

รายงานฉบับสมบูรณ์

เครื่องกราดวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์

3D laser scanner

รหัสโครงการ

SCH-NR-2010-22-06

ชื่อหัวหน้าโครงการ

รศ. ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต

วันที่ 25 กันยายน 2557

รายงานฉบับสมบูรณ์

เครื่องกราดวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์

3D laser scanner

รายนามคณะผู้วิจัย

1. รศ. ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ผศ.ดร. อุดม จันทร์จรัสสุข
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

วันเริ่มต้นโครงการม.ย. พ.ศ. 2554.....

วันสิ้นสุดโครงการม.ย. พ.ศ. 2555.....

(..... / ตรวจสอบเนื้อหาแล้ว)

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ประสานงาน
นักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และสำนักงานพัฒนา
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

ปีงบประมาณที่ได้รับทุน ปีงบประมาณ 2553

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาต้นแบบของเครื่องกราดวัตถุด้วยแสงเลเซอร์ เพื่อสร้างแบบ 3 มิติของวัตถุ โดยออกแบบให้สามารถใช้กับวัตถุที่มีขนาดความยาวไม่เกิน 30 เซนติเมตร ตัวเครื่องประกอบด้วยกล้องถ่ายภาพความละเอียดสูง ชุดกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดเส้น 2 ชุด แท่นหมุนวัตถุ และเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล การทำงานของเครื่องต้นแบบอาศัยหลักการของ Optical Triangulation โดยการวางวัตถุบนแท่นหมุน และทำการถ่ายภาพด้วยการฉายลำแสงเลเซอร์ไปยังผิวของวัตถุจากด้านซ้ายและด้านขวาของกล้องถ่ายภาพ ภาพถ่ายที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อหาโปรไฟล์ของพื้นผิวของวัตถุโดยใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ การสร้างแบบ 3 มิติของวัตถุอาศัยการหมุนวัตถุบนแท่นหมุนเป็นมุม 360 องศาเพื่อให้ได้โปรไฟล์พื้นผิวของวัตถุโดยรอบ และทำการเชื่อมโยงโปรไฟล์พื้นผิวของวัตถุด้วยโครงสร้างลายเส้นสามเหลี่ยม นอกจากนี้ งานวิจัยนี้ยังได้นำเทคนิคการสอบเทียบกล้อง มาใช้เพื่อเพิ่มความแม่นยำของแบบ 3 มิติที่ได้ จากผลการทดสอบกับวัตถุต่างๆ โดยการเปรียบเทียบขนาดของแบบ 3 มิติกับขนาดจริงของวัตถุพบว่า ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 6.2% ในแนวระดับและ 8.1% ในแนวตั้ง

คำสำคัญ: เครื่องกราด 3 มิติ เครื่องกราดด้วยแสงเลเซอร์ โครงสร้างลายเส้นสามเหลี่ยม การประมวลผลภาพ

Abstract

The main objective of this research is to develop a prototype of 3D laser scanner for constructing 3D model of an object. The prototype is designed for scanning object with a maximum of 30 centimeters in length. The scanner consists of a high resolution camera, two laser line emission devices, a turn-table, and a computer. The design is based on the principle of optical triangulation. By placing the object on the turn-table, the images of the object are collected by emitting laser beam from the left and the right of the camera. The profile of the object surface is then constructed by using image processing technique. The surface information of the object is obtained by rotating the object on the turn-table in 360 degree. The 3D model of the object is then reconstructed from the profiles of the object by using triangle mesh. In addition, the camera calibration technique is used to increase the accuracy of the 3D model. From comparing dimensions of the 3D models with physical measurements of the objects, the average errors are 6.2% measured in horizontal and 8.1% measured in vertical.

Key words: 3D Scanner, Laser Scanner, Optical Triangulation, Triangle Mesh, Image Processing.

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.3 การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)	2
1.4 การออกแบบการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย	6
บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	7
2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ	7
2.1.1 แผ่นหมุนวัตถุและชุดขับเคลื่อน	8
2.1.2 การควบคุมการหมุนของมอเตอร์.....	9
2.1.3 ชุดเลเซอร์และกล้องถ่ายภาพ.....	12
2.1.4 ความละเอียดของวัตถุที่วัดได้.....	13
2.2 การถ่ายภาพเพื่อหาพิกัด.....	14
2.3 ภาพถ่ายในระบบดิจิทัล.....	15
2.4 การประมวลผลภาพ (Image Processing).....	16
2.4.1 การตรวจจับเส้น (Line Detection).....	17
2.5 โปรเจกชัน (Projections).....	20
2.5.1 โปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections).....	20
2.5.2 โปรเจกชันแบบเพอร์สเปกทีฟ (Perspective Projections).....	21
2.6 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation).....	22
2.6.1 การเลื่อนภาพ (Translation)	23

2.6.2 การย่อและการขยายภาพ (Scaling).....	24
2.6.3 การหมุนภาพ (Rotation).....	25
2.6.4 การบิดภาพ (Shearing).....	27
2.6.5 การสะท้อนภาพ (Reflection).....	29
2.7 เรขาคณิตสำหรับการเห็นใน 3 มิติ (Geometry for 3D Vision).....	32
2.7.1 การเกิดภาพในกรณีที่พิกัดโลกซ้อนทับพิกัดกล้อง	32
2.7.2 การแปลงจากหน่วยความยาวเป็นพิกเซล (Pixel)	34
2.7.3 กรณีที่พิกัดของโลกไม่ซ้อนทับพิกัดของกล้อง	35
2.7.4 การแปลงภาพจากระนาบ 2 มิติมายังระนาบ 3 มิติ	37
2.8 การปรับเทียบกล้อง (Camera Calibration).....	39
2.9 การปรับเทียบการบิดเบือนของเลนส์ (Lens Distortion Calibration).....	40
2.10 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุ (3D Modeling)	45
2.10.1 การสร้างโครงตาข่าย (Mesh).....	46
2.10.2 โครงตาข่ายรูปหลายเหลี่ยม (Polygon Mesh).....	46
2.10.3 แบบจำลองโครงลวด (Wire Frame Model)	47
2.10.4 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ.....	47
2.11 การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์.....	49
2.11.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม	49
2.11.2 ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphical User Interface, GUI).....	51
บทที่ 3 ผลการวิจัย	53
3.1 ภาพถ่ายจากการสแกน	53
3.2 การประมวลผลภาพ.....	54
3.3 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ	55
3.4 การปรับเทียบกล้อง	56
3.5 การทดลองเพื่อหาค่าความแตกต่างของขนาดระหว่างแบบจำลองกับวัตถุจริง	58

3.6 การทดลองกับวัตถุที่มีรูปทรงต่างๆ	60
3.7 การทดลองอื่นๆ	63
3.7.1 ผลลัพธ์จากการปรับเปลี่ยนแนวในการประมวลผลภาพ	63
3.7.2 ผลลัพธ์จากการปรับเปลี่ยนทิศทางของแสงเลเซอร์	64
3.7.3 สีของวัตถุ.....	65
3.7.4 ตัวกลางของวัตถุ.....	66
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย	68
4.1 สรุปผลการดำเนินการ.....	68
4.2 แนวทางในการพัฒนา	69
บรรณานุกรม	70
ภาคผนวก	73

สารบัญภาพ

รูปที่ 1.1	ภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องกราด 3 มิติแบบ Triangulation	4
รูปที่ 1.2	แสดงตำแหน่งบนผิววัตถุที่เป็นจุดบอด.....	5
รูปที่ 1.3	แสดงระบบของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติที่นำเสนอ.....	6
รูปที่ 2.1	แผงผังแสดงส่วนประกอบของเครื่องต้นแบบ	7
รูปที่ 2.2	โครงสร้างของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์ ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks 2010	8
รูปที่ 2.3	แท่นหมุนวัตถุและระบบขับเคลื่อน	9
รูปที่ 2.4	การควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าของขดลวดมอเตอร์	9
รูปที่ 2.5	รูปแบบสัญญาณควบคุมของสเต็ปมอเตอร์แบบเต็มขั้นหนึ่งเฟส	10
รูปที่ 2.6	รูปแบบสัญญาณควบคุมของสเต็ปมอเตอร์แบบเต็มขั้นสองเฟส	11
รูปที่ 2.7	รูปแบบสัญญาณควบคุมของสเต็ปมอเตอร์แบบครึ่งขั้น	12
รูปที่ 2.8	การวัดในแนวตั้ง	13
รูปที่ 2.9	การวัดในแนวนอน	14
รูปที่ 2.10	หลักการของวิธีการฉายแสงแบบเส้นหรือจุด	15
รูปที่ 2.11	ตัวกรองแบบสามเหลี่ยม (Triangle Filter)	18
รูปที่ 2.12	ตัวกรองแบบเกาส์เซียนขนาด 5x5 โดยใช้ค่า $\sigma=1.0$	18
รูปที่ 2.13	ตัวกรองแบบแลนซ์ซอส (Lanczos Filter)	19
รูปที่ 2.14	ตัวกรองแบบบีสไปไลน์ (B-Spline Filter)	19
รูปที่ 2.15	หลักการของโปรเจกชัน	20
รูปที่ 2.16	โปรเจกชันแบบขนาน	20
รูปที่ 2.17	โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ	21
รูปที่ 2.18	คุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ	21
รูปที่ 2.19	ระบบพิกัด	23
รูปที่ 2.20	การเลื่อนพิกัดของภาพ	24
รูปที่ 2.21	การย่อขนาดของภาพ	25
รูปที่ 2.22	ระบบพิกัด Polar การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้ Vector	26
รูปที่ 2.23	การหมุนภาพ	27
รูปที่ 2.24	การบิดของภาพ	28
รูปที่ 2.25	การสะท้อนตามแกน X	29

รูปที่ 2.26	การสะท้อนตามแกน Y	30
รูปที่ 2.27	การสะท้อนรอบเส้นตรง $Y = X$..	31
รูปที่ 2.28	แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง	32
รูปที่ 2.29	พิกัดบนระนาบของภาพ	34
รูปที่ 2.30	แบบจำลองการสร้างภาพกรณีพิกัดของโลกไม่ซ้อนทับกับพิกัดของกล้อง	36
รูปที่ 2.31	การแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ 2 มิติของกล้อง	37
รูปที่ 2.32	การแปลงภาพของวัตถุจากระนาบ 2 มิติมายังระนาบของกล้องที่เป็นระนาบ 3 มิติ	38
รูปที่ 2.33	การบิดเบือนของภาพ	41
รูปที่ 2.34	ที่มาของการบิดเบือนของภาพ	41
รูปที่ 2.35	ตัวแปร K_3 ที่มีอิทธิพลต่อการบิดเบือนของภาพ	42
รูปที่ 2.36	การตรวจหาจุด p_d บนส่วนเส้นโค้งด้วยตัวตรวจจับเส้นตรง	43
รูปที่ 2.37	การเชื่อมโยงของเส้นตรงบริเวณส่วนโค้ง	44
รูปที่ 2.38	จุด p_d บนเส้นโค้งถูกแมปบนจุด p_u บนเส้นตรงที่เชื่อมโยง Λ_m ซึ่งเป็น ฟังก์ชันของ K_3 , K_5 และจุด p_d	45
รูปที่ 2.39	องค์ประกอบของแบบจำลองโครงตาข่าย	46
รูปที่ 2.40	ตัวอย่างโครงตาข่ายรูปหลายเหลี่ยม	47
รูปที่ 2.41	ตัวอย่างแบบจำลองโครงลวด	47
รูปที่ 2.42	ตัวอย่างไฟล์นามสกุล .ply (ส่วนหัว)	48
รูปที่ 2.43	ตัวอย่างไฟล์นามสกุล .ply (ส่วนตัว)	48
รูปที่ 2.44	ตัวอย่างการเชื่อมต่อจุด	49
รูปที่ 2.45	แผนผังการทำงานของโปรแกรมประมวลผลภาพและการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ	50
รูปที่ 2.46	ส่วนประกอบของโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้	51
รูปที่ 3.1	ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการสแกนของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์	53
รูปที่ 3.2	การตรวจจับเส้นจากภาพถ่าย	54
รูปที่ 3.3	การตรวจจับเส้นในแนวต่างๆ	55
รูปที่ 3.4	แบบจำลอง 3 มิติ	55
รูปที่ 3.5	ตารางหมากฮอสที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบ	56
รูปที่ 3.6	การเปรียบเทียบโดยใช้ภาพตารางหมากฮอส	57
รูปที่ 3.7	ตัวอย่างแบบจำลองก่อนและหลังการเปรียบเทียบ	57
รูปที่ 3.8	ภาพของวัตถุรูปทรงกระบอกที่นำมาทดสอบ	58
รูปที่ 3.9	ผลการสแกนวัตถุที่มีรูปทรงต่างๆ	60
รูปที่ 3.10	แบบจำลองจากการตรวจจับเส้นในแนวต่างๆ	63

รูปที่ 3.11	แบบจำลองจากการเปลี่ยนทิศทางของแสงเลเซอร์	64
รูปที่ 3.12	ผลการทดลองกับวัตถุที่มีสีแตกต่างกัน	65
รูปที่ 3.13	ผลการทดสอบกับวัตถุที่เป็นตัวกลางต่างๆ	66

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 การทำงานของสเต็มมอเตอร์แบบเติมชั้นหนึ่งเฟส	10
ตารางที่ 2.2 การทำงานของสเต็มมอเตอร์แบบเติมชั้นสองเฟส	11
ตารางที่ 2.3 การทำงานของสเต็มมอเตอร์แบบครึ่งชั้น	12
ตารางที่ 3.1 ค่าความแตกต่างของขนาดในแนวระนาบ	59
ตารางที่ 3.2 ค่าความแตกต่างของขนาดในแนวตั้ง	59

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบัน การผลิตชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมต้องอาศัยแบบ 3 มิติของชิ้นส่วนที่ได้รับการออกแบบมา คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (Computer-aided design, CAD) ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในงานออกแบบผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมและในงานออกแบบสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ทำให้การออกแบบสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ในทางกลับกัน การคัดลอกแบบ 3 มิติจากวัตถุหรือชิ้นงานที่มีอยู่แล้วกลับต้องประสบกับปัญหาไม่น้อยเนื่องจากความซับซ้อนของพื้นผิวของวัตถุที่ไม่สามารถวัดขนาดได้อย่างถูกต้องด้วยเครื่องมือวัดทั่วไป ทำให้ต้องใช้เวลาในการเขียนแบบนาน นอกจากนี้ แบบ 3 มิติที่ได้มักจะมี ความคลาดเคลื่อนทั้งรูปทรงและขนาดจากวัตถุจริงเนื่องจากความผิดพลาดในการวัดและจากเครื่องมือวัด ยกตัวอย่างเช่น ความผิดพลาดในการเขียนแบบชิ้นส่วนของเครื่องจักรเพื่อนำไปผลิตใช้ทดแทนชิ้นส่วนที่สึกหรอที่ไม่สามารถหาใหม่ได้ ทำให้ชิ้นส่วนที่ผลิตออกมาใช้งานไม่ได้หรือต้องทำการแก้ไขใหม่หลายรอบ ดังนั้น เทคโนโลยีสแกนเนอร์ 3 มิติ (3D Scanner Technology) จึงได้ถูกคิดค้นขึ้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ทำให้การสร้างแบบ 3 มิติของชิ้นงานหรือวัตถุสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

เครื่องกราดวัตถุ 3 มิติหรือเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์วัตถุโดยการเก็บรวบรวมข้อมูลรูปทรงของวัตถุ ซึ่งอาจรวมถึงสีผิวของวัตถุด้วย ข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้จะถูกนำมาสร้างเป็นแบบ 3 มิติ เครื่องกราดวัตถุ 3 มิติสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น การออกแบบเชิงอุตสาหกรรม การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพ การพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์ (Product Prototyping) วิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse Engineering) การเก็บรวบรวมข้อมูลของสิ่งประดิษฐ์ทางวัฒนธรรม และงานอุตสาหกรรมภาพยนตร์ เป็นต้น

เครื่องกราดวัตถุ 3 มิติสามารถแบ่งออกเป็นแบบสัมผัสและไม่สัมผัส เครื่องกราดแบบสัมผัสอาศัยหัวตรวจ (Probe) ไปสัมผัสผิวของวัตถุเพื่อให้ได้ค่าพิกัดของตำแหน่งที่สัมผัส ตัวอย่างของเครื่องกราดแบบสัมผัสได้แก่เครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine) ซึ่งใช้กันมากในงานวิศวกรรม เนื่องจากให้ความเที่ยงตรงสูง ข้อเสียประการหนึ่งของเครื่องกราดแบบสัมผัสคือต้องใช้เวลาในการวัดค่อนข้างนาน นอกจากนี้ การสัมผัสอาจทำให้เกิดความเสียหายแก่วัตถุที่นำมากราด โดยเฉพาะกับวัตถุที่แตกหักง่าย เช่น วัตถุโบราณ เครื่องกราดแบบไม่สัมผัสอาศัยกล้อง CCD (Charged Coupling Device) เพื่อวัดตำแหน่งของผิวชิ้นงาน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบ Active และแบบ Passive เครื่องกราดแบบ Active อาศัยการปล่อยพลังงานเพื่อไปกระทบกับผิวของวัตถุ เช่น แสงเลเซอร์หรือแสงที่มี

รูปแบบ (Structured Light) จากเครื่องฉายในการกราดวัตถุ ส่วนเครื่องกราดแบบ Passive อาศัยแสงสะท้อนจากธรรมชาติของวัตถุในการหาค่าพิกัดของพื้นผิว ข้อเสียของเครื่องกราดแบบ Passive ที่เห็นได้ชัดคือมีความแม่นยำต่ำเนื่องจากการไม่มีการควบคุมตำแหน่งและความเข้มของแหล่งกำเนิดแสง

เทคโนโลยีการกราดวัตถุแบบไม่สัมผัสได้เข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนทดแทนโดยการช่วยให้การสร้างแบบ 3 มิติทางคอมพิวเตอร์มีความรวดเร็วและแม่นยำ ประโยชน์อีกประการหนึ่งของการใช้เทคโนโลยีการกราดวัตถุที่เห็นได้ชัดทางด้านอุตสาหกรรม คือ การนำแม่พิมพ์ที่ซื้อมาหรือแม่พิมพ์ที่ผ่านการตกแต่งและทดสอบเรียบร้อยแล้วมาสแกนเพื่อเก็บพื้นผิวแม่พิมพ์ไว้ก่อน ถ้าแม่พิมพ์เกิดการแตกหักจนซ่อมแซมไม่ได้ระหว่างผลิตชิ้นงาน สามารถนำแบบของแม่พิมพ์ที่เก็บไว้มาสร้างแม่พิมพ์ใหม่ที่มีรูปร่างเหมือนแม่พิมพ์เก่าได้ทันที วิธีนี้จึงเหมาะสำหรับการผลิตจำนวนมากๆ ซึ่งมีโอกาสสูงที่แม่พิมพ์จะสึกหรอหรือเสียหายจนซ่อมแซมไม่ได้

เทคโนโลยีการกราดวัตถุ 3 มิติกำลังเป็นที่สนใจ เนื่องจากมีลักษณะเด่นในเรื่องของความรวดเร็ว ความแม่นยำ และประโยชน์ใช้สอยที่มีหลากหลายด้าน ไม่จำกัดแต่เพียงด้านอุตสาหกรรมเท่านั้น เช่น ใช้สแกนวัตถุโบราณ ฯลฯ ทำให้มีการสั่งซื้อเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพง ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการสร้างเครื่องต้นแบบการกราดวัตถุแบบไม่สัมผัสด้วยแสงเลเซอร์ขึ้นใช้เองเพื่อเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือการพัฒนาต้นแบบของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติเพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ซึ่งประกอบด้วยวัตถุประสงค์สำคัญดังนี้

1. เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์
2. เพื่อพัฒนาองค์ความรู้เกี่ยวกับการกราดวัตถุ 3 มิติ
3. เพื่อทดสอบความแม่นยำรวมทั้งข้อจำกัดของเครื่องต้นแบบที่พัฒนาขึ้นโดยการทดลองกับวัตถุที่มีรูปร่างต่างๆ

1.3 การทบทวนวรรณกรรม (Literature Review)

แนวคิดของการนำแสงเลเซอร์มาใช้ในการเก็บรูปร่างของวัตถุมีมานานแล้ว เทคโนโลยีการกราดวัตถุโดยใช้แสงเลเซอร์ด้วยวิธี Optical Triangulation ได้ถูกพัฒนาขึ้นครั้งแรกโดยสภาวิจัยแห่งชาติแคนาดาเมื่อปี ค.ศ. 1978 ถึงแม้ว่าเทคโนโลยีนี้จะมีความนิยม แต่การคิดค้นอย่างจริงจังได้เกิดขึ้นในทศวรรษ

1990 เนื่องจากความก้าวหน้าทางด้านอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการสร้างเครื่องกราด 3 มิติ

Jean-Yves Bouguet [1] ได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบ 3 มิติในงานวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอก ซึ่งได้เสนอไว้ทั้งหมด 3 วิธี วิธีแรกเป็นวิธีแบบ Passive ซึ่งอาศัยแสงจากธรรมชาติและกล้องถ่ายภาพเพียงตัวเดียว ทำการเก็บภาพของวัตถุในมุมมองต่างๆโดยปราศจากการควบคุมตำแหน่งของวัตถุและกล้อง จากนั้นนำภาพที่ได้ไปสร้างเป็นแบบ 3 มิติ วิธีที่สองเป็นการใช้เครื่องฉาย (Projector) ฉายแสงที่เป็นรูปแบบ (Light Patterns) ไปยังวัตถุ ซึ่งรูปทรงของวัตถุจะก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวของรูปแบบของแสงที่ฉาย โดยวัตถุจะถูกวางไว้บนแท่นหมุนเพื่อให้กล้องสามารถบันทึกภาพในมุมต่างๆ และภาพที่ได้จะถูกนำไปสร้างเป็นแบบ 3 มิติ Bouguet เสนอให้ใช้รูปแบบของแสงที่เป็นสเกลลีเททที่มีโพรไฟล์เป็นรูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal) แทนรูปแบบทวิภาค (Binary Patterns) ที่ใช้กันทั่วไป ซึ่งวิธีนี้ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากทุกจุดภาพ (Pixels) ที่ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ วิธีที่สามเป็นการใช้คอมพิวเตอร์เครื่องฉายและใช้แท่งดินสอบังแสงจากคอมพิวเตอร์เพื่อทำให้เกิดเงาบนวัตถุ วิธีนี้ตัววัตถุและกล้องจะอยู่กับที่ มีเพียงแท่งดินสอเท่านั้นที่กวาดผ่านแสงที่ฉายไปบนวัตถุ การสร้างแบบ 3 มิติจะอาศัยข้อมูลที่ได้จากเงาของแท่งดินสอที่ตกกระทบบนวัตถุ

Kenn Tornslev [2] ได้เสนอวิธีการกราดวัตถุ 3 มิติโดยใช้ลำแสงเลเซอร์หลายแถบ (Multi-beam Laser Scanning) โดยใช้รูปแบบที่คล้ายคลึงกับวิธีที่สามที่ได้นำเสนอโดย Bouguet คือให้วัตถุอยู่กับที่และใช้กล้องถ่ายภาพจากเบื้องบน แตต่างกันตรงที่ Tornslev ใช้ลำแสงเลเซอร์แทนการกวาดด้วยแท่งดินสอและตัวกล้องสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง วิธีของ Tornslev นี้ดีกว่าการกวาดด้วยแท่งดินสอของ Bouguet ตรงที่มีการควบคุมการกวาดของลำแสงเลเซอร์ ทำให้สามารถคำนวณตำแหน่งของพิกัดได้อย่างแม่นยำ ข้อดีอีกประการหนึ่งของวิธีนี้คือการใช้ลำแสงเลเซอร์หลายแถบ ทำให้ร่นเวลาในการกราดวัตถุลง ส่วนข้อด้อยของวิธีนี้คือการที่วัตถุถูกยึดกับที่และการติดตั้งกล้องไว้เหนือวัตถุ ทำให้ภาพที่ได้มาจากมุมกล้องด้านบนของวัตถุ ซึ่งเหมาะสำหรับวัตถุที่มีลักษณะแบนราบ เช่นเหรียญหรือเปลือกหอยเชลล์ เป็นต้น

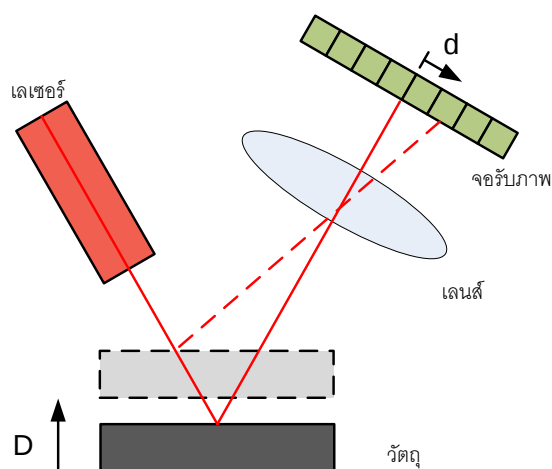
Sadlo และคณะ [3] ได้เสนอระบบการกราดวัตถุ 3 มิติโดยใช้การฉายแสง (Structured Light) ระบบดังกล่าวประกอบด้วยเครื่องฉาย (Projector) แท่นหมุนวัตถุที่ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ และกล้องถ่ายภาพหนึ่งตัว หลักการทำงานของระบบอาศัยรหัสเกรย์ (Gray Code) ร่วมกับการฉายโดยการเลื่อนเฟส (Phase-shift Projection) ในการเก็บข้อมูลรูปทรงเรขาคณิตของวัตถุ โดยเก็บในรูปแบบของตำแหน่งพิกัดของจุดบนพื้นผิวของวัตถุ ระบบดังกล่าวมีความแม่นยำสูงเนื่องจากการสอบเทียบตำแหน่งของเครื่องฉายแท่นหมุน รวมทั้งกล้องถ่ายภาพอย่างละเอียด นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยยังได้ใช้เทคนิคทางคอมพิวเตอร์

