญญาณรบกวนซึ่งมีอยู่ตามปกติทั่วไปของเครื่องมือวัด ซึ่งเราสมมติให้ค่าความผิดพลาดนี้มีการกระจายตัวปกติและค่าความผิดพลาดปรากฏแต่เฉพาะแกน Z ของชิ้นงานซึ่งอยู่ภายในระนาบการวัด YZ เราสามารถประมาณรูปร่างของชิ้นงานด้วยเส้นโพลีโนเมียลจากวิธีค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุดได้ วิธีนี้จะลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนภายในเครื่องวัดพิกัดสามมิติ เส้นโพลีโนเมียลที่ได้เป็นเส้นที่ประมาณรูปร่างหน้าตัดชิ้นงานภายในระนาบการวัดที่กำหนด

เส้นโพลีโนเมียลที่ประมาณรูปร่างหน้าตัดชิ้นงานสามารถนำมาแบ่งเป็นจุดอีกครั้งเป็นกลุ่มจุดหนาแน่นเพื่อเพิ่มรายละเอียดของกลุ่มจุดที่ได้จากการวัด เนื่องจากจำนวนจุดภายในระนาบการวัดที่ได้จากเครื่องวัดพิกัดจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของกล้องซึ่งอาจไม่เพียงพอสำหรับการแสดงรายละเอียดของชิ้นงาน หรือจุดที่ได้จากการวัดมีการขาดหายไปบางส่วน วิธีการนี้ช่วยเพิ่มจุดส่วนที่ขาดหายและเพิ่มความละเอียดของกลุ่มจุด

เมื่อนำจุดจากการวัดมาสร้างพื้นผิว mesh ด้วยโปรแกรม CATIA จะสังเกตเห็นว่าพื้นผิวมีความไม่ราบเรียบและขอบมุมแหลมของชิ้นงานไม่ชัดเจน เนื่องจากพิกัดจุดมีค่าความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนและความละเอียดของกลุ่มจุดไม่เพียงพอ แต่พื้นผิว mesh ที่สร้างจากกลุ่มจุดที่ได้จากเทคนิคการประมาณกลุ่มจุด จะมีความราบเรียบมากกว่าและบริเวณขอบมุมแหลมชัดเจนมากกว่า

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

การคำนวณรูปร่างของชิ้นงานภายในระนาบการวัดอาจมีความผิดพลาดเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของกลุ่มจุดจากการวัด เช่นกลุ่มจุดภายในระนาบการวัดขาดหายไปบางส่วน อาจใช้กลุ่มจุดในระนาบการวัดข้างเคียงในการคำนวณเนื่องจากรูปร่างหน้าตัดภายในระนาบการวัดข้างเคียงมักจะมีรูปร่างคล้ายกัน

เราไม่สามารถเพิ่มรายละเอียดระหว่างระนาบการวัดได้เนื่องจากการคำนวณของเทคนิคการประมาณกลุ่มจุดเป็นการคำนวณภายในระนาบการวัดสองมิติ ดังนั้นการเพิ่มรายละเอียดระหว่างระนาบการวัดจะต้องใช้การคำนวณภายในสามมิติ โดยการประมาณกลุ่มจุดจากการวัดด้วยพื้นผิวพาราเมตริก พื้นผิวพาราเมตริกสามารถแบ่งเป็นกลุ่มจุดที่มีความละเอียดมากขึ้นและสามารถเพิ่มรายละเอียดระหว่างระนาบการวัดได้ บริเวณขอบมุมของชิ้นงานจะเป็นส่วนที่ตัดกันของพื้นผิวย่อยพาราเมตริกที่

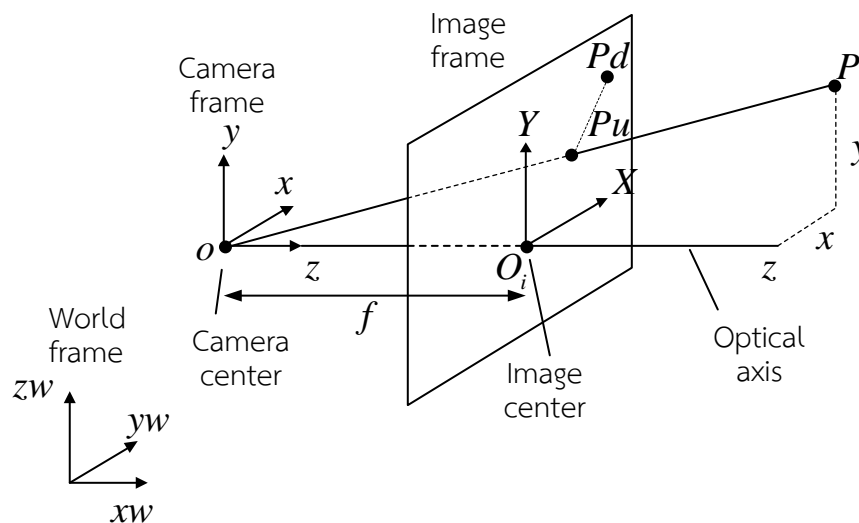
ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### แบบจำลองของกล้องและการแปลงพิกัด

