

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชน
ระบบผลิตอัตโนมัติเพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตขั้นสูง

เรื่อง

โครงการพัฒนาเครื่อง CMM (Coordinate Measuring Machine) สำหรับการวัดพิกัด 3 มิติแบบอัตโนมัติโดยใช้เลเซอร์ และเชื่อมต่อข้อมูลเข้ากับระบบ CAD/CAM เชิงพานิช

โดย

รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรกฎาคม 2548

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติโดยใช้ภาพสเตอริโอ

A 3D Coordinate Measuring Machine Using Stereo Vision

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ พงศกร เพชรพันธ์ศรี
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889
E-Mail: fmevsv@kankrow.eng.chula.ac.th , pedpunsri@yahoo.com

Viboon Sangveraphunsiri and Pongsakon Pedpunsri
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phyathai Road, Patumwan, Bangkok 10330
E-Mail: fmevsv@kankrow.eng.chula.ac.th , pedpunsri@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวถึงการพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติโดยใช้ระบบสเตอริโอวิชันร่วมกับแถบแสงเลเซอร์เพื่อใช้วัดพิกัดพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการพิกัดที่ได้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) เช่นโปรแกรม CATIA เพื่อนำมาสร้างพื้นผิวและสร้างเป็นแบบของชิ้นงานในคอมพิวเตอร์ ในส่วนของการคำนวณพิกัดใช้หลักการของระบบสเตอริโอวิชัน ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดพิกัด 3 มิติโดยใช้กล้องตั้งแต่สองตัวขึ้นไปถ่ายภาพจากมุมมองที่แตกต่างกัน การฉายแถบแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวที่ต้องการวัดช่วยให้การคำนวณพิกัดทำได้ง่ายขึ้น โดยชิ้นงานที่ทำการวัดจะต้องมีขนาดไม่เกิน $200 \times 150 \times 120$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times สูง) จากการทดลองวัดพื้นผิวที่มีความต่อเนื่องและพื้นผิวที่มีความซับซ้อนในลักษณะต่างๆ พบว่าเครื่องวัดพิกัดที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลการวัดที่ดี โดยมีความแม่นยำในการวัด (Accuracy) อยู่ในระดับ 350 ไมครอน (0.35 มิลลิเมตร) เมื่อทำการวัดที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตรจากตำแหน่งบนสุดของแกน Z โดยสามารถเพิ่มความแม่นยำในการวัดได้ หากใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีคุณภาพดีขึ้น

คำหลัก เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ, เครื่องสแกน 3 มิติ, สเตอริโอวิชัน

Abstract

The development of a 3D Coordinate Measuring Machine (CMM) using stereo vision with line laser is described in this paper. The purpose of the machine is to measure surface coordinates of target object. The point cloud can be exported to CAD application software such as CATIA and used to create surface to obtain CAD model. Stereo vision, a technique of calculating 3D coordinates from two or more cameras in different viewpoints, is used for 3D reconstruction, which is simplified by projecting line

laser on the target surface. Working-space of the machine is inside the $200 \times 150 \times 120$ millimeters (width \times length \times height). Tested with continuous and complex surfaces, the machine has shown its performance to achieve good result. The accuracy of this machine is about 350 microns (0.35 millimeters) when measured at 100 millimeters from the top of the Z axis. The accuracy can be improved with better quality of the line laser.

Keywords: Stereo Vision, 3DScanner, Coordinate Measuring Machine, CMM

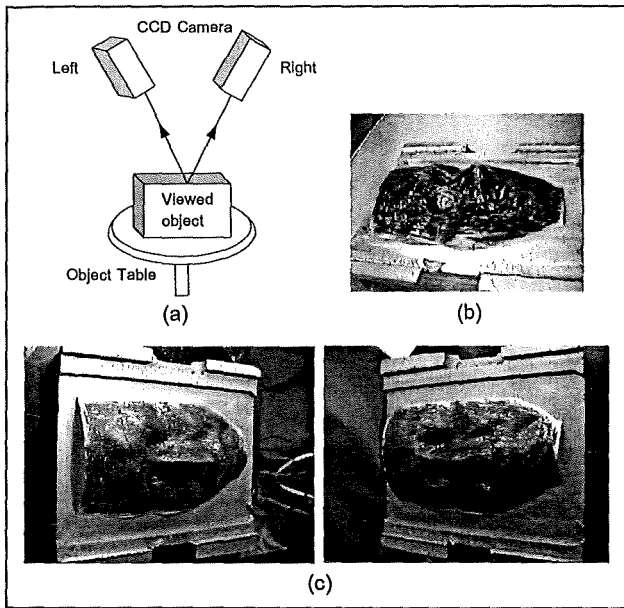
1. บทนำ

เนื่องจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมต้องใช้แบบในการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ในกรณีที่ต้องการผลิตชิ้นงานจากต้นแบบที่ไม่มีแบบหรือข้อมูลการออกแบบสูญหาย ผู้ผลิตจำเป็นต้องสร้างแบบของชิ้นงานนั้นขึ้นใหม่ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) ซึ่งการสร้างแบบอาจทำได้ยากหากชิ้นงานมีความซับซ้อนหรือหากต้องการแบบที่มีความถูกต้องสูง วิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว คือ การวัดขนาดของชิ้นงานต้นแบบโดยตรงโดยใช้เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แล้วนำพิกัดของชิ้นงานนั้นไปสร้างแบบในคอมพิวเตอร์ วิธีการนี้ช่วยให้การสร้างแบบในคอมพิวเตอร์ทำได้รวดเร็ว ลดความผิดพลาด และช่วยให้การสร้างแบบของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนทำได้ง่ายขึ้น จากความสำคัญของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติในอุตสาหกรรมการผลิต จึงได้มีการพัฒนาเครื่องวัดพิกัดขึ้น โดยในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาต่อจากโครงสร้างเดิมที่มีอยู่แล้ว [1] ซึ่งใช้เทคนิคการวัดแบบ Optical Triangulation [2] โดยได้ทำการติดตั้งกล้องซีซีดีที่โครงสร้างเพิ่มอีกหนึ่งตัว และใช้หลักการของระบบสเตอริโอวิชันในการคำนวณพิกัด เพื่อปรับปรุงให้เครื่องมีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีความแม่นยำในการวัดมากขึ้น

2. ระบบสเตอริโอวิชั่น (Stereo Vision System)

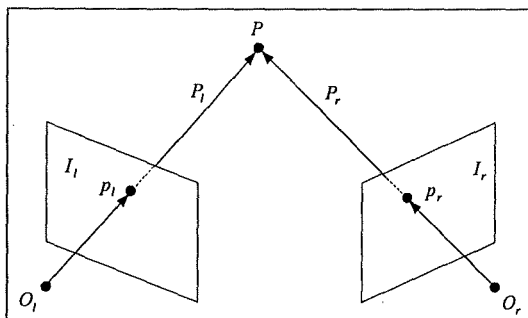
2.1 หลักการพื้นฐาน

ระบบสเตอริโอวิชั่น (Stereo Vision System) หรือระบบสเตอริโอ (Stereo System) เป็นเทคนิคการวัดโดยใช้กล้องตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ถ่ายภาพวัตถุจากมุมมองที่แตกต่างกัน ตัวอย่างของระบบสเตอริโอแสดงในรูปที่ 1 โดยรูปที่ 1(a) แสดงแผนภาพของระบบสเตอริโอแบบใช้กล้อง 2 ตัวที่วางตัวในแนวตั้ง เมื่อถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างในรูปที่ 1(b) จะได้ภาพที่ถ่ายจากกล้องแต่ละตัวแสดงดังรูปที่ 1(c)



รูปที่ 1 แผนภาพของระบบสเตอริโอแบบใช้กล้อง 2 ตัว และภาพที่ถ่ายจากกล้อง

ระบบสเตอริโอคำนวณพิกัดพื้นผิวของชิ้นงานโดยการนำภาพถ่ายจากกล้องแต่ละตัวมาค้นหาตำแหน่งของภาพที่เป็นจุดเดียวกันบนวัตถุ เช่น บริเวณดวงตาของชิ้นงานในรูปที่ 1(c) เพื่อนำมาคำนวณหาตำแหน่งพิกัดของชิ้นงานที่ตำแหน่งนั้น หลักการในการหาตำแหน่งพิกัดแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 หลักการคำนวณพิกัดของระบบสเตอริโอ

รูปที่ 2 เป็นแผนภาพของระบบสเตอริโอแบบ 2 กล้องที่แนวการมองของกล้องทั้งสองตัวไม่ขนานกัน โดยที่ I_l และ I_r เป็นระนาบที่เกิดภาพของกล้องซ้ายและขวาตามลำดับ กำหนดให้จุด p_l และ p_r

เป็นจุดที่มาจากตำแหน่งเดียวกันบนวัตถุ เมื่อทำการสร้างรังสีจากจุดกึ่งกลางเลนส์ของกล้องทั้งสองหรือจุด O_l และจุด O_r ไปยังจุด p_l และ p_r ตามลำดับ จะได้รังสีสองเส้นตัดกันที่จุดๆหนึ่งใน 3 มิติซึ่งจุดดังกล่าวคือจุด P ซึ่งเป็นตำแหน่งของชิ้นงาน ณ ตำแหน่งนั้น

2.2 การใช้แถบแสงเลเซอร์ในระบบสเตอริโอวิชั่น

การค้นหาตำแหน่งในภาพที่มาจากจุดเดียวกันบนวัตถุเพื่อใช้ในการคำนวณพิกัด อาจทำได้โดยการหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของค่าความเข้มของภาพที่ตำแหน่งต่างๆ [3] แต่วิธีการดังกล่าวมีความซับซ้อน และอาจมีข้อจำกัดในกรณีที่มีความเข้มของภาพจากกล้องแต่ละตัวไม่เท่ากัน หรือมุมมองของกล้องแตกต่างกันมาก

การฉายแสงเลเซอร์ชนิดแถบเส้น (Line Laser) ลงบนพื้นผิวที่ทำการวัด [4] เป็นเทคนิคหนึ่งที่ยอมรับเพื่อช่วยให้การคำนวณพิกัดทำได้ง่ายขึ้น เมื่อทำการฉายแถบแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวชิ้นงานรูปไบหน้าคนในรูปที่ 1(b) จะได้ภาพจากกล้องตัวซ้ายและขวาเป็นเส้นแสงเลเซอร์ที่มีความโค้งตามลักษณะของพื้นผิวที่ทำการวัดดังรูปที่ 3 ซึ่งเมื่อเทียบกับรูปที่ 1(c) จะเห็นว่าแนวของเส้นแสงเลเซอร์ช่วยให้เห็นส่วนที่เป็นพื้นผิวเดียวกันได้ง่ายขึ้น แต่การคำนวณพิกัดด้วยเทคนิคนี้จะได้พิกัดของชิ้นงานที่ภาคตัด (Section) เดียวเท่านั้น หากต้องการพิกัดทั้งหมดจะต้องมีอุปกรณ์ขับเคลื่อน เพื่อเคลื่อนที่ไปทำการวัดในตำแหน่งอื่นๆ

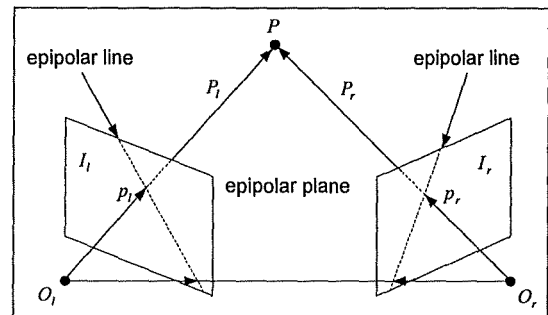


รูปที่ 3 แนวเส้นเลเซอร์บนพื้นผิวชิ้นงานรูปไบหน้าคน จากกล้องตัวซ้ายและขวา

การค้นหาตำแหน่งของภาพที่ตรงกันในกรณีนี้ ไม่สามารถใช้การคำนวณค่าความเข้มของภาพได้ เนื่องจากข้อมูลส่วนใหญ่ของภาพจะถูกกรองออกไปเพื่อให้เห็นแต่แนวของเส้นเลเซอร์ วิธีการที่ช่วยในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การใช้เรขาคณิตอีพิโพลาร์ (Epipolar Geometry)

2.3 เรขาคณิตอีพิโพลาร์ (Epipolar Geometry)

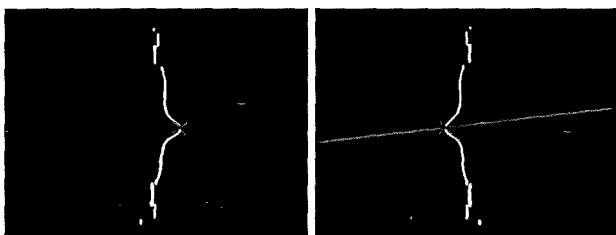
เรขาคณิตอีพิโพลาร์ (Epipolar Geometry) เป็นหลักการที่ช่วยให้การค้นหาตำแหน่งของภาพที่มาจากจุดเดียวกันบนวัตถุอยู่ในแนวของเส้นตรงเส้นหนึ่งๆที่เรียกว่าเส้นอีพิโพลาร์ (Epipolar Line)



รูปที่ 4 ลักษณะของเรขาคณิตอีพิโพลาร์

พิจารณาแผนภาพของระบบสเตอริโอในรูปที่ 4 กำหนดให้ระนาบที่เกิดจากจุดศูนย์กลางของกล้องทั้งสองและจุดบนวัตถุเรียกว่าระนาบอีพ็อลาร์ (Epipolar Plane) และตำแหน่งที่ระนาบอีพ็อลาร์ตัดกับระนาบของภาพเกิดเป็นเส้นตรงมีชื่อว่า เส้นอีพ็อลาร์ (Epipolar Line)

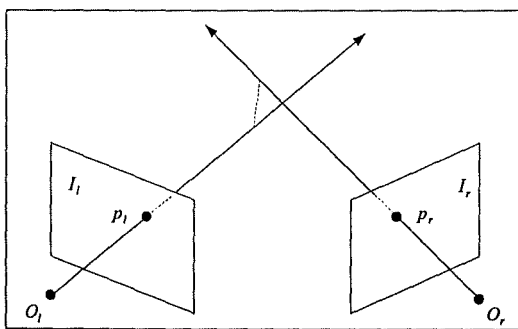
สมมติให้จุด P คือตำแหน่งของชิ้นงานใน 3 มิติ, เวกเตอร์ $p_l = [x_l, y_l, z_l]^T$ และ $p_r = [x_r, y_r, z_r]^T$ เป็นเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังจุดที่ได้จากการฉายจุด P บนระนาบภาพของกล้องซ้ายและขวาตามลำดับ เมื่อกำหนด p_l ในภาพทางซ้ายเพื่อเริ่มทำการค้นหาจุดที่ตรงกันในภาพทางขวาจะพบว่าจุดที่ตรงกันหรือจุด p_r จะอยู่บนเส้นอีพ็อลาร์เสมอ ดังนั้นในระบบมีการฉายเส้นเลเซอร์ลงบนชิ้นงาน เมื่อสร้างเส้นอีพ็อลาร์แล้วทำการค้นหาจุดตัดของเส้นเลเซอร์กับเส้นอีพ็อลาร์ จะได้จุดของภาพที่ตรงกันดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 จุดของภาพที่ตรงกันในภาพซ้ายและขวาที่ได้จากจุดตัดของเส้นเลเซอร์และเส้นอีพ็อลาร์