กราฟิกช่วยในการปรับแต่งข้อมูลเพื่อให้แบบ 3 มิติที่ได้สอดคล้องกับวัตถุจริง เช่น การกำจัดสิ่งแปลกบนทางเรขาคณิต (Geometric Artifact) การสร้างพื้นผิวของวัตถุ และการกำจัดเงาเป็นต้น

Sánchez Secades [4] ได้เสนอระบบการกราดวัตถุด้วยแสงอินฟราเรด โดยงานวิจัยนี้ได้เน้นในการกราดวัตถุที่มีคุณสมบัติโปร่งแสง เช่น วัตถุที่ทำจากแก้วหรือพลาสติกใส ซึ่งมักมีปัญหาในการกราดด้วยเครื่องกราด 3 มิติโดยทั่วไป ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สร้างเครื่องต้นแบบขึ้นโดยอาศัยหลักการของ Optical Triangulation เช่นเดียวกับวิธีที่ใช้ในเครื่องกราด 3 มิติทั่วไป แต่ใช้แสงเลเซอร์อินฟราเรดและกล้องถ่ายภาพอินฟราเรดแทนการใช้แสงเลเซอร์และกล้องถ่ายภาพธรรมดา จากการทดลองกราดวัตถุโปร่งแสงพบว่า ระบบนี้ให้ผลดีกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องกราดวัตถุด้วยแสงเลเซอร์ธรรมดา

1.4 การออกแบบการวิจัย

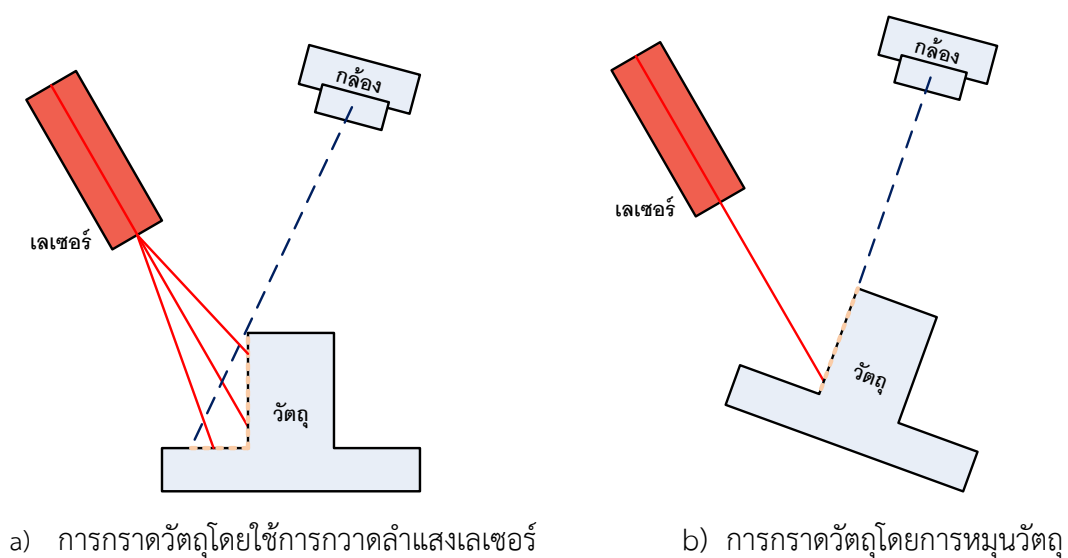
เครื่องกราด 3 มิติที่เสนอในงานวิจัยนี้อาศัยหลักการของ Optical Triangulation เหตุผลที่เลือกใช้วิธีนี้เนื่องจากวิธีนี้สามารถให้ความแม่นยำสูง เครื่องกราด 3 มิติแบบ Triangulation (Triangulation 3D Laser Scanner) เป็นเครื่องกราดแบบ Active ที่ใช้การฉายลำแสงเลเซอร์ไปตกกระทบบนผิวของวัตถุ และใช้กล้อง CCD จับภาพสะท้อนเพื่อนำไปคำนวณหาพิกัดของพื้นผิวของวัตถุ การสร้างแบบ 3 มิติของวัตถุจะต้องทำการเก็บข้อมูลพิกัดพื้นผิวโดยรอบวัตถุ ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุหรือกล้อง รูปที่ 1.1 เป็นการแสดงหลักการทำงานของวิธี Optical Triangulation โดยตำแหน่งของภาพที่ตกกระทบบน CCD จะแปรผันตามระยะของแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนผิวของวัตถุ



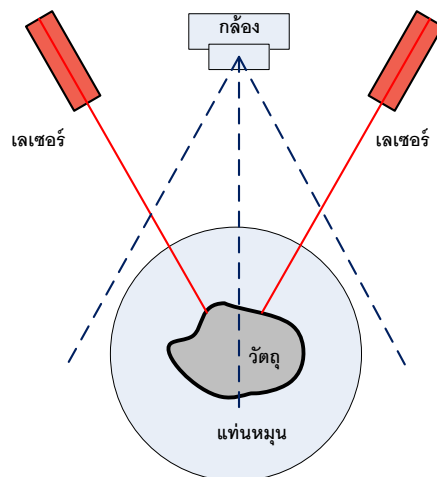
รูปที่ 1.1 ภาพแสดงหลักการทำงานของเครื่องกราด 3 มิติแบบ Triangulation

ในทางปฏิบัติ การกราดวัตถุด้วยแสงเลเซอร์โดยวิธี Optical Triangulation มักจะใช้ลำแสงที่เป็นเส้นแทนการใช้ลำแสงที่เป็นจุด และอาจมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพมากกว่าหนึ่งตัวเพื่อช่วยลดเวลาในการกราดวัตถุลง นอกจากนี้ การใช้กล้องถ่ายภาพมากกว่าหนึ่งตัวยังสามารถช่วยลดปัญหาของการเกิดจุดบอด ซึ่งเป็นตำแหน่งที่กล้องไม่สามารถเก็บภาพได้เนื่องจากลำแสงเลเซอร์ไปตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุส่วนที่ถูกปิดบัง อย่างไรก็ตาม การใช้กล้องถ่ายภาพมากกว่าหนึ่งตัวย่อมหมายถึงค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงเสนอวิธีการกราดวัตถุโดยใช้กล้องถ่ายภาพเพียงตัวเดียว

การกราดวัตถุโดยใช้กล้องถ่ายภาพเพียงตัวเดียวได้มีการนำเสนอในงานวิจัยก่อนหน้านี้แล้วโดยใช้การฉายแสงที่เป็นรูปแบบ [1, 3] หรือใช้ลำแสงเลเซอร์หลายแถบ [2] ร่วมกับการปรับเปลี่ยนตำแหน่งของวัตถุหรือกล้องถ่ายภาพ สิ่งที่คล้ายคลึงกันในงานวิจัยเหล่านี้คือการฉายแสงออกจากตำแหน่งเดียวโดยให้ครอบคลุมพื้นที่ในแนวเชิงมุม สาเหตุที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนมุมของแสงที่ตกกระทบวัตถุเนื่องจากการหมุนวัตถุเพียงอย่างเดียวไม่สามารถแก้ปัญหาการเกิดจุดบอดได้หากปราศจากการขยับมุมกล้อง ตัวอย่างการเกิดจุดบอดได้แสดงไว้ในรูปที่ 1.2 ซึ่งแสดงให้เห็นตำแหน่งของจุดบอดบนผิววัตถุโดยการกวาดลำแสงเลเซอร์ในรูป a) และตำแหน่งของจุดบอดบนผิววัตถุโดยการหมุนวัตถุในรูป b) ดังนั้น เพื่อลดปัญหาของการเกิดจุดบอด งานวิจัยที่นำเสนอจึงเลือกใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สองชุด โดยติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ไว้ที่ด้านซ้ายและด้านขวาของกล้องถ่ายภาพดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.2 แสดงตำแหน่งบนผิววัตถุที่เป็นจุดบอด



รูปที่ 1.3 แสดงระบบของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติที่น่าเสนอ

การสร้างแบบ 3 มิติของวัตถุจะเริ่มจากการประมวลผลภาพที่ถ่ายในแต่ละมุมของวัตถุเพื่อหาพิกัดของภาพที่แสงเลเซอร์ตกกระทบบนผิวของวัตถุ ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพจะถูกเก็บในรูปแบบของแถวลำดับของพิกัด 2 มิติ ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาพิกัดบนพื้นผิวของวัตถุในปริภูมิ 3 มิติต่อไป การคำนวณหาพิกัดบนพื้นผิวของวัตถุจะต้องอาศัยข้อมูลจากการสอบเทียบกล้องเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการบิดเบี้ยวของภาพ (Distortion) อันเนื่องมาจากเลนส์ที่ใช้ หลังจากที่ได้จุดต่างๆบนพื้นผิววัตถุแล้ว จึงจะสามารถสร้างแบบ 3 มิติของวัตถุได้โดยใช้โครงสร้าง 3 มิติลายเส้น เนื่องจากระบบกราดวัตถุที่น่าเสนอใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ 2 ตัว ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยที่มีผู้เสนอก่อนหน้านี้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนวิธี (Algorithms) ต่างๆที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถใช้กับเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น

1.5 ขอบเขตของโครงการวิจัย

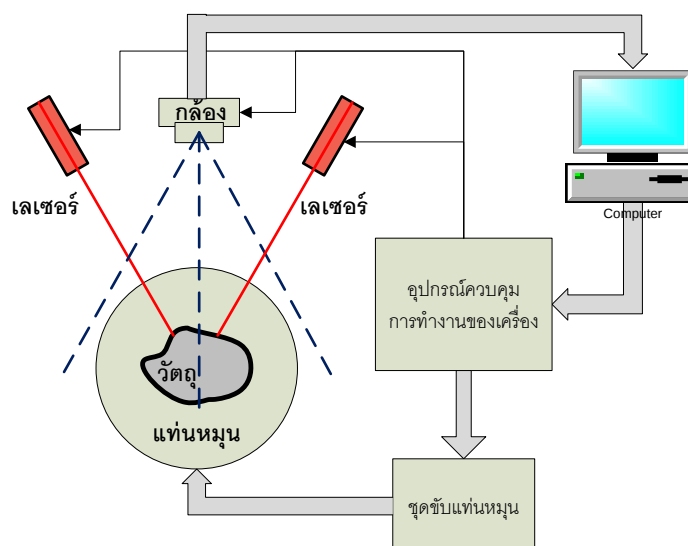
งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาต้นแบบของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติ เพื่อศึกษาขีดความสามารถและข้อจำกัดของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นโดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์สองตัว ซึ่งจะทำให้การทดลองกับวัตถุที่บดแสงที่มีขนาดความยาวไม่เกิน 30 เซนติเมตร ดังนั้น ขอบเขตของงานวิจัยนี้จึงรวมถึงการสร้างเครื่องต้นแบบ การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลข้อมูลภาพที่ได้จากการกราดวัตถุ การสร้างแบบรูปทรง 3 มิติของวัตถุ การสอบเทียบกล้องเพื่อให้ได้แบบ 3 มิติที่ถูกต้อง รวมทั้งการทดลองกับวัตถุที่มีรูปทรงต่างๆ โดยงานวิจัยนี้สนใจเฉพาะรูปทรง 3 มิติของวัตถุเท่านั้น ส่วนลักษณะสีผิวของวัตถุและชนิดของวัสดุที่ใช้อยู่นอกเหนือการศึกษาในครั้งนี้

บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย

การพัฒนาต้นแบบเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆ คือ 1) การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ และ 2) การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการสร้างแบบ 3 มิติ โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียดดังนี้

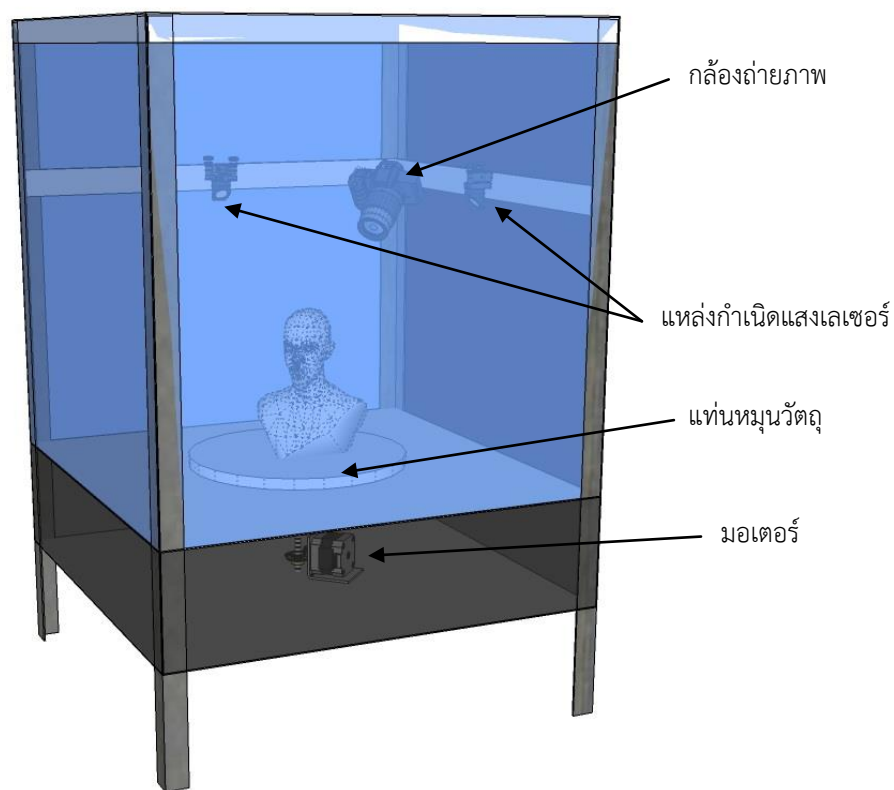
2.1 การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

เครื่องต้นแบบประกอบด้วยแท่นหมุนวัตถุ ชุดขับเคลื่อนแท่นหมุน กล้อง แห่แสงเลเซอร์ และอุปกรณ์ควบคุม โดยมีคอมพิวเตอร์เป็นตัวสั่งการและเก็บรวบรวมข้อมูล แผนผังส่วนประกอบของเครื่องต้นแบบแสดงดังรูปที่ 2.1 กล้องถ่ายภาพจะถูกยึดอยู่กับที่เหนือวัตถุโดยทำมุม 45 องศากับแนวตั้ง ส่วนชุดแห่แสงเลเซอร์ถูกออกแบบให้อยู่ด้านซ้ายและขวาของกล้องถ่ายภาพ โดยทำมุม 45 องศา กับกล้องในแนวนอน ส่วนแท่นหมุนจะถูกขับเคลื่อนด้วย Stepping Motor โดยใช้เฟืองเป็นตัวส่งกำลัง และใช้ตลับลูกปืนกันรุน (Thrust Bearing) เป็นตัวรับน้ำหนักของแท่นหมุนและวัตถุ สาเหตุที่เลือกใช้มอเตอร์แบบ Stepping เนื่องจากสามารถควบคุมตำแหน่งของแท่นหมุนได้ง่ายและมีความแม่นยำสูง ส่วนปัญหาระยะคลอน (Backlash) ที่อาจเกิดขึ้นกับชุดเฟืองสามารถกำจัดออกไปได้โดยการบังคับให้แท่นหมุนหมุนในทิศทางใดทิศทางหนึ่งเท่านั้น ในการกราดวัตถุ คอมพิวเตอร์จะสั่งให้แท่นหมุนหมุนวัตถุไปในตำแหน่งที่ต้องการ แล้วทำการฉายแสงเลเซอร์เพื่อถ่ายภาพ



รูปที่ 2.1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของเครื่องต้นแบบ

โครงสร้างของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติที่ออกแบบไว้มีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยม ภายในเป็นห้องสำหรับวางและถ่ายภาพวัตถุ มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมลูกบาศก์โดยมีความยาวแต่ละด้านเท่ากับ 800 มิลลิเมตร ผนังโดยรอบปิดด้วยวัสดุสีดำทึบแสงเพื่อป้องกันการรบกวนของแสงจากภายนอกระหว่างการถ่ายภาพ ผนังด้านหน้าเป็นประตูบานพับที่สามารถเปิดปิดได้ แท่นหมุนวัตถุอยู่ติดกับฐานด้านล่าง โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร กล้องถ่ายภาพถูกยึดไว้อยู่กับที่กับเสาภายใน โดยมีระยะความสูงจากผิวหน้าของแท่นหมุนถึงจุดกึ่งกลางของฉากรับแสงเท่ากับ 500 มิลลิเมตร รูปที่ 2.2 แสดงภาพ 3 มิติของเครื่องต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม SolidWorks 2010

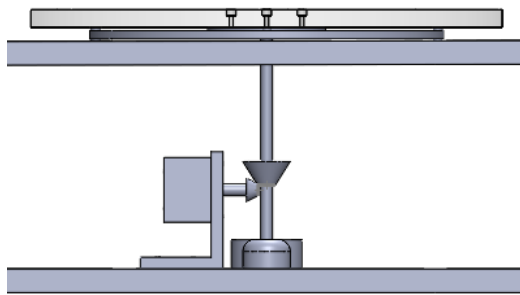


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์
ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks 2010

2.1.1 แท่นหมุนวัตถุและชุดขับเคลื่อน

แท่นหมุนวัตถุทำหน้าที่รองรับวัตถุที่นำมาสแกนและหมุนวัตถุในแนวเชิงมุม 360 องศา ซึ่งในงานวิจัยนี้ออกแบบให้แท่นหมุนสามารถรองรับวัตถุที่มีขนาดไม่เกิน 300 มิลลิเมตร และมีน้ำหนักไม่เกิน 1 กิโลกรัม แท่นหมุนวัตถุมีลักษณะพื้นที่หน้าตัดกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตร ทำจากแผ่น

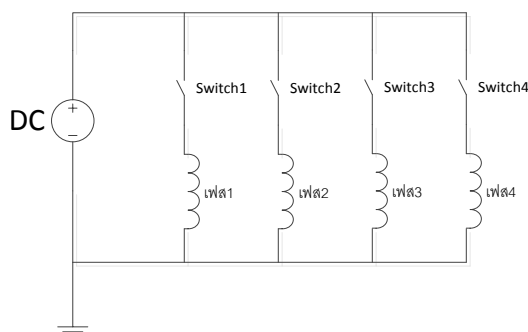
อะคริลิกหนา 20 มิลลิเมตร ตรงกลางยึดด้วยเพลานาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ด้านล่างใช้ตัวยึดล็อกปืนกันรุนในการรับน้ำหนัก แท่นหมุนขับเคลื่อนด้วยสเต็ปมอเตอร์ที่มีความละเอียด 200 ขั้น (Step) ต่อรอบ หรือเท่ากับ 1.8 องศาต่อขั้น ใช้เฟืองดอกจอกในการส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังแท่นหมุน โดยใช้อัตราทด 1:2 รูปที่ 2.3 แสดงแท่นหมุนวัตถุและชุดขับเคลื่อนที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 2.3 แท่นหมุนวัตถุและระบบขับเคลื่อน

2.1.2 การควบคุมการหมุนของมอเตอร์

สเต็ปมอเตอร์ที่ใช้เป็นชนิด Unipolar ซึ่งมีจำนวนขดลวดทั้งหมด 4 ขด(เฟส) การควบคุมการหมุนของสเต็ปมอเตอร์สามารถทำได้โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดแต่ละขดในลำดับที่แตกต่างกัน รูปที่ 2.4 แสดงหลักการควบคุมสเต็ปมอเตอร์ชนิด Unipolar โดยการเปิดปิดกระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่ขดลวด การควบคุมมอเตอร์สามารถทำได้แบบเต็มขั้น(Full-step) และแบบครึ่งขั้น (Half-step) ซึ่งการขับเคลื่อนแบบเต็มขั้นยังสามารถแบ่งได้เป็นแบบขับเคลื่อนทีละหนึ่งเฟสและแบบขับเคลื่อนทีละสองเฟส การขับเคลื่อนในแต่ละแบบจะใช้สัญญาณควบคุมที่แตกต่างกันดังนี้



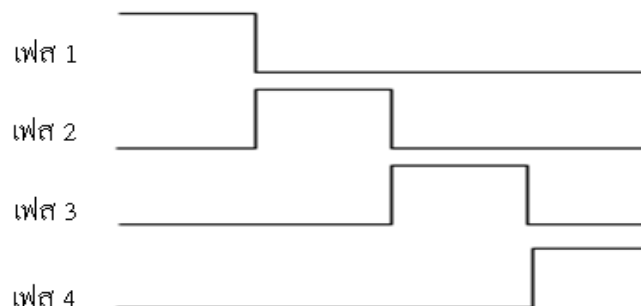
รูปที่ 2.4 การควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าของขดลวดมอเตอร์

การควบคุมแบบเต็มขั้นหนึ่งเฟส

การควบคุมแบบเต็มขั้นหนึ่งเฟสเป็นการกระตุ้นขดลวดที่ละขดเรียงตามลำดับ 1, 2, 3, 4 ซึ่งจะมีขดลวดเพียงขดเดียวที่ถูกกระตุ้นในเวลาหนึ่งเท่านั้น เมื่อต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทาง การกระตุ้นจะใช้ลำดับกลับกันคือ 4, 3, 2, 1 การควบคุมแบบเต็มขั้นหนึ่งเฟสเป็นการควบคุมที่สามารถสร้างสัญญาณควบคุมได้ง่าย และมีอัตราการกินกระแสไฟฟ้าที่ต่ำ ตารางที่ 2.1 แสดงการทำงานของสแต็ปมอเตอร์แบบเต็มขั้นหนึ่งเฟส และรูปที่ 2.5 เป็นรูปแบบของสัญญาณควบคุม

ตารางที่ 2.1 การทำงานของสแต็ปมอเตอร์แบบเต็มขั้นหนึ่งเฟส

ลำดับที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	-	ทำงาน	-	-
3	-	-	ทำงาน	-
4	-	-	-	ทำงาน



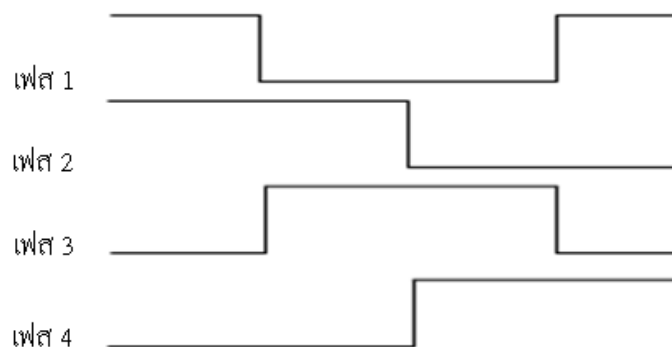
รูปที่ 2.5 รูปแบบสัญญาณควบคุมของสแต็ปมอเตอร์แบบเต็มขั้นหนึ่งเฟส

การควบคุมแบบเต็มขั้นสองเฟส

การควบคุมแบบเต็มขั้นสองเฟสเป็นการกระตุ้นขดลวดครั้งละสองขดพร้อมกัน โดยมีลำดับเป็น 12, 23, 34, 41 ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทาง การกระตุ้นจะใช้ลำดับเป็น 14, 43, 32, 21 ข้อดีของการควบคุมแบบเต็มขั้นสองเฟส คือ สแต็ปมอเตอร์จะมีแรงบิดมากกว่าแบบหนึ่งเฟส ส่วนข้อเสียคือจะต้องใช้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของแบบหนึ่งเฟส เพราะต้องกระตุ้นขดลวด 2 ขดพร้อมกัน ตารางที่ 2.2 แสดงการทำงานของสแต็ปมอเตอร์แบบเต็มขั้นสองเฟส และรูปที่ 2.6 เป็นรูปแบบของสัญญาณควบคุม

ตารางที่ 2.2 การทำงานของสแต็ปมอเตอร์แบบเต็มขั้นสองเฟส

ลำดับที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	ทำงาน	-	-
2	-	ทำงาน	ทำงาน	-
3	-	-	ทำงาน	ทำงาน
4	ทำงาน	-	-	ทำงาน



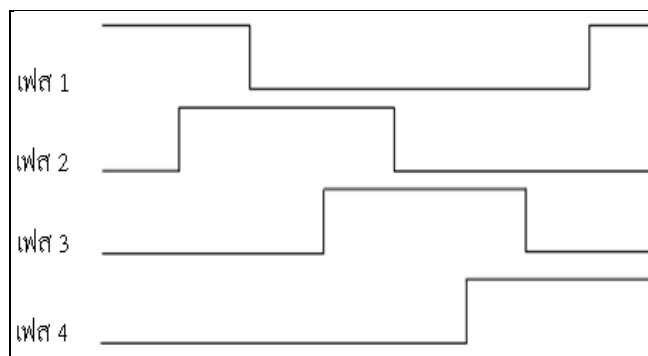
รูปที่ 2.6 รูปแบบสัญญาณควบคุมของสแต็ปมอเตอร์แบบเต็มขั้นสองเฟส

การควบคุมแบบครึ่งขั้น

การควบคุมแบบครึ่งขั้นเป็นการกระตุ้นขดลวดครึ่งละ 1 เฟสและ 2 เฟสสลับกัน โดยมีลำดับเป็น 1, 12, 2, 23, 3, 34, 4, 41 ถ้าต้องการให้มอเตอร์หมุนกลับทาง การกระตุ้นจะใช้ลำดับเป็น 1, 41, 4, 43, 3, 32, 2, 21 ข้อดีของการควบคุมแบบครึ่งขั้นคือ สแต็ปมอเตอร์จะมีแรงบิดมากกว่าการควบคุมแบบเต็มขั้นหนึ่งเฟส และมีความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากการควบคุมแบบเต็มขั้น ยกตัวอย่างเช่น สแต็ปมอเตอร์ที่มีความละเอียดเท่ากับ 200 ขั้นต่อรอบจะมีความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 400 ขั้นต่อรอบ หรือเท่ากับขั้นละ 0.9 องศา ตารางที่ 2.3 แสดงการทำงานของสแต็ปมอเตอร์แบบครึ่งขั้น และรูปที่ 2.7 เป็นรูปแบบของสัญญาณควบคุม