#### ก.1 แบบจำลองของกล้องและการแปลงพิกัด

แบบจำลองของกล้อง หรือ camera model เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดของภาพ (pixel) และ ตำแหน่งของวัตถุภายในพิกัดสามมิติ ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นสมการแสดงการเชื่อมโยงระหว่างการแปลงพิกัดในระบบพิกัดต่างๆ



รูปที่ ก.1 แบบจำลองกล้อง

จากรูปที่ ก.1 มีระบบพิกัดที่เกี่ยวข้อง 5 ระบบพิกัดดังนี้

- 1.) ระบบพิกัดสามมิติ (3D world coordinate system) โดย  $(x_w, y_w, z_w)$  เป็นพิกัดสามมิติของจุดบนวัตถุ  $P$
- 2.) ระบบพิกัดกล้องสามมิติ (3D camera coordinate system) โดย  $(x, y, z)$  เป็นพิกัดสามมิติของจุดบนวัตถุ  $P$  ซึ่งมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดกึ่งกลางเลนส์  $O$  และทิศทางของแกน  $z$  อยู่ในแนวเดียวกับแกนการมองของกล้อง
- 3.) ระบบพิกัดภาพ (image plane coordinate system) โดย  $(X_u, Y_u)$  เป็นพิกัดของจุด  $P_u$  ซึ่งมีจุดกำเนิดอยู่ที่  $O_i$  โดย  $f$  เป็นระยะห่างระหว่างระนาบภาพกับจุดกึ่งกลางเลนส์
- 4.) ระบบพิกัดภาพที่แท้จริง โดย  $(X_d, Y_d)$  เป็นพิกัดของจุด  $P_d$  ที่แตกต่างจากค่าพิกัดของจุด  $P_u$  เนื่องจากความบิดเบือนของเลนส์
- 5.) ระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ โดย ค่าพิกัด  $(X_f, Y_f)$  บอกตำแหน่งจุดภาพ (pixel)

ขั้นตอนการแปลงพิกัดโลกของวัตถุไปยังระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ แบ่งเป็น 4 ขั้นตอน

### ขั้นตอนที่ 1

เปลี่ยนระบบพิกัดโลกของวัตถุ  $(x_w, y_w, z_w)$  ไปยังระบบพิกัดกล้อง  $(x, y, z)$  จากสมการ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + T \quad (\text{ก.1})$$

โดยที่  $R$  เป็น  $3 \times 3$  Rotation matrix

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (\text{ก.2})$$

และ  $T$  เป็น Translation vector

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (\text{ก.3})$$

### ขั้นตอนที่ 2

แปลงระบบพิกัดกล้องเป็นระบบพิกัดภาพอุดมคติ (Ideal image plane)  $X_u, Y_u$  โดยใช้ perspective projection จะได้

$$\begin{aligned} X_u &= f \frac{x}{z} \\ Y_u &= f \frac{y}{z} \end{aligned} \quad (\text{ก.4})$$

### ขั้นตอนที่ 3

การจำลองการบิดเบือนของภาพเนื่องจากระบบเลนส์ (Radial lens distortion) มีสมการดังนี้

$$\begin{aligned} X_d + D_x &= X_u \\ Y_d + D_y &= Y_u \end{aligned} \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่  $(X_d, Y_d)$  เป็นค่าพิกัดบนระนาบภาพที่แท้จริง (Actual image plane coordinate) และ

$$\begin{aligned} D_x &= X_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \\ D_y &= Y_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \\ r &= \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \end{aligned} \quad (ก.6)$$

#### ขั้นตอนที่ 4

การแปลงพิกัดในระบบภาพที่แท้จริง ไปยังระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์

$$\begin{aligned} X_f &= s_x d'_x{}^{-1} X_d + C_x \\ Y_f &= d_y^{-1} Y_d + C_y \end{aligned} \quad (ก.7)$$