2.4 การคำนวณพิกัด 3 มิติ

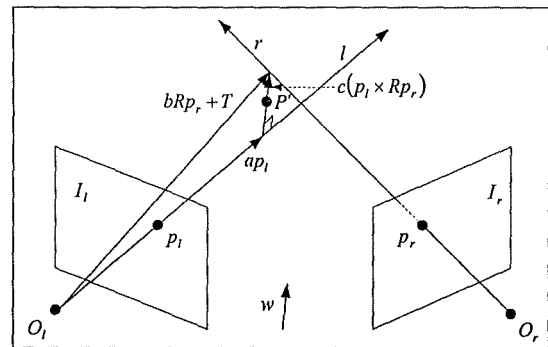
ในทางปฏิบัติ การคำนวณพิกัด 3 มิติโดยใช้หลักการในรูปที่ 2 ไม่สามารถทำได้ เนื่องจากความผิดพลาดในการหาจุดของภาพที่ตรงกัน และความผิดพลาดของค่าพารามิเตอร์ของกล้องที่ได้จากการสอบเทียบกล้องซึ่งใช้ในการแปลงพิกัดระหว่างระบบพิกัดต่างๆ [3] ทำให้รังสีที่เกิดขึ้นไม่ตัดกันจริงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 รังสีจากจุดของภาพที่ตรงกันไม่ตัดกันใน 3 มิติ

ดังนั้นการหาค่าพิกัด 3 มิติโดยใช้ระบบสเตอริโอจึงเป็นการหาตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติของจุดที่มีระยะห่างจากรังสีทั้งสองน้อยที่สุด พิจารณารูปที่ 7 กำหนดให้ p_l และ p_r เป็นคู่จุดของภาพที่ตรงกันที่อยู่ในระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้ายและขวาตามลำดับ, ap_l โดย $a \in R$ เป็นรังสี l ที่ผ่านจุด O_l ($a=0$) และ p_l ($a=1$) และให้ $T + bRp_r$ โดย $b \in R$ เป็นรังสี r ที่ผ่านจุด O_r ($b=0$) และ p_r

($b=1$) อยู่ในระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้าย, กำหนดให้ $w = p_l \times Rp_r$ เป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับทั้งรังสี l และ r ส่วน c เป็นความยาวของเวกเตอร์ w ที่สั้นที่สุดโดย $c \in R$



รูปที่ 7 เวกเตอร์ที่ใช้ในการหาค่าพิกัด

จากเวกเตอร์ในรูปที่ 7 จะได้สมการ

$$ap_l + c(p_l \times Rp_r) = bRp_r + T \quad (1)$$

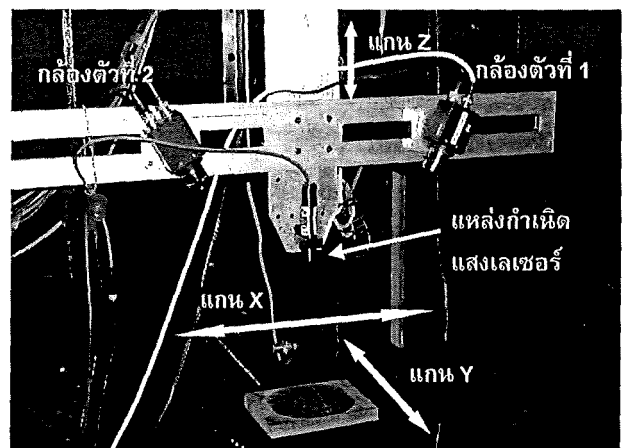
$$ap_l - bRp_r + c(p_l \times Rp_r) = T \quad (2)$$

เมื่อทำการแก้สมการ (2) เพื่อหาค่าคงที่ a , b และ c จะสามารถหาค่าพิกัดของจุด P' ได้จาก

$$P' = ap_l + \frac{c}{2}(p_l \times Rp_r) \quad (3)$$

3. ลักษณะโครงสร้างของเครื่องวัดพิกัด

เครื่องวัดพิกัดที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นแกนเคลื่อนที่ 3 แกนคือ แกน X, แกน Y และแกน Z ที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Servomotor) และติดตั้งชุดบอลสกรูระหว่างมอเตอร์กับภาวะ บนแกน Z มีโครงสร้างสำหรับติดตั้งกล้องซีซีดี 2 ตัวสำหรับถ่ายภาพแถบแสงเลเซอร์ (Line Laser) ที่ถูกฉายลงบนพื้นผิวชิ้นงาน โดยสามารถเลื่อนปรับระยะห่างระหว่างกล้องและปรับมุมกล้องได้ ชิ้นงานที่ทำการวัดจะถูกตั้งอยู่บนโต๊ะวางชิ้นงานที่ติดตั้งเข้ากับแกนเคลื่อนที่แกน Y ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดที่พัฒนาขึ้น

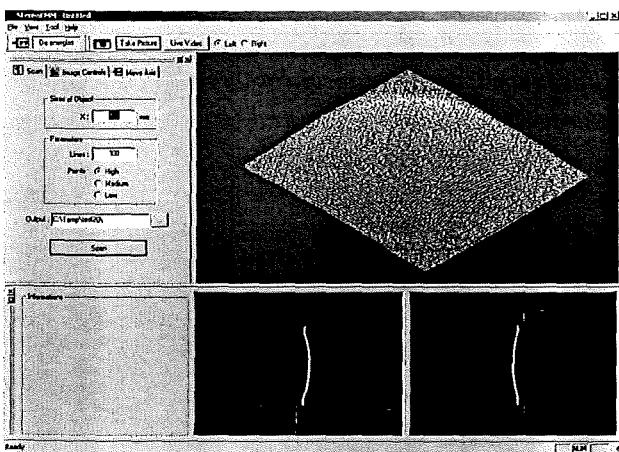
แกนเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกนของเครื่องถูกควบคุมโดยใช้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลผ่านพอร์ตอนุกรม (RS232) จำนวน 2 พอร์ต โดยเชื่อมต่อกับตัวควบคุม 2 ตัวคือ ตัวควบคุม 6250 ของบริษัท Parker Compumotor ซึ่งจะส่งคำสั่งต่อไปยังอุปกรณ์ขับเคลื่อน BL30 เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแกน Y และแกน Z และตัวควบคุม BLX30 ของบริษัท Parker Digiplan สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของแกน X โดยภายในตัวควบคุม BLX30 จะมีตัวขับเคลื่อนอยู่แล้ว

กล้องที่ใช้ในการถ่ายภาพเป็นกล้องซีซีดีแบบขาวดำจำนวน 2 ตัวยี่ห้อ PULNIX รุ่น TM300 ความละเอียด 752 X 582 พิกเซล การรับภาพจากกล้องเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ใช้การรับข้อมูลภาพ (Image Frame Grabber) รุ่น DT3155 ของบริษัท Data Translation โดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต PCI เมื่อรับภาพจากกล้องเข้าสู่คอมพิวเตอร์จะให้ภาพขนาด 768 X 576 พิกเซล ซึ่งเป็นขนาดของภาพที่ใช้ในการประมวลผลหาค่าพิกัด

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ เป็นเลเซอร์ชนิดแถบเส้น (Line Laser) รุ่น LAS 200-635-5 ของบริษัท LaserMax มีความยาวคลื่น 635 nm, กำลังขาออก (Power Output) 4.25 mW, ความกว้างของเลเซอร์ 0.8 มิลลิเมตร อัตราการกระจายออก (Divergence) 0.6 mrad half angle โดยแสงเลเซอร์จะอยู่ห่างจากชิ้นงานที่ทำการวัดในระยะ 120 - 250 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแกน Z และความสูงของชิ้นงาน

4. โปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องวัดพิกัด

โปรแกรมของเครื่องวัดพิกัด มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด โดยควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ควบคุมขั้นตอนการเก็บและบันทึกข้อมูล คำนวณค่าพิกัด รวมถึงการแสดงผลต่อผู้ใช้ โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีชื่อว่า StereoCMM เขียนด้วยภาษาซีพลัสพลัส โดยใช้ Microsoft Visual C++ 6.0 เป็นคอมไพเลอร์ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 2000 หน้าจอของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 9



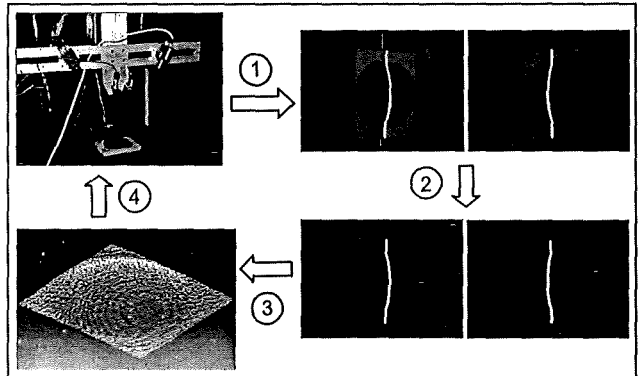
รูปที่ 9 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องวัดพิกัด

5. การทำงานของเครื่องวัดพิกัด

ในการถ่ายภาพแต่ละครั้ง ลักษณะของเส้นเลเซอร์ที่ปรากฏในภาพจะแปรผันตามระยะความสูงและความกว้างของชิ้นงานนั้นๆ ดังนั้น

จากภาพถ่ายจะได้ค่าพิกัดของชิ้นงานในแนวแกน Y และ Z เท่านั้น ส่วนค่าพิกัดในแกน X จะได้มาจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดพิกัดดังแสดงในรูปที่ 10 มีดังนี้

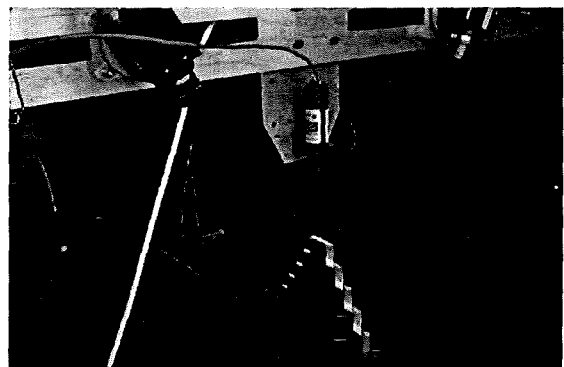
- 0 เคลื่อนที่แกน X ไปยังเริ่มต้นของการวัด
1. ถ่ายภาพแสงเลเซอร์บนพื้นผิวชิ้นงาน
2. ค้นหาตำแหน่งกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์ เนื่องจากภาพของแสงเลเซอร์ที่ปรากฏบนภาพมีความหนามากกว่า 1 พิกเซล
3. คำนวณพิกัดตามหลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น
4. เคลื่อนที่แกน X ไปยังตำแหน่งถัดไป
5. ทำซ้ำข้อ 1-4 จนครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของชิ้นงาน



รูปที่ 10 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดพิกัด

6. การสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด

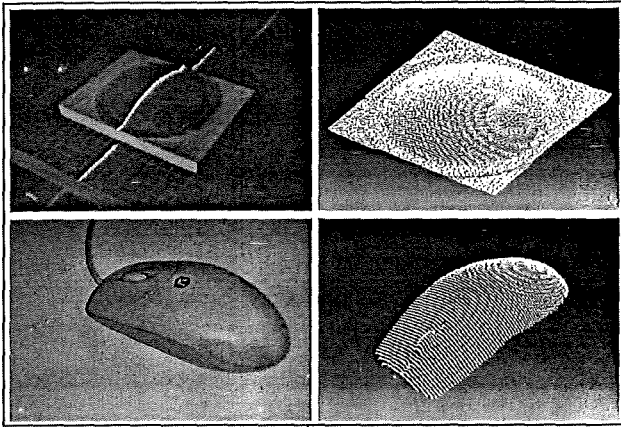
ก่อนทำการวัดในแต่ละครั้งเครื่องวัดพิกัดจะต้องได้รับการสอบเทียบ (Calibration) กับชิ้นงานอ้างอิงก่อนเสมอ โดยการสอบเทียบเครื่องเป็นการสอบเทียบกล้องที่ใช้ในการถ่ายภาพ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัว รวมทั้งหาค่าพารามิเตอร์ของระบบสเตอริโอ [3] หลังจากการสอบเทียบหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะของการจัดวางกล้องก็สามารถใช้งานเครื่องได้ทันที การสอบเทียบมีลักษณะดังรูปที่ 11 โดยทำการถ่ายภาพชิ้นงานชิ้นบันได (Steps) ที่มีความสูงและความกว้างในแต่ละขั้นเป็นระยะที่แน่นอน จากนั้นนำภาพที่ได้มาค้นหาค่าตำแหน่งปลายของขั้นบันไดแต่ละขั้น แล้วนำค่าเหล่านั้นตั้งกล่าวกับขนาดจริงของวัตถุมาเป็นข้อมูลในการสอบเทียบโดยได้ใช้วิธีการของ Tsai [5] ในการหาค่าพารามิเตอร์ของกล้อง



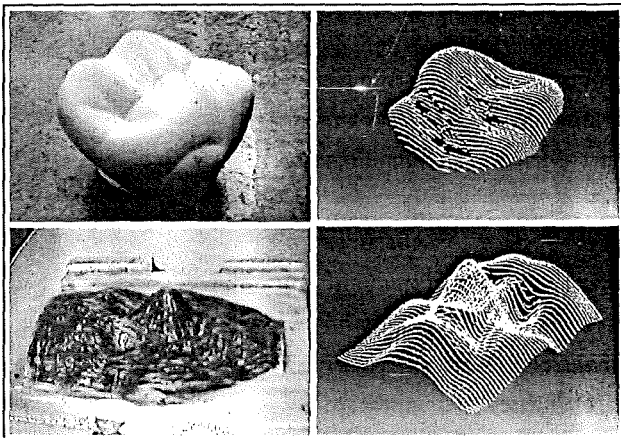
รูปที่ 11 การสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด

7. ผลการทดลองและการหาค่าความแม่นยำของเครื่อง

ในการทดสอบความสามารถของเครื่องวัดพิกัดที่ได้พัฒนาขึ้น ได้ใช้เครื่องวัดพิกัดวัดชิ้นงานที่มีพื้นผิวลักษณะต่างๆ เช่น พื้นผิวที่มีความโค้งต่อเนื่อง พื้นผิวที่มีความชันสูง และพื้นผิวที่มีความสลับซับซ้อน ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 12 และ 13 ซึ่งแสดงชิ้นงานต้นแบบและผลการวัดเมื่อนำเข้าโปรแกรม CATIA

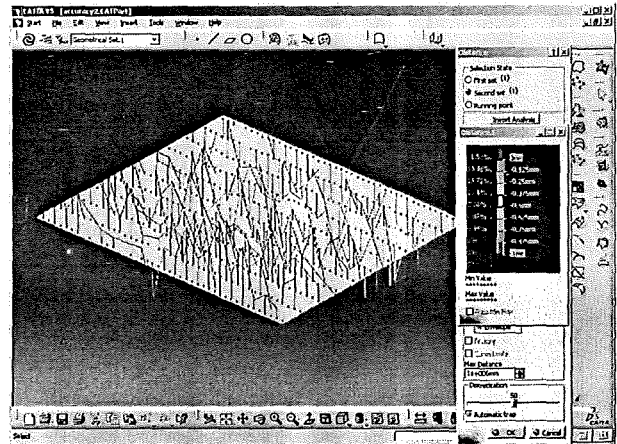


รูปที่ 12 ผลการวัดพื้นผิวโค้งสี่ตาและเมาส์



รูปที่ 13 ผลการวัดชิ้นงานแบบจำลองฟันกรามและชิ้นงานรูปใบพัดคน

การหาค่าความแม่นยำของเครื่องทำโดยการวัดชิ้นงานที่เป็นระนาบ แล้วนำค่าพิกัดที่ได้มาสร้างระนาบจากกลุ่มข้อมูลจุดด้วยโปรแกรม CATIA จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างตำแหน่งต่างๆของพิกัดที่ได้กับระนาบที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 14 พบว่ามีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 0.2087 มิลลิเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.1381 มิลลิเมตร เมื่อทำการวัดที่ระยะ 100 มิลลิเมตรจากตำแหน่งบนสุดของแกน Z จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของเครื่องอยู่ที่ประมาณ 0.35 มิลลิเมตรหรือ 350 ไมครอน