ตารางที่ 2.3 การทำงานของสเต็ปมอเตอร์แบบครึ่งขั้น

ลำดับที่	เฟสที่ 1	เฟสที่ 2	เฟสที่ 3	เฟสที่ 4
1	ทำงาน	-	-	-
2	ทำงาน	ทำงาน	-	-
3	-	ทำงาน	-	-
4	-	ทำงาน	ทำงาน	-
5	-	-	ทำงาน	-
6	-	-	ทำงาน	ทำงาน
7	-	-	-	ทำงาน
8	ทำงาน	-	-	ทำงาน



รูปที่ 2.7 รูปแบบสัญญาณควบคุมของสเต็ปมอเตอร์แบบครึ่งขั้น

2.1.3 ชุดเลเซอร์และกล้องถ่ายภาพ

ชุดเลเซอร์ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่เป็นเส้นเพื่อฉายลงบนผิววัตถุ เลเซอร์ที่ใช้เป็นเลเซอร์สีแดงจำนวน 2 ชุด และเส้นเลเซอร์มีขนาดความกว้าง 1 มิลลิเมตร โดยชุดเลเซอร์ถูกยึดไว้กับรางเลื่อนด้วยตัวจับยึดเลเซอร์ในระดับเดียวกับกล้องถ่ายภาพ และสามารถปรับชุดเลเซอร์ในแนวระนาบซ้ายและขวาได้ ส่วนรางถูกยึดติดไว้กับผนังของเครื่องกราฟวัตถุ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.2

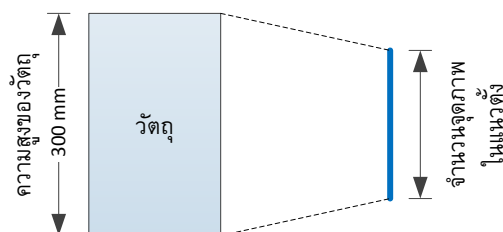
กล้องถ่ายภาพทำหน้าที่ในการถ่ายภาพวัตถุที่ถูกนำมากราฟด้วยแสงเลเซอร์ กล้องถ่ายภาพที่ใช้เป็นกล้องชนิดสะท้อนภาพเลนส์เดี่ยวด้วยระบบดิจิทัล (Digital Single-lens reflex หรือ D-SLR) ซึ่งสามารถเปลี่ยนเลนส์ได้ ตัวรับภาพหรือเซ็นเซอร์มีความละเอียดรวม 16 ล้านจุดภาพ (Pixel) โดยมีความ

ละเอียดในแนวนอน 4928 จุดภาพและความละเอียดในแนวตั้ง 3264 จุดภาพ ตัวกล้องถ่ายภาพจะถูกยึดกับฐานวางกล้องซึ่งเอียงทำมุม 45 องศากับเสาที่ใช้ยึดและแท่นหมุน โดยมีระยะความสูงจากแท่นหมุน 500

2.1.4 ความละเอียดของวัตถุที่วัดได้

ความละเอียดของวัตถุที่วัดได้จะแตกต่างกันในแนวตั้งและแนวนอน ความละเอียดของวัตถุที่วัดได้ในแนวตั้งจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของกล้องและขนาดของวัตถุ ส่วนความละเอียดในแนวนอนจะมีปัจจัยที่เพิ่มเติมคือมุมในการหมุนของวัตถุ เนื่องจากความละเอียดของกล้องที่ใช้มีจำนวนจุดภาพ (Pixel) สูงสุดเท่ากับ 4928x3264 หรือ 16 ล้านจุดภาพ ดังนั้น ความละเอียดของวัตถุที่สามารถวัดได้ในแนวตั้ง r_v สามารถหาได้จาก ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

$$\begin{aligned} r_v &= \frac{\text{ความสูงของวัตถุ}}{\text{จำนวนจุดภาพในแนวตั้ง}} \\ &= \frac{300}{3264} \\ &\approx 0.092 \text{ mm/pixel} \end{aligned}$$



รูปที่ 2.8 การวัดในแนวตั้ง

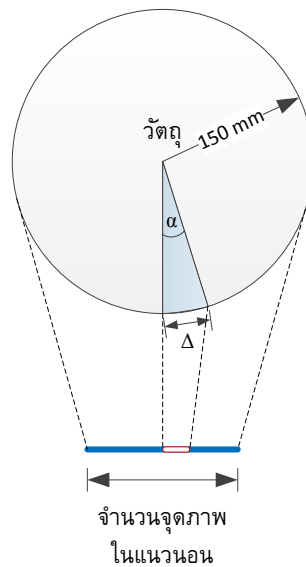
ส่วนการคำนวณความละเอียดของวัตถุที่สามารถวัดได้ในแนวนอน r_h สามารถหาได้จาก

$$\begin{aligned} r_h &= \frac{\text{ความกว้างของวัตถุ}}{\text{จำนวนจุดภาพในแนวนอน}} \\ &= \frac{300}{4928} \\ &\approx 0.061 \text{ mm/pixel} \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากข้อจำกัดในการหมุนของมอเตอร์ที่มีความละเอียด 400 ขั้นตอนรอบและการทศรอบด้วยเฟือง (ด้วยอัตราทด 1:2) ทำให้มุมที่เล็กที่สุดที่มอเตอร์สามารถหมุนได้ (α) มีค่าเท่ากับ $360^\circ/(400*2)$

= 0.45 องศาแสดงในรูปที่ 2.9 สำหรับวัตถุที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 300 มิลลิเมตร ระยะของวัตถุที่เล็กที่สุดในแนวนอน (Δ) ที่สามารถวัดได้คือ

$$\begin{aligned}\Delta &= \frac{\text{ความยาวเส้นรอบวง} \times \alpha}{360} \\ &= \frac{300 \times \pi \times 0.45}{360} \\ &\approx 1.178 \text{ mm/step}\end{aligned}$$

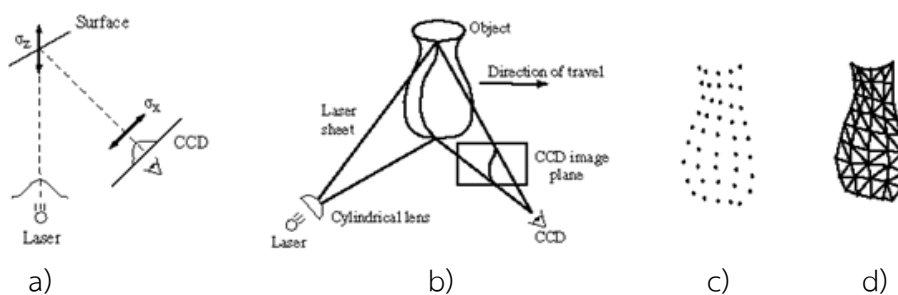


รูปที่ 2.9 การวัดในแนวนอน

2.2 การถ่ายภาพเพื่อหาพิกัด

ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการหาพิกัดของวัตถุด้วยวิธีการฉายแสงแบบเส้นที่เรียกว่า Optical triangulation ตามที่ได้กล่าวไปแล้ว ซึ่งเป็นวิธีการวัดแบบไม่สัมผัส และอาศัยแสงสะท้อนจากวัตถุในการคำนวณหาพิกัดพื้นผิวของวัตถุ หรือที่เรียกว่า หลักการวัดจากการสะท้อน (Reflective) โดยใช้แสง

หลักการทำงานของวิธีการฉายแสงแบบเส้นหรือจุดสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อฉายแสงที่เป็นเส้นลงบนพื้นผิวของวัตถุ จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของแสงมายังตัวรับแสง (ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เป็นกล้องถ่ายภาพ) ซึ่งรูปแบบของแสงสะท้อนกลับนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวของวัตถุ เมื่อลักษณะของแสงสะท้อนเปลี่ยนไป ทำให้สามารถหาระยะที่เปลี่ยนไปบนพื้นผิวได้ รูปที่ 2.10 แสดงหลักการทำงานของวิธีการฉายแสงแบบเส้นหรือจุด



รูปที่ 2.10 หลักการของวิธีการฉายแสงแบบเส้นหรือจุด [5]

จากรูปที่ 2.10 a) เป็นภาพแสดงการทำงานแบบ 2 มิติ แสงจากเลเซอร์ส่องไปยังผิวของวัตถุ แล้วจึงสะท้อนไปยังตัวรับแสงหรือ CCD (Charged Coupling Device) ซึ่งระยะห่างของแสงที่ตกบนตัวรับแสงจะเป็นตัวบอกข้อมูลระยะห่างบนผิววัตถุ รูปที่ 2.10 b) เป็นภาพแสดงการทำงานแบบ 3 มิติซึ่งใช้แสงเลเซอร์ที่เป็นแถบกวาดผ่านวัตถุ หรือหมุนวัตถุผ่านแถบของแสงเลเซอร์ กล้อง CCD จะรับแถบแสงที่สะท้อนกลับจากวัตถุเพื่อใช้ในการคำนวณระยะห่างบนผิววัตถุ รูปที่ 2.10 c) เป็นข้อมูลที่ได้จากรูป b) โดยมีลักษณะเป็นกลุ่มของข้อมูลจุดที่เป็นระเบียบ รูปที่ 2.10 d) เป็นพื้นผิวเชิงเส้นซึ่งเกิดจากเชื่อมโยงจุดที่ใกล้กันให้เป็นรูปสามเหลี่ยมเพื่อให้ได้รูปที่ใกล้เคียงกับวัตถุจริง

2.3 ภาพถ่ายในระบบดิจิทัล

วัตถุที่มีอยู่ตามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นมีรูปร่างที่แตกต่างกันไป ทั้งที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตและไม่เป็นรูปทรงเรขาคณิต ในการประมวลผลภาพการกำหนดขอบเขตของภาพทุกภาพให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม (Rectangular Image Model) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุดเนื่องจากการอ่านภาพ การจัดเก็บข้อมูลภาพในหน่วยความจำและการแสดงภาพออกทางอุปกรณ์ต่างๆ เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การเก็บข้อมูลภาพลงหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์สามารถทำได้โดยการจองหน่วยความจำของเครื่องไว้ในรูปของตัวแปรอะเรย์ (Array) โดยค่าในแต่ละช่องของอะเรย์แสดงถึงคุณสมบัติของจุดภาพ (Pixel) และตำแหน่งของช่องอะเรย์เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของจุดภาพ สมมุติให้ภาพถูกจัดเก็บในตัวแปรแบบอะเรย์ขนาด $M \times N$ (M แถว และ N คอลัมน์) ที่ใช้เก็บภาพขนาด $M \times N$ จุด (M จุดในแนวนอน และ N จุดในแนวตั้ง) ค่าสี (หรือ ความสว่าง ในกรณีที่เป็นภาพระดับสีเทา) ของจุดภาพในแถวที่ 5 คอลัมน์ที่ 4 จะตรงกับค่าของภาพ จะเห็นว่าใช้ตำแหน่งของจุดภาพทั้งสองแกนเป็นตัวชี้ค่าข้อมูลในอะเรย์ จากการใช้หน่วยความจำเพื่อการเก็บภาพในลักษณะที่กล่าวมานี้เมื่อในการเก็บภาพสามารถคำนวณได้จาก $M \times N \times g$ เมื่อ g เป็นจำนวนเต็มที่แทนจำนวนบิตของข้อมูลในแต่ละจุดภาพ ตัวอย่างเช่น ถ้า g มีค่าเท่ากับ 8 บิต

สามารถเก็บความแตกต่างของระดับสีที่เป็นไปได้สูงสุด 256 ระดับ ค่า M และ N เป็นตัวบอกถึงความละเอียดของภาพ สำหรับคอมพิวเตอร์ทั่วไปในระบบ VGA (Video Graphic Array) จะมีขนาด 640 x 480, 800 x 600 และ 1024 x 768 จุด เป็นต้น การกำหนดความละเอียดขึ้นอยู่กับงานที่ใช้ ในงานบางอย่างใช้ความละเอียดแค่ 30 x 50 จุดก็พอ แต่ในงานบางชนิดอาจต้องใช้ความละเอียดมากกว่า 1000 x 1000 จุด

ปกติการเก็บข้อมูลภาพโดยเครื่องมือต่างๆ จะใช้มาตรฐานของโทรทัศน์ซึ่งมีอัตราส่วนในแนวนอนต่อแนวตั้ง (x:y) เท่ากับ 4:3 สำหรับเครื่องมือเก็บข้อมูลภาพที่ไม่เป็นไปตามอัตราส่วน 4:3 เมื่อนำภาพไปแสดงในจอภาพมาตรฐานจะทำให้ภาพที่แสดงนั้นมีขนาดของจุดภาพไม่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส เช่น ในบางระบบอาจใช้ความละเอียดในการแสดงเท่ากับ 640 x 512 ซึ่งทำให้ขนาดของจุดภาพที่ได้มีขนาดของด้านกว้างมีความยาวมากกว่าด้านสูง ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้เป็นหัวข้อที่ต้องสนใจสำหรับการเขียนโปรแกรมทางด้านกราฟิกและการจัดการข้อมูล

จำนวนสีสูงสุดที่เป็นไปได้ของแต่ละจุดภาพขึ้นอยู่กับจำนวนบิตที่ใช้ เมื่อมีการกำหนดให้ขนาดของบิตต่อจุดมากขึ้นจะทำให้จำนวนของสีมากขึ้นด้วย เช่น 1 บิต = $2^1=2$ สี 2 บิต = $2^2=4$ สี 4 บิต = $2^4=16$ สี 8 บิต = $2^8=256$ สี และ 16 บิต = $2^{16}=65536$ สี เป็นต้น สำหรับการแสดงข้อมูลภาพที่มีขนาด 1 บิตและ 8 บิตมีการทำงานที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากหน่วยประมวลผลจะไม่จัดการกับข้อมูลที่เป็นบิตเพียงบิตเดียว ดังนั้น การแสดงข้อมูลออกทางจอภาพตัวประมวลผลจะทำการคัดลอกข้อมูลทั้ง 8 บิต (1 ไบต์) ส่งให้กับจอภาพซึ่งในกรณีที่จุดภาพมีขนาด 1 บิต เมื่อตัวประมวลผลทำงานกับบิตแรกที่ต้องการแล้วจะทำการคัดลอกข้อมูลชุดใหม่ทันทีโดยที่ไม่สนใจข้อมูลอีก 7 บิตที่เหลือ ส่วนในกรณีที่จุดภาพมีขนาด 8 บิต ตัวประมวลผลจะทำการคัดลอกข้อมูลชุดใหม่ก็ต่อเมื่อตัวประมวลผลทำงานกับทุกบิตแล้ว

2.4 การประมวลผลภาพ (Image Processing)

การประมวลผลภาพ (Image Processing) คือ การเอาภาพมาประมวลผล โดยการคิดคำนวณทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งการคำนวณนั้นมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีก็มีประโยชน์แตกต่างกันไป เช่น การนำเอาสีแต่ละจุดพิกเซลมาคำนวณ การคำนวณเป็นบริเวณโดยใช้พื้นที่หลายๆจุดรวมกัน การตรวจจับลวดลาย (Pattern) การวิเคราะห์หารูปร่าง (Shape) และการวิเคราะห์แบบอื่นๆ

แหล่งของรูปภาพอาจมาจากกล้องถ่ายภาพที่สแกนหรือจากสื่อดิจิทัลต่างๆแล้วนำไปผ่านกระบวนการแปลงเพื่อให้เกิดเป็นภาพใหม่ เช่น การทำภาพเบลอ (Blur Image) การทำภาพนูน (Emboss Image) การตรวจหาขอบภาพ (Edge Detector) ซึ่งศาสตร์ด้านนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากมายหลายด้าน เช่น ทางด้านการแพทย์ การรักษาความปลอดภัย การตรวจนับจำนวนคน หรือการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัตถุต่างๆ ภายในภาพ

รูปแบบในการประมวลผลภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระดับ คือ การประมวลผลภาพในระดับต่ำ (Low-Level Image Processing) และการประมวลผลภาพในระดับสูง (High-Level Image Processing) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การประมวลผลภาพในระดับต่ำ

การประมวลผลภาพในระดับต่ำเป็นการประมวลผลภาพเชิงตัวเลขเพื่อหาตัวแปรต่างๆ มาอธิบายข้อมูลภาพ โดยทั่วไปแล้วการประมวลผลภาพในระดับต่ำ คือ การประมวลผลภาพเบื้องต้น (Image Preprocessing) เช่น การกำจัดสัญญาณรบกวน การจำแนกภาพ การหาขอบภาพ การเปลี่ยนแปลงภาพ และการทำให้ภาพคมชัดขึ้น เป็นต้น โดยการประมวลผลในระดับต่ำจะใช้ค่าความสว่างหรือระดับความเข้มของจุดภาพโดยตรง ซึ่งถือว่าเป็นกระบวนการเบื้องต้นที่มีความสำคัญ เพื่อจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการประมวลผลภาพในระดับสูงต่อไป

การประมวลผลภาพในระดับสูง

การประมวลผลภาพในระดับสูงเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพในระดับต่ำมาตีความประมวลผล และแสดงให้อยู่ในรูปของสัญลักษณ์ โดยสัญลักษณ์เหล่านี้จะแสดงถึงสิ่งต่างๆ ในภาพเพื่อให้คอมพิวเตอร์เข้าใจภาพได้ เช่น การรู้จำรูปแบบของตัวอักษร ความสัมพันธ์ระหว่างวัตถุในภาพ ขนาดหรือรูปร่างของวัตถุ เป็นต้น

2.4.1 การตรวจจับเส้น (Line Detection)

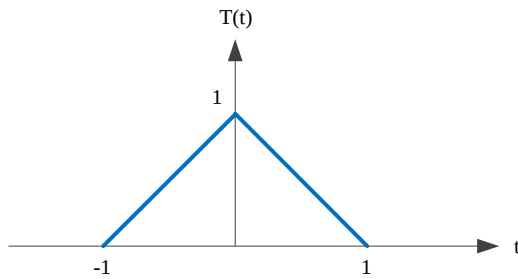
การตรวจจับเส้นเป็นเทคนิคการประมวลผลภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นวิธีการหาตำแหน่งของภาพที่เป็นเส้นโดยการทำให้ตำแหน่งที่เป็นเส้นมีความคมชัดมากขึ้น และยังสามารถกำหนดขนาดของเส้นที่ตรวจจับได้ให้มีขนาดเล็กหรือใหญ่ได้ โดยใช้ตัวกรอง (Filter) ต่างๆดังต่อไปนี้

ตัวกรองแบบสามเหลี่ยม (Triangle Filter)

ตัวกรองแบบสามเหลี่ยมเป็นวิธีที่ใช้เพื่อเพิ่มความคมชัดของจุดบริเวณที่มีความเข้มสูงสุด โดยการให้น้ำหนักกับจุดกึ่งกลางของเส้นมากกว่าจุดที่อยู่รอบข้าง ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและเร็ว แต่มีข้อเสียคือทำได้เฉพาะใน 1 มิติเท่านั้น คือในแนวตั้งหรือแนวนอน ฟังก์ชันของตัวกรองแบบสามเหลี่ยมสามารถแสดงได้จากสมการ (2.1) และมีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 2.11

$$T(x) = \begin{cases} 1 - |x|, & |x| < 1 \\ 0, & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (2.1)$$

โดยที่ t คือระยะในแนวนอนหรือแนวตั้ง



รูปที่ 2.11 ตัวกรองแบบสามเหลี่ยม (Triangle Filter)

จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่า ฟังก์ชันตัวกรองแบบสามเหลี่ยมจะมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่ง 0 (ตรงกลาง) ทำให้บริเวณตรงกลางของเส้นมีความคมชัดมากกว่าบริเวณรอบข้าง

ตัวกรองแบบเกาส์เซียน (Gaussian Filter)

ตัวกรองแบบเกาส์เซียนเป็นตัวกรองแบบ 1 มิติและ 2 มิติ ซึ่งมีรูปแบบคล้ายตัวกรองแบบสามเหลี่ยม การประมวลผลต้องใช้เวลามากกว่าตัวกรองแบบสามเหลี่ยม และผลที่ได้มีคุณภาพที่ได้ค่อนข้างสูง ฟังก์ชันของตัวกรองแบบเกาส์เซียนสามารถแสดงได้จากสมการ (2.2) ในกรณี 1 มิติ

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (2.2)$$

และสมการ (2.3) ในกรณี 2 มิติ

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

โดยที่ x คือระยะในแนวนอนและ y คือระยะในแนวตั้ง

$$\frac{1}{273} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 7 & 26 & 41 & 26 & 7 \\ 4 & 16 & 26 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 7 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

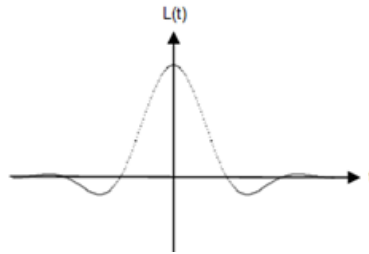
รูปที่ 2.12 ตัวกรองแบบเกาส์เซียนขนาด 5x5 โดยใช้ค่า $\sigma=1.0$

ตัวกรองแบบแลนซ์ซอส (Lanczos Filter)

ตัวกรองแลนซ์ซอสเป็นวิธีที่ใช้ในการทำสเกลของรูปเพราะมีค่าความถี่สูง ดังนั้นรูปที่ได้จะมีคุณภาพมาก ฟังก์ชันของตัวกรองแบบแลนซ์ซอสสามารถหาได้จากสมการ (2.4) และมีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 2.13

$$L(t) = \begin{cases} \sin c(t) \times \sin c\left(\frac{t}{a}\right), & -a < t < a \\ 0, & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (2.4)$$

โดยที่ t คือระยะในแนวนอนหรือแนวตั้ง a และ c เป็นค่าคงที่

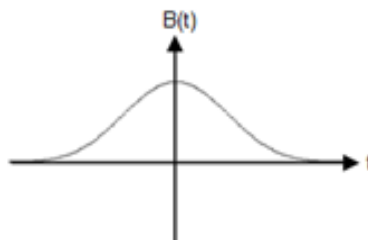


รูปที่ 2.13 ตัวกรองแบบแลนซ์ซอส (Lanczos Filter)

ตัวกรองแบบบีสไปไลน์ (B-Spline Filter)

ตัวกรองแบบบีสไปไลน์เป็นตัวกรองปรับความเรียบทั่วไป วิธีนี้ให้น้ำหนักที่มากกว่าไปยังตรงกลางขององค์ประกอบ ดังนั้นวิธีนี้จึงมีประโยชน์ที่จะนำไปใช้กับรูปที่มีความโค้งสูงหรือจุดที่สูงที่สุด ฟังก์ชันของตัวกรองแบบบีสไปไลน์สามารถแสดงได้จากสมการ (2.5) และมีรูปร่างแสดงดังรูปที่ 2.14

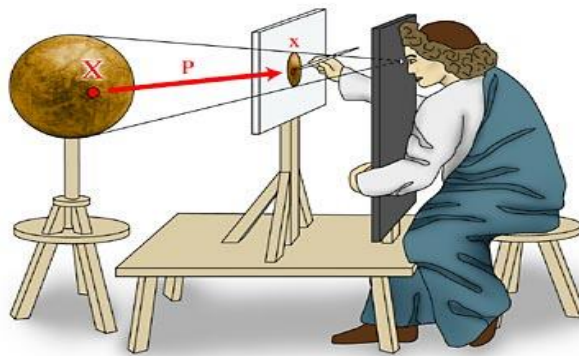
$$B(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}t^3 - t^2 + \frac{2}{3}, & |t| < 1 \\ \frac{1}{6} \times (2 - t)^3, & 1 < |t| < 2 \end{cases} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.14 ตัวกรองแบบบีสไปไลน์ (B-Spline Filter)

2.5 โปรเจกชัน (Projections)

โดยทั่วไปการโปรเจกชันจะเป็นการแปลงพิกัดจาก n มิติ ไปเป็น $n-1$ มิติ เช่น วัตถุ 3 มิติที่ถูกโปรเจก (Projected) ลงบนระนาบโปรเจกชัน (Projection Plane) โดยมีผู้สังเกตลักษณะการโปรเจกของวัตถุ และเพื่อให้สามารถมองลักษณะการโปรเจกได้จึงต้องกำหนดให้วัตถุและผู้สังเกตอยู่คนละข้างกันของระนาบโปรเจกชันแสดงดังในรูปที่ 2.15

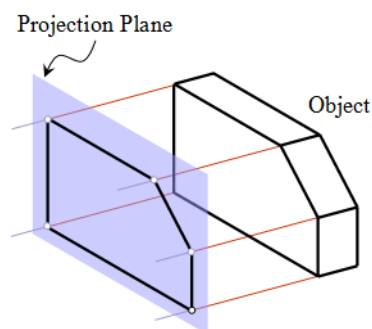


รูปที่ 2.15 หลักการของโปรเจกชัน

โปรเจกชันสามารถแบ่งได้เป็นแบบเชิงเส้น (Linear Projections) และแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Projections) โดยที่โปรเจกชันแบบเชิงเส้นจะประกอบด้วย 2 ชนิด คือโปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections) และโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections)

2.5.1 โปรเจกชันแบบขนาน (Parallel Projections)

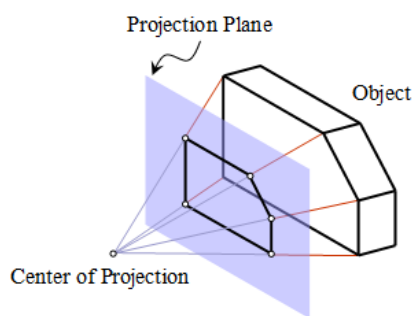
หลักการของโปรเจกชันแบบขนาน คือ การฉายแสงไปตามทิศทางที่กำหนดไว้ให้ปรากฏเป็นจุดใหม่บนระนาบโปรเจกชันซึ่งเป็น 2 มิติ โดยที่แสงและเงาของวัตถุที่ฉายจะพุ่งขนานกันไปกระทบกับระนาบของการโปรเจกและขนาดของรูปที่ได้จากการโปรเจกแบบนี้จะมีขนาดเท่ากับขนาดของวัตถุ ส่วนใหญ่โปรเจกชันแบบขนานนี้ถูกใช้ในการวาดภาพทางวิศวกรรม แสดงดังรูปที่ 2.16



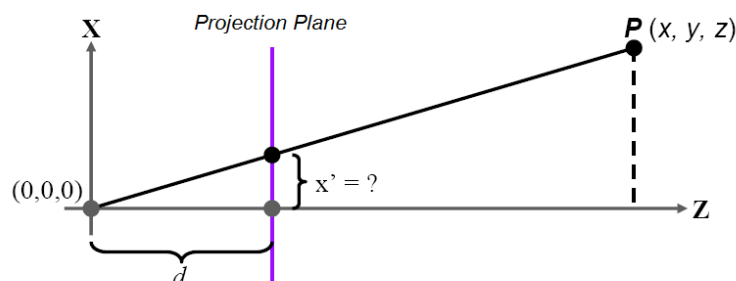
รูปที่ 2.16 โปรเจกชันแบบขนาน

2.5.2 โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections)

โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections) เป็นการมองเห็นวัตถุในลักษณะเดียวกับโลกของความเป็นจริงเหมือนที่ตามนุษย์มองเห็น โปรเจกชันแบบนี้มีจุดศูนย์กลางของการโปรเจก (Center of Projection) อยู่ที่จุดๆหนึ่ง แนวลำแสงและเงาของวัตถุที่ฉายจะพุ่งเข้าไปยังจุดศูนย์กลางของการโปรเจกซึ่งมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยม คือ ผู้สังเกตจะเห็นวัตถุที่อยู่ไกลมีขนาดเล็กกว่าความเป็นจริงเนื่องจากของวัตถุเปลี่ยนแปลงไปโดยมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับระยะห่างระหว่างวัตถุกับจุดศูนย์กลางของการโปรเจก แสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 โปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟ



รูปที่ 2.18 คุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการโปรเจกชัน
แบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Projections)

รูปที่ 2.18 เป็นคุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจากการโปรเจกชันแบบเพอสเปกทีฟที่ทำการโปรเจกภาพจากจุด $P(x, y, z)$ ไปยังจุดบนระนาบของการโปรเจก โดยมีระยะห่างระหว่างระนาบของการโปรเจกกับจุดศูนย์กลางของการโปรเจกเป็นระยะเท่ากับ d และจากคุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้าย จะได้

$$\frac{x'}{d} = \frac{x}{z} \quad (2.6)$$

$$\frac{y'}{d} = \frac{y}{z} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.6) และสมการ (2.7) นำ d คูณตลอดจะได้เป็น

$$x' = \frac{d \cdot x}{z} \quad (2.8)$$

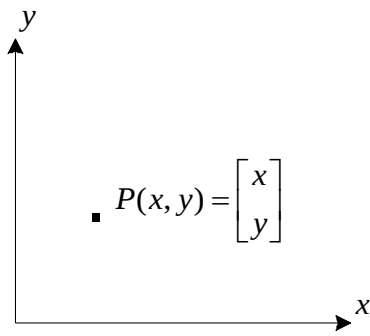
$$y' = \frac{d \cdot y}{z} \quad (2.9)$$

ดังนั้นการโปรเจกภาพจากจุด $P(x, y, z)$ ไปยังจุดบนระนาบของการโปรเจก $P'(x', y', z')$ จะได้เป็น

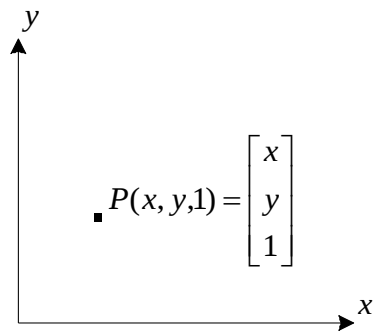
$$P' = \left(\frac{d \cdot x}{z}, \frac{d \cdot y}{z}, d \right) \quad (2.10)$$

2.6 การแปลงเชิงเรขาคณิต (Geometric Transformation)

ในการประมวลผลรูปภาพจำเป็นต้องมีการเคลื่อนย้ายภาพ การย่อภาพ การขยายภาพ หรือมีการหมุนภาพให้อยู่ในมุมมองที่เหมาะสม ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้การแปลงเชิงเรขาคณิต การพิจารณาการแปลงนั้นมักจะเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ สำหรับการแปลงเชิงเรขาคณิตโดยทั่วไปประกอบด้วยการแปลงหลายๆ ชนิดผสมกัน เนื่องจากเป็นการคำนวณในรูปแบบของเมทริกซ์ทำให้ยากในการคำนวณเมทริกซ์ที่มีขนาดแตกต่างกัน จึงได้มีการนำระบบพิกัดโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate) เข้ามาใช้เพื่อแก้ปัญหานี้ โดยทำการจัดรูปแบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinate) จาก (x, y) เพื่อให้อยู่ในรูปแบบของระบบพิกัดโฮโมจีเนียส คือ (xw, yw, w) โดยมี w เป็นค่าแฟกเตอร์สเกลที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จุด (xw, yw, w) จะถูกนอร์มอลไลซ์ (Normalize) โดยทั่วไปสามารถเลือกค่า h เป็นจำนวนจริงบวกใดๆ แต่เพื่อความสะดวกในการหาผลลัพธ์ในทางคณิตศาสตร์มักจะกำหนดให้ค่าของ $w = 1$ ดังนั้นพิกัดโฮโมจีเนียส คือ $(x, y, 1)$ แสดงดังรูปที่ 2.19



a) Cartesian coordinate



b) Homogeneous coordinate

รูปที่ 2.19 ระบบพิกัด

2.6.1 การเลื่อนภาพ (Translation)

การเลื่อนภาพเป็นการเลื่อนตำแหน่งของภาพตามระยะการขจัดทางแนวแกน X (T_x) และตามแนวแกน Y (T_y) เมื่อกำหนดให้พิกัดเดิม คือ (x, y) และพิกัดใหม่ คือ (x', y') จะได้สมการของการเลื่อนภาพดังนี้

$$x' = x + T_x \quad (2.11)$$

$$y' = y + T_y \quad (2.12)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ มีลักษณะดังนี้

$$P' = P + T \quad (2.13)$$

เมื่อ

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

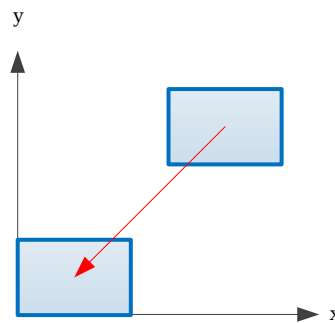
$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \end{bmatrix}$$

ดังนั้นการเลื่อนภาพสามารถจัดอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

รูปที่ 2.20 แสดงตัวอย่างการเลื่อนพิกัดของภาพมายังจุดกำเนิด (0, 0)



รูปที่ 2.20 การเลื่อนพิกัดของภาพ

2.6.2 การย่อและการขยายภาพ (Scaling)

การย่อและการขยายภาพสามารถทำได้โดยใช้สเกลแฟคเตอร์ (Scaling factor) ได้แก่ S_x และ S_y ซึ่งใช้สำหรับการย่อและการขยายภาพในทางแกน X และ Y ตามลำดับ โดยถ้า $(0 < S_x, S_y < 1)$ แสดงว่าเป็นการย่อภาพและ $(S_x, S_y > 1)$ แสดงว่าเป็นการขยายภาพ โดยที่สมการของการย่อและขยายภาพ มีลักษณะดังนี้

$$x' = x \cdot S_x \quad (2.15)$$

$$y' = y \cdot S_y \quad (2.16)$$

$$P' = S \cdot P \quad (2.17)$$

เมื่อ

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

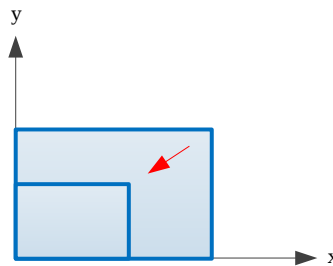
$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} S_x & 0 \\ 0 & S_y \end{bmatrix}$$

ดังนั้นการย่อและการขยายภาพจัดสามารถอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

รูปที่ 2.21 แสดงตัวอย่างการย่อขนาดของภาพ

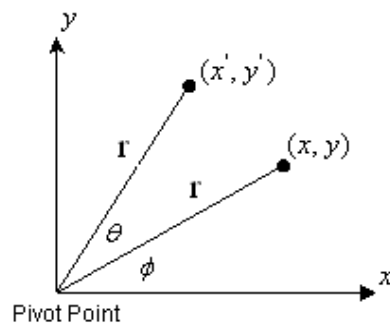


รูปที่ 2.21 การย่อขนาดของภาพ

2.6.3 การหมุนภาพ (Rotation)

การหมุนภาพเป็นการแปลงรูปแบบของภาพที่จะต้องกำหนดว่าจุดใดจุดหนึ่งเป็นจุดหมุน (Pivot Point) เสมอ หลังจากหมุนภาพไปแล้วระยะห่างระหว่างจุดหมุนกับภาพยังคงมีค่าเท่าเดิม รูปร่างและลักษณะของภาพยังคงเดิม แต่ภาพมีการจัดวางที่ต่างไปจากเดิมเนื่องมาจากการหมุนภาพ ซึ่งการหมุนภาพอาจจะหมุนที่หลายๆ ภาพ โดยกำหนดให้การหมุนทวนเข็มนาฬิกามีค่ามุมเป็นบวก และการหมุนตามเข็มนาฬิกามีค่ามุมเป็นลบ และจุดหมุนที่ใช้อาจจะอยู่ภายในหรือนอกภาพก็ได้

การอ้างอิงถึงจุดพิกัด (x, y) นั้น นอกจากจะใช้ระบบพิกัดฉากแล้ว อาจใช้ระบบพิกัดโพลาร์ (การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้ Vector) ก็ได้ ซึ่งทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กันดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ระบบพิกัด Polar การบอกตำแหน่งจุดโดยใช้ Vector

โดยที่

r = ระยะจากจุด Pivot Point ถึง (x, y) , (x', y')

จากรูปที่ 2.22 จะได้ว่า

$$x = r \cos(\phi) \quad (2.19)$$

$$y = r \sin(\phi) \quad (2.20)$$

$$x' = r \cos(\phi + \theta) = r(\cos\phi \cos\theta - \sin\phi \sin\theta) \quad (2.21)$$

$$y' = r \sin(\phi + \theta) = r(\sin\phi \cos\theta + \cos\phi \sin\theta) \quad (2.22)$$

จากสมการ (2.19) และ สมการ (2.20) จะได้สมการของการหมุนรอบจุด Pivot Point ดังนี้

$$x' = x \cos(\theta) - y \sin\theta \quad (2.23)$$

$$y' = x \sin(\theta) + y \cos\theta \quad (2.24)$$

ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ มีลักษณะดังนี้

$$P' = R \cdot P \quad (2.25)$$

เมื่อ

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$$

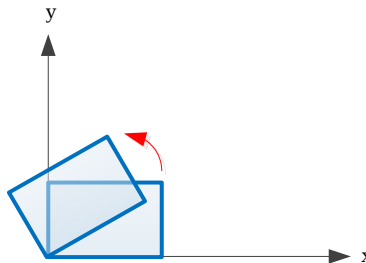
$$P = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

ดังนั้นการหมุนสามารถจัดอยู่ในรูปของโฮโมจีเนียสมเทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

รูปที่ 2.23 แสดงตัวอย่างการหมุนภาพในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.23 การหมุนภาพ

2.6.4 การบิดภาพ (Shearing)

การบิดภาพจะทำให้บางส่วนของภาพหรือภาพทั้งหมดเกิดการบิดเบือนขึ้น ซึ่งจะพิจารณาเพียง 2 แบบ คือ การบิดภาพในแนวแกน X และการบิดภาพในแนวแกน Y การบิดภาพในแนวแกน Y จะทำให้เกิดการย้ายจุด (x, y) ไปยังจุด (x', y') โดยที่

$$x' = x, \quad y' = y + x \cdot \text{shY} \quad (2.27)$$

การบิดภาพในแนวแกน Y จะทำให้จุดต่างๆ ในแกน Y เลื่อนขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ Shy factor (shY) จากสมการการบิดภาพดังกล่าว สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & shY & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

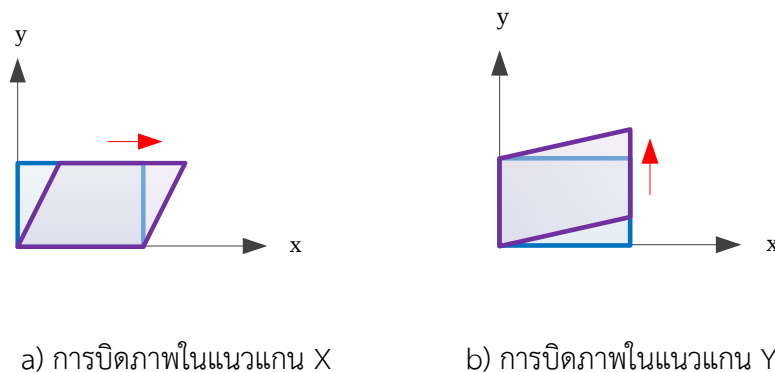
สำหรับการบิดภาพในแนวแกน X จะให้ผลตรงกันข้ามกับการบิดภาพในแนวแกน Y กล่าวคือ จุด (x, y) ของภาพจะถูกแปลงไปเป็นจุด (x', y') โดยที่

$$y' = y, \quad x' = x + y \cdot shX \quad (2.29)$$

การบิดภาพในแนวแกน X ทำให้จุดต่างๆ ในแกน X เลื่อนขึ้นหรือลงขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ shY factor (shX) จากสมการการบิดภาพดังกล่าว สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ shX & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

รูปที่ 2.24 แสดงตัวอย่างการบิดภาพในแนวแกน X และแกน Y



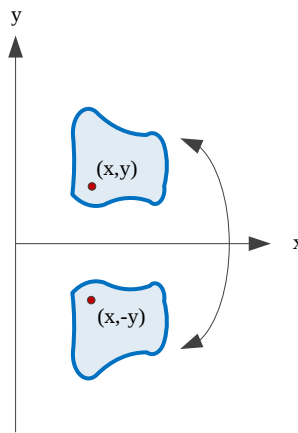
รูปที่ 2.24 การบิดของภาพ

2.6.5 การสะท้อนภาพ (Reflection)

การสะท้อนภาพเป็นการแปลงภาพของวัตถุในลักษณะของกระจก โดยจะทำการหมุนภาพต้นแบบไป 180 องศา รอบแกนการสะท้อน ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาการสะท้อน 3 แบบดังนี้

2.6.5.1 การสะท้อนตามแกน X

การสะท้อนตามแกน X ทำได้โดยการคูณจุดทุกจุดที่ใช้นิยามภาพกับเมทริกซ์การแปลงสำหรับการสะท้อนกับแกน X ทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') แสดงดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 การสะท้อนตามแกน x

การสะท้อนตามแกน X สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$x' = x \quad (2.31)$$

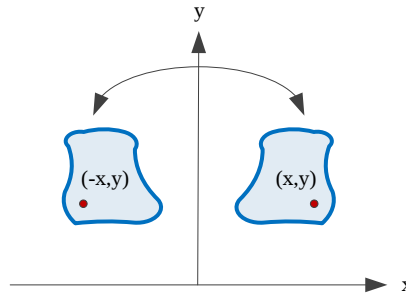
$$y' = -y \quad (2.32)$$

และสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

2.6.5.2 การสะท้อนตามแกน Y

การสะท้อนตามแกน Y ทำได้โดยการคูณจุดทุกจุดที่ใช้นิยามภาพกับเมทริกซ์การแปลงสำหรับการสะท้อนกับแกน Y จะทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') แสดงดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การสะท้อนตามแกน Y

การสะท้อนกับแกน Y สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$x' = -x \quad (2.34)$$

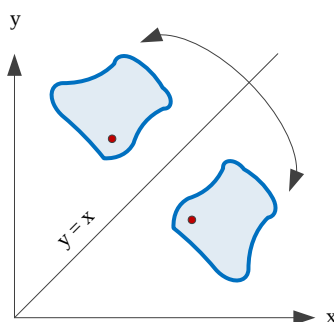
$$y' = y \quad (2.35)$$

และสามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

2.6.5.3 การสะท้อนรอบเส้นตรงใดๆ

สำหรับการสะท้อนรอบแกนใดๆ สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งแกน $Y = X$ หรือ $Y = -X$ ก็ได้ กรณีที่เป็น การสะท้อนรอบแกน $Y = X$ แสดงดังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การสะท้อนรอบเส้นตรง $Y = X$

สำหรับการสะท้อนกับเส้นตรง $Y = X$ จะทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

กรณีที่เป็นการสะท้อนรอบแกน $Y = -X$ การสะท้อนกับเส้นตรง $Y = -X$ จะทำให้จุด (x, y) กลายเป็นจุด (x', y') สามารถเขียนในรูปแบบของโฮโมจีเนียสมเทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

โดยทั่วไปการประมวลผลภาพเป็นการแปลงเชิงเรขาคณิตของภาพใช้การแปลงหลายๆชนิดร่วมกันหรือเรียกว่า การแปลงแบบผสม (Multiple Transformations) เช่น ในระบบ 3 มิติ การหมุนในสองแกนก็สามารถหาเมทริกซ์การแปลงของการหมุนได้โดยการนำเมทริกซ์การแปลงของการหมุนรอบแกนในแต่ละแกนมาคูณกัน แต่หากมีการสลับตำแหน่งของการคูณกันแล้วจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่เท่ากัน

ส่วนในกรณีที่มีการหมุนและการเคลื่อนย้ายพิคัดด้วย กรณีที่เป็น 2 มิติ โดยมีลำดับการแปลง คือ เคลื่อนย้ายจุดก่อนแล้วจึงหมุนตามลำดับ จะได้เป็นดังนี้

$$M = [T][R] \quad (2.39)$$

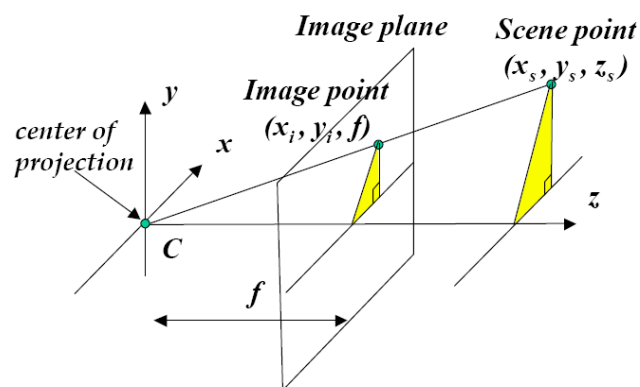
$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

สำหรับการแปลงเชิงเรขาคณิตแบบอื่นๆ ที่มีร่วมกันของการแปลงแบบต่างๆ สามารถหาเมทริกซ์การแปลงได้ในทำนองเดียวกัน

2.7 เรขาคณิตสำหรับการเห็นใน 3 มิติ (Geometry for 3D Vision)

2.7.1 การเกิดภาพในกรณีที่พิกัดโลกซ้อนทับพิกัดกล้อง

ในระบบภาพ 2 มิติส่วนใหญ่เกิดจากการมองวัตถุ 3 มิติผ่านเลนส์ของตา หรือเลนส์ของกล้อง ขบวนการเกิดภาพสามารถถูกจำลองได้โดยใช้การโปรเจกชันแบบเพอร์สเปกทีฟ (Perspective Projection) โดยแทนแกนระบบพิกัดโลก (World Coordinate System) ด้วยตัวอักษรตัวใหญ่ (X, Y, Z) และแทนแกนของระบบพิกัดของกล้องด้วยตัวอักษรตัวเล็ก (x, y, z) ในกรณีนี้สมมติให้พิกัดของโลกละดับซ้อนทับกับระบบพิกัดของกล้อง แสงจากวัตถุ 3 มิติส่องผ่านศูนย์กลางการโปรเจกชันแล้วโปรเจกต์ลงบนระนาบของภาพ (Image Plane) ที่เป็น 2 มิติ โดยให้จุด (x_s, y_s, z_s) แทนจุดบนพิกัดของวัตถุ 3 มิติ และให้ (x_i, y_i) แทนจุดของวัตถุที่ถูกฉายลงบนระนาบของภาพ โดยระนาบของภาพจะอยู่ห่างไปทางขวาของจุดกำเนิดของพิกัดของกล้องเป็นระยะเท่ากับ f ซึ่ง f คือ ความยาวโฟกัสที่เกิดจากผลของเลนส์กล้อง



รูปที่ 2.28 แบบจำลองของระบบสร้างภาพของกล้อง

จากรูปที่ 2.28 โดยการใช้กฎสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ว่า

$$\frac{x_i}{f} = \frac{x_s}{z_s} \quad (2.41)$$

$$\frac{y_i}{f} = \frac{y_s}{z_s} \quad (2.42)$$

เมื่อนำค่า f คูณในสมการ (2.41) และสมการ (2.42) จะได้

$$x_i = \frac{fx_s}{z_s} \quad (2.43)$$

$$y_i = \frac{fy_s}{z_s} \quad (2.44)$$

ดังนั้นจุดที่ถูกโปรเจกต์ลงบนระนาบภาพ (x_i, y_i) จะมีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับจุดของวัตถุ 3 มิติ (x_s, y_s, z_s) จากความสัมพันธ์นี้สามารถทำให้มองเห็นได้ง่ายโดยใช้ระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียส (Homogeneous Coordinate) โดยกำหนดให้

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

เป็นเวกเตอร์ที่ประกอบด้วยจุดพิกัดของวัตถุ โดยที่เวกเตอร์ในระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียส $\tilde{\mathbf{v}}$ ของ $\mathbf{v}$ คือ

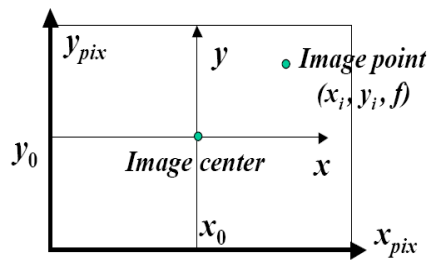
$$\tilde{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

จากสมการ (2.43) และสมการ (2.44) พิจารณาเป็นเมทริกซ์ของการแปลงแบบเพอสเปกทีฟ (Perspective Transformation) สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดโลกกับระบบพิกัดของกล้องได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f/z_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f/z_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

2.7.2 การแปลงจากหน่วยความยาวเป็นพิกเซล (Pixel)

การแปลงหน่วยความยาวเป็นจุดภาพหรือพิกเซล (Pixel) เริ่มจากการกำหนดให้พิกัดของภาพมีจุดกำเนิดอยู่ที่มุมล่างซ้าย การแปลงจากความยาวเป็นพิกเซลจำเป็นต้องรู้ค่าการปรับสเกล (Aspect Ratio) ของแต่ละแกนของระบบพิกัดภาพ ค่าการปรับสเกลเป็นค่าที่ระบุจำนวนพิกเซลต่อหนึ่งหน่วยความยาวในระบบภาพ ในบางระบบพิกเซลในแถวถัดไปอาจเกิดการเอียงกัน จึงจำเป็นต้องรู้ค่าที่เรียกว่า พารามิเตอร์ของการเอียง (Skew Parameter) นอกจากนั้นยังจำเป็นต้องรู้จุดหลัก (Principal Point) $u_0 = (x_0, y_0)$ ซึ่งบางครั้งถูกเรียกว่า จุดกึ่งกลางของภาพ ดังนั้นพิกัดของจุดในหน่วยพิกเซลของภาพ (x_i, y_i, f) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 พิกัดบนระนาบของภาพ

ซึ่งจะได้

$$x_{pix} = k_x x_i + x_0 \quad (2.48)$$

$$y_{pix} = k_y y_i + y_0 \quad (2.49)$$

จากสมการ (2.48) และสมการ (2.49) จะได้

$$x_{pix} = k_x f \frac{x_s}{z_s} + x_0 \quad (2.50)$$

$$y_{pix} = k_y f \frac{y_s}{z_s} + y_0 \quad (2.51)$$

โดยที่ k_x คือ ค่าการปรับสเกลในทิศทางแกน x

k_y คือ ค่าการปรับสเกลในทิศทางแกน y

และ s คือ ค่าพารามิเตอร์ของการเอียง

จากสมการ (2.50) และสมการ (2.51) สามารถทำให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

โดยที่ $\alpha_x = k_x f$ คือ ค่าความยาวโฟกัสในทิศทางแกน x ในหน่วยของพิกเซล

และ $\alpha_y = k_y f$ คือ ค่าความยาวโฟกัสในทิศทางแกน y ในหน่วยของพิกเซล

สมการ (2.52) สามารถจัดรูปแบบใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ = K[I_3|O_3] \quad (2.53)$$

โดยเมทริกซ์ K มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมบน (Upper Triangle) ขนาด 3×3 เรียกว่า เมทริกซ์การปรับเทียบ (Calibration Matrix) เป็นเมทริกซ์ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ภายใน (Internal Parameter or Intrinsic Parameter) ที่สำคัญของกล้อง

2.7.3 กรณีที่พิกัดของโลกไม่ซ้อนทับพิกัดของกล้อง

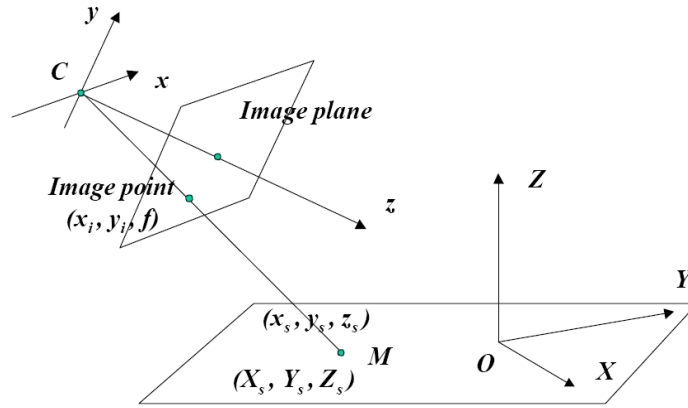
ในกรณีที่พิกัดของโลกไม่ซ้อนทับพิกัดของกล้องนั้นสามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.30 ซึ่งจุดกึ่งกลางของการโปรเจกชันของกล้องถูกวางไว้ที่จุดกึ่งกลางของระบบพิกัดอ้างอิงของโลก โดยไม่มีการส่ายหรือเอียงท่ามกับแกนอ้างอิง ในกรณีนี้แบบจำลองการเกิดภาพ (Imaging Model) สามารถเขียนแทนด้วย

$$x = M_i X \quad (2.54)$$

โดยที่ x คือ เวกเตอร์ของจุดบนวัตถุในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส

X คือ เวกเตอร์ของจุดบนระนาบภาพในระบบพิกัดโฮโมจีเนียส

และ M_i คือ เมทริกซ์การโปรเจกชันของกล้องที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ภายในของกล้อง



รูปที่ 2.30 แบบจำลองการสร้างภาพกรณีพิกัดของโลกไม่ซ้อนทับกับพิกัดของกล้อง

ในกรณีที่เกิดภาพที่จุดกึ่งกลางของการโปรเจกชันของกล้องไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับจุดกึ่งกลางของระบบพิกัดอ้างอิงของโลก กล่าวคือ ระบบพิกัดโลกเกิดมุมส่าย (Pan) และเอียง (Tilt) รวมทั้งมีระยะห่างของระนาบของกล้องและระนาบของพิกัดโลก ดังนั้นจึงทำให้เกิดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหมุนและการย้ายจุดอ้างอิง โดยพารามิเตอร์นี้เป็นพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง (External Parameter or Extrinsic Parameter) ที่ประกอบด้วยเมทริกซ์การหมุนและเวกเตอร์การย้ายที่อ้างอิงกับระบบพิกัดคือ

$$M_e = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

ดังนั้นแบบจำลองการเกิดภาพ (Imaging Model) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$x = PX \quad (2.56)$$

โดยที่ $P = M_i M_e$ คือ Camera Projection Matrix ที่รวมทั้งพารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล้องซึ่งเมทริกซ์ M สามารถกระจายได้ดังนี้

$$P = X[I_3 | O_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & I \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

เมื่อนำสมการ (2.56) แทนในสมการ (2.57) จะได้ว่า

$$x = K[I_3 | O_3] \begin{bmatrix} R & -T \\ O_3^T & I \end{bmatrix} X \quad (2.58)$$

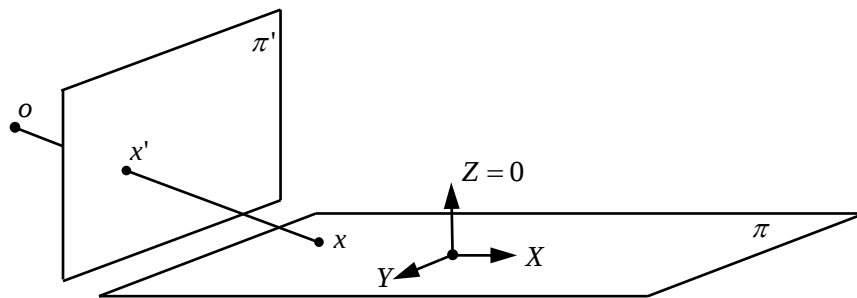
ซึ่งสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบเมทริกซ์โฮโมจีเนียสได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

โดยที่เมทริกซ์ P เป็นเมทริกซ์การแปลงของกล้องมีขนาด 3×4 ที่รวมทั้งพารามิเตอร์ภายในและพารามิเตอร์ภายนอกเข้าด้วยกัน ซึ่งเป็นการแปลงภาพของวัตถุต่างๆ จากระนาบ 3 มิติมายังระนาบของกล้องที่เป็นระนาบ 2 มิติ ดังนั้นหากเป็นการแปลงจากระนาบ 2 มิติ มายังระนาบของกล้อง 2 มิติ ซึ่งก็คือ $Z = 0$ และจากเมทริกซ์การแปลงของกล้องมีขนาด 3×4 สามารถเขียนได้ใหม่เป็นเมทริกซ์การแปลงขนาด 3×3 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

โดยเป็นการแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ (Plane Projective Transformations) ดังแสดงในรูปที่ 2.31

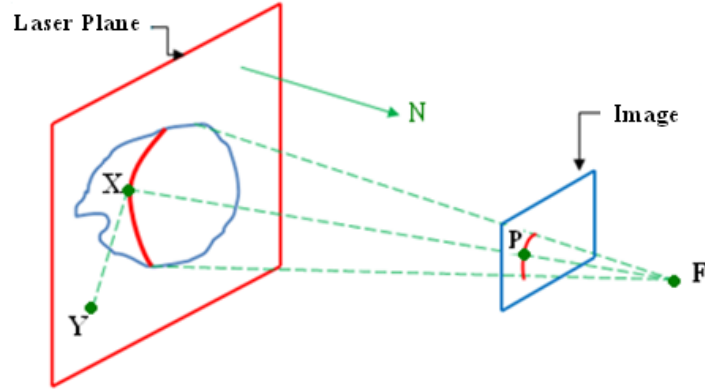


รูปที่ 2.31 การแปลงแบบโปรเจกทีฟของระนาบ 2 มิติของกล้อง

2.7.4 การแปลงภาพจากระนาบ 2 มิติมายังระนาบ 3 มิติ

การแปลงภาพของวัตถุต่างๆจากระนาบ 2 มิติมายังระนาบของกล้องที่เป็นระนาบ 3 มิติ โดยการหาจุดพิกัดบนระนาบเป็นการหาพิกัดของจุด X บนระนาบที่ตัดกับเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างจุดโฟกัสกับจุดบนภาพถ่าย จากรูปที่ 2.32 กำหนดให้ F คือ ตำแหน่งของจุดโฟกัส P คือ ตำแหน่งภาพบนพิกัด 3 มิติ

Y คือ ตำแหน่งของจุดที่รู้พิกัดบนระนาบที่เส้น laser ตัดผ่าน และ N คือ normal vector ของระนาบที่เส้น laser ตัดผ่าน พิกัดของตำแหน่ง X สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.32 การแปลงภาพของวัตถุจากระนาบ 2 มิติมายังระนาบของกล้องที่เป็นระนาบ 3 มิติ

$$N \cdot (X - Y) = 0 \quad (2.61)$$

$$N \cdot X = N \cdot Y \quad (2.62)$$

เนื่องจาก X อยู่บนเส้นตรงที่เชื่อมระหว่าง F กับ P ดังนั้น

$$X = F + u(P - F) \quad (2.63)$$

แทนสมการ (2.63) ในสมการ (2.62) จะได้

$$N \cdot (F + u(P - F)) = N \cdot Y \quad (2.64)$$

$$u = \frac{N \cdot (Y - F)}{(N \cdot (P - F))} \quad (2.65)$$

เมื่อแทนค่า u ในสมการที่ (2.63) จะได้

$$X = F + \frac{N \cdot (Y - F)}{(N \cdot (P - F))} (P - F) \quad (2.66)$$

2.8 การปรับเทียบกล้อง (Camera Calibration)

การปรับเทียบกล้องเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องเพื่อให้พิกัดที่วัดได้ตรงกับพิกัดจริง โดยนำภาพที่ถ่ายได้มาประมวลผล พารามิเตอร์มีทั้งหมด 2 แบบ คือ 1) Intrinsic Parameter ได้แก่ ระยะโฟกัส ขนาดของแต่ละพิกเซล (Pixel) ในการรับภาพ และตำแหน่งของจุดกึ่งกลางภาพ และ 2) Extrinsic Parameter ได้แก่ ตำแหน่งและการหมุนของวัตถุ

การปรับเทียบกล้องจะทำการประมาณหาค่าเมทริกซ์ M จากจุดในระบบพิกัด 3 มิติที่รู้ตำแหน่งและภาพที่เกิดขึ้นของจุด โดยทำการถ่ายภาพแผ่นตารางที่มีลักษณะเหมือนกับตารางหมากรุก ซึ่งทราบระยะจุดตัดของตาราง จากนั้นถ่ายภาพวัตถุที่ถูกสแกนซึ่งอยู่บนแผ่นตาราง แล้วนำข้อมูลภาพที่ทราบตำแหน่งของจุดตัดบนแผ่นตารางมาประมวลผลทางคณิตศาสตร์ ทำให้ได้ค่า Intrinsic และ Extrinsic Parameter และได้ตำแหน่งจุดตัดของแผ่นตารางบนรูปภาพที่กล้องรับมาได้ แล้วนำมาเทียบกับรูปภาพที่ได้จริง

การหาเมทริกซ์ M สามารถทำได้โดยการกำหนดจุดในฉากที่ทราบพิกัด $X = [x, y, z]^T$ และจุดในภาพ 2 มิติ $[u, v]^T$ ให้สอดคล้องกัน ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \alpha u \\ \alpha v \\ \alpha \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha u \\ \alpha v \\ \alpha \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.67)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha u \\ \alpha v \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14} \\ m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24} \\ m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalize) ให้สมาชิกที่ 3 เป็น 1 จะได้สมการเป็น

$$\begin{aligned} u(m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}) \\ = m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14} \end{aligned} \quad (2.69)$$

$$\begin{aligned} v(m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}) \\ = m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24} \end{aligned} \quad (2.70)$$

ดังนั้นจะได้สมการเชิงเส้น 2 สมการสำหรับจุดในฉาก 3 มิติหนึ่งจุดและจุดในภาพ 2 มิติที่สอดคล้องกัน
ทำการเขียนสมการ (2.70) ใหม่ในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -ux & -uy & -uz & -u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x & y & z & 1 & -vx & -vy & -vz & -v \\ & & & & & & & \vdots & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} \\ m_{12} \\ \vdots \\ m_{34} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.71)$$

จากสมการจะเห็นว่า มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 11 ตัวแปรแทนที่จะเป็น 12 ตัวแปรเนื่องจากแพคเตอร์การย่อและการขยายภาพไม่สามารถทราบค่าได้ ในการแก้สมการโฮโมจีเนียสจึงต้องใช้อย่างน้อย 6 จุด และถ้าใช้จุดมากกว่า 6 จุดจะได้สมการ Over-Determined ซึ่งสามารถแก้ได้โดยใช้วิธี Least Square หรือใช้การหา Singular Value Decomposition (SVD) ของ A เมทริกซ์ โดยที่ M คือ แกนสุดท้ายของ V เมื่อได้เมทริกซ์ M แล้วจึงทำการแยกพารามิเตอร์ภายใน (Intrinsic Parameter)

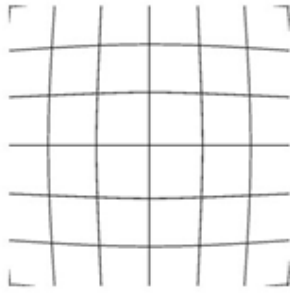
เนื่องจาก

$$M = [KR|-KRT] = [A|b] \quad (2.72)$$

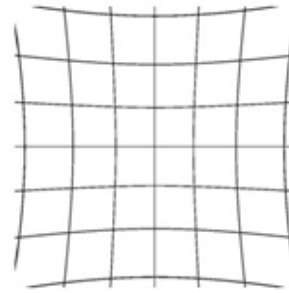
ดังนั้น กำหนดให้ A แทนเมทริกซ์ย่อยขนาด 3x3 และ b แทนเวกเตอร์คอลัมน์ขวามือสุด เวกเตอร์ที่มีพารามิเตอร์ระยะเคลื่อนที่สามารถแยกออกมาได้ง่ายโดย $t = -A^{-1}b$ ซึ่งเวกเตอร์ t ให้ข้อมูลที่บ่งบอกถึงตำแหน่งกึ่งกลางของ Image Plan และพิจารณา $A = KR$ โดยที่ K เป็นเมทริกซ์สามเหลี่ยมบน (Upper Triangle) และเมทริกซ์ R เป็นเมทริกซ์ออร์โธกอนอล การแยกเมทริกซ์ K และ R สามารถทำได้โดยใช้เทคนิค QR Decomposition

2.9 การปรับเทียบการบิดเบือนของเลนส์ (Lens Distortion Calibration)

ปัญหาการบิดเบือนของภาพมักจะเกิดกับภาพที่ใช้เลนส์มุมกว้าง โดยการบิดเบือนของภาพจะมีลักษณะคล้อยออกเป็นทรงกลม (Barrel Distortion) ส่วนเลนส์เทเลหรือเลนส์ระยะไกล จะมีการบิดเบือนของภาพในลักษณะที่ตรงข้ามกัน คือ จะมีการห่อตัวของภาพ (Pincushion Distortion) ตัวอย่างการบิดเบือนของภาพแสดงดังรูปที่ 2.33



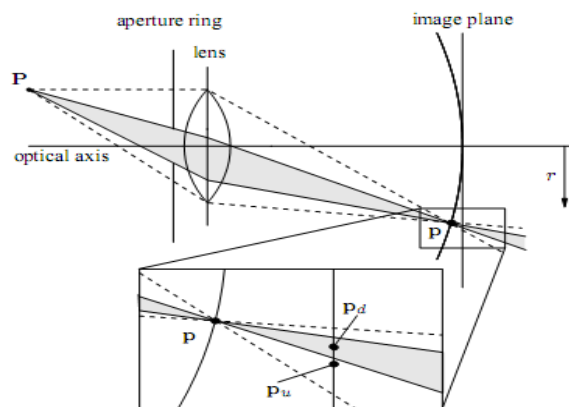
a) แบบทรงกลม



b) แบบห่อตัวของภาพ

รูปที่ 2.33 การบิดเบือนของภาพ

สาเหตุของการบิดเบือนของภาพเกิดจากรัศมีของเลนส์ ทำให้ระนาบของภาพหรือ Image Plane ไม่ได้อยู่ในแนวเดียวกับรัศมีที่ภาพตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 ที่มาของการบิดเบือนของภาพ

ฟังก์ชันการบิดเบือนรัศมีผกผัน $f(r_d)$ สามารถประมาณการและหาค่าของตัวแปรได้โดยใช้สมการการขยายตัวเทย์เลอร์ดังสมการที่ (2.73) – (2.75)

$$r_u = f(r_d) = r_d + r_d \sum_{i=0}^{\infty} k_i r_d^{i-1} \quad (2.73)$$

หรือ

$$r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2} \quad (2.74)$$

หรือ

$$r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad (2.75)$$

ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$x_u = x_d + x_d \sum_{i=0}^{\infty} k_i r_d^{i-1} \quad (2.76)$$

และ

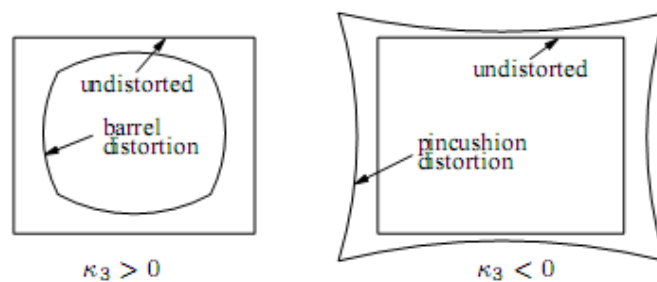
$$y_u = y_d + y_d \sum_{i=0}^{\infty} k_i r_d^{i-1} \quad (2.77)$$

โดยที่สมการ (2.76) และสมการ (2.77) สามารถลดรูปให้เหลือ

$$x_u = x_d + x_d (k_3 r_d^2 + k_5 r_d^4) \quad (2.78)$$

$$y_u = y_d + y_d (k_3 r_d^2 + k_5 r_d^4) \quad (2.79)$$

จากสมการ (2.78) และ (2.79) ตัวแปร k_3 เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อประเภทของการบิดเบือนของภาพ โดยที่ $k_3 > 0$ เป็นการบิดเบือนทรงกลมและ $k_3 < 0$ เป็นการบิดเบือนแบบห่อตัวของภาพ รูปที่ 2.35 แสดงอิทธิพลของตัวแปร k_3



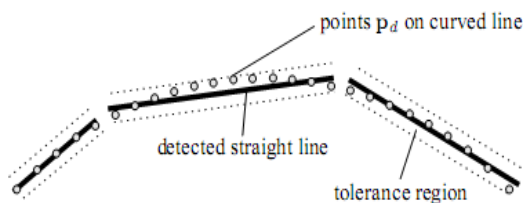
รูปที่ 2.35 ตัวแปร K_3 ที่มีอิทธิพลต่อการบิดเบือนของภาพ

การสอบเทียบเลนส์เพื่อแก้ไขการบิดเบือนของภาพสามารถทำได้โดยใช้ขั้นตอนการสอบเทียบ 4 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

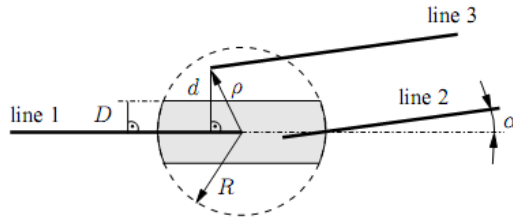
ขั้นตอนที่ 1 การตรวจหาจุดบนส่วนโค้ง (Detection of Points on Curved Line Segment) เป็นวิธีที่อาศัยข้อจำกัดที่เส้นตรงในภาพ 3 มิติ ที่ต้องฉายภาพให้เป็นเส้นตรงในระนาบภาพ 2 มิติ ถ้าจะทำ

ให้รัศมีการบิดเบือนมีค่าเท่ากัน ดังนั้นรัศมีของเลนส์จึงมีความบิดเบือนที่จุด P บนเส้นตรง ในภาพ 3 มิติที่ฉายความบิดเบือนที่จุด p_d บนเส้นโค้ง เพราะฉะนั้นจึงทำการหาฟังก์ชันการบิดเบือนรัศมีผกผัน $f(r_d)$ ที่จุดทุกจุดของ p_d บนเส้นโค้งที่ไปยังจุด p_d ที่อยู่บนเส้นตรง ดังนั้นในขั้นตอนแรกจุด p_d บนเส้นโค้งนี้เป็นจุดที่ตรวจพบการบิดเบือน

ขั้นตอนที่ 2 การเชื่อมโยงของส่วนเส้นโค้ง (Linkage of Curved Line Segments) ฟังก์ชันการบิดเบือนรัศมีผกผัน $f(r_d)$ ทำการประมาณจากเส้นตรงเส้นเดียวเท่านั้น ในขั้นตอนการกำจัดโดยการใช้ในการตรวจหาค่าความแตกต่างระหว่างเส้นตรงและเส้นโค้งดังแสดงในรูปที่ 2.36 ถ้าเส้นโค้งสั้นแสดงว่าความแตกต่างนี้มีขนาดเล็ก และการประมาณค่ามีความแปรปรวนสูง ดังนั้นการใช้เส้นตรงยาวเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของการประมาณเพื่อให้สามารถตรวจพบเส้นโค้งได้ ส่วนเส้นตรงจากขั้นตอนก่อนหน้านี้จะต้องมีการเชื่อมโยงเข้าหากัน ถ้าเส้นตรงทั้งสองเส้นเกือบมีทิศทางเดียวกันและจุดสุดท้ายใกล้กันจึงจะถือว่าส่วนของเส้นตรงสองเส้นนั้นเชื่อมโยงกัน การค้นหาขั้นตอนวิธีการเชื่อมโยงภายในรัศมี R รอบจุดสิ้นสุดของแต่ละจุดสำหรับของแต่ละเส้นตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.37 จากรูป จุดสิ้นสุดของเส้นตรงที่ 2 และ 3 เป็นจุดที่ถูกพิจารณาเนื่องจากระยะทาง ρ ไปยังจุดสิ้นสุดของเส้นตรง 1 มีค่าน้อยกว่า R จากนั้นจะทำการตรวจสอบเส้นตรง โดยการตรวจสอบด้วยค่าสัมบูรณ์ของมุม α ว่ามีขนาดเล็กกว่าเกณฑ์ที่กำหนดในการเชื่อมโยงของเส้นคู่ขนานหรือไม่ สุดท้ายจะดำเนินการตรวจสอบตามความเข้ากันที่จุดสิ้นสุดของเส้นตรงที่เชื่อมโยง ว่าตั้งฉากกับระยะทาง d ไปยังเส้นตรงอื่นๆ ที่มีขนาดเล็กกว่าเกณฑ์หรือไม่ โดยเส้นที่สามารถเชื่อมต่อได้จะอยู่ในพื้นที่สีเทาดังแสดงในรูปที่ 2.37 ซึ่งมีการเชื่อมต่อเส้นตรงที่ 1 และเส้นตรงที่ 2 เนื่องจากอยู่ในพื้นที่สีเทา ส่วนเส้นตรงที่ 1 และเส้นตรงที่ 3 ไม่มีการเชื่อมต่อ สุดท้ายทั้งเส้นตรงที่สั้นและเส้นตรงทั้งหมดในทิศทางแนวรัศมีจะถูกเอาออกเพราะมีข้อมูลที่เชื่อถือได้เกี่ยวกับรัศมีการบิดเบือนเลนส์ ผลที่ได้คือจำนวนเส้นโค้ง M ความยาวเส้นโค้ง L_m โดยที่ $m = 1, \dots, M$ และทุกๆ เส้นตรงประกอบด้วยจุดจำนวน N_m จุดที่บิดเบือน $p_{d, n}$ โดยที่ $n = 1, \dots, N_m$



รูปที่ 2.36 การตรวจหาจุด p_d บนส่วนเส้นโค้งด้วยตัวตรวจจับเส้นตรง



รูปที่ 2.37 การเชื่อมโยงของเส้นตรงบริเวณส่วนโค้ง

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบค่าการขจัด (Outlier Elimination) เป็นแนวทางการประเมินประสิทธิภาพของเส้นตรงในโลก 3 มิติ ซึ่งถูกนำไปใช้สำหรับการประมาณค่าของฟังก์ชันการบิดเบือนรัศมีผกผัน $f(r_d)$ ดังนั้น จึงจำเป็นต้องตรวจสอบหาเส้นโค้งในโลก 3 มิติ และทำการตัดออกจากชุดของความยาวเส้นโค้ง

การตรวจสอบค่าการขจัดใช้เทคนิคการสุ่มตัวอย่าง Consensus (RANSAC) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับการยอมรับสำหรับการกำจัดและตรวจสอบค่าที่ใช้สำหรับการประยุกต์ในด้านการเห็นภาพในคอมพิวเตอร์ ประโยชน์จากเทคนิคนี้คือ สามารถรับมือกับข้อมูลที่มีขนาดใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่นๆ

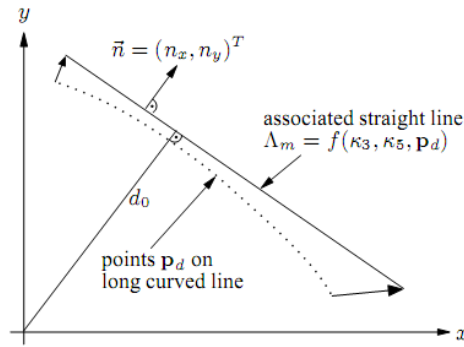
การประยุกต์ใช้ RANSAC เริ่มต้นด้วยการสุ่มเลือกเส้นโค้งที่ยาวมาหนึ่งเส้น (L_m) ออกมาจากชุดฟังก์ชัน การบิดเบือนรัศมีผกผัน $f(r_d)$ ที่ประมาณค่าจากเส้นโค้งนี้ ดังนั้นในขั้นตอนต่อไปเป็นฟังก์ชันแรกสำหรับการประมาณค่าตัวแปร K_3 และ K_5 ของฟังก์ชันการบิดเบือนรัศมีผกผันจากเส้นโค้งยาวที่สุ่มมา

จากสมการ (2.78) และสมการ (2.79) นำจุดทั้งหมดจุดที่บิดเบือน $p_{d,n} = (x_{d,n}, y_{d,n})^T$ ของเส้นโค้งที่มีความยาวที่เลือกแมปไปยังจุดบิดเบือน $p_{u,n} = (x_{u,n}, y_{u,n})^T$ ดังแสดงในรูปที่ 2.38 ซึ่งสามารถแสดงด้วยสมการดังนี้

$$x_{u,n} = x_{d,n} + x_{d,n}(k_3 r_{d,n}^2 + k_5 r_{d,n}^4) \quad (2.80)$$

$$y_{u,n} = y_{d,n} + y_{d,n}(k_3 r_{d,n}^2 + k_5 r_{d,n}^4) \quad (2.81)$$

$$\mathcal{E}_n = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} x_{u,n} \\ y_{u,n} \end{pmatrix} - d_o \quad (2.82)$$



รูปที่ 2.38 จุด p_d บนเส้นโค้งถูกแมปบนจุด p_u บนเส้นตรงที่เชื่อมโยง Λ_m ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ K_3 , K_5 และจุด p_d

วิธี RANSAC เป็นการประมาณตัวแปร K_3 ที่เกิดขึ้นจริงและ K_5 จากเส้นโค้ง L_m ที่สุ่มเลือกออกจากชุด จากนั้นพยายามลดเซตความบิดเบือนของรัศมีกับตัวแปรที่เกิดขึ้นจริงเหล่านี้ และประเมินร้อยละของค่าผิดปกติ เส้นตรง L_m ถือเป็นการตรวจหาค่า ถ้ามีค่ามากกว่าอัตราร้อยละของจุดที่ไม่บิดเบือน p_u , n ส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์ขนาดใหญ่ที่ $\delta_{\max}$ จากเส้นตรงที่เกี่ยวข้อง ส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ (2.82) โดยใช้ตัวแปรที่เกิดขึ้นจริง K_3 และ K_5

ขั้นตอนที่ 4 การประมาณค่าพารามิเตอร์สุดท้ายของฟังก์ชันการบิดเบือนผกผันรัศมี (Inverse Radial Distortion Function) การประมาณค่าตัวแปรสุดท้ายของฟังก์ชันการบิดเบือนรัศมีผกผัน $f(r_d)$ ช่วยลดความยาวของฟังก์ชันลงโดยเป็นดังสมการนี้

$$\sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^{N_m} (\varepsilon_n)^2 \rightarrow \min \quad (2.83)$$