โดยที่

$(X_f, Y_f)$  เป็นตำแหน่งของแถวและหลักในจุดภาพ (Pixel) ในคอมพิวเตอร์

$(C_x, C_y)$  เป็นตำแหน่งแถวและหลักของจุดกึ่งกลางภาพในคอมพิวเตอร์

$s_x$  เป็นความไม่แน่นอนของสัญญาณในระบบการรับข้อมูลภาพ

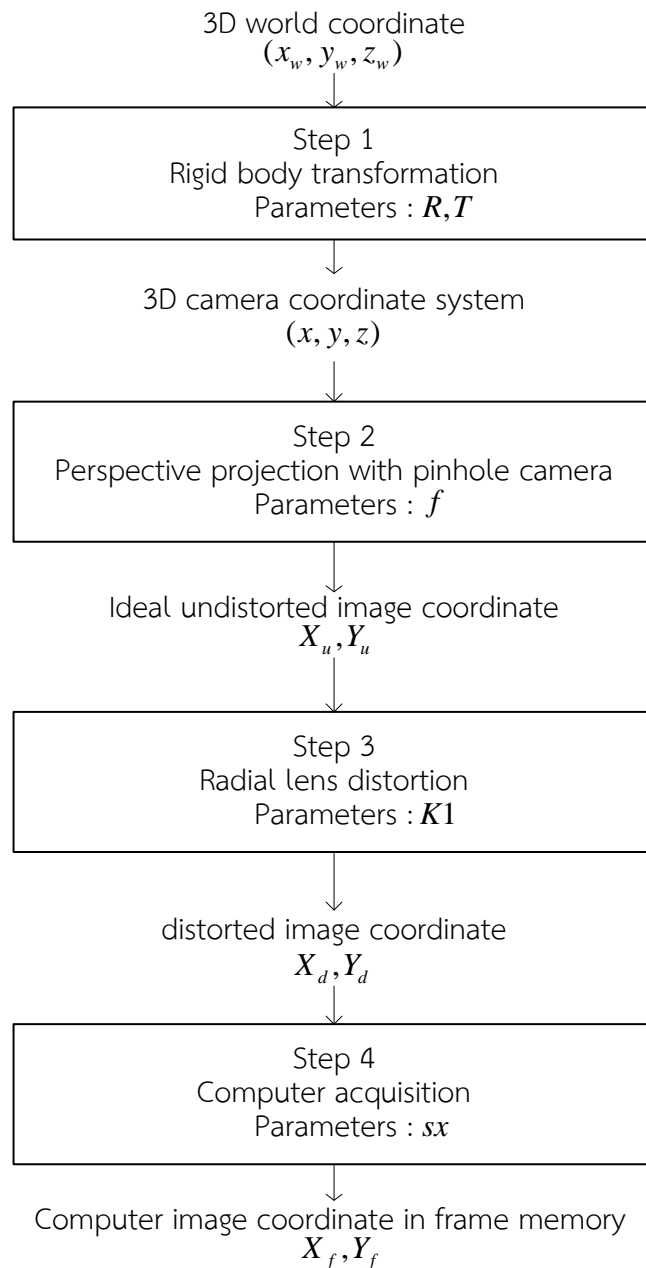
$$d'_x = \frac{d_x N_{cx}}{N_{fx}} \quad (ก.8)$$

$d_x$  เป็นระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของ CCD element ที่อยู่ติดกันในแนวแกน X

$d_y$  เป็นระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของ CCD element ที่อยู่ติดกันในแนวแกน Y

$N_{cx}$  เป็นจำนวนของ CCD elements ในแนวแกน X

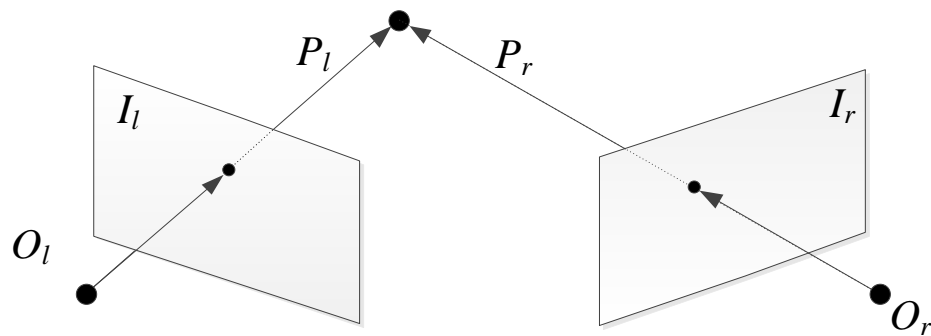
$N_{fx}$  เป็นจำนวนของจุดภาพหรือพิกเซลในแนวแกน X