รูปที่ 14 การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างจุดที่วัดได้กับระนาบที่สร้างขึ้น

8. สรุป

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นแบบที่ใช้กล้องซีซีดี 2 ตัวร่วมกับแสงเลเซอร์ชนิดแถบเส้นทำงานในระบบสเตอริโอวิชันสำหรับวัดพิกัดพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการ เมื่อทำการทดสอบวัดพื้นผิวในลักษณะต่างๆ เช่น พื้นผิวที่มีความโค้งต่อเนื่อง พื้นผิวที่มีความชันสูง และพื้นผิวที่มีความสลับซับซ้อน พบว่าเครื่องสามารถให้ผลการวัดที่ดี โดยความแม่นยำของเครื่องอยู่ในระดับ 350 ไมครอน (0.35 มิลลิเมตร) เมื่อทำการวัดชิ้นงานที่เป็นระนาบที่ระยะ 100 มิลลิเมตรจากตำแหน่งบนสุดของแกน Z ซึ่งหากใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีคุณภาพดีขึ้นจะทำให้ความแม่นยำของเครื่องดีขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ นพศักดิ์ ณรงค์ฤกษ์นาวัน "เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียว" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 15 กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 28-30 พฤศจิกายน 2544 หน้า MC 60-64.
- [2] J.A. Bosch, Coordinate Measuring Machines and Systems, Marcel Dekker, New York, 1995.
- [3] E. Trucco, and A. Verri, Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall, 1998.
- [4] R. Jain, R. Kasturi, and B. Schunck, Machine Vision, McGraw-Hill, 1995.
- [5] R. Y. Tsai, A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses, IEEE Journal of Robotics and Automation, 3,4(Aug,1987): 323-344.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติโดยใช้ระบบสเตอริโอวิชันร่วมกับแถบแสงเลเซอร์ แสงเลเซอร์แบบเส้นจะถูกฉายลงบนพื้นผิวที่ต้องการวัด และใช้กล้องซีซีดี 2 ตัวในการถ่ายภาพ ระบบสเตอริโอวิชันเป็นการหาค่าพิกัด 3 มิติโดยใช้จุดของภาพที่ตรงกันในกล้องแต่ละตัว เมื่อนำมาใช้ในการคำนวณพิกัดของเครื่อง ช่วยเพิ่มความถูกต้องในการวัดและทำให้เครื่องมีความยืดหยุ่นในการใช้งานจริง พิกัดที่วัดได้สามารถนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) ที่ชื่อ CATIA ได้

จากการทดสอบกับพื้นผิวที่มีความต่อเนื่อง และพื้นผิวที่มีความซับซ้อน พบว่าเครื่องวัดพิกัดที่พัฒนาขึ้นสามารถวัดพื้นผิวในลักษณะต่างๆ ได้ดี โดยมีความแม่นยำในการวัด (Accuracy) อยู่ในระดับ 350 ไมครอน (0.35 มิลลิเมตร) เมื่อทำการวัดที่ตำแหน่ง 100 มิลลิเมตรจากตำแหน่งบนสุดของแกน Z โดยสามารถเพิ่มความแม่นยำในการวัดได้ หากใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีคุณภาพดีขึ้น ชิ้นงานที่ทำการวัดจะต้องมีขนาดไม่เกิน $200 \times 150 \times 120$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times สูง)

Abstract

A 3D Coordinate Measuring Machine (CMM) using stereo vision with line laser was developed in this research. The laser line on the target surface was taken by two CCD cameras. Stereo vision, a technique calculate 3D coordinate from corresponding pixel in each cameras, used for 3D reconstruction to enhanced the precision of machine and make the machine more flexible in real application. The point cloud from the machine can be exported to CAD application software such as CATIA.

Tested with continuous and complex surfaces, the machine has shown its performance to achieve good result. The accuracy of this machine is about 350 micron (0.35 millimeters) when calibrated at 100 millimeters from the top of Z axis. The accuracy can be improved with better quality of the line laser. Working-space of the machine is inside the $200 \times 150 \times 120$ millimeters (width \times length \times height).

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชน เรื่องระบบผลิตอัตโนมัติ เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตขั้นสูง โดยโครงการนี้เป็นการพัฒนาเครื่องวัดพิกัดหรือ Coordinate Measuring Machine สำหรับวัดพิกัด 3 มิติแบบอัตโนมัติ งบประมาณส่วนหนึ่ง ได้รับจากโครงการดังกล่าวนี้ จึงต้องขอขอบพระคุณมา ณ. ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 ผลงานที่ได้มีการทำมาก่อน.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	6
2 หลักการของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ.....	7
2.1 คำนำ.....	7
2.2 การจำแนกประเภทของเครื่องวัดพิกัด โดยวิธีการวัด.....	7
2.3 ลักษณะของข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ.....	13
3 แบบจำลองกล้อง (Camera Model) และระบบสเตอริโอ.....	15
3.1 คำนำ.....	15
3.2 แบบจำลองกล้อง (Camera Model).....	15
3.3 หลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น.....	19
3.4 เทคนิคการใช้แถบแสงเลเซอร์ในระบบสเตอริโอ.....	26
3.5 เทคนิคการทำจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน.....	28
4 วิธีการและโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องวัดพิกัด.....	30
4.1 คำนำ.....	30
4.2 โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดและการควบคุมการเคลื่อนที่.....	30

4.3 โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเครื่องวัดพิกัด	32
4.4 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ	38
	หน้า
5 การสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด	44
5.1 คำนำ	44
5.2 การออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการสอบเทียบ	44
5.3 การสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด	45
5.4 การหาค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของเครื่องวัดพิกัด	48
6 การทดลอง	50
6.1 คำนำ	50
6.2 การทดลองที่ 1	51
6.3 การทดลองที่ 2	55
6.4 การทดลองที่ 3	57
6.5 การทดลองที่ 4	59
6.6 การทดลองที่ 5	61
6.7 การทดลองที่ 6	63
7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	66
7.1 สรุปผลการทำวิจัย	66
7.2 ข้อเสนอแนะ	66
รายการอ้างอิง	68
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์	70
ภาคผนวก ข กล้อง CCD และการวัดประมวลผลภาพ	80

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
1.1 โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียว.....	2
1.2 พื้นผิวทรงกลมสีดำ ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว.....	3
1.3 พื้นผิวหน้าคนสีดำ ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว.....	3
1.4 พื้นผิวพื้นกรามสีขาว ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว.....	3
1.5 พื้นผิวหุโทรศัพท์ ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว.....	4
1.6 พื้นผิวสี่เหลี่ยมคางหมู ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว.....	4
1.7 พื้นผิวด้านแบบรูปใบหน้าคนสีดำ และพิกัดที่วัดได้ส่วนที่เป็นจมูกและตา.....	4
2.1 วิธีการวัดแบบ Active ประเภทต่างๆ.....	8
2.2 เครื่องวัดพิกัดแบบสัมผัส.....	9
2.3 เครื่อง Industrial CT.....	10
2.4 หลักการของ Optical triangulation ใน 2 มิติ, ใน 3 มิติ และข้อมูลที่ได้ใน 3 มิติ.....	11
2.5 ระบบ Active stereo vision.....	12
3.1 ลักษณะของแบบจำลองกล้อง (Camera model).....	15
3.2 ขั้นตอนการแปลงพิกัดจากระบบพิกัดโลก 3 มิติไปยังระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์.....	17
3.3 ระบบสเตอริโอแบบ 2 กล้อง.....	19
3.4 การแก้ correspondence problem โดยใช้ correlation-based methods.....	20
3.5 ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นกับการแก้ correspondence problem.....	21
3.6 ลักษณะของ Epipolar Geometry.....	21
3.7 การสร้างเส้น epipolar line ในภาพของกล้องตัวขวา.....	22
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้ายและขวา.....	24
3.9 รังสีจากจุดของภาพที่ตรงกันไม่ตัดกันใน 3 มิติ.....	25
3.10 การหาค่าพิกัด 3 มิติจากจุดของภาพที่ตรงกันในทางปฏิบัติ.....	25
3.11 เวกเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสมการหาค่าพิกัด.....	26
3.12 แนวของเส้นเลเซอร์บนวัตถุเมื่อถ่ายจากกล้อง CCD.....	27
3.13 จุดของภาพที่ตรงกันในภาพซ้ายและขวาที่ได้จากจุดตัดของเส้นเลเซอร์และ epipolar line.....	27
3.14 ภาพถ่ายของจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน.....	28
3.15 การค้นหาของจุดอ้างอิงในการวัดแต่ละครั้ง.....	29

ภาพประกอบ	หน้า
4.1 โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัด.....	30
4.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์กับคอมพิวเตอร์.....	31
4.3 โปรแกรม StereoCMM ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ.....	32
4.4 หน้าจอของคำสั่งในกลุ่ม Scan.....	33
4.5 หน้าจอของคำสั่งในกลุ่ม Image Controls.....	34
4.6 การแสดงภาพที่ถ่ายจากกล้องในช่องแสดงรูปภาพ.....	35
4.7 หน้าจอของคำสั่งในกลุ่ม Move Axis.....	36
4.8 ปุ่ม Energize ในสถานะปิดและเปิดตามลำดับ.....	36
4.9 แถบคำสั่งทางด้านบนของโปรแกรม.....	37
4.10 การแสดงภาพแบบต่อเนื่องจากการใช้คำสั่ง Live.....	37
4.11 การแสดงผลการวัดในรูปแบบ 3 มิติ.....	38
4.12 กลุ่มข้อมูลจุดที่ถูกขยายและหมุนมุมมอง โดยใช้เมาส์.....	38
4.13 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดพิกัด.....	39
4.14 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม.....	40
4.15 ขั้นตอนการหาตำแหน่งกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์.....	41
4.16 ขั้นตอนการหาค่าพิกัด.....	42
4.17 ลักษณะของไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องวัดพิกัด.....	43
4.18 ไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการวัดเมื่อนำไปเปิดในโปรแกรม CATIA.....	43
5.1 ลักษณะการเกิดภาพบนกล้อง CCD.....	45
5.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการสอบเทียบ.....	45
5.3 การตั้งชิ้นงานเพื่อสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด.....	46
5.4 ภาพของชิ้นงานสอบเทียบเมื่อถ่ายจากกล้องทั้งสองตัว.....	46
5.5 การสร้างระนาบจากจุดข้อมูลที่วัดได้.....	48
5.6 การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างจุดที่วัดได้กับระยะนาบที่สร้างขึ้น.....	49
6.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง.....	51
6.2 ชิ้นงานพื้นผิวทรงกลมสีดำ.....	52
6.3 การทดลองที่ระยะห่างกล้อง 300 มิลลิเมตร มุมกล้อง 20 องศา.....	52

ภาพประกอบ	หน้า
6.4 การทดลองที่ระยะห่างกล้อง 350 มิลลิเมตร มุมกล้อง 30 องศา.....	52
6.5 การทดลองที่ระยะห่างกล้อง 400 มิลลิเมตร มุมกล้อง 40 องศา.....	53
6.6 ผลการวัดชิ้นงานที่ระยะห่างของกล้อง 300 มิลลิเมตร.....	54
6.7 ผลการวัดชิ้นงานที่ระยะห่างของกล้อง 350 มิลลิเมตร.....	54
6.8 ผลการวัดชิ้นงานที่ระยะห่างของกล้อง 400 มิลลิเมตร.....	55
6.9 ชิ้นงานเมาส์ที่มีความชันน้อยและความชันมาก.....	55
6.10 ผลการวัดพื้นผิวที่มีความชันน้อย.....	56
6.11 ผลการวัดพื้นผิวที่มีความชันมาก.....	57
6.12 ชิ้นงานพินกรามสีขาว.....	57
6.13 ผลการวัดพื้นผิวโดยใช้ปริมาณจุดมาก.....	58
6.14 ผลการวัดพื้นผิวโดยใช้ปริมาณจุดปานกลาง.....	59
6.15 ผลการวัดพื้นผิวโดยใช้ปริมาณจุดน้อย.....	59
6.16 ชิ้นงานที่มีความชันสูงทางด้านข้าง.....	60
6.17 ผลการวัดพื้นผิวที่มีความชันสูงทางด้านข้าง.....	61
6.18 ชิ้นงานหูโทรศัพท์ที่มีพื้นผิวมันวาว.....	61
6.19 ผลการวัดชิ้นงานหูโทรศัพท์ที่มีความมันวาว.....	62
6.20 การสะท้อนแสงจากเลเซอร์เข้าสู่กล้อง.....	63
6.21 ชิ้นงานพื้นผิวใบหน้าคนสีดำ.....	63
6.22 การแบ่งจุดอ้างอิงบนพื้นผิวชิ้นงาน.....	64
6.23 กลุ่มข้อมูลจุดที่ได้จากการเชื่อมโยงการวัดหลายครั้ง.....	65
6.24 มุมมองต่างๆของกลุ่มข้อมูลจุดที่ได้จากพื้นผิวใบหน้าคน.....	65
ก.1 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรง.....	71
ก.2 การทำงานของมอเตอร์กระแสสลับ.....	72
ก.3 การทำงานของมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน.....	72
ก.4 การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน เมื่อมีขดลวดเหนี่ยวนำ 3 เฟส.....	73
ก.5 ระบบสำหรับควบคุมเซอร์โวมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน.....	74
ก.6 การแปลงสัญญาณจากคลื่นรูปไซน์ไปเป็นพัลส์.....	76

ภาพประกอบ	หน้า
ก.7 วิธีการควบคุมแบบ PIV&F.....	77
ก.8 การเกิด Integrator windup.....	78
ข.1 ส่วนประกอบของกล้อง CCD.....	80
ข.2 การเรียงตัวของไดโอดเป็นแถวลำดับ.....	81
ข.3 วิธี Interline Transfer.....	81
ข.4 วิธี Frame Transfer.....	82
ข.5 การกำหนดขนาดของแถวลำดับ.....	82
ข.6 วิธีสแกนภาพแบบ Interlace.....	84
ข.7 คาบการทำงานของกล้อง CCD ในระบบ RS-170.....	84
ข.8 พื้นที่การมองเห็นของกล้อง CCD.....	86
ข.9 การวัดประมวลผลภาพรุ่น DT3155 ของบริษัท Data Translation จำกัด.....	87

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
5.1 ผลที่ได้จากการสอบเทียบกล้องตัวซ้าย.....	46
5.2 ผลที่ได้จากการสอบเทียบกล้องตัวขวา.....	47
5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องตัวซ้าย.....	47
5.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องตัวขวา.....	48
ก.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับพอร์ตสื่อสาร RS232C.....	76
ก.2 ตัวอย่างคำสั่งต่างๆที่ใช้ควบคุมตัวควบคุม 6250.....	79
ก.3 ตัวอย่างคำสั่งต่างๆที่ใช้ควบคุมตัวควบคุม BLX30.....	79
ข.1 สูตรการหาพื้นที่การมองเห็น.....	86

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมต้องใช้แบบในการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ หากต้องการผลิตชิ้นงานที่ได้รับการออกแบบใหม่ ต้องสร้างแบบในคอมพิวเตอร์ขึ้นใหม่จากต้นแบบที่นักออกแบบสร้างขึ้น โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ (CAD) ซึ่งผลงานที่ได้ขึ้นอยู่กับทักษะของผู้เขียนแบบเพื่อให้ได้แบบที่ถูกต้อง ตรงตามที่ต้องการออกแบบไว้ ในกรณีที่ต้องการสร้างแบบให้ได้เหมือนหรือใกล้เคียงกับต้นแบบจริงๆ นั้น การเขียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์อาจทำได้ยาก ใช้เวลานาน และมีโอกาสเกิดความผิดพลาดสูง วิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การวัดขนาดของชิ้นงานต้นแบบโดยตรง โดยใช้เครื่องวัดพิคต 3 มิติ แล้วนำพิคตของชิ้นงานนั้นไปสร้างแบบในคอมพิวเตอร์ ข้อดีของวิธีการนี้คือช่วยให้การสร้างแบบในคอมพิวเตอร์ทำได้สะดวกรวดเร็วขึ้น ลดความผิดพลาด และช่วยให้การสร้างแบบของชิ้นงานที่มีความซับซ้อนทำได้ง่ายขึ้น รวมทั้งสามารถนำไปสร้างแบบของชิ้นงานที่ข้อมูลทางขนาดสูญหายไปได้ด้วย

จากความสำคัญดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดในการนำเครื่องวัดพิคต 3 มิติที่สร้างขึ้นจากงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งเป็นแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียวมาพัฒนาต่อ โดยนำกล้อง CCD มาติดที่โครงสร้างเพิ่มอีกหนึ่งตัว เพื่อให้ทำงานในระบบที่เรียกว่าสเตอริโอวิชัน (Stereo Vision) จุดประสงค์ของการวิจัย คือต้องการเพิ่มความสามารถของเครื่องวัดพิคตที่มีอยู่ให้สามารถวัดพื้นผิวที่มีความสลับซับซ้อนได้ดีขึ้น และปรับปรุงให้ผลการวัดมีความแม่นยำ (Accuracy) ดีขึ้น การใช้แถบแสงเลเซอร์ส่องลงบนพื้นผิววัตถุและใช้กล้อง 2 ตัวในการรับภาพโดยทำงานในระบบสเตอริโอวิชัน จะช่วยให้การทำงานของเครื่องวัดพิคตมีความยืดหยุ่นมากขึ้น สำหรับพิคตจุดที่วัดได้จะอยู่ในรูปแบบที่สามารถนำเข้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและการผลิต (CAD/CAM) ที่ชื่อ CATIA เพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิวได้

งานวิจัยฉบับนี้มีทั้งสิ้น 7 บท บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความสำคัญและที่มา รวมทั้งภาพรวมอย่างกว้างๆ ส่วนในบทที่ 2 กล่าวถึงหลักการการทำงาน รวมทั้งข้อดีข้อเสียของเครื่องวัดพิคต 3 มิติชนิดต่างๆ บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการของระบบสเตอริโอวิชัน (Stereo Vision) ซึ่งใช้ใน งานวิจัยนี้ บทที่ 4 มีเนื้อหาเกี่ยวกับ โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเพื่อควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิคต บทที่ 5 เป็นวิธีการสอบเทียบ (Calibration) เครื่องวัดพิคต บทที่ 6 กล่าวถึงการทดลองใช้เครื่องวัด

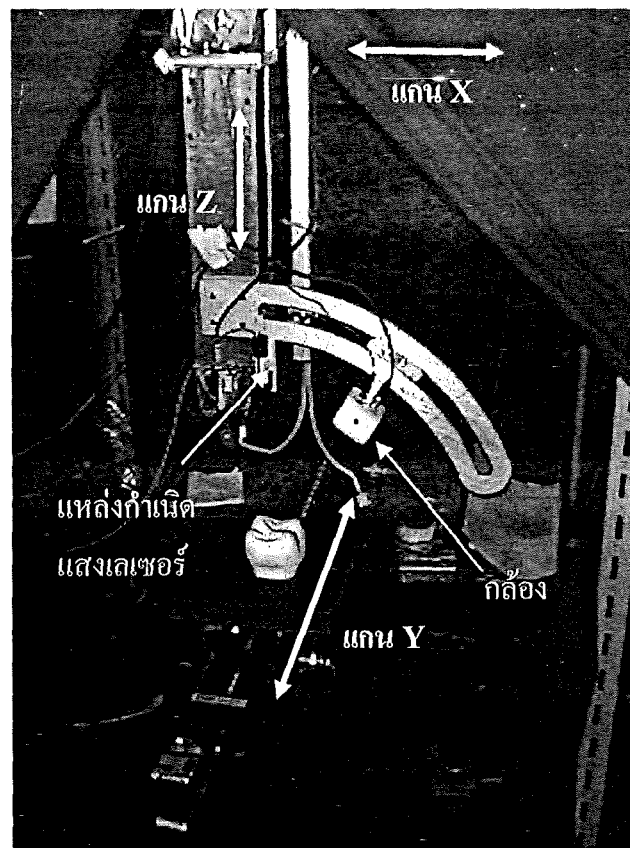
พิกัดในการวัดชิ้นงานที่มีลักษณะต่างๆ และในบทสุดท้าย บทที่ 7 เป็นการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

1.2 ผลงานที่ได้มีการทำมาก่อน

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ทำต่อเนื่องจากงานวิจัยเรื่อง “เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียว” [7] จึงขอกล่าวถึงงานวิจัยดังกล่าว เพื่อให้เห็นภาพรวมและแนวทางของการพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติในงานวิจัยนี้

งานวิจัยเรื่องเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียว

เป็นการพัฒนาและสร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบใช้แถบแสงเลเซอร์ส่องลงบนพื้นผิววัตถุ และเก็บข้อมูลภาพด้วยกล้อง CCD โดยอาศัยหลักการสะท้อนของแสงเกิดเป็นภาพ แล้วนำภาพที่ได้มาคำนวณหาพิกัดของพื้นผิว



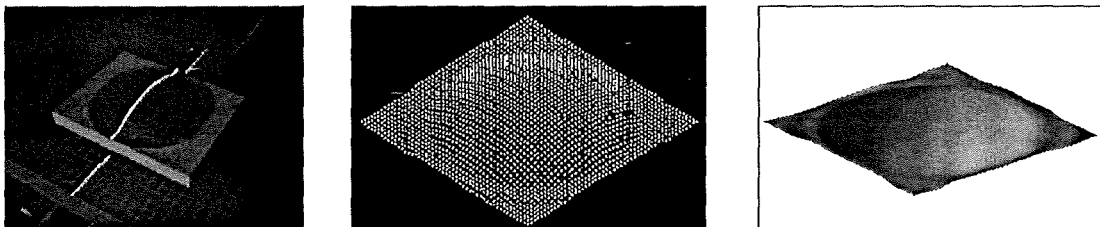
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียว

ลักษณะของเครื่องแสดงดังรูปที่ 1.1 โครงสร้างของเครื่องสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 แกนในลักษณะตั้งฉากซึ่งกันและกัน คือในแนวแกน X, แกน Y และแกน Z การขับเคลื่อนใช้มอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่านและติดตั้งชุดบอลสกรูระหว่างมอเตอร์กับภาระ บนแกน Z จะมีโครงสร้างที่เป็นแขนโค้งยื่นออกมา ซึ่งใช้วางตำแหน่งของกล้อง CCD เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกมุมของกล้อง CCD ได้โดยสะดวก และใช้ติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์

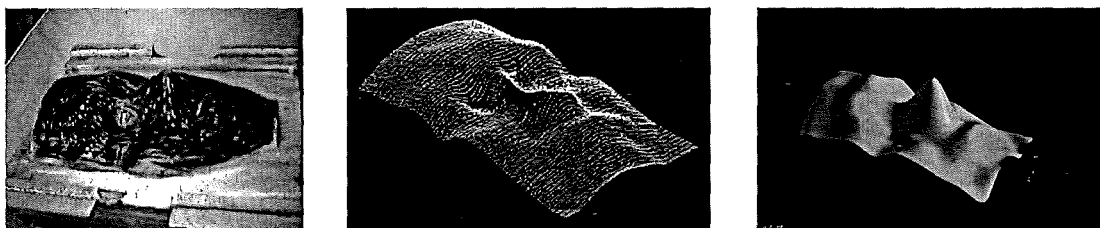
พื้นผิวที่จะทำการวัดต้องมีขนาดไม่เกิน $200 \times 200 \times 100$ มิลลิเมตร (กว้าง \times ยาว \times สูง) และพิกัดที่ได้สามารถนำไปใช้ในโปรแกรม CAD ทั่วไปได้ โดยโปรแกรม CAD จะทำหน้าที่สร้างและปรับแต่งพื้นผิวให้มีความเรียบและต่อเนื่อง และได้ทำการทดลองวัดพิกัดพื้นผิวที่มีลักษณะต่างๆ คือ ทดลองวัดพื้นผิวที่มีสีต่างๆกัน พื้นผิวที่มีความชันสูง พื้นผิวที่มีความมันวาว รวมทั้งการทดลองวัดพิกัดที่มุมกล้องต่างๆ กัน และวัดพิกัดโดยจำนวนจุดข้อมูลต่างๆ กัน โดยมีผลการทดลองดังนี้

ตัวอย่างพื้นผิวที่ได้ทำการวัดจากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียว

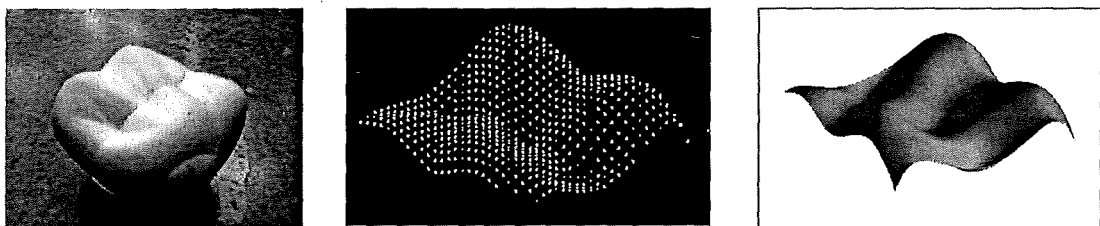
ในหัวข้อนี้จะแสดงตัวอย่างพื้นผิวแบบต่างๆ ที่ได้ทำการวัด ผลที่ได้จากการวัด รวมทั้งพื้นผิวที่สร้างขึ้น โดยใช้โปรแกรม Unigraphics



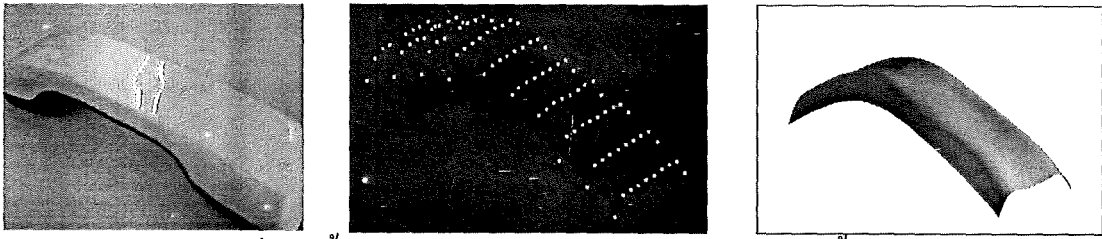
รูปที่ 1.2 พื้นผิวทรงกลมสีดำ ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว



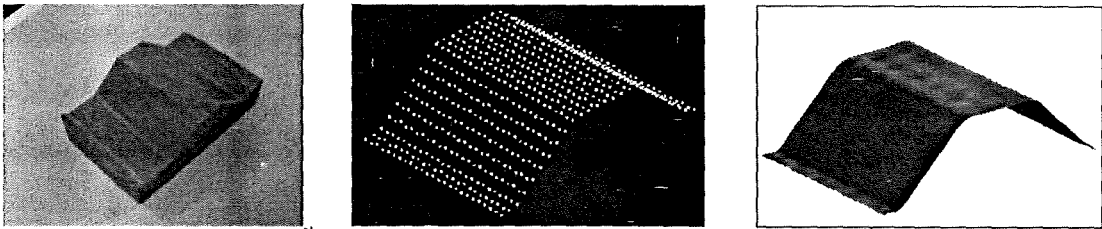
รูปที่ 1.3 พื้นผิวหน้าคนสีดำ ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว



รูปที่ 1.4 พื้นผิวพื้นกรามสีขาว ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว



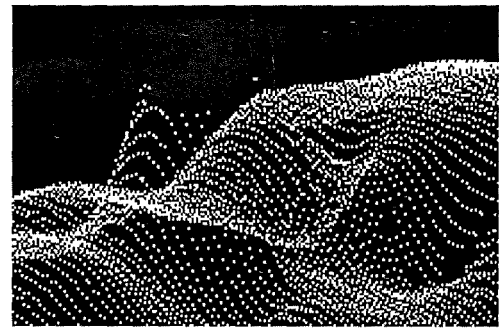
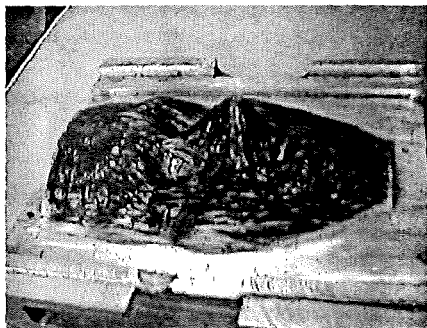
รูปที่ 1.5 พื้นผิวหุโทรัสซัพท์ ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว



รูปที่ 1.6 พื้นผิวสี่เหลี่ยมคางหมู ผลของการวัดและการสร้างพื้นผิว

สรุปผลและปัญหาที่พบในการวิจัย

1. เครื่องวัดพิกัดใช้หลักการ Optical Triangulation ในการคำนวณพิกัดจากภาพ
2. ความแม่นยำ (Accuracy) ของเครื่องวัดพิกัดมีค่าประมาณ 0.4203 มิลลิเมตร (420.3 ไมครอน) เมื่อทำการวัดพื้นผิวทรงกลมที่มุมกล้อง 30 องศาที่ระยะนาบแสงเลเซอร์
3. พื้นผิวที่เป็นอุปสรรคต่อการวัดจะมีลักษณะเป็นพื้นผิวที่มีความชันสูง เป็นขอบ ร่อง หรือเป็นหลุมลึก ดังรูปที่ 1.7 ซึ่งทำให้เกิดสภาพการสะท้อนที่ไม่ถูกต้องหรือไม่สมบูรณ์ รวมทั้งส่วนที่มีการบดบังการสะท้อนของแสงเลเซอร์ไปยังกล้อง ข้อผิดพลาดเหล่านี้สามารถลดได้โดยทำการวัดพิกัดที่มุมกล้องน้อยๆ เพื่อลดโอกาสการถูกบดบัง แต่การวัดพิกัดที่มุมกล้องน้อยๆ ก็จะมีผลให้ Resolution ของเครื่องหยาบมากขึ้น



รูปที่ 1.7 พื้นผิวดันแบบรูปไบหน้าคนสีดำ (ซ้าย) และพิกัดที่วัดได้

ส่วนที่เป็นจมูกและตา (ขวา)

การพัฒนาในงานวิจัยนี้

เพื่อเป็นการแก้ปัญหาในงานวิจัยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ทำการพัฒนาเครื่องวัดพิคัดในส่วนต่างๆดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์จับยึดกล้องแบบใหม่ที่ตัวโครงสร้าง สำหรับใช้ยึดกล้อง CCD 2 ตัว และติดตั้งกล้องตัวที่ 2 เพิ่มเติม
2. การคำนวณพิคัดใช้หลักการของสเตอริโอวิชั่น (Stereo Vision) แบบใช้กล้อง 2 ตัว เพื่อให้ได้ความถูกต้องในการวัดดีขึ้น
3. ใช้แบบจำลองกล้อง (Camera Model) ในการสอบเทียบกล้อง เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการวัดพิคัด
4. การถ่ายภาพ ทำการถ่ายหลายครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย เพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวนในภาพ
5. พัฒนาเทคนิคช่วยในการวัดชิ้นงานที่มีซับซ้อน หรือมีความชันสูง ซึ่งเป็นปัญหาในเครื่องตัวเก่า
6. พัฒนาให้เครื่องสามารถวัดพิคัดจุดได้ในปริมาณมาก

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดพิคัดพื้นผิว โดยใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้อง 2 ตัว
2. พัฒนาความสามารถของเครื่องวัดพิคัด 3 มิติที่มีอยู่ ซึ่งใช้การวัดแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียว ด้วยการใช้นิเทศของกล้อง 2 ตัว เพื่อให้สามารถวัดพื้นผิวที่มีความซับซ้อนได้ดีขึ้น
3. ศึกษาเทคนิคการกรองสัญญาณรบกวนออกจากพิคัดจุดที่วัดได้ เพื่อปรับปรุงให้เครื่องสามารถวัดพิคัดได้ถูกต้องมากขึ้น
4. สามารถนำข้อมูลที่วัดได้ไปเข้าโปรแกรม CATIA เพื่อใช้สร้างพื้นผิวได้

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. พัฒนาเครื่องวัดพิคัด 3 มิติที่มีอยู่ ซึ่งวัดพิคัดชิ้นงาน โดยใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียว ให้เป็นแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้อง 2 ตัว สำหรับใช้วัดพื้นผิวชิ้นงาน
2. พัฒนาโปรแกรมสำหรับเครื่องวัดพิคัด 3 มิติ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องและใช้คำนวณพิคัดพื้นผิวชิ้นงาน
3. ทำการเชื่อมโยงข้อมูลที่วัดได้เข้ากับโปรแกรม CATIA

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำวิจัย

1. ได้เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ สำหรับวัดพื้นผิวชิ้นงานเพื่อนำมาสร้างแบบในคอมพิวเตอร์ได้
2. ได้โปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้อง 2 ตัว สำหรับใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องและใช้เก็บพิกัดพื้นผิวชิ้นงาน
3. สามารถใช้ได้กับชิ้นงานที่เปราะบาง เนื่องจากใช้การวัดแบบไม่สัมผัสพื้นผิวชิ้นงาน

บทที่ 2

หลักการของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

2.1 คำนำ

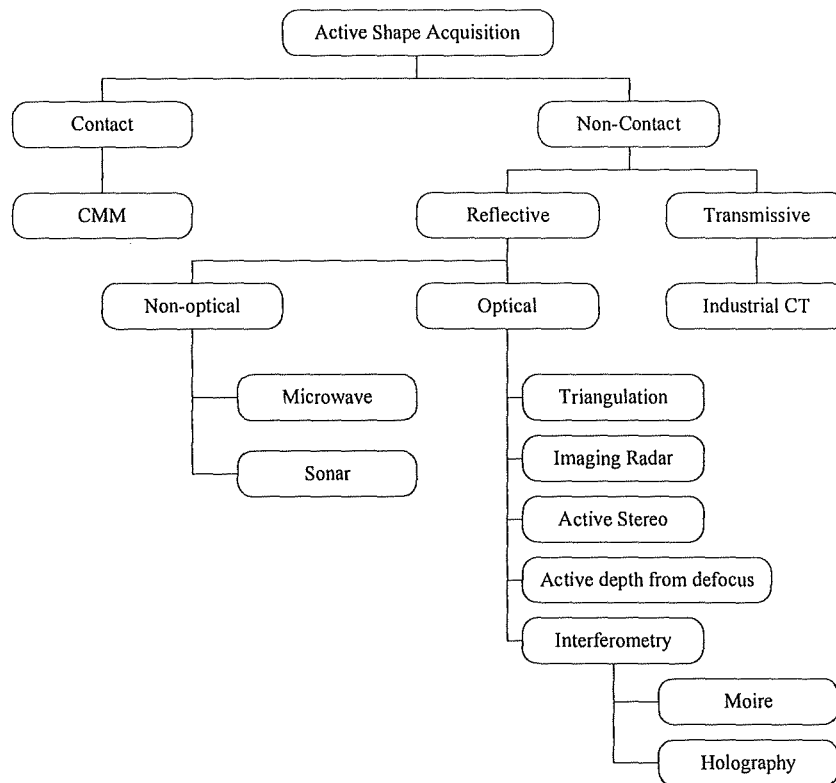
เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (Coordinate Measuring Machine / CMM) เป็นเครื่องที่ใช้สำหรับวัดพิกัดพื้นผิวของวัตถุ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นโครงสร้าง (Hardware) และส่วนที่เป็นโปรแกรมทำงาน (Software) ส่วนที่เป็นโครงสร้างใช้ในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ทำการวัด แต่หากเป็นเครื่องวัดชนิดไม่เคลื่อนที่จะใช้ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด เช่น กล้องซีซีดี (CCD camera) ส่วนที่เป็นโปรแกรมทำงานทำหน้าที่ตรวจสอบสถานะ และควบคุมลำดับขั้นตอนการทำงานของเครื่อง คำนวณค่าพิกัด รวมทั้งติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ เช่น การรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และการแสดงผล

เครื่องวัดพิกัดที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายชนิด โดยอาจแบ่งตามวิธีการที่ใช้ในการวัดพิกัด หรือตามลักษณะโครงสร้างของเครื่องวัดพิกัด ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติชนิดต่างๆ หลักการทำงาน และข้อดีข้อเสียในแต่ละระบบ รวมถึงลักษณะของข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

2.2 การจำแนกประเภทของเครื่องวัดพิกัดโดยวิธีการวัด

ในการวัดชิ้นงานเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นผิวมีวิธีที่ใช้ต่างๆกันหลายวิธี ในที่นี้จะแบ่งตามวิธีการวัดที่ใช้กันอยู่ [1] สามารถแบ่งเป็นวิธีแบบ Passive และวิธีแบบ Active ซึ่งวิธีแบบ Passive จะไม่มีการถ่ายทอดพลังงานในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งให้กับวัตถุ ส่วนแบบ Active จะตรงกันข้ามคือจะมีการสัมผัสหรือมีการถ่ายทอดพลังงานในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่งไปบนวัตถุเพื่อประโยชน์ในการวัดพื้นผิวชิ้นงาน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการวัดแบบ Active เท่านั้นเนื่องจากเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

ในการวัดแบบ Active สามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ คือแบบสัมผัสและแบบไม่สัมผัสกับชิ้นงาน โดยการวัดแบบไม่สัมผัสกับชิ้นงานแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือการวัดโดยใช้หลักการสะท้อน (Reflective) และการวัดโดยการส่งผ่านคลื่นหรือรังสีในตัวกลาง (Transmissive) ในรูปที่ 2.1 แสดงประเภทของการวัดแบบ Active แบบต่างๆ รายละเอียดของการวัดในแต่ละประเภทมีดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.1 วิธีการวัดแบบ Active ประเภทต่างๆ

2.2.1 เครื่องวัดพิกัดแบบสัมผัส (Contact CMM)

เป็นเครื่องวัดพิกัดที่ขณะทำการวัดจะต้องสัมผัสกับพื้นผิวชิ้นงาน โดยการใช้หัววัดแบบสัมผัส (touch probe) หรือลูกกลิ้งสัมผัสไปตามตำแหน่งที่ต้องการ โดยตรง พิกัดที่ได้จะมาจากตำแหน่งของตัวโครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดเอง ลักษณะโดยทั่วไปแกนทั้งสามของเครื่องจะตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยมีหัววัดแบบสัมผัสติดตั้งอยู่ที่ปลายแกนสุดท้าย ขณะทำการวัดเมื่อหัววัดสัมผัสกับพื้นผิวชิ้นงานจะส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะบันทึกตำแหน่งของหัววัดไว้ โดยอ่านค่าจากตำแหน่งของแต่ละแกนโดยตรง รูปที่ 2.2 แสดงเครื่องวัดพิกัดแบบสัมผัส

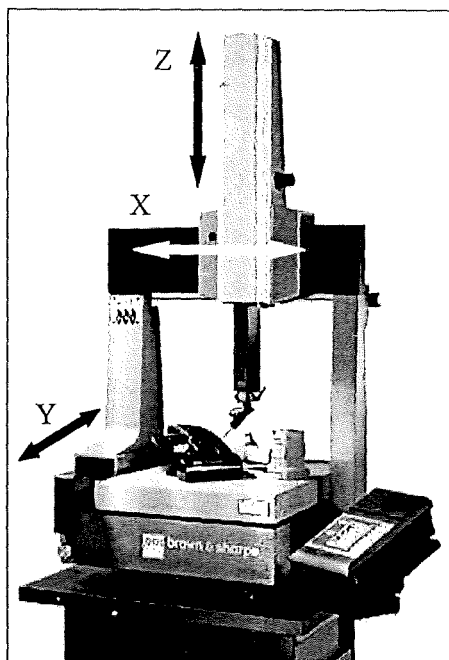
ข้อดี

- มีความถูกต้องในการวัดสูง
- สามารถวัดชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ โดยการใช้หัววัดที่มีขนาดเล็ก และการปรับเอียงหัววัดเป็นมุมต่างๆเพื่อให้สามารถเข้าถึงชิ้นงานได้

ข้อเสีย

- ช้า เนื่องจากต้องใช้มือในการควบคุมการเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับจุดที่ต้องการ

- ต้องใช้คนคอยควบคุม
- เนื่องจากการสัมผัสกับวัตถุ จึงอาจทำให้เกิดความเสียหายกับชิ้นงานที่เปราะบางได้



รูปที่ 2.2 เครื่องวัดพิกัดแบบสัมผัส

2.2.2 เครื่องวัดพิกัดแบบไม่สัมผัส (Non-Contact CMM)

เป็นเครื่องวัดพิกัดที่ไม่มีส่วนสัมผัสกับพื้นผิวชิ้นงาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้หลักการของการส่งผ่านคลื่นหรือรังสีในตัวกลาง (Transmissive) กับประเภทที่ใช้หลักการสะท้อน (Reflective) โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.2.2.1 ชนิดที่ใช้การส่งผ่านคลื่นหรือรังสีในตัวกลาง (Transmissive)

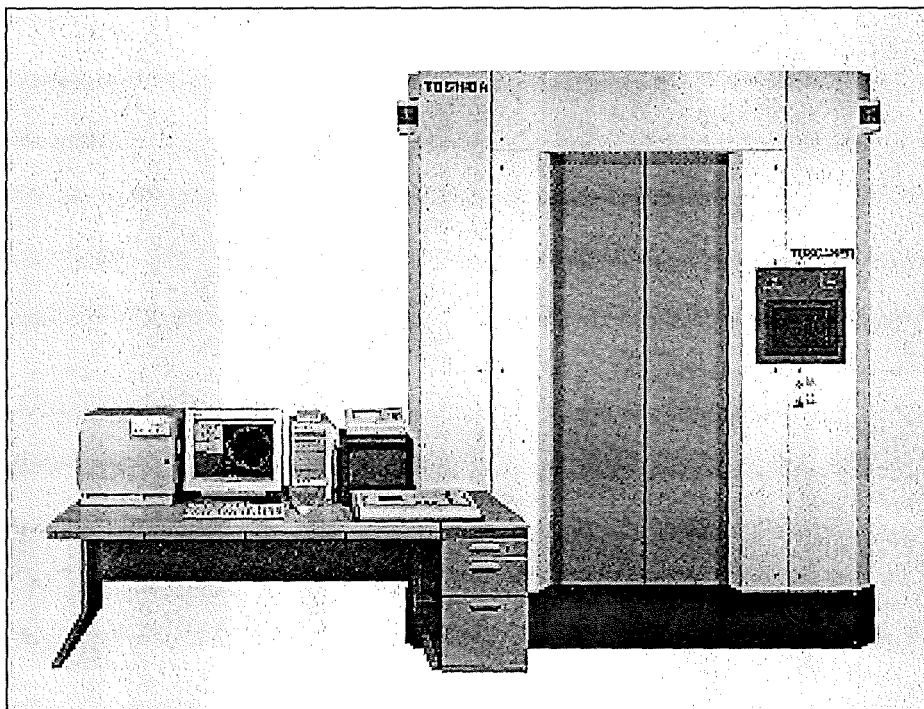
ใช้การฉายพลังงานไปบนวัตถุแล้วรับพลังงานที่ถูกส่งผ่านกลับมา เพื่อคำนวณหาระยะห่างของวัตถุ วิธีการที่มีประสิทธิภาพในการหารูปร่างของชิ้นงานคือ Industrial computer tomography (Industrial CT) จะใช้การระดมยิงวัตถุด้วยรังสีเอกซ์พลังงานสูง ซึ่งรังสีดังกล่าวสามารถทะลุผ่านวัตถุแล้ววัดปริมาณการแผ่รังสีที่ผ่านวัตถุในแนวต่างๆ โดยจะทำการฉายรังสีในแนวต่างๆเพื่อนำข้อมูลที่ได้อัมาประกอบกันเป็นข้อมูล 3 มิติของชิ้นงาน

ข้อดี

- สามารถวัดรูปร่างลักษณะภายในของวัตถุที่ซับซ้อนได้
- ไม่ต้องกังวลกับคุณสมบัติการสะท้อนแสงของวัตถุ

ข้อเสีย

- ราคาแพง
- วัตถุที่มีส่วนประกอบเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่นต่างกันมาก (เช่น ไม้ ทากาวติดกับเหล็ก) จะทำให้ความถูกต้องของข้อมูลลดลง
- เป็นอันตรายเนื่องจากใช้แก๊มมันตาพรังสี



รูปที่ 2.3 เครื่อง Industrial CT

2.2.2.2 ชนิดที่ใช้การสะท้อน (Reflective)

อาศัยหลักการสะท้อนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือแสง เป็นตัววัดพิกัด แทนการสัมผัสจุดนั้น โดยตรง วิธีนี้ยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทย่อยๆ อีก คือ

2.2.2.2.1 เครื่องวัดพิกัดที่ไม่ใช้แสง (Non-Optical CMM)

ใช้คลื่นเสียงและคลื่นไมโครเวฟเป็นหลัก โดยทั่วไปใช้หลักการวัดระยะห่างจากวัตถุ โดยการคำนวณเวลาที่ลูกคลื่นสะท้อนกลับ จากวัตถุ (Time-of-Flight)

2.2.2.2.2 เครื่องวัดพิภคที่ใช้แสง (Optical CMM)

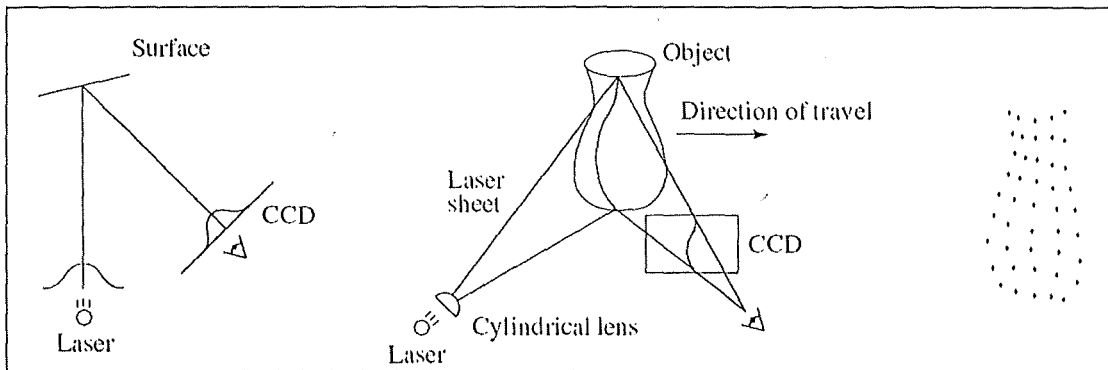
ใช้แสงฉายไปบนวัตถุและสะท้อนกลับมาที่ตัวรับ ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องวัดที่ใช้หลักการนี้สามารถให้ข้อมูลที่มีความหนาแน่นมากได้อย่างรวดเร็ว ปลอดภัยและมีความถูกต้องสูง แต่มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถเก็บข้อมูลของส่วนที่มองไม่เห็น และผลการวัดขึ้นกับคุณสมบัติการสะท้อนแสงของวัตถุ วิธีการนี้ยังแบ่งได้อีกดังนี้

- Imaging Radar ลักษณะเหมือนกับการใช้คลื่น ไมโครเวฟ แต่ใช้คลื่นช่วงความถี่แสง เหมาะสำหรับวัตถุที่มีขนาดใหญ่

- Interferometric ใช้การฉายแสงที่มีรูปแบบเป็นคาบแบบคงที่หรือไม่คงที่ไปบนพื้นผิวของวัตถุ จากนั้นจะผสมแสงที่สะท้อนกลับมากรับรูปแบบอ้างอิง รูปแบบที่ใช้อ้างอิงจะช่วยแปลงข้อมูลออกมาเป็นลักษณะของพื้นผิวได้ วิธีนี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ Moire interferometry และ Holographic interferometry

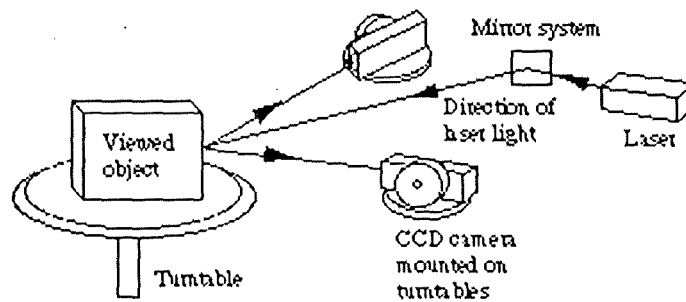
- Active depth from defocus ใช้หลักการที่ว่าภาพของวัตถุจะเลื่อนไปเป็นส่วนแปรผันกับระยะทางระหว่างจุดบนวัตถุและระนาบที่พอดีโฟกัสของวัตถุ วิธีนี้สามารถใช้ได้ทั้งแบบ Passive และ Active แบบ Passive จะอาศัยลักษณะพื้นผิว (texture) ของวัตถุเป็นตัวกำหนดความไม่ชัด ส่วนแบบ Active จะฉายแสงแบบต่างๆไปบนวัตถุ

- Optical triangulation เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่ง หลักการคือเมื่อฉายแสงซึ่งอาจเป็นจุดหรือเป็นเส้นลงบนพื้นผิววัตถุก็จะเกิดการสะท้อนกลับมายังตัวรับ ซึ่งแสงที่สะท้อนกลับนี้จะขึ้นอยู่กัลักษณะของพื้นผิวของวัตถุ เมื่อลักษณะของแสงสะท้อนเปลี่ยนไป จะสามารถหาระยะที่เปลี่ยนไปของพื้นผิวได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการของ Optical triangulation (ซ้าย) ใน 2 มิติ, (กลาง) ใน 3 มิติ และ (ขวา) ข้อมูลที่ได้ใน 3 มิติ

- Active stereo vision หรือ Active stereo ใช้หลักการของระบบ Stereo vision เพียงแต่ทำการฉายแสงไปบนวัตถุที่ทำการวัด เพื่อให้การคำนวณหาพิกัดง่ายขึ้น หลักการคือการใช้กล้องตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปในการดูวัตถุ เมื่อหาตำแหน่งของภาพที่ตรงกันของกล้องแต่ละตัวได้แล้ว จะทำให้ได้เส้นทางการมองเห็น (Line of sight) ของกล้องตัดกันที่จุดเดียวบนผิวของวัตถุ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณเป็นพิกัดของจุดบนผิววัตถุได้ ลักษณะของระบบแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ระบบ Active stereo vision

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้หลักการของ Active stereo vision มาคำนวณพิกัดพื้นผิวของวัตถุ โดยใช้แถบแสงเลเซอร์ฉายลงบนพื้นผิวที่ทำการวัด เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้ข้อมูลในปริมาณมากในเวลาอันรวดเร็ว รายละเอียดของระบบ Stereo vision จะกล่าวถึงในบทที่ 3

2.3 ลักษณะของข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

ลักษณะของข้อมูลที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ มีอยู่ด้วยกัน 2 แบบขึ้นอยู่กับงานที่จะนำไปใช้ คือ

2.3.1 ข้อมูลพิกัดเฉพาะส่วน

ข้อมูลชนิดนี้จะมีปริมาณไม่มากนัก แต่เพียงพอที่จะทำให้ทราบถึงลักษณะบางประการของชิ้นงาน เช่น การวัดพิกัดในส่วนหัวและส่วนท้ายของชิ้นงานเพื่อหาความยาวของชิ้นงาน การวัดพื้นผิวภายในของทรงกระบอกเพื่อหาความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเจาะ เป็นต้น

พิกัดที่วัดได้จะไม่ถูกนำไปใช้โดยตรง แต่จะนำไปใช้ในการคำนวณหาพารามิเตอร์ที่ต้องการ ข้อมูลลักษณะนี้มักใช้ในงานทางด้านการตรวจสอบคุณภาพ ซึ่งนิยมใช้เครื่องวัดพิกัดแบบสัมผัสเนื่องจากมีความถูกต้องในการวัดสูง และ โปรแกรมของเครื่องจะมีฟังก์ชันสำหรับวัดค่าเหล่านี้มาให้เรียบร้อยแล้ว

2.3.2 ข้อมูลพิกัดพื้นผิวทั้งหมดของชิ้นงาน

พิกัดที่วัดในลักษณะนี้จะมีปริมาณมาก เพื่อแสดงถึงรูปร่างพื้นผิวของวัตถุที่ทำการวัด ลักษณะข้อมูลชนิดนี้เรียกว่า กลุ่มข้อมูลจุด (point cloud) ซึ่งจะใช้งานทางด้านวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse Engineering / RE) ข้อมูลพิกัดของชิ้นงานจะถูกนำไปสร้างเป็นแบบของชิ้นงานอีกครั้ง เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ ทำซ้ำ หรือปรับปรุงชิ้นงานนั้นให้ดีขึ้น

วิศวกรรมย้อนกลับเป็นการสร้างแบบจากชิ้นงานที่มีอยู่ ถือเป็น การย้อนกลับกระบวนการทางวิศวกรรมโดยทั่วไป ที่จะเริ่มจากการออกแบบตามหลักการ ไปสู่การผลิต และสร้างชิ้นงานจริง จุดประสงค์ของการทำวิศวกรรมย้อนกลับคือ

- ต้องการสร้างแบบจากต้นแบบที่สร้างขึ้นจากไม้หรือดินเหนียว
- ต้องการผลิตชิ้นงานที่ผู้ผลิตเดิมเลิกกิจการ หรือยกเลิกการผลิตไปแล้ว แต่ลูกค้ายังต้องการอยู่
- มีเอกสารการออกแบบดั้งเดิม ไม่เพียงพอ
- ต้องการปรับปรุงผลิตภัณฑ์ในบางส่วน
- เอกสารการออกแบบหายหรือไม่มี
- เพื่อใช้วิเคราะห์ส่วนที่ดีและไม่ดีของผลิตภัณฑ์ของกลุ่มแข่ง

เนื่องจากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้เครื่องวัดพิคัด 3 มิติที่พัฒนาขึ้นในงานด้านวิศวกรรมย้อนกลับเป็นหลัก ดังนั้นข้อมูลพิคัดที่วัดได้จะมีลักษณะเป็นกลุ่มข้อมูลจุด (point cloud) ซึ่งสามารถนำเข้าโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและการผลิต (CAD/CAM) ที่ชื่อ CATIA ที่มีกลุ่มคำสั่งในการสร้างพื้นผิวจากกลุ่มข้อมูลจุด เมื่อได้พื้นผิวในโปรแกรม CATIA แล้ว สามารถนำมาวิเคราะห์ แก๊งไข หรือนำไปสร้างแนวกัดสำหรับทูลด้วยกลุ่มคำสั่งทางด้านคอมพิวเตอร์ช่วยในการผลิต (CAM) เพื่อสร้างเป็นชิ้นงานจริงอีกครั้ง

บทที่ 3

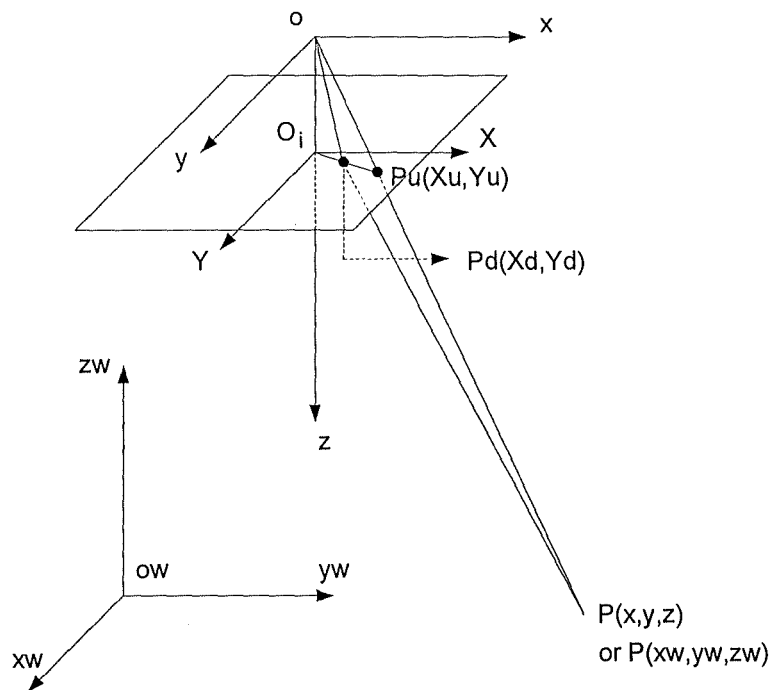
แบบจำลองกล้อง (Camera Model) และระบบสเตอริโอ

3.1 คำนำ

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงแบบจำลองกล้อง (Camera model) ที่ใช้ในงานวิจัย ซึ่งใช้ในการสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างจุดของภาพ (Pixel) กับตำแหน่งของวัตถุใน 3 มิติ และกล่าวถึงหลักการพื้นฐานและการคำนวณพิกัดด้วยระบบสเตอริโอ รวมถึงเทคนิคการทำจุดอ้างอิงบนชิ้นงานเพื่อช่วยให้สามารถวัดชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ดีขึ้น

3.2 แบบจำลองกล้อง (Camera Model)

แบบจำลองกล้อง (Camera model) เป็นการจำลองถึงลักษณะการเกิดภาพบนระนาบของภาพจากวัตถุใน 3 มิติ ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวจะทำให้ได้สมการที่แสดงความเชื่อมโยงระหว่างการแปลงพิกัดในระบบพิกัดต่างๆ เริ่มจากการแปลงพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดโลก 3 มิติ (3D world coordinate system) ไปสู่ระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ (computer image coordinate system or pixel coordinate) รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะของแบบจำลองกล้อง



รูปที่ 3.1 ลักษณะของแบบจำลองกล้อง (Camera model)

จากรูปที่ 3.1 มีระบบพิกัดต่างๆที่เกี่ยวข้องดังนี้

- (x_w, y_w, z_w) เป็นพิกัด 3 มิติของจุดบนวัตถุ P ในระบบพิกัดโลก 3 มิติ (3D world coordinate system)
- (x, y, z) เป็นพิกัด 3 มิติของจุดบนวัตถุ P ในระบบพิกัดกล้อง 3 มิติ (3D camera coordinate system) ซึ่งมีจุดกำเนิดอยู่ที่จุดกึ่งกลางเลนส์ O และทิศทางของแกน z อยู่ในแนวเดียวกับแกนการมองของกล้อง (Optical axis)
- (X, Y) เป็นระบบพิกัดภาพ ซึ่งมีจุดกำเนิดที่ O_i (จุดตัดของแกนการมอง z กับระนาบของภาพ) และขนานกับแกน x และ y ของระบบพิกัดกล้อง, โดยมี f เป็นระยะห่างระหว่างระนาบของภาพกับจุดกึ่งกลางเลนส์
- (X_u, Y_u) คือค่าพิกัดในระบบพิกัดภาพ (image plane coordinate system) ของจุด (x, y, z) ในกรณีที่เป็นแบบจำลองกล้องรูเข็ม (pinhole camera model)
- (X_d, Y_d) คือค่าพิกัดในระบบพิกัดภาพที่แท้จริงซึ่งจะแตกต่างจากค่าของ (X_u, Y_u) เนื่องจากความบิดเบือนของเลนส์ (lens distortion)
- (X_f, Y_f) เป็นค่าพิกัดของระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ บอกถึงตำแหน่งจุดของภาพ (Pixel) ในไฟล์คอมพิวเตอร์

ขั้นตอนในการแปลงพิกัดจาก (x_w, y_w, z_w) ไปสู่ (X_f, Y_f) ประกอบด้วยการแปลงพิกัด 4 ขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 3.2 ซึ่งการแปลงพิกัดในขั้นตอนต่างๆมีสมการดังต่อไปนี้

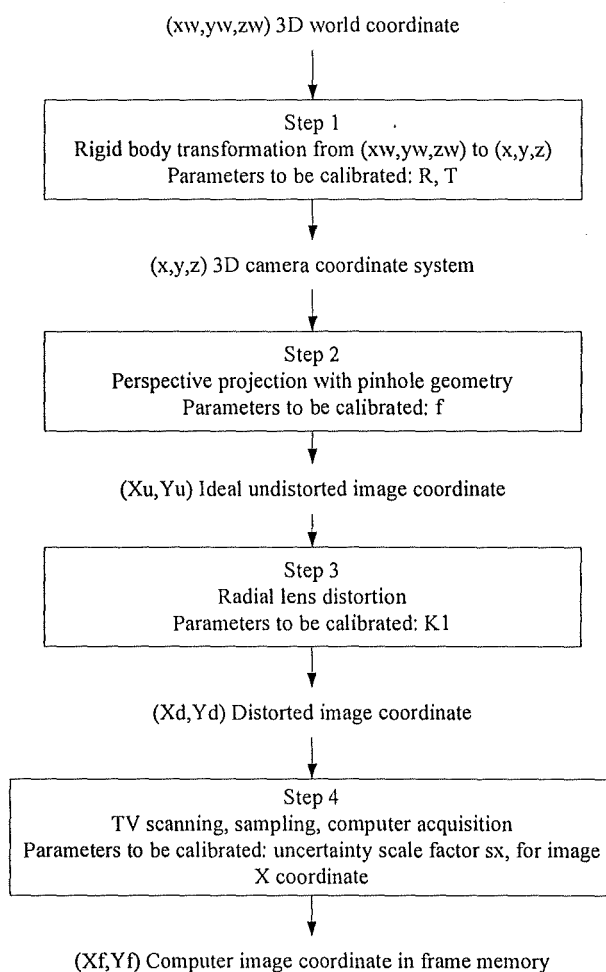
ขั้นตอนที่ 1

Rigid body transformation จากระบบพิกัดโลกของวัตถุ (x_w, y_w, z_w) ไปยังระบบพิกัดของกล้อง (x, y, z)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad [3.1]$$

โดยที่ R เป็น 3×3 Rotation matrix

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad [3.2]$$



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการแปลงพิกัดจากระบบพิกัดโลก 3 มิติ ไปยังระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์

และ T เป็น Translation vector

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad [3.3]$$

ขั้นตอนที่ 2

เป็นการแปลงจากระบบพิกัดกล้อง ไปสู่ระบบพิกัดภาพอุดมคติ (Ideal image plane coordinate), (X_u, Y_u) โดยใช้ perspective projection จะได้

$$X_u = f \frac{x}{z} \quad [3.4]$$

$$Y_u = f \frac{y}{z} \quad [3.5]$$

ขั้นตอนที่ 3

เป็นการจำลองการเกิดความบิดเบือนของภาพเนื่องจากระบบเลนส์ (Radial lens distortion) โดยมีสมการ คือ

$$X_d + D_x = X_u \quad [3.6]$$

$$Y_d + D_y = Y_u \quad [3.7]$$

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

$$D_x = X_d(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \dots) \quad [3.8]$$

$$D_y = Y_d(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \dots) \quad [3.9]$$

$$r = \sqrt{X_d^2 + Y_d^2} \quad [3.10]$$

ขั้นตอนที่ 4

เป็นการแปลงจากพิกัดในระบบพิกัดภาพที่แท้จริง ไปยังระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์

$$X_f = s_x d'_x{}^{-1} X_d + C_x \quad [3.11]$$

$$Y_f = d_y{}^{-1} Y_d + C_y \quad [3.12]$$

โดยที่

(X_f, Y_f) เป็นตำแหน่งแถวและหลักของจุดของภาพ (Pixel) ในคอมพิวเตอร์

(C_x, C_y) เป็นตำแหน่งแถวและหลักของจุดกึ่งกลางภาพในคอมพิวเตอร์

s_x เป็นความไม่แน่นอนของสัญญาณในระบบการรับข้อมูลภาพ

$$d'_x = d_x \frac{N_{cx}}{N_{fx}} \quad [3.13]$$

d_x เป็นระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของ CCD elements ที่อยู่ติดกันในแนวแกน X

d_y เป็นระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของ CCD elements ที่อยู่ติดกันในแนวแกน Y

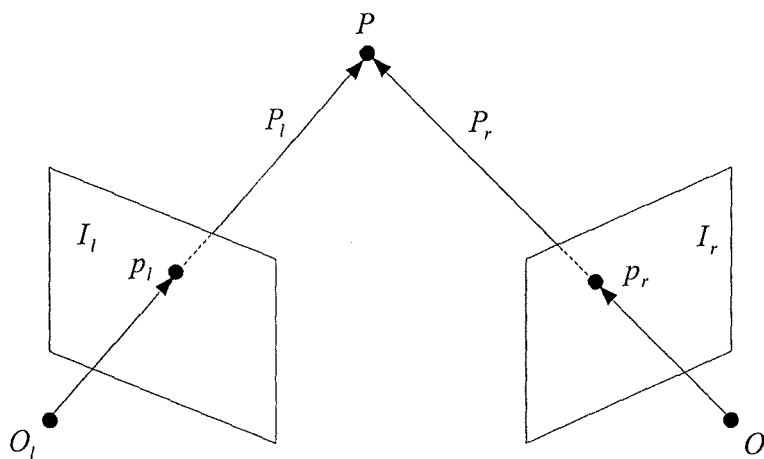
N_{cx} เป็นจำนวนของ CCD elements ในแนวแกน X

N_{fx} เป็นจำนวนจุดของภาพ (pixel) ในแนวแกน X

จากการแปลงพิกัดใน 4 ขั้นตอนดังกล่าว จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งในภาพกับตำแหน่งของวัตถุใน 3 มิติ โดยจะต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ในสมการต่างๆเสียก่อน สามารถหาได้โดยการสอบเทียบกล้อง (Camera calibration) ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 5

3.3 หลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น

ระบบสเตอริโอวิชั่น (Stereo vision system) หรือระบบสเตอริโอ (Stereo system) เป็นการใช้กล้องตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปถ่ายภาพจากมุมมองที่แตกต่างกัน แล้วนำภาพที่ได้มาค้นหาตำแหน่งของภาพในกล้องแต่ละตัวที่เกิดจากจุดเดียวกันบนวัตถุ เพื่อคำนวณหาระยะห่างจากกล้องถึงวัตถุ ในกรณีที่คำนวณระยะในทุกตำแหน่งของภาพ จะได้พิกัด 3 มิติ (3D coordinate) ที่มีปริมาณมาก ครอบคลุมพื้นผิววัตถุทั้งหมดที่มองเห็น ซึ่งนิยมใช้ในการวัดพิกัดพื้นผิวของชิ้นงาน หรือในกรณีที่คำนวณระยะเพียงบางตำแหน่งของภาพ โดยเลือกเฉพาะวัตถุที่สนใจในภาพ ก็จะได้ค่าพิกัดที่มีปริมาณน้อย เหมาะสำหรับงานด้านระบบนำร่องอัตโนมัติ และระบบการตรวจรู้ของหุ่นยนต์ เนื่องจากต้องการทราบเพียงตำแหน่งของวัตถุ



รูปที่ 3.3 ระบบสเตอริโอแบบ 2 กล้อง

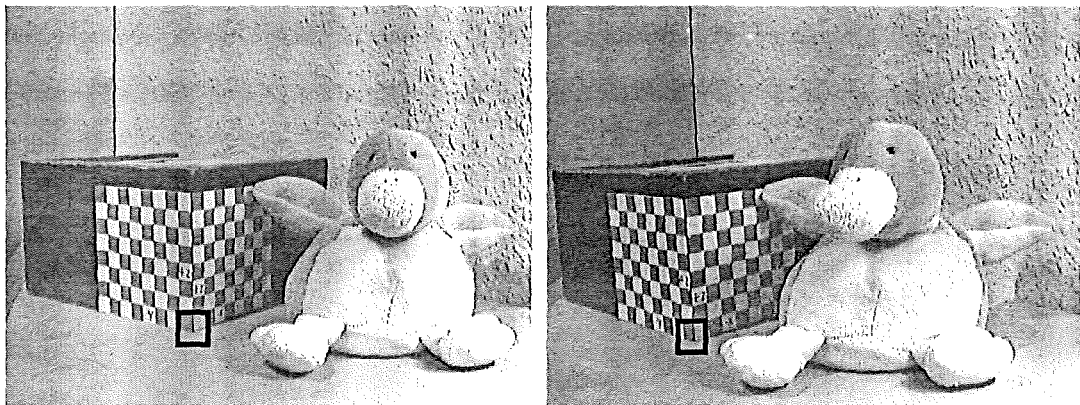
รูปที่ 3.3 แสดงระบบสเตอริโอแบบ 2 กล้อง ถ้ากำหนดให้ P เป็นจุดบนชิ้นงาน, I_1 และ I_2 แทนระนาบของภาพบนกล้องตัวซ้ายและขวาตามลำดับ จะเห็นว่าเราสามารถหาตำแหน่งพิกัดของจุด P ใน 3 มิติได้ หากรู้ตำแหน่งที่จุด P ฉายลงบนระนาบของภาพซ้ายและขวา (จุด p_1 และจุด p_2) เมื่อนำมาสร้างรังสีจากจุดกึ่งกลางเลนส์ของกล้องแต่ละตัว (จุด O_1 และจุด O_2) จะได้จุดตัดใน 3 มิติ ซึ่งเป็นค่าพิกัด 3 มิติของวัตถุที่ตำแหน่งนั้น

ดังนั้นปัญหาในระบบสเตอริโอ มีอยู่ 2 ประการ คือ การค้นหาตำแหน่งของภาพในกล้องแต่ละตัวที่เป็นจุดเดียวกันบนชิ้นงาน มีชื่อเรียกว่า Correspondence problem และการหาค่าพิกัด 3 มิติจากตำแหน่งของภาพดังกล่าว หรือ 3D Reconstruction

3.3.1 Correspondence Problem

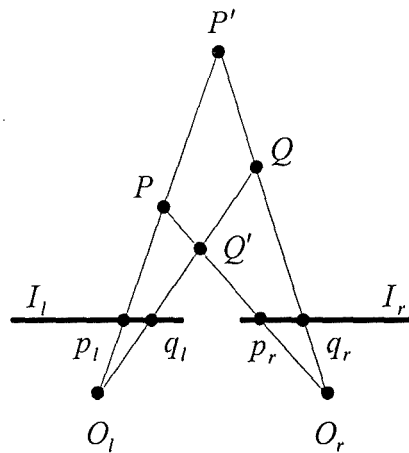
ในการแก้ Correspondence problem จะต้องมีสิ่งที่ใช้ในการเปรียบเทียบ และเกณฑ์การเปรียบเทียบความเหมือนของวัตถุในภาพแต่ละภาพ โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การใช้ค่าความเข้มของภาพ (Intensity value) และการใช้ลักษณะรูปร่าง (Feature) ของวัตถุในภาพ โดยในวิธีที่ใช้ค่าความเข้มของภาพ จะทำการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) ของค่าความเข้มของภาพในบริเวณรอบๆจุดที่พิจารณา ซึ่งเรียกว่า image windows ที่แต่ละตำแหน่งของภาพ บริเวณที่มีค่า correlation สูงสุดจะเป็นส่วนของภาพที่ตรงกัน วิธีนี้เรียกว่า Correlation-based methods ส่วนวิธีที่ใช้ลักษณะรูปร่างของวัตถุในภาพ หรือ Feature-based methods จะใช้การสร้าง feature descriptors ของวัตถุแต่ละชิ้นในภาพมาเปรียบเทียบกัน

ในการแก้ correspondence problem นิยมกำหนดข้อมูลของภาพทางซ้าย และทำการค้นหาส่วนของภาพทางขวาที่ตรงกัน รูปที่ 3.4 เป็นตัวอย่างของการแก้ correspondence problem โดยใช้วิธี correlation-based methods บริเวณที่เป็นกรอบสี่เหลี่ยมเป็นส่วนของภาพที่ตรงกัน



รูปที่ 3.4 การแก้ correspondence problem โดยใช้ correlation-based methods

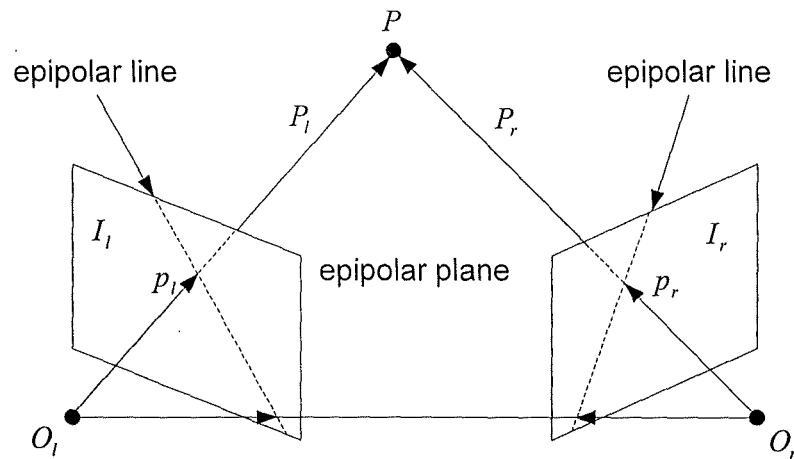
การแก้ correspondence problem มีความสำคัญต่อการหาค่าพิกัดของวัตถุเป็นอย่างมาก จากรูปที่ 3.5 ซึ่งแสดงระบบสเตอริโอที่ระนาบของภาพขนานกันเมื่อมองจากด้านบน, จุด P และ Q เป็นจุดที่ต้องการวัดพิกัด จุดที่ควรจะได้จากการแก้ correspondence problem คือจุด (p_l, p_r) และ (q_l, q_r) ตามลำดับ ซึ่งหากผิดพลาด ได้จุด (p_l, q_r) และ (q_l, p_r) เมื่อทำการคำนวณพิกัดจะได้จุด P' และ Q' ตามลำดับ ซึ่งทำให้ค่าพิกัดที่ได้ผิดพลาด ดังนั้นความถูกต้องของการวัดจึงขึ้นอยู่กับ การแก้ correspondence problem เป็นอย่างมาก



รูปที่ 3.5 ความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นกับการแก้ correspondence problem

Epipolar Geometry

ในการค้นหาส่วนของภาพทางขวาที่ตรงกับภาพทางซ้าย เพื่อแก้ correspondence problem นั้น กรณีที่ไม่ทราบทิศทางของการค้นหาอาจเริ่มค้นหาจากตำแหน่งซ้ายบนของรูปโดยค้นหาไปที่ละจุดจนกว่าจะครบทั้งรูป ซึ่งทำให้เสียเวลามาก แต่เนื่องจากมี Epipolar Geometry จึงช่วยให้การแก้ปัญหาง่ายขึ้น โดยทำให้การค้นหาอยู่ในแนวของเส้นตรงเส้นหนึ่ง ที่เรียกว่า epipolar line

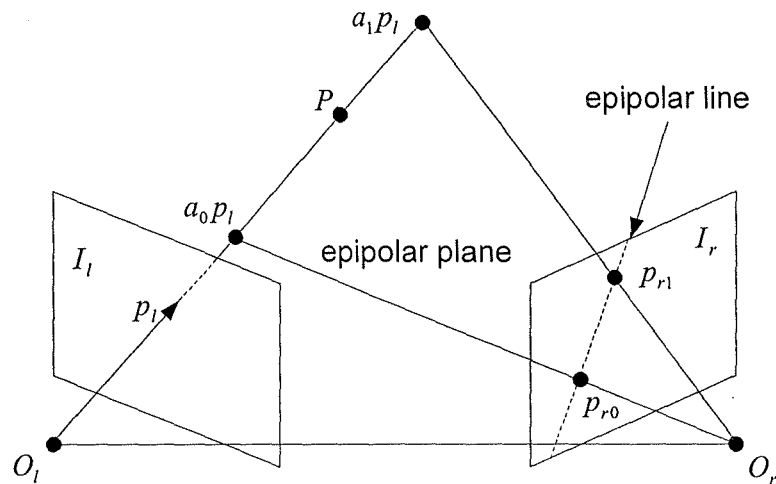


รูปที่ 3.6 ลักษณะของ Epipolar Geometry

พิจารณาระบบสเตอริโอแบบ 2 กล้องที่แนวการมองของกล้องทั้งสองตัวไม่ขนานกันดังรูปที่ 3.6 กำหนดให้ระนาบที่เกิดจากจุดศูนย์กลางของกล้องทั้งสองและจุดบนวัตถุเรียกว่า epipolar plane และตำแหน่งที่ epipolar plane ตัดกับระนาบภาพเกิดเป็นเส้นตรง มีชื่อว่า epipolar line

สมมติให้ จุด P คือจุดที่ต้องการหาพิกัด, เวกเตอร์ $P_l = [X_l, Y_l, Z_l]^T$ และ $P_r = [X_r, Y_r, Z_r]^T$ ซึ่งไปที่จุดเดียวกันคือจุด P เมื่อเทียบกับระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้ายและขวาตามลำดับ, $p_l = [x_l, y_l, z_l]^T$ และ $p_r = [x_r, y_r, z_r]^T$ เป็นเวกเตอร์ที่ชี้ไปยังจุดที่ได้จากการฉายจุด P บนระนาบภาพของกล้องซ้ายและขวาตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อกำหนดจุด p_l เพื่อเริ่มทำการค้นหาจุดที่ตรงกัน, จุด P สามารถอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ได้บนรังสีที่เกิดขึ้นจาก O_l ไปยัง p_l แต่เนื่องจากภาพของรังสีนี้ในระนาบภาพทางขวา ซึ่งก็คือ epipolar line จะผ่านจุด p_r เสมอ ดังนั้นถ้าสามารถสร้างเส้น epipolar line ในภาพทางขวาแล้วทำการค้นหาตามแนวเส้น จะพบจุดของภาพที่ตรงกันเสมอ หลักการนี้เรียกว่า epipolar constraint

ในรูปที่ 3.7 แสดงการสร้างเส้น epipolar line ในภาพของกล้องตัวขวา ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.7 การสร้างเส้น epipolar line ในภาพของกล้องตัวขวา

1. กำหนดจุดที่ต้องการค้นหาจากภาพในกล้องตัวซ้าย หรือจุด p_l ซึ่งจุดดังกล่าวจะอยู่ในระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ (pixel coordinate)
2. แปลงพิกัดดังกล่าวให้อยู่ในระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้าย โดยใช้สมการแปลงพิกัดในหัวข้อ 3.2 ขั้นตอนที่ 4, 3 และ 2 ตามลำดับ จะได้จุด p_l ที่อ้างอิงเทียบกับระบบพิกัดกล้องตัวซ้ายที่มีจุด O_l (จุดกึ่งกลางเลนส์) เป็นจุดกำเนิด
3. ทำการสร้างจุดในรังสีที่เกิดจากจุด O_l และ p_l โดยการคูณค่าคงที่ a_0 และ a_1 เข้ากับ p_l โดยค่า a_0 และ a_1 เป็นจำนวนจริงบวกใดๆ และ $a_0 < a_1$
4. แปลงจุด $a_0 p_l$ และ $a_1 p_l$ ให้อยู่ในระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวขวา ที่มีจุด O_r (จุดกึ่งกลางเลนส์) เป็นจุดกำเนิด โดยใช้สมการแปลงพิกัดระหว่างกล้องซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป จะได้จุด $b_0 p_{r0}$ และ $b_1 p_{r1}$

5. นำพิกัดจุดที่ได้จากข้อ 4 มาคำนวณหาตำแหน่งพิกัดที่ฉายลงบนระนาบภาพทางขวา คือจุด p_{r_0} และ p_{r_1} โดยการนำค่า z ของจุด $b_0 p_{r_0}$ และ $b_1 p_{r_1}$ มาหารด้วยระยะโฟกัส f ของกล้องตัวขวา เพื่อหาตำแหน่งที่ b_0 และ b_1 ตามลำดับ แล้วนำ b_0 และ b_1 ไปหารค่าพิกัดของจุด $b_0 p_{r_0}$ และ $b_1 p_{r_1}$ จะได้ตำแหน่งของจุด p_{r_0} และ p_{r_1}
6. แปลงจุด p_{r_0} และ p_{r_1} ให้อยู่ในระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ (pixel coordinate) โดยใช้สมการแปลงพิกัดในหัวข้อ 3.2 ขั้นตอนที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ
7. นำจุดในภาพทั้ง 2 จุดที่ได้จากข้อ 6 มาสร้างสมการเส้นตรง จะได้สมการของเส้น epipolar line ในภาพของกล้องตัวขวา

นอกจากนี้ยังสามารถใช้ขั้นตอนข้างต้น หาสมการเส้น epipolar line ในภาพทางซ้าย เมื่อกำหนดจุดในภาพทางขวามือ

สมการแปลงพิกัดระหว่างกล้อง

ระบบสเตอริโอที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยกล้อง 2 ตัว โดยที่กล้องแต่ละตัวมีระบบพิกัดกล้อง (Camera coordinate) เป็นของตัวเอง แต่ในการคำนวณพิกัดจะต้องมีระบบพิกัดที่ใช้อ้างอิงของทั้งระบบ ที่เรียกว่า ระบบพิกัดของสเตอริโอ (Stereo coordinate system) โดยทั่วไปจะใช้ระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้าย เพื่อใช้ในการอ้างอิงพิกัดที่วัดได้ ก่อนจะแปลงไปสู่ระบบพิกัดภายนอกต่อไป

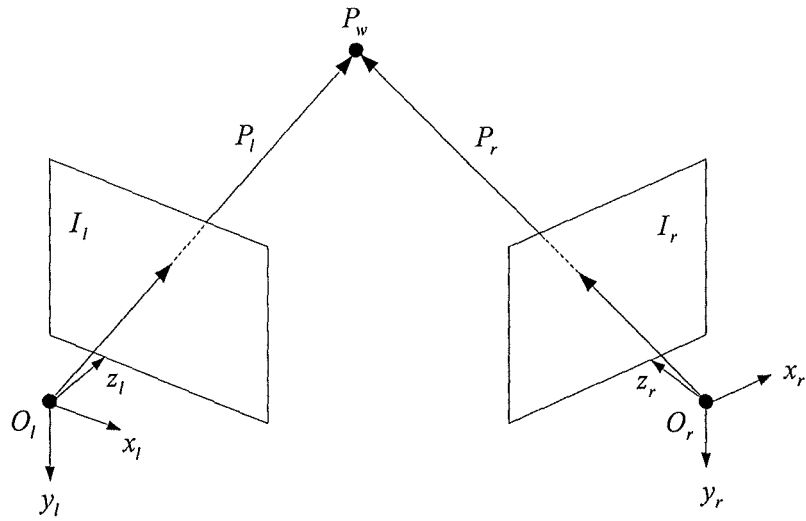
ในส่วนของการสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้ายและกล้องตัวขวาสามารถหาได้ โดยกำหนดให้ความสัมพันธ์ระหว่างกล้องซ้ายและขวาอยู่ในรูปของ Rigid body transformation ดังสมการ

$$P_l = R P_r + T \quad [3.14]$$

โดยเมตริกซ์ R และ T สามารถหาได้ดังต่อไปนี้ พิจารณารูปที่ 3.8 กำหนดให้จุด P_w เป็นจุดในระบบพิกัดโลก 3 มิติ จาก Rigid body transformation โดย P_r และ P_l เป็นเวกเตอร์ที่ชี้ไปที่จุด P_w เมื่อเทียบกับระบบพิกัดกล้องของกล้องขวาและซ้ายตามลำดับ จะได้

$$P_r = R_r P_w + T_r \quad [3.15]$$

และ
$$P_l = R_l P_w + T_l \quad [3.16]$$



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้ายและขวา

โดยที่ R_r , T_r และ R_l , T_l เป็นเมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงจุด P_w ไปยังจุด P_r และ P_l ตามลำดับ จากสมการ 3.15 และ 3.16 จะได้

$$\begin{aligned} P_l &= R_l P_w + T_l \\ &= R_l [R_r^{-1} (P_r - T_r)] + T_l \\ &= R_l R_r^{-1} P_r - R_l R_r^{-1} T_r + T_l \\ P_l &= (R_l R_r^{-1}) P_r + (T_l - R_l R_r^{-1} T_r) \end{aligned} \quad [3.17]$$

จากสมการ 3.17 เมื่อเทียบกับรูปแบบของสมการ 3.14 จะได้เมตริกซ์ R และ T ดังนี้

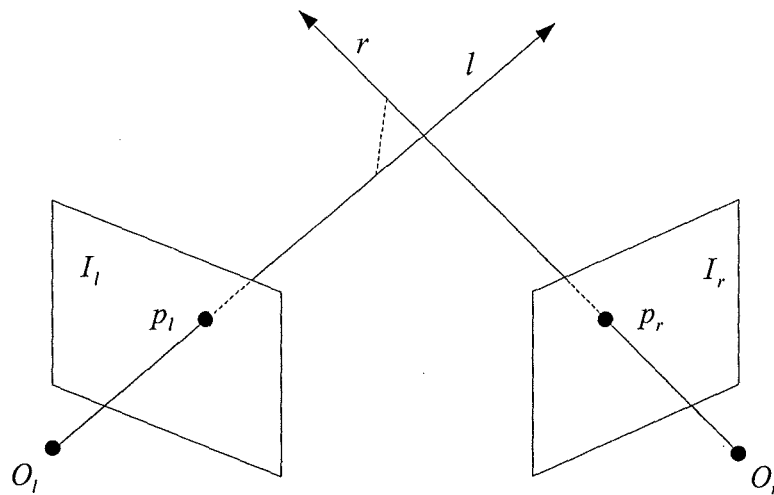
$$R = R_l R_r^{-1} = R_l R_r^T \quad [3.18]$$

$$T = T_l - R_l R_r^{-1} T_r = T_l - R T_r \quad [3.19]$$

ดังนั้นเราสามารถใส่สมการ 3.14 ในการแปลงพิกัดระหว่างกล้อง โดยที่เมตริกซ์ R และ T หาได้จากสมการ 3.18 และ 3.19 ส่วนเมตริกซ์ R_r , T_r , R_l และ T_l ได้มาจากการสอบเทียบกล้องตัวขวาและซ้ายกับชิ้นงานอ้างอิง ดังจะกล่าวถึงในบทที่ 5

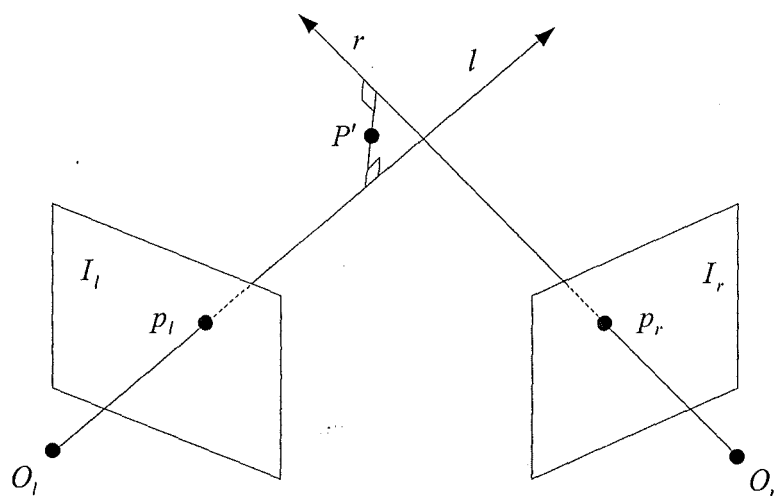
3.3.2 การหาค่าพิกัด 3 มิติ (3D Reconstruction)

เมื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างกล้องทั้งสองตัวแล้ว การหาค่าพิกัด 3 มิติ ทำได้โดยการนำคู่จุดของภาพที่ตรงกันมาสร้างรังสีจากจุดกึ่งกลางเลนส์ของกล้องแต่ละตัว ไปยังตำแหน่งของภาพ ซึ่งรังสีสองเส้นนี้จะตัดกันที่จุดๆหนึ่งใน 3 มิติ แต่ความเป็นจริงแล้ว เนื่องจากความผิดพลาดของการแก้ correspondence problem และความผิดพลาดของการหาค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองกล้อง ทำให้รังสีที่เกิดขึ้นไม่ตัดกันจริงดังแสดงในรูปที่ 3.9



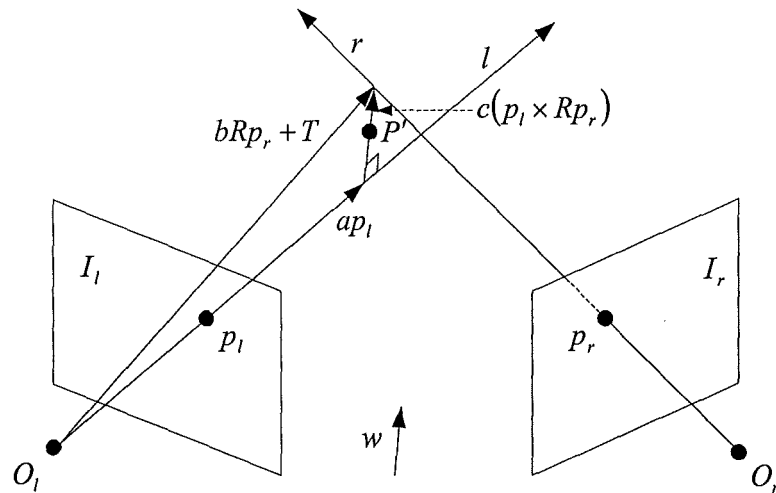
รูปที่ 3.9 รังสีจากจุดของภาพที่ตรงกันไม่ตัดกันใน 3 มิติ

ดังนั้นในทางปฏิบัติจะหาตำแหน่งพิกัดใน 3 มิติของจุดที่มีระยะห่างจากรังสีทั้งสองน้อยที่สุดแทน ซึ่งก็คือจุดกึ่งกลางของเวกเตอร์ที่มีความยาวน้อยที่สุดที่ตั้งฉากกับรังสีทั้งสอง หรือจุด P' ในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การหาค่าพิกัด 3 มิติจากจุดของภาพที่ตรงกันในทางปฏิบัติ

วิธีการหาค่าพิกัดมีดังต่อไปนี้ จากรูปที่ 3.11 กำหนดให้ p_l และ p_r เป็นจุดศูนย์กลางของภาพที่ตรงกันที่อยู่ในระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้ายและขวาตามลำดับ, ap_l โดย $a \in R$ เป็นรังสี l ที่ผ่านจุด O_l ($a=0$) และ p_l ($a=1$) และให้ $T + bRp_r$ โดย $b \in R$ เป็นรังสี r ที่ผ่านจุด O_r ($b=0$) และ p_r ($b=1$) อยู่ในระบบพิกัดกล้องของกล้องตัวซ้าย, กำหนดให้ $w = p_l \times Rp_r$ เป็นเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับทั้งรังสี l และ r ส่วน c เป็นความยาวของเวกเตอร์ w ที่สั้นที่สุดโดย $c \in R$



รูปที่ 3.11 เวกเตอร์ที่ใช้ในการสร้างสมการหาค่าพิกัด

พิจารณาเวกเตอร์ในรูปที่ 3.11 จะได้สมการ

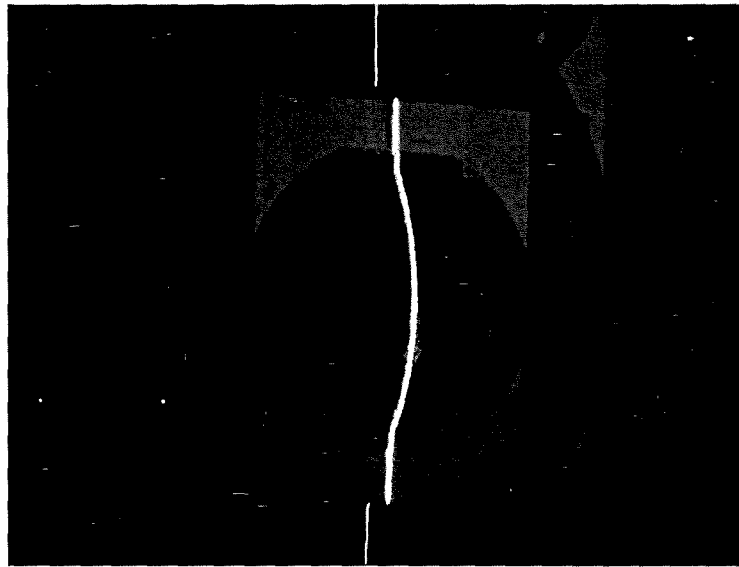
$$\begin{aligned} ap_1 + c(p_1 \times Rp_r) &= bRp_r + T \\ ap_1 - bRp_r + c(p_1 \times Rp_r) &= T \end{aligned} \quad [3.20]$$

แก้สมการที่ 3.20 เพื่อหาค่า a, b และ c แล้วนำมาหาค่าพิกัดของจุด P' จากสมการ