2.10 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุ (3D Modeling)

ข้อมูลที่ได้จากการสแกนจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบของพิกัดจุดโดยใช้การประมวลผลภาพและการแปลงเชิงเรขาคณิตตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งแต่ละจุดแทนพิกัดจุดของพื้นผิววัตถุที่ทำการวัด ข้อมูลจุดที่วัดในลักษณะนี้จะมีปริมาณมาก และเรียกข้อมูลจุดเหล่านี้ว่า กลุ่มข้อมูลจุด (Point Cloud) ซึ่งจะถูกนำไปสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติต่อไป

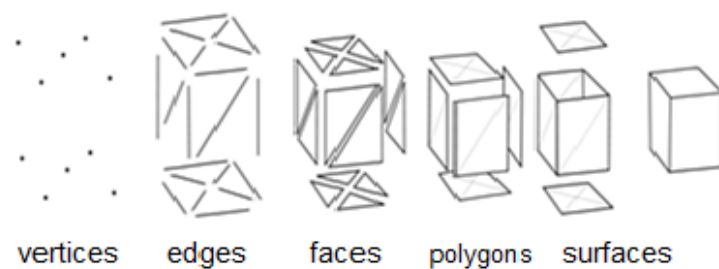
แบบจำลอง 3 มิติของวัตถุที่มีรูปแบบเป็นโครงสร้าง 3 มิติลายเส้น ซึ่งวัตถุ 3 มิติที่ถูกเขียนขึ้นทั้งหมด เกิดจากการนำแผ่นสี่เหลี่ยมเล็กๆ หรือแผ่นสามเหลี่ยมเล็กๆ มาประกอบกันเป็นวัตถุที่ซับซ้อนมากขึ้น

ความละเอียดของรูปสามมิติจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นสี่เหลี่ยม หรือแผ่นสามเหลี่ยมที่นำมาประกอบเข้าด้วยกัน ถ้าต้องการให้รูปที่แสดงออกมามีความโค้งมน มีความละเอียดมากๆ แผ่นสี่เหลี่ยมหรือแผ่นสามเหลี่ยมที่ประกอบขึ้นต้องมีขนาดเล็กลง แต่การใช้แผ่นที่เล็กลงจะทำให้ต้องใช้จำนวนแผ่นมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการประมวลผลมากขึ้น

2.10.1 การสร้างโครงตาข่าย (Mesh)

โครงตาข่าย (Mesh) คือ แบบจำลอง 3 มิติประเภทหนึ่งซึ่งสร้างขึ้นโดยใช้รูปหลายเหลี่ยม (Polygon) ประกอบขึ้นจากจุดและเส้น สามารถทำการปรับค่าความละเอียดของโครงตาข่ายเพื่อให้รายละเอียดของแบบจำลองมีความสมบูรณ์และใกล้เคียงกับวัตถุจริงมากยิ่งขึ้น

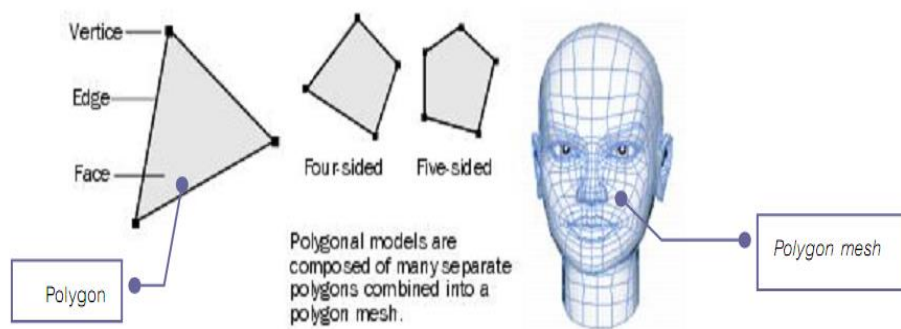
วัตถุที่สร้างด้วยโครงตาข่ายรูปเหลี่ยมต่างๆ จะต้องทำการเก็บประเภทขององค์ประกอบเหล่านี้ คือ จุดยอด (Vertices) ขอบ (Edges) ผิวหน้า (Faces) และพื้นผิว (Surfaces) รูปที่ 2.39 แสดงองค์ประกอบต่างๆ ของโครงตาข่าย



รูปที่ 2.39 องค์ประกอบของแบบจำลองโครงตาข่าย [6]

2.10.2 โครงตาข่ายรูปหลายเหลี่ยม (Polygon Mesh)

รูปหลายเหลี่ยม (Polygon) คือ แผ่นขอบเรียบที่มี 3 ด้านขึ้นไป และเป็นแผ่นที่เกิดจากการลากเส้นตรงเชื่อมจุดแบบ 3 มิติเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดพื้นที่ด้านในขึ้น จุด เส้น และผิวหน้า ถือว่าเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของรูปหลายเหลี่ยมที่จะใช้เลือกเพื่อการทำงานขั้นตอนการสร้างรูปสามมิติ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ง่าย มีการใช้งานมาก ข้อได้เปรียบของแบบจำลองโครงตาข่าย คือ ความง่ายในโครงสร้าง ดังนั้นจึงไม่ต้องการหน่วยความจำมาก แต่ผู้ใช้งานต้องใช้เวลามากในการสร้างแบบจำลองประเภทนี้ ความซับซ้อนของรูปร่างวัตถุทำให้การแสดงแบบจำลองโครงตาข่ายไม่สามารถแสดงรายละเอียดได้ชัดเจนและทำให้เกิดความสับสนในการมองรูปร่างของวัตถุได้ รูปที่ 2.40 แสดงตัวอย่างของโครงตาข่ายรูปหลายเหลี่ยม

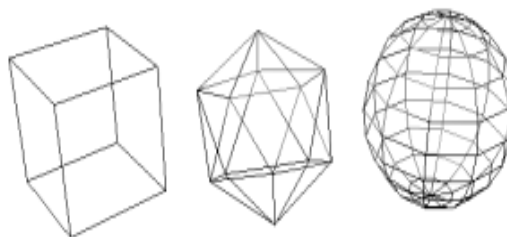


รูปที่ 2.40 ตัวอย่างโครงตาข่ายรูปหลายเหลี่ยม

2.10.3 แบบจำลองโครงลวด (Wire Frame Model)

โครงลวด (Wire Frame) หรือ แบบจำลองโครงลวด (Wire Frame Model) เป็นลักษณะการแสดงผลของแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุ หรือสิ่งของที่สร้างในคอมพิวเตอร์โดยการแสดงเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ซึ่งเป็นเส้นของขอบวัตถุที่เกิดจากคำนวณทางคณิตศาสตร์ของพื้นผิวที่ไม่ต่อเนื่องของวัตถุ

การใช้งานแบบจำลองโครงลวดนอกจากช่วยให้มองเห็นสิ่งที่อยู่ภายในวัตถุ 3 มิติแล้ว การแสดงผลแบบนี้จะแสดงผลได้เร็วกว่าการแสดงผลแบบจำลอง 3 มิติทั่วไป นิยมใช้ในโครงสร้างวัตถุสามมิติที่ซับซ้อน เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยน ตรวจสอบ และแก้ไขได้ง่ายและสะดวกกว่า โดยเมื่อสร้างและแก้ไขเสร็จแล้ว แบบจำลอง 3 มิติจะถูกนำไปสร้างเป็นแบบจำลองเสมือนจริงผ่านกระบวนการให้แสงและเงา รูปที่ 2.41 แสดงตัวอย่างของแบบจำลองโครงลวด

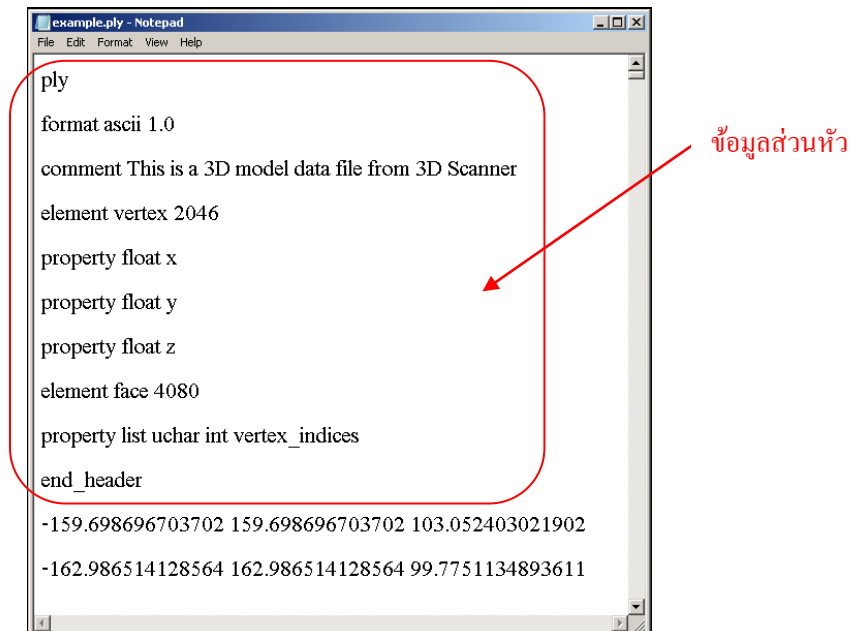


รูปที่ 2.41 ตัวอย่างแบบจำลองโครงลวด

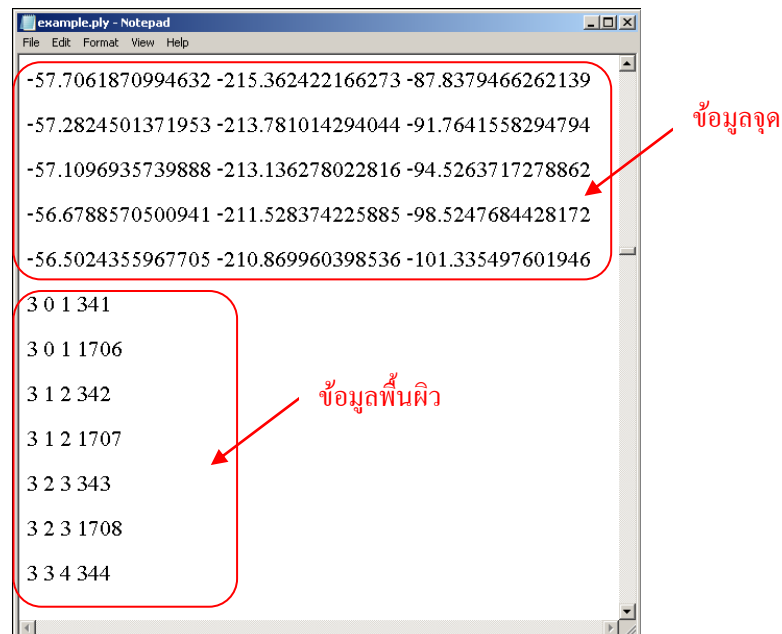
2.10.4 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

การสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุขึ้นงานเป็นการนำข้อมูลพิกัด 3 มิติของวัตถุขึ้นงานจริงมาสร้างไฟล์นามสกุล .ply ซึ่งเป็นเท็กซ์ไฟล์ (Text File) ที่มีรูปแบบในการเขียนที่เฉพาะเจาะจง โดยรูปแบบของไฟล์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ 1) ส่วนหัวของไฟล์ ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลของแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งได้แก่ คำเฉพาะที่ระบุรูปแบบของไฟล์ คำอธิบายเพิ่มเติม จำนวนจุดทั้งหมดที่มี รูปแบบของจุด และจำนวนพื้นผิวทั้งหมดที่มี และ 2) ส่วนตัวของไฟล์ ซึ่งประกอบด้วย จุดทั้งหมดที่มีหรือตำแหน่งพิกัด

(X, Y, Z) ของวัตถุจริงที่เรียงต่อกัน และพื้นผิวทั้งหมดที่มี โดยระบุเป็นจำนวนจุดและหมายเลขของจุดที่นำมาต่อกันเพื่อสร้างเป็นพื้นผิวโครงตาข่าย (Polygon) ตัวอย่างของรูปแบบไฟล์แสดงดังรูปที่ 2.42 และ 2.43

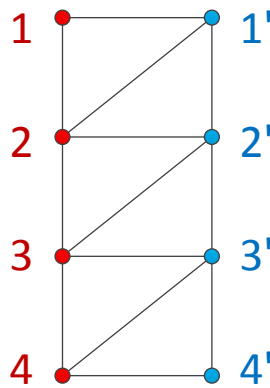


รูปที่ 2.42 ตัวอย่างไฟล์นามสกุล .ply (ส่วนหัว)



รูปที่ 2.43 ตัวอย่างไฟล์นามสกุล .ply (ส่วนตัว)

วิธีการนำจุดมาเชื่อมต่อกันเพื่อให้ได้เป็นโครงข่าย 3 มิติสามารถทำได้โดยการเชื่อมต่อจุดต่างๆที่ได้จากการสแกนของแต่ละเส้นเข้าด้วยกัน ตัวอย่างการเชื่อมต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.44 โดยที่จุด 1 2 3 4 เป็นจุดที่อยู่บนเส้นที่ 1 และจุด 1' 2' 3' 4' เป็นจุดที่อยู่บนเส้นที่ 2



รูปที่ 2.44 ตัวอย่างการเชื่อมต่อจุด

หลังจากทำการเชื่อมต่อแล้วจะได้พื้นผิวที่ประกอบด้วยจุดต่างๆ ดังนี้

- 1 1' 2
- 2 1' 2'
- 2 2' 3
- 3 2' 3'
- 3 3' 4
- 4 3' 4'

2.11 การออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์

2.11.1 ส่วนประกอบของโปรแกรม

โปรแกรมการทำงานของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ 1) โปรแกรมส่วนควบคุมการทำงานของเครื่องและการถ่ายภาพ และ 2) โปรแกรมส่วนประมวลผลภาพและการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

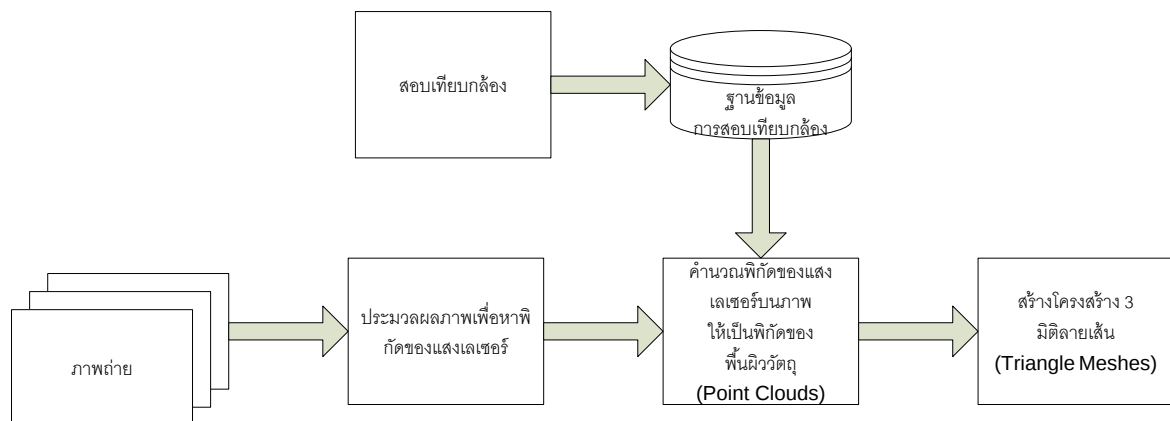
2.11.1.1 โปรแกรมส่วนควบคุมการทำงานและการถ่ายภาพ

โปรแกรมส่วนควบคุมการทำงานและการถ่ายภาพทำหน้าที่ควบคุมการหมุนของแท่นหมุนและการถ่ายภาพให้สัมพันธ์กัน เพื่อให้ได้ภาพถ่ายในตำแหน่งและจำนวนตามที่ผู้ใช้ได้กำหนดไว้ โดยการส่งคำสั่งการควบคุมการหมุนของแท่นหมุนและการถ่ายภาพไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านทางพอร์ตสื่อสาร

แบบอนุกรม RS-232 การเชื่อมต่อระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นแบบ 2 ทางคือ คอมพิวเตอร์จะส่งคำสั่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งสถานะการทำงานกลับมายังเครื่องคอมพิวเตอร์

2.11.1.2 โปรแกรมส่วนประมวลผลภาพและการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

โปรแกรมส่วนประมวลผลภาพและการสร้างแบบจำลอง 3 มิติประกอบด้วยฟังก์ชันการทำงานหลักๆ 4 ส่วนดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.45



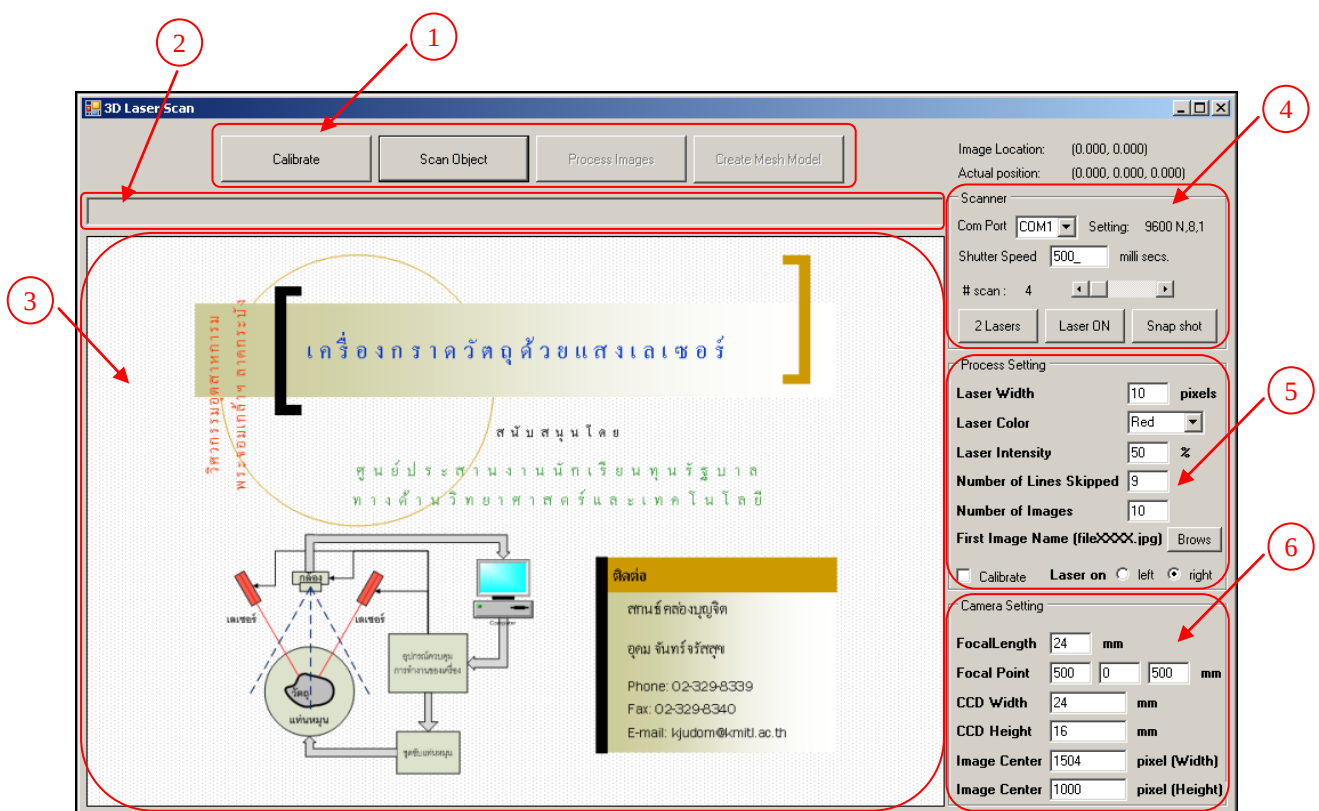
รูปที่ 2.45 แผนผังการทำงานของโปรแกรมส่วนประมวลผลภาพและการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

1. **ส่วนของการประมวลผลภาพเพื่อหาพิกัดของแสงเลเซอร์** ภาพถ่ายที่ได้จากกล้องถ่ายภาพจะประกอบด้วยภาพถ่ายของวัตถุซึ่งปะปนกับเส้นลำแสงเลเซอร์ที่ตกกระทบบนผิวของวัตถุ ดังนั้นโปรแกรมในส่วนของการประมวลผลภาพมีหน้าที่แยกแยะความแตกต่างของภาพที่เกิดจากแสงเลเซอร์และแสงธรรมชาติออกจากกัน โดยอาศัยหลักการการตรวจจับเส้น (Line Detection) ตามที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.4.1
2. **ส่วนของการปรับเทียบกล้อง** การปรับเทียบกล้องเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องเพื่อใช้ในการชดเชยการบิดเบี้ยวของภาพถ่าย ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธี Photogrammetric Calibration ในการปรับเทียบกล้องเนื่องจากมีความเที่ยงตรงสูงกว่าวิธีแบบ Self-calibration การปรับเทียบกล้องด้วยวิธี Photogrammetric Calibration เป็นการปรับเทียบกล้องจากภาพถ่ายของวัตถุที่ทราบขนาดที่แน่นอน โดยวัตถุที่นิยมนำมาใช้ปรับเทียบกล้องคือกระดานสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะเหมือนตารางหมากรุก โดยใช้วิธีการตามที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.8 และ 2.9

3. ส่วนของการหาพิกัดบนพื้นผิวของวัตถุ พิกัดของแสงเลเซอร์ที่ได้จากการประมวลผลภาพจะถูกนำไปคำนวณหาพิกัดบนพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการแปลงข้อมูลจาก 2 มิติให้เป็นข้อมูลแบบ 3 มิติโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับข้อมูลที่ได้จากการสอบเทียบกล้อง โดยอาศัยวิธีการที่ได้นำเสนอไปแล้วในหัวข้อ 2.6 และ 2.7
4. ส่วนของการสร้างโครงสร้าง 3 มิติลายเส้น กระบวนการนี้เป็นการเชื่อมต่อจุดของพิกัดต่างๆ เพื่อให้เกิดเป็นพื้นผิวของวัตถุ ซึ่งรูปแบบที่นิยมใช้ทั่วไปคือเป็นโครงสร้าง 3 มิติลายเส้นแบบหลายเหลี่ยม (Polygon Meshes) โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้รูปแบบโครงสร้าง 3 มิติลายเส้นแบบสามเหลี่ยม ซึ่งได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 2.10

2.11.2 ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (Graphical User Interface, GUI)

ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้เป็นส่วนของโปรแกรมที่ติดต่อกับผู้ใช้เพื่อให้สามารถเข้าถึงฟังก์ชันการทำงานต่างๆ ของโปรแกรมได้ ซึ่งรูปลักษณ์หน้าตาของโปรแกรมประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆ ทั้งหมด 6 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 2.46



รูปที่ 2.46 ส่วนประกอบของโปรแกรมส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้

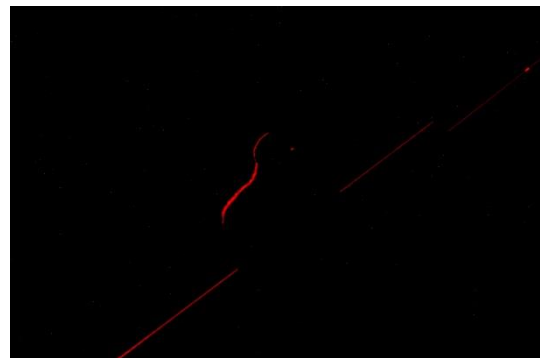
1. ปุ่มกดหลัก ประกอบด้วยปุ่มกดทั้งหมด 4 ปุ่มคือ
 - ปุ่ม Calibrate เป็นปุ่มกดสำหรับเรียกใช้ฟังก์ชันการทำงานของเครื่องปรับเทียบกล้อง
 - ปุ่ม Scan Object เป็นปุ่มกดสำหรับเรียกใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องและการถ่ายภาพ
 - ปุ่ม Process Image เป็นปุ่มกดสำหรับเรียกใช้ฟังก์ชันการประมวลผลภาพและการคำนวณหาพิกัดบนพื้นผิวของวัตถุ
 - ปุ่ม Create Mesh Model เป็นปุ่มกดสำหรับเรียกใช้ฟังก์ชันการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุ
2. แถบแสดงความคืบหน้า (Progress Bar) เป็นส่วนที่แสดงความคืบหน้าการทำงานของโปรแกรม
3. ส่วนแสดงผล เป็นส่วนที่ใช้แสดงผลของโปรแกรม
4. ส่วนการตั้งค่าการทำงานของเครื่อง เป็นส่วนที่ใช้ตั้งค่าการทำงานของเครื่อง ซึ่งได้แก่ การสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม ความไวชัตเตอร์ (Shutter Speed) แถบเลือกจำนวนภาพที่ต้องการสแกน การตั้งค่าจำนวนแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ รวมทั้งปุ่มสำหรับทดสอบการทำงานของเครื่อง
5. ส่วนการตั้งค่าการประมวลผลภาพ เป็นส่วนที่ใช้ตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลภาพ เช่น ความกว้างของแถบแสงเลเซอร์ สีและความเข้มของแสงเลเซอร์ จำนวนภาพที่ใช้ในการประมวลผล เป็นต้น
6. ส่วนการตั้งค่ากล้องถ่ายภาพ เป็นส่วนที่ใช้ตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกล้องถ่ายภาพ เช่น ระยะโฟกัสของกล้อง ขนาดของฉากรับภาพ ตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพ รวมทั้งขนาดของภาพที่ได้จากกล้อง

บทที่ 3 ผลการวิจัย

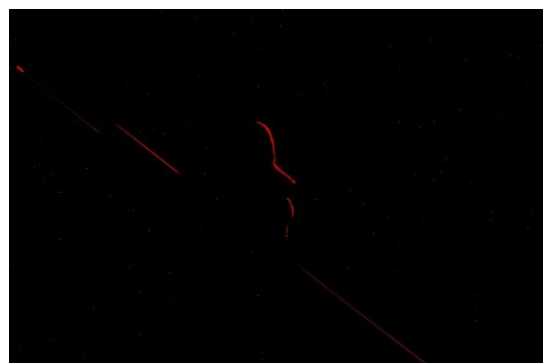
คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นโดยการสแกนวัตถุที่มีรูปทรงต่างๆ ซึ่งมีทั้งวัตถุที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตและวัตถุที่มีรูปทรงซับซ้อน เช่น รูปปั้นและหุ่นจำลอง รวมทั้งได้ทำการวัดขนาดของวัตถุเพื่อเปรียบเทียบกับขนาดที่ได้จากการสแกน ผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.1 ภาพถ่ายจากการสแกน

จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุโดยใช้เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้น ภาพถ่ายที่ได้จากการสแกนมีลักษณะดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นภาพที่มีพื้นหลังสีดำและมีเส้นเลเซอร์สีแดงแสดงถึงรูปร่างลักษณะของวัตถุที่นำมาสแกน ภาพถ่ายในรูป 3.1 a) เป็นภาพที่ได้จากการฉายแสงเลเซอร์จากด้านซ้ายของกล้องถ่ายภาพ ส่วนภาพถ่ายในรูป 3.1 b) เป็นภาพที่ได้จากการฉายแสงเลเซอร์จากด้านขวาของกล้องถ่ายภาพ



a) ตัวอย่างภาพถ่ายจากการฉายแสงเลเซอร์จากด้านซ้ายของกล้อง

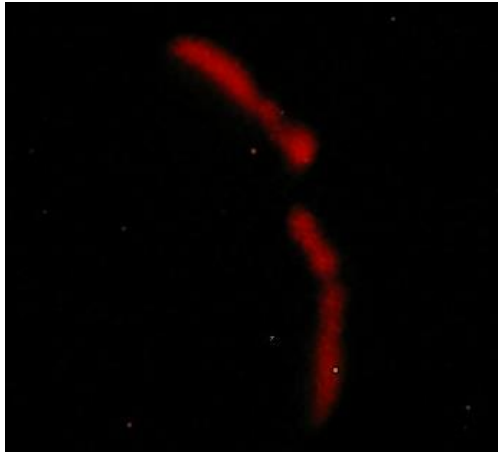


b) ตัวอย่างภาพถ่ายจากการฉายแสงเลเซอร์จากด้านขวาของกล้อง

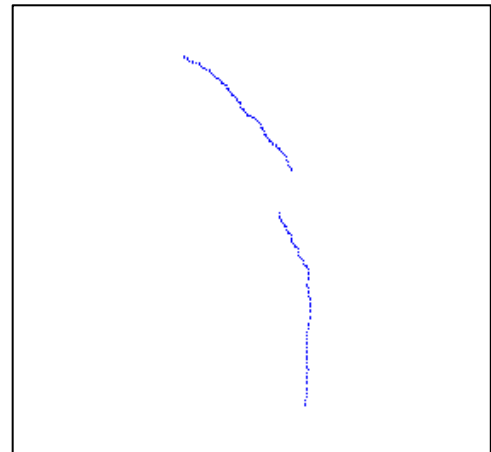
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการสแกนของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์

3.2 การประมวลผลภาพ

ภาพถ่ายที่ได้จากการสแกนจะถูกนำไปประมวลผลภาพเพื่อให้ได้ข้อมูลของตำแหน่งที่ต้องการโดยใช้เทคนิคการตรวจจับเส้น รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของเส้นที่ได้จากภาพถ่าย (รูป a) และจุดพิกัดที่ได้หลังจากผ่านการประมวลผลภาพโดยใช้ตัวกรองแบบสามเหลี่ยม (รูป b) จากรูปจะเห็นได้ว่าเส้นที่ได้จากภาพถ่ายมีลักษณะเป็นพรวดและมีขนาดค่อนข้างกว้าง ส่วนเส้นที่ผ่านการประมวลผลแล้วมีความคมชัดสูง



a) ลักษณะของเส้นจากภาพถ่าย



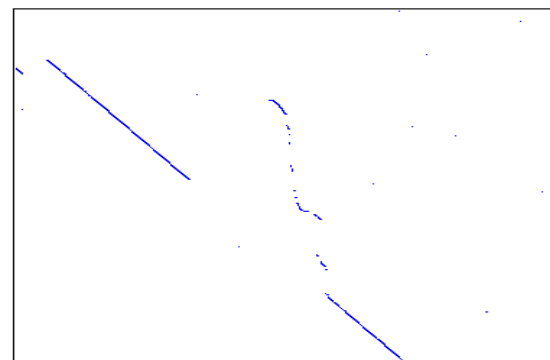
b) เส้นที่ผ่านการประมวลผลแล้ว

รูปที่ 3.2 การตรวจจับเส้นจากภาพถ่าย

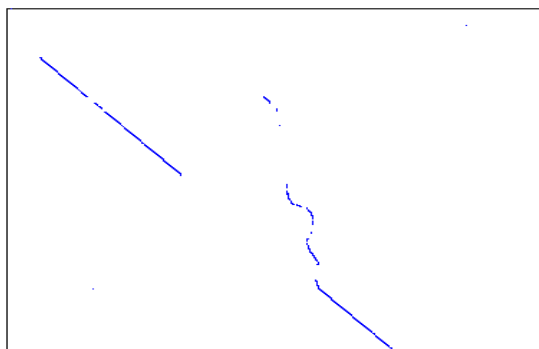
ทิศทางที่ใช้ในการตรวจจับเส้นบนภาพถ่ายมีผลต่อจุดพิกัดที่ได้ในการประมวลผลภาพ รูปแบบที่ใช้ในการตรวจจับเส้นสามารถเลือกได้ 3 แนวคือ การตรวจจับเส้นในแนวตั้ง แนวนอน และแนวทแยงมุม 45 องศา โดยการตรวจจับเส้นในแนวทแยงมุมจะขึ้นอยู่กับทิศทางของการฉายแสงเลเซอร์ กล่าวคือ ถ้าการฉายแสงเลเซอร์มาจากด้านซ้ายของกล้อง การตรวจจับเส้นจะมีทิศทางมาจากด้านซ้ายบนไปยังด้านขวาล่างของภาพ ส่วนการฉายแสงเลเซอร์จากด้านขวาของกล้องจะใช้การตรวจจับเส้นจากด้านขวบนไปยังด้านซ้ายล่างของภาพ รูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของจุดที่ได้จากการตรวจจับเส้นโดยใช้แนวทางที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของแบบจำลอง 3 มิติที่ได้ดังแสดงไว้ในหัวข้อ 3.7.1



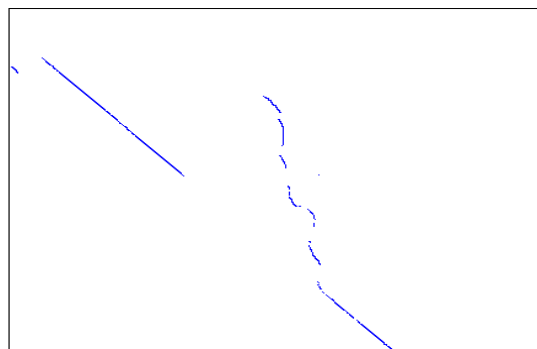
a) ตัวอย่างเส้นจากภาพถ่าย



b) ผลการตรวจจับเส้นในแนวตั้ง



c) ผลการตรวจจับเส้นในแนวนอน



d) ผลการตรวจจับเส้นในแนวทแยงมุม

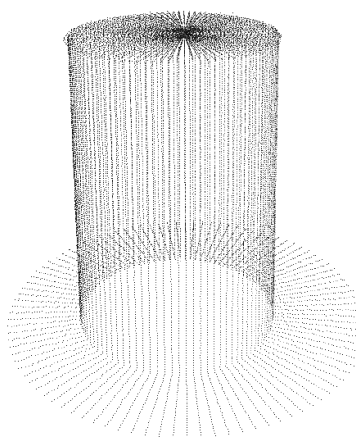
รูปที่ 3.3 การตรวจจับเส้นในแนวต่างๆ

3.3 การสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

จุดที่ได้จากการประมวลผลภาพจะถูกนำไปคำนวณหาพิกัดบนพื้นผิวของวัตถุ แล้วจึงนำไปเชื่อมโยงเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดเป็นพื้นผิวของวัตถุ ทำให้ได้แบบจำลอง 3 มิติของวัตถุที่สมบูรณ์ โดยแบบจำลอง 3 มิติที่ได้สามารถแสดงผลได้ 3 แบบคือ แบบจุด แบบโครงลวด และแบบพื้นผิว ตัวอย่างของแบบจำลอง 3 มิติสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

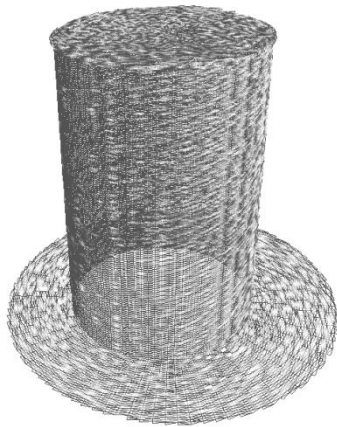


a) ตัวอย่างวัตถุ

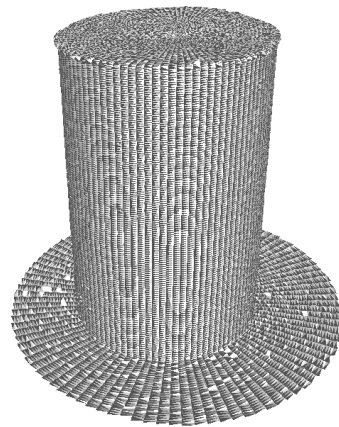


b) แบบจำลองแบบจุด

รูปที่ 3.4 แบบจำลอง 3 มิติ



c) แบบจำลองโครงลวด



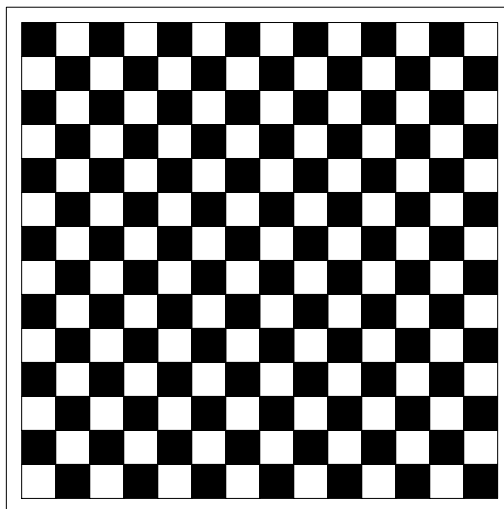
d) แบบจำลองพื้นผิว

รูปที่ 3.4 แบบจำลอง 3 มิติ (ต่อ)

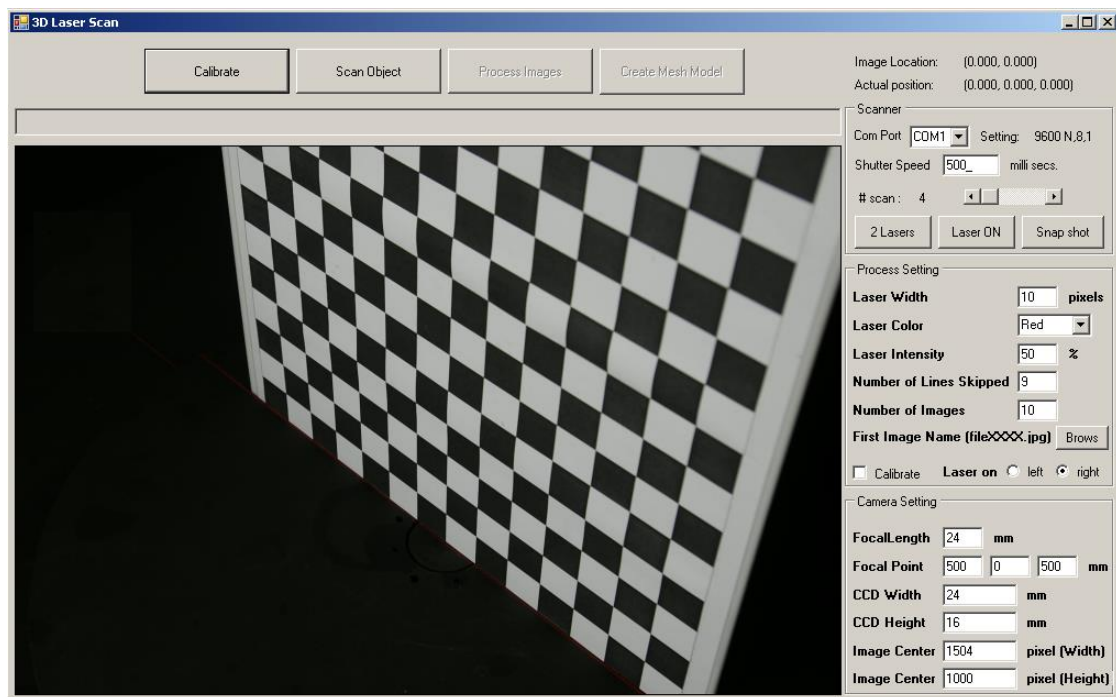
3.4 การปรับเทียบกล้อง

การปรับเทียบกล้องเป็นการหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องเพื่อใช้ในการคำนวณพิกัดพื้นผิวของวัตถุ รวมทั้งเพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการถ่ายภาพอันเนื่องมาจากคุณลักษณะของกล้องและเลนส์ที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ใช้ตารางสี่เหลี่ยมที่มีลักษณะคล้ายตารางหมากฮอสดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยใช้ตารางขนาด 20x20 mm ที่มีสีขาวและดำเรียงสลับกัน ยึดติดกับฉากขนาด 30x30 cm

การปรับเทียบกล้องสามารถทำได้โดยการนำตารางปรับเทียบไปตั้งไว้บนแท่นหมุนของเครื่องเพื่อทำการถ่ายภาพก่อนการสแกนวัตถุ ซึ่งภาพถ่ายของตารางปรับเทียบที่ได้จะถูกนำมาใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์โดยใช้โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น รูปที่ 3.6 แสดงการปรับเทียบกล้องโดยใช้ภาพตารางหมากฮอส ซึ่งผู้ใช้สามารถกำหนดจุดบนภาพถ่ายที่ใช้ในการปรับเทียบได้จากการใช้ Mouse คลิกไปบนจอแสดงผลได้โดยตรง

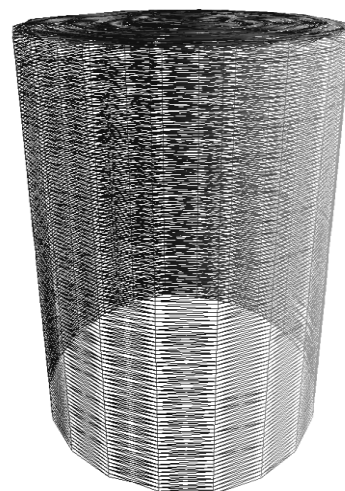
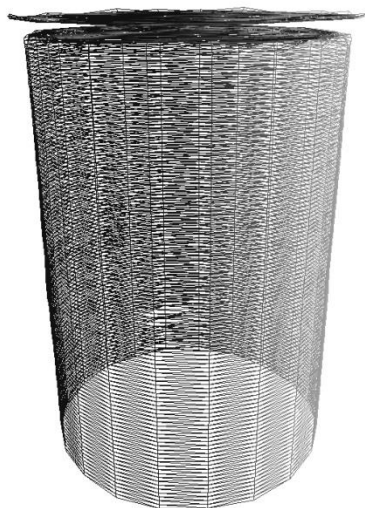


รูปที่ 3.5 ตารางหมากฮอสที่ใช้สำหรับการปรับเทียบ



รูปที่ 3.6 การปรับเทียบโดยใช้ภาพตารางหมากรุก

รูปที่ 3.7 แสดงตัวอย่างแบบจำลองโครงลวดของวัตถุที่ไม่ได้ผ่านการปรับเทียบ (รูป 3.7 a) และหลังการปรับเทียบ (รูป 3.7 b) จากรูป 3.7 a) จะเห็นได้ว่า พื้นผิวของวัตถุด้านบนมีการเชื่อมต่อที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของพิกัดบนพื้นผิวที่สแกนได้ระหว่างตำแหน่งบนพื้นผิวที่อยู่ใกล้กล้องถ่ายภาพและตำแหน่งที่อยู่ไกลจากกล้องถ่ายภาพ ส่วนรูป 3.7 b) แสดงให้เห็นการเชื่อมต่อที่สมบูรณ์หลังการปรับเทียบแล้ว



a) แบบจำลองโครงลวดของวัตถุรูปทรงกระบอกที่ไม่ได้ผ่านการปรับเทียบ

b) แบบจำลองโครงลวดของวัตถุรูปทรงกระบอกที่ผ่านการปรับเทียบ

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างแบบจำลองก่อนและหลังการปรับเทียบ

3.5 การทดลองเพื่อหาค่าความแตกต่างของขนาดระหว่างแบบจำลองกับวัตถุจริง

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อวิเคราะห์ว่าแบบจำลอง 3 มิติที่ได้จากการสแกนมีขนาดและรูปร่างเหมือนหรือต่างจากวัตถุจริงที่นำมาสแกนมากน้อยเพียงใด วัตถุที่ใช้ในการทดสอบเป็นวัตถุรูปทรงกระบอกที่มีขนาดแตกต่างกัน 5 ชิ้น ซึ่งประกอบด้วยกระปุกครีม ท่อพลาสติก (สีน้ำเงิน) ท่อประปา (สีเหลือง) ฝาขวดน้ำ และสตาร์ทเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดยวัตถุแต่ละชิ้นถูกนำมาสแกนที่ความละเอียด 3.6 องศาต่อสเต็ป ซึ่งจะได้จำนวนภาพถ่ายเท่ากับ 100 ภาพต่อวัตถุ 1 ชิ้น



รูปที่ 3.8 ภาพของวัตถุรูปทรงกระบอกที่นำมาทดสอบ

จากการทดลองพบว่า แบบจำลอง 3 มิติของวัตถุที่ได้แต่ละชิ้นมีรูปทรงที่เสมือนจริงเมื่อเทียบกับวัตถุจริงโดยการประเมินด้วยสายตา ซึ่งยากที่จะประเมินความแตกต่างได้ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำแบบจำลอง 3 มิติที่ได้ไปทำการวัดด้วยโปรแกรม SolidWorks เพื่อนำค่าที่ได้มาหาค่าเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของขนาดระหว่างแบบจำลอง 3 มิติที่ได้กับวัตถุจริงโดยใช้สมการที่ (3.1) โดยทำการวัดขนาดในแนวระนาบและแนวตั้ง ซึ่งได้ผลดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ 3.2

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง} = \frac{|\text{ขนาดของวัตถุจริง} - \text{ขนาดของแบบจำลอง 3 มิติ}|}{\text{ขนาดของวัตถุจริง}} \times 100\% \quad (3.1)$$

ตาราง ที่ 3.1 ค่าความแตกต่างของขนาดในแนวระนาบ

วัตถุ	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)			ค่าความแตกต่าง	% ความแตกต่าง
	ตำแหน่งที่วัด	ค่าจากการวัด	ค่าจากการสแกน		
กระปุกครีม	บน	89.41	91.43	2.02	2.26
	ล่าง	89.71	91.88	2.17	2.42
ท่อพลาสติก	บน	38.05	39.88	1.83	4.81
	ล่าง	37.90	40.55	2.65	6.99
ท่อประปา	บน	102.28	104.70	2.42	2.37
	ล่าง	102.25	105.99	3.74	3.66
ฝาขวดน้ำ	บน	33.30	35.40	2.10	6.31
	ล่าง	34.25	37.16	2.91	8.50
สตาร์ทเตอร์	บน	21.25	23.13	1.88	8.85
	ล่าง	20.50	22.93	2.43	11.85

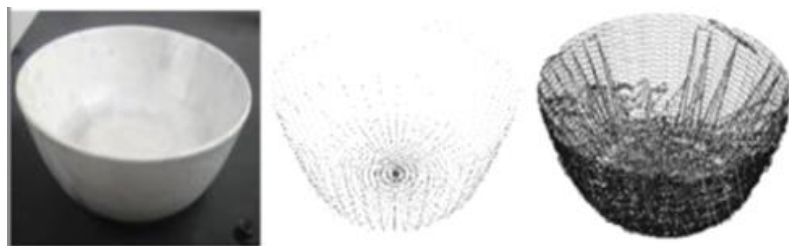
ตาราง ที่ 3.2 ค่าความแตกต่างของขนาดในแนวตั้ง

วัตถุ	ความสูง (มิลลิเมตร)		ค่าความแตกต่าง	% ความแตกต่าง
	ค่าจากการวัด	ค่าจากการสแกน		
กระปุกครีม	66.52	60.96	5.56	8.36
ท่อพลาสติก	200.65	173.19	27.46	13.69
ท่อประปา	156.70	155.66	1.04	0.66
ฝาขวดน้ำ	13.75	11.86	1.89	13.75
สตาร์ทเตอร์	34.55	33.15	1.40	4.05

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่า เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนมีค่าน้อยกว่าด้านล่างของวัตถุ โดยวัตถุที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสูงสุดคือสตาร์ทเตอร์ ซึ่งเป็นวัตถุที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยที่สุด ส่วนผลจากการวัดในแนวตั้งในตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่า วัตถุที่มีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างสูงสุดคือท่อพลาสติกและฝาขวดน้ำ ซึ่งเป็นวัตถุที่มีความสูงมากที่สุดและน้อยที่สุดตามลำดับ

3.6 การทดลองกับวัตถุที่มีรูปทรงต่างๆ

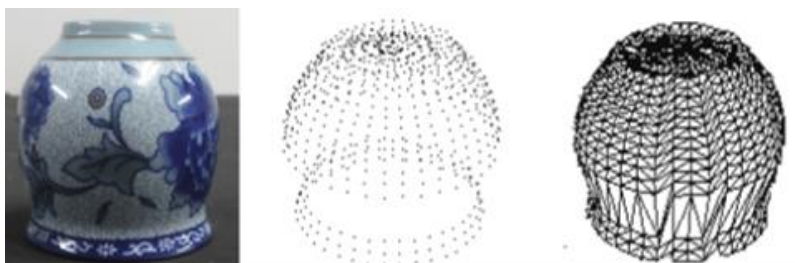
การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบว่าวัตถุที่มีรูปทรงอื่นๆ ที่นำมาสแกนสามารถที่จะสร้างแบบจำลอง 3 มิติได้สมบูรณ์หรือไม่ โดยวัตถุที่ใช้ในการทดลองมีตั้งแต่วัตถุที่มีรูปทรงค่อนข้างเรียบง่ายจนถึงวัตถุที่มีรูปทรงซับซ้อน ซึ่งประกอบด้วยวัตถุดังนี้คือ ชาม ถ้วยคว่ำ ไฟฉาย ฝากระติกน้ำ กระปุกออมสิน รูปปั้น หุ่นจำลอง และโทรศัพท์ ผลที่ได้จากการสแกนได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.9 โดยนำเสนอแบบจำลองแบบจุดและแบบจำลองโครงลวดของวัตถุแต่ละชิ้นควบคู่กับภาพถ่ายของวัตถุเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบ



a) ชาม



b) ไฟฉาย

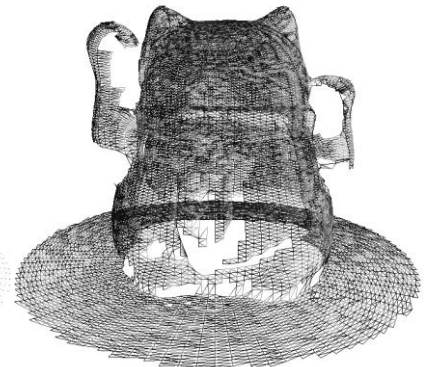
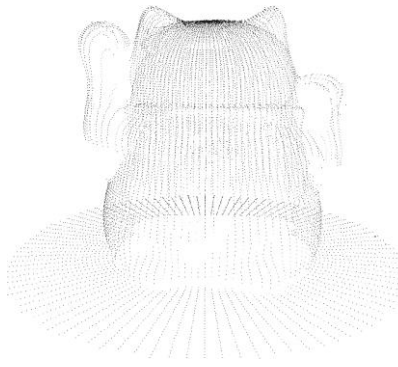


c) ถ้วยคว่ำ

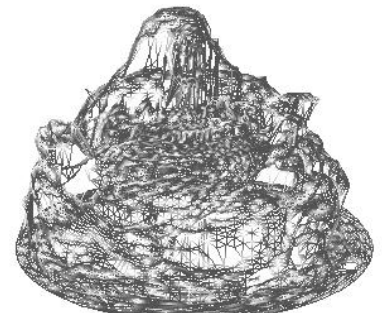
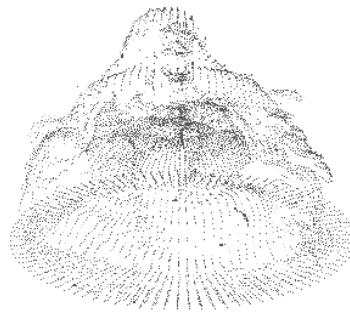
รูปที่ 3.9 ผลการสแกนวัตถุที่มีรูปทรงต่างๆ



d) ฝากระติกน้ำ

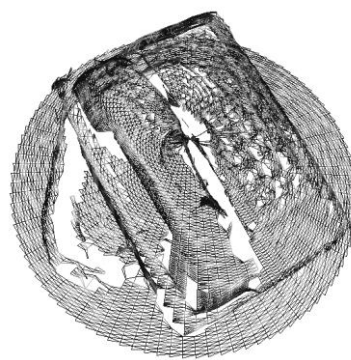
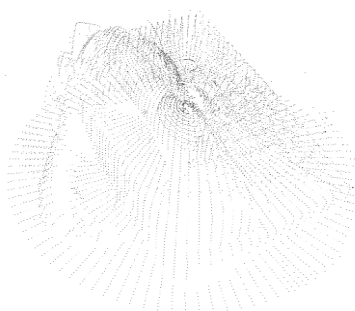


e) กระปุกออมสิน



f) รูปปั้น

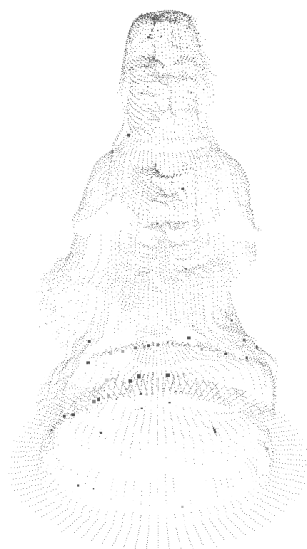
รูปที่ 3.9 ผลการสแกนวัตถุที่มีรูปทรงต่างๆ (ต่อ)



g) โทรศัพท์



h) หุ่นจำลอง



i) รูปปั้นเจ้าแม่กวนอิม

รูปที่ 3.9 ผลการสแกนวัตถุที่มีรูปทรงต่างๆ (ต่อ)

จากรูป 3.9 จะเห็นได้ว่า เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นสามารถทำงานได้ดีกับวัตถุที่ไม่มีพื้นผิวส่วนใดส่วนหนึ่งถูกปิดบัง เช่นในกรณีของขาม ไฟฉาย และฝากระตักน้ำ (รูปที่ 3.9 a, b และ d ตามลำดับ) แต่สำหรับวัตถุที่มีส่วนเว้าตรงกลาง เช่นในกรณีของถ้วยคว่ำ (รูปที่ 3.9 c) และวัตถุที่มีพื้นผิวบางส่วนถูกปิดบัง เช่นในกรณีของกระป๋องอมสิน รูปปั้น โทรศัพท์ หุ่นจำลอง และรูปปั้นเจ้าแม่กวนอิม (รูปที่ 3.9 e, f, g, h และ i) แบบจำลองที่ได้มีลักษณะไม่สมบูรณ์ในบริเวณที่กล้องถ่ายภาพไม่สามารถจับภาพของเส้นแสงเลเซอร์ได้ เช่น บริเวณพื้นผิวด้านใต้ของหุ่นจำลอง เป็นต้น

3.7 การทดลองอื่นๆ

ในส่วนของการทดลองนี้เป็นการทดลองปรับเปลี่ยนปัจจัยอื่นๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแบบจำลอง 3 มิติที่ได้ ซึ่งได้แก่ 1) การปรับเปลี่ยนแนวในการประมวลผลภาพ และ 2) ทิศทางของแสงเลเซอร์ที่ฉายบนวัตถุ

3.7.1 ผลลัพธ์จากการปรับเปลี่ยนแนวในการประมวลผลภาพ

ส่วนของการทดลองนี้เป็นการปรับเปลี่ยนทิศทางที่ใช้ในการตรวจจับเส้นของภาพถ่ายดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อ 3.2 เพื่อดูความแตกต่างของแบบจำลอง 3 มิติที่ได้จากภาพถ่ายชุดเดียวกัน แต่ใช้ทิศทางในการตรวจจับเส้นที่ต่างกัน ซึ่งประกอบด้วยทิศทางในแนวตั้ง แนวนอน และแนวทแยงมุม รูปที่ 3.10 แสดงผลของแบบจำลองโครงลวดจากหุ่นที่ใช้ในการทดลอง จากรูป จะเห็นได้ว่า แบบจำลองที่ได้จากการตรวจจับเส้นในแนวตั้ง (รูปที่ 3.10 b) มีคุณภาพดีกว่าอย่างเห็นได้ชัด ส่วนแบบจำลองที่ได้จากการตรวจจับเส้นในแนวนอน (รูปที่ 3.10 c) และแนวทแยงมุม (รูปที่ 3.10 d) มีคุณภาพใกล้เคียงกัน



a) ภาพถ่ายของหุ่นที่ใช้ทดลอง



b) แบบจำลองจากการตรวจจับเส้นในแนวตั้ง

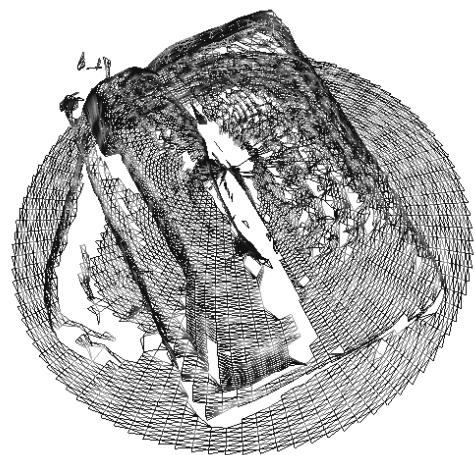
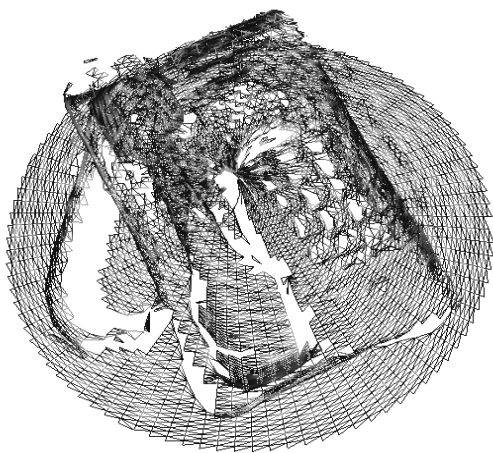
รูปที่ 3.10 แบบจำลองจากการตรวจจับเส้นในแนวต่างๆ



c) แบบจำลองจากการตรวจจับเส้นในแนวนอน d) แบบจำลองจากการตรวจจับเส้นในแนวทแยงมุม
รูปที่ 3.10 แบบจำลองจากการตรวจจับเส้นในแนวต่างๆ (ต่อ)

3.7.2 ผลลัพธ์จากการปรับเปลี่ยนทิศทางของแสงเลเซอร์

ในส่วนของการทดลองนี้เป็นการทดลองปรับเปลี่ยนทิศทางของแสงเลเซอร์ ซึ่งแบ่งเป็นสองกรณี คือ กรณีที่แสงเลเซอร์ฉายจากด้านซ้ายของกล้องถ่ายภาพ และกรณีที่แสงเลเซอร์ฉายจากด้านขวาของกล้องถ่ายภาพ รูปที่ 3.11 แสดงแบบจำลองโครงลวดของโทรศัพท์ที่ใช้ในการทดลอง จากรูปจะเห็นว่าแบบจำลองที่ได้มีคุณภาพใกล้เคียงกัน แต่พื้นผิวบางส่วนมีรายละเอียดที่แตกต่างกันเนื่องจากบริเวณที่แสงเลเซอร์ตกกระทบต่างกัน



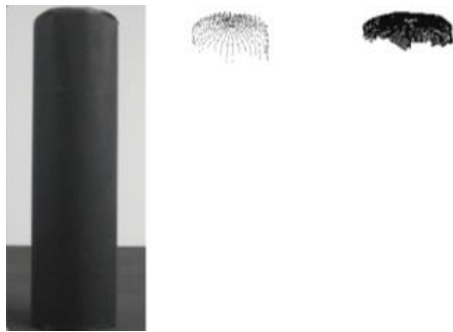
a) แบบจำลองจากการฉายแสงจากด้านซ้าย

b) แบบจำลองจากการฉายแสงจากด้านขวา

รูปที่ 3.11 แบบจำลองจากการเปลี่ยนทิศทางของแสงเลเซอร์

3.7.3 สีของวัตถุ

สีของวัตถุที่นำมาสแกนก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของแบบจำลอง 3 มิติที่ได้ จากการทดลอง วัตถุที่มีสีเข้ม หรือวัตถุที่มีความสามารถในการดูดกลืนแสงเลเซอร์สีแดงสูง จะส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ที่ไม่ดี ในรูปที่ 3.12 แสดงตัวอย่างแบบจำลองของท่อพลาสติกที่หล่อหุ้มด้วยกระดาษสีดำ (รูปที่ 3.12 a) สีขาว (รูปที่ 3.12 b) และสีแดง (รูปที่ 3.12 c) ตามลำดับ โดยตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเหมือนกัน จากรูปจะเห็นได้ว่า แบบจำลองที่ได้จากวัตถุที่หล่อหุ้มด้วยกระดาษสีดำมีลักษณะไม่สมบูรณ์เมื่อเทียบกับแบบจำลองที่ได้จากวัตถุที่หล่อหุ้มด้วยกระดาษสีขาวและสีแดง ทั้งนี้เนื่องจากแสงเลเซอร์บางส่วนถูกดูดกลืนไปในกรณีที่ใช้กระดาษสีดำ อย่างไรก็ตาม ในการใช้กันจริง ผู้ใช้สามารถตั้งค่าให้ความไวในการตรวจจับแสงมากขึ้นเมื่อสแกนวัตถุที่มีสีเข้ม ซึ่งจะช่วยให้ได้แบบจำลองที่สมบูรณ์ขึ้น ดังเช่นตัวอย่างของหุ่นจำลองในรูปที่ 3.10 ที่มีฐานด้านล่างเป็นสีดำ

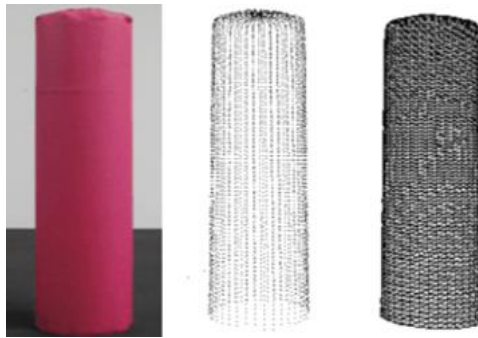


a) วัตถุที่หุ้มด้วยกระดาษสีดำ



b) วัตถุที่หุ้มด้วยกระดาษสีขาว

รูปที่ 3.12 ผลการทดลองกับวัตถุที่มีสีแตกต่างกัน



c) วัตถุที่หุ้มด้วยกระดาษสีแดง

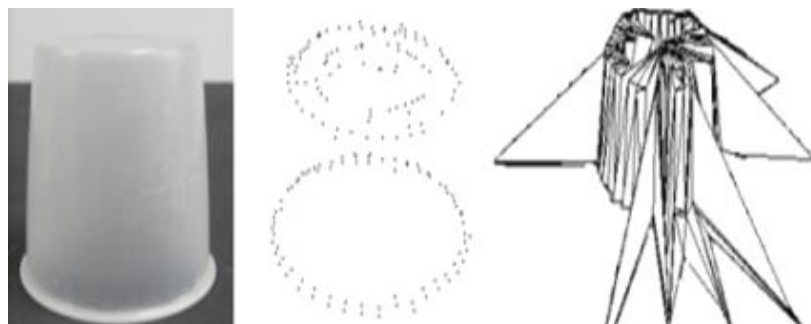
รูปที่ 3.12 ผลการทดลองกับวัตถุที่มีสีแตกต่างกัน (ต่อ)

3.7.4 ตัวกลางของวัตถุ

นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยยังได้ลองทดสอบกับวัตถุที่เป็นตัวกลางโปร่งใส โปร่งแสง และวัตถุสะท้อนแสงตามลำดับ รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างแบบจำลองที่ได้จากการสแกนขวดน้ำ (รูปที่ 3.13 a) ถ้วยตวง (รูปที่ 3.13 b) และถ้วยสแตนเลส (รูปที่ 3.13 c) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า เครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นไม่สามารถสแกนวัตถุที่มีพื้นผิวดังกล่าวได้



a) ขวดน้ำพลาสติกใส



b) ถ้วยตวง

รูปที่ 3.13 ผลการทดสอบกับวัตถุที่เป็นตัวกลางต่างๆ



c) ถ้วยสแตนเลส

รูปที่ 3.13 ผลการทดสอบกับวัตถุที่เป็นตัวกลางต่างๆ (ต่อ)

บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย

4.1 สรุปผลการดำเนินการ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างต้นแบบของเครื่องกราดวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์โดยได้นำเทคนิคการถ่ายภาพและการประมวลผลภาพมาประยุกต์ใช้งาน เครื่องต้นแบบที่ได้สร้างขึ้นใช้หลักการของ Optical Triangulation ในการหาพิกัดบนพื้นผิวของวัตถุเพื่อนำไปสร้างแบบจำลอง 3 มิติ วัตถุที่นำมากราดหรือสแกนจะถูกวางไว้บนแท่นหมุน และทำการฉายแสงเลเซอร์แบบเส้นในแนวตั้งไปบนพื้นผิวของวัตถุเพื่อถ่ายภาพตามมุมต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้โดยรอบ โดยกล้องถ่ายภาพถูกติดตั้งไว้เป็นมุม 45 องศาจากแนวระดับเหนือวัตถุ และใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ 2 แหล่งซึ่งติดตั้งไว้ด้านซ้ายและด้านขวาของกล้องถ่ายภาพ ภาพถ่ายที่ได้จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อหาโปรไฟล์ของวัตถุโดยใช้เทคนิคการตรวจจับเส้น หลังจากนั้น จึงนำข้อมูลที่ได้ไปแปลงเป็นตำแหน่งพิกัดบนพื้นผิวของวัตถุ และนำพิกัดที่ได้ไปสร้างเป็นพื้นผิวของวัตถุในแบบจำลอง 3 มิติ นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ยังได้นำเทคนิคการปรับเทียบกล้องมาใช้เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความถูกต้องมากขึ้น

คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นกับวัตถุต่างๆ พบว่า เครื่องต้นแบบสามารถสร้างแบบจำลอง 3 มิติได้ดีในกรณีที่วัตถุมีรูปทรงที่เรียบง่ายและไม่มีพื้นผิวของวัตถุส่วนใดส่วนหนึ่งถูกปิดบัง ส่วนในกรณีที่วัตถุมีรูปทรงที่ซับซ้อน แบบจำลองที่ได้จะมีความสมบูรณ์ลดหลั่นลงมาตามความซับซ้อนของวัตถุและตามสัดส่วนของพื้นผิววัตถุที่ถูกปิดบัง นอกจากนี้ รูปแบบในการประมวลผลภาพและการปรับเทียบกล้องก็มีผลต่อคุณภาพของแบบจำลองที่ได้อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ การตรวจจับเส้นในแนวตั้งจะให้คุณภาพของแบบจำลองที่ดีกว่าการตรวจจับเส้นในแนวนอนและในแนวทแยงมุม และแบบจำลองที่ได้โดยไม่ผ่านการปรับเทียบกล้องอาจทำให้เกิดการเชื่อมต่อพื้นผิวที่ไม่สมบูรณ์ ในการตรวจสอบความถูกต้องของขนาดของแบบจำลอง คณะผู้วิจัยได้ทำการวัดขนาดของแบบจำลองเทียบกับขนาดของวัตถุจริงโดยใช้วัตถุที่มีขนาดต่างๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่า เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของขนาดในแนวระนาบมีค่าสูงสุด 11.85% และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของขนาดในแนวตั้งมีค่าสูงสุด 13.75% ซึ่งถือว่ายังมีความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง ทั้งนี้ แบบจำลองที่สร้างจากวัตถุที่มีขนาดเล็กมีแนวโน้มที่จะมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าวัตถุที่มีขนาดใหญ่ ส่วนสีและตัวกลางที่วัตถุก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพของแบบจำลองที่ได้ วัตถุที่มีสีเข้มและสามารถดูดกลืนแสงเลเซอร์สีแดงจะส่งผลให้แบบจำลองที่ได้มีพื้นผิวที่ไม่สมบูรณ์เนื่องจากภาพถ่ายที่เห็นเส้นแสงเลเซอร์ไม่ชัดเจน และวัตถุที่เป็นตัวกลางโปร่งใสหรือสะท้อนแสงจะก่อให้เกิดความผิดพลาดในการสร้างพื้นผิวของแบบจำลอง 3 มิติ

4.2 แนวทางในการพัฒนา

จากผลการวิจัยที่ได้ดำเนินการมา คณะผู้วิจัยมองเห็นข้อจำกัดหลายอย่างของเครื่องต้นแบบที่สร้างขึ้นและปัญหาหลายอย่างที่ต้องแก้ไขก่อนที่จะสามารถนำไปใช้งานได้จริง ประการแรก การวางตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพที่อยู่กับที่ทำให้ไม่สามารถถ่ายภาพพื้นผิวของวัตถุได้อย่างครบถ้วน โดยเฉพาะวัตถุที่มีพื้นผิวบางส่วนถูกปิดบัง การแก้ไขสามารถทำได้โดยการใช้กล้องถ่ายภาพมากกว่าหนึ่งตัว หรือการเปลี่ยนตำแหน่งของกล้องระหว่างการสแกน เช่น การใช้กล้องถ่ายภาพ 3 ตัวติดตั้งไว้ในแนวแกน x , y , z เพื่อให้สามารถถ่ายภาพพื้นผิวของวัตถุในแต่ละแนวได้ดีขึ้น หรือการเลื่อนกล้องไปในตำแหน่งต่างๆตามแนวทรงกลมรอบวัตถุ เป็นต้น ในกรณีที่ใช้กล้องถ่ายภาพมากกว่าหนึ่งตัว ข้อเสียประการสำคัญคือเป็นการเพิ่มต้นทุนของเครื่องกราด รวมทั้งความแม่นยำในการติดตั้งกล้องให้อยู่ในตำแหน่งที่สัมพันธ์กัน และต้องทำการปรับเปลี่ยนขั้นตอนวิธีในการสร้างโครงตาข่ายของแบบจำลอง ส่วนในกรณีที่เปลี่ยนตำแหน่งของกล้องระหว่างการสแกนจำเป็นต้องอาศัยอุปกรณ์ในการวัดตำแหน่งของกล้อง เช่น การติดตั้ง Encoder เพื่อนำตำแหน่งของกล้องที่ได้ไปประมวลผล ซึ่งทำให้ขั้นตอนวิธีในการสร้างแบบจำลองมีความซับซ้อนขึ้น ข้อจำกัดของเครื่องต้นแบบอีกประการหนึ่งคือ ความละเอียดของวัตถุที่วัดได้ถูกจำกัดอยู่ที่ความละเอียดในการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งจากค่าที่คำนวณได้ในหัวข้อ 2.1.4 จะเห็นได้ว่ามีความละเอียดค่อนข้างต่ำ ในขณะที่กล้องถ่ายภาพสามารถให้ความละเอียดที่สูงกว่ามาก ซึ่งในส่วนนี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้มอเตอร์และชุดขับที่มีความละเอียดสูง และมีระบบควบคุมตำแหน่งในตัว ส่วนประการที่สามคือการปรับปรุงขั้นตอนวิธีในการสร้างโครงตาข่ายให้ดีขึ้น เนื่องจากวิธีที่ใช้ในปัจจุบันใช้การเชื่อมโยงจุดที่อยู่ใกล้ที่สุด ซึ่งในบางกรณีอาจทำให้พื้นผิวของแบบจำลองที่ได้ไม่สมบูรณ์หรือผิดเพี้ยนไปจากวัตถุจริง

บรรณานุกรม

1. Jean-Yves Bouguet, *Visual methods for three-dimensional modeling*, PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 1999.
2. Kenn Tornslev, *3D scanning using multibeam laser*, Master Thesis in Informatics and Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, Lyngby 2005.
3. Filip Sadlo, Tim Weyrich, Ronald Peikert, and Markus Gross, *A Practical Structured Light Acquisition System for Point-Based Geometry and Texture*, Appeared in the Proceedings of the Eurographics Symposium on Point-Based Graphics, 2005.
4. Luis Alonso Sánchez Secades, *3D scanning of non-opaque objects by means of infrared imaging*, Master Thesis in Vision and Robotics, University of Burgundy, France, 2008.
5. Z. ZHANG, A flexible new technique for camera calibration. In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22, 11 (2000), 1330-1334.
6. Jean-Yves Bouguet and Pietro Perona. 3D photography using shadows in dual-space geometr. International Journal of Computer Vision, 129-149, 1999.
7. Boiangiu, and Raducanu. “Line Detection Techniques for Automatic Content Conversion Systems”. WSEAS Transactions on Information Science & Applications, Issue 7, Vol. 5, 2008.
8. จักรภพ ตระกูลวงศา, นายชินวัตร ตันติไชยบริบูรณ์ และ นายประสิทธิ์ เด่นนินนาท, 2540. การจำลองภาพ 3 มิติจากวัตถุจริง. ปรินิพนธ์ปรินิพนธ์บัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
9. นันทินี ตุลยานนท์, 2552. การสร้างโมเดลสามมิติของวัตถุโดยอัตโนมัติด้วยกล้องและแขนกล. วิทยานิพนธ์ ปรินิพนธ์ดุสิตบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

10. ปัญญาดี ประเสริฐกุล, 2541. อุปกรณ์วัดพิก 3 มิติที่ใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีพื้นผิวต่อเนื่องและโปรแกรมเชื่อมโยงกับโปรแกรม CATIA. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุชฎบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
11. ศรายุทธ อินทุเศรษฐ, 2553. การวัดขนาดวัตถุสามมิติโดยการใช้แสงเลเซอร์แบ่งส่วนวัตถุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาคุชฎบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
12. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์. โครงการพัฒนาเครื่องสร้างภาพ 3 มิติ โดยใช้เทคนิคโทโมกราฟี ที่วางตำแหน่งกล้องอิสระ ใน รายงานฉบับสมบูรณ์, 39-45.
13. เดชฤทธิ์ มณีธรรม และสำเร็จ เต็มราม, 2549. ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS 51. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ เคทีพี คอมพ์ แอนด์ คอนซัลท์.
14. ชันชัย กิ่งกังวาลย์, คู่มือเขียนโปรแกรมกราฟิกด้วย C# และ GDI +(.NET Framework). กรุงเทพมหานคร : โปรวิชั่น, 2551.
15. เรียนรู้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ด้วยภาษา C พร้อมโครงงาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาร์ทเลิร์นนิ่ง, 2552.
16. สัจจะ จรัสรุ่งวิธร, เริ่มต้น Visual C# 2008 ฉบับสมบูรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี : โอดีซี อินโฟ ดิสทริบิวเตอร์เซ็นเตอร์, 2552.
17. ออกแบบและจำลองการทำงานของวงจรด้วย Proteus. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สมาร์ทเลิร์นนิ่ง, 2552.
18. “การแปลงข้อมูลรูปภาพ (Image Transformation).”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://fivedots.coe.psu.ac.th/~montri/Teaching/image/transform.DOC>
19. “งานกราฟิก 3 มิติ.”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.vcharkarn.com/vblog/33026/4>
20. “ทฤษฎีการประมวลผลภาพและคอมพิวเตอร์วิชัน.”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:8ZRsjDuHneYJ:fivedots.coe.psu.ac.th/~montri/Teaching/image/chap1.pdf>
21. “แบบจำลองโครงลวด.”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki/>
22. “A Volumetric Method for Building Complex Models from Range Images.”. [Online]. Available:

http://graphics.stanford.edu/papers/volrange/paper_1_level/gamma-corrected/paper.html

23. "Depth from defocus vs. Stereo.". [Online]. Available:
<http://webee.technion.ac.il/~yoav/research/depth-defocus.html>
24. "Interferometric microscopy.". [Online]. Available:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Interferometric_Microscopy.png
25. "Our Active Stereo Vision System.". [Online]. Available:
http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MARSHALL/node13.html
26. "Polygon mesh.". [Online]. Available:
[http://translate.google.co.th/translate?hl=th&sl=en&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mes](http://translate.google.co.th/translate?hl=th&sl=en&u=http://en.wikipedia.org/wiki/Polygon_mesh)
27. "Reverse Engineering (II)". [Online]. Available:
<http://www.cadthai.com/article/4411/5/reveng20.htm>
28. "3D Surface Reconstruction.". [Online]. Available:
http://www.photogrammetry.ethz.ch/research/ccdlaser_integration/CCDLASER_files/results.html

ภาคผนวก

ประวัติคณะผู้วิจัย

1. หัวหน้าโครงการ

รศ.ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-329-8339 และ 086-363-5450 โทรสาร 02-329-8340

E-mail: sakonklong@hotmail.com

การศึกษา

พ.ศ. 2535 – 2539	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
พ.ศ. 2540 - 2541	Master of Science (Computer and Engineering Management) Assumption University, Bangkok, Thailand
พ.ศ. 2543 - 2544	Master of Science (Mechanical Engineering) University of Southern California, Los Angeles, USA
พ.ศ. 2545 - 2548	Doctor of Philosophy (Mechanical Engineering) University of Southern California, Los Angeles, USA

ประสบการณ์การทำงาน

พ.ศ. 2539 - 2540	วิศวกร บริษัท สยามยูไนเต็ด สตีล (1995) จำกัด นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ระยอง
พ.ศ. 2540 – ปัจจุบัน	อาจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ

เกียรติประวัติทางการศึกษา

- พ.ศ. 2539 ปริญญาตรี เกียรตินิยมอันดับสอง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- พ.ศ. 2541 ปริญญาโท รางวัล Outstanding Award
Assumption University
- พ.ศ. 2543 ทุนรัฐบาล (กระทรวงวิทยาศาสตร์) ระดับ ปริญญาโท – เอก
ณ ประเทศสหรัฐอเมริกา

2. ผู้ร่วมวิจัย

ผศ.ดร. อุดม จันทรจรัสสุข

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทรศัพท์ 02-329-8339 โทรสาร 02-329-8340
E-mail: kjudom@gmail.com

การศึกษา

- พ.ศ. 2535 – 2539 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบควบคุม)
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพฯ, ประเทศไทย
- พ.ศ. 2546 - 2548 Master of Engineering (Industrial Engineering)
Lehigh University, Pennsylvania, USA
- พ.ศ. 2548 - 2552 Doctor of Philosophy (Industrial Engineering)
Lehigh University, Pennsylvania, USA

ประสบการณ์การทำงาน

- พ.ศ. 2539 - 2540 ผู้ช่วยนักวิจัย
ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)
- พ.ศ. 2540 - ปัจจุบัน อาจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ

เกียรติประวัติทางการศึกษา

- พ.ศ. 2545 ทูกรัฐบาล (กระทรวงวิทยาศาสตร์) ระดับ ปริญญาโท – เอก
ณ ประเทศสหรัฐอเมริกา