รูปที่ ก.2 ขั้นตอนการแปลงพิกัดจากระบบพิกัดโลกสามมิติไปยังระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์

## ก.2 การแปลงพิกัดระหว่างกล้อง

ระบบสเตอริโอเป็นระบบที่ใช้กล้องสองตัว โดยกล้องแต่ละตัวจะมีระบบพิกัดกล้อง (Camera Coordinate) เป็นของตัวเอง แต่ในการคำนวณพิกัดจะใช้ระบบพิกัดที่อ้างอิงทั้งระบบ เรียกว่า ระบบพิกัดสเตอริโอ (Stereo coordinate system) โดยทั่วไปจะใช้ระบบกล้องตัวซ้าย ในการอ้างอิงพิกัดก่อนแปลงเป็นระบบพิกัดโลก



รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ในระบบพิกัดระหว่างกล้อง

ความสัมพันธ์ระหว่างกล้องซ้ายและขวาเป็นดังสมการ

$$\begin{aligned} R &= R_l R_r^T \\ T &= T_l - R T_r \end{aligned} \quad (\text{ก.9})$$

เมทริกซ์  $R, T$  หาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} R &= R_l R_r^T \\ T &= T_l - R T_r \end{aligned} \quad (\text{ก.10})$$

เมทริกซ์  $R_r, T_r, R_l$  และ  $T_l$  ได้มาจากการสอบเทียบกล้องซ้ายและขวา

## รายการอ้างอิง

- [1] Fleishman, S., Cohen-Or, D., and Silva, C., Robust Moving Least-squares fitting with Sharp Features, The 32<sup>nd</sup> International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2005.
- [2] Anthony, C., Atkinson, Marco, R., and Andrea, C., The forward search: Theory and data analysis. Journal of the Korean Statistical Society, 39, 117-134, 2010
- [3] Woosung, Y., Yutaka, T., and Jun, N., Forward Search Algorithm for Robust Influence Analysis in Maximum Likelihood Factor Analysis, International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.6, No.7A, July 2006.
- [4] พงศกรบำรุงไทย, เครื่องวัดพิกัด 3 มิติโดยใช้ภาพสเตอริโอ, การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19, 2548.
- [5] Sareen, K., Knopf, K., and Canas, R., Surface Reconstruction from Sliced Point Cloud Data for Designing Facial Prosthesis, IEEE International Conference, Science and Technology for Humanity, Toronto, 2009.
- [6] FenghuaGuo, Reconstructing Curves from Point Clouds, The 2nd International Conference on Materials, Mechatronics and Automation Lecture Notes in Information Technology, Vol.15, 2012.
- [7] Weyrich, T., Pauly M., Keiser, R., Heinzle, S., Scandella, S., and Gross, M., Post-processing of Scanned 3D Surface Data, Eurographic Symposium on Point-Based Graphic, 2004.
- [8] Emanuele, T., and Alessandro, V., Introductory techniques for 3-D computer vision (Prentice Hall, Upper saddle River, New Jersey (07458).
- [9] In-Kwon, L., Curve Reconstruction from unorganized Points, Computer Aided Geometric Design, Volume 17, Issue 2, February 2000, Pages 161–177
- [10] Sung JoonAhn, Least Square Orthogonal Distance Fitting of Curve and Surfaces in Space, (Springer, 2004).
- [11] Reuter, P., Joyot, P., Trunzler, J., and Boubekur, T., Point Set Surfaces with Sharp Features, Technical Report LaBRI , 2005.
- [12] Avron, H., Sharf, A., Greif, C., and Cohen-or, D.,  $l_1$ -sparse Reconstruction of Sharp Point Set Surfaces, ACM Transactions on Graphics, Vol. V, No. N, M 2010.
- [13] Amenta, N., and Kil, Y.J., Defining Point-set Surfaces. ACM Transactions on Graphics, Volume 23 Issue 3, August 2004, 264-270.
- [14] Tsai R.Y., An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, FL, pp. 364-374, 1986.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเอกภพ ศรีจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 24 พฤศจิกายน พ.ศ. 2529 เป็นชาวกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เมื่อปีการศึกษา 2551 และศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2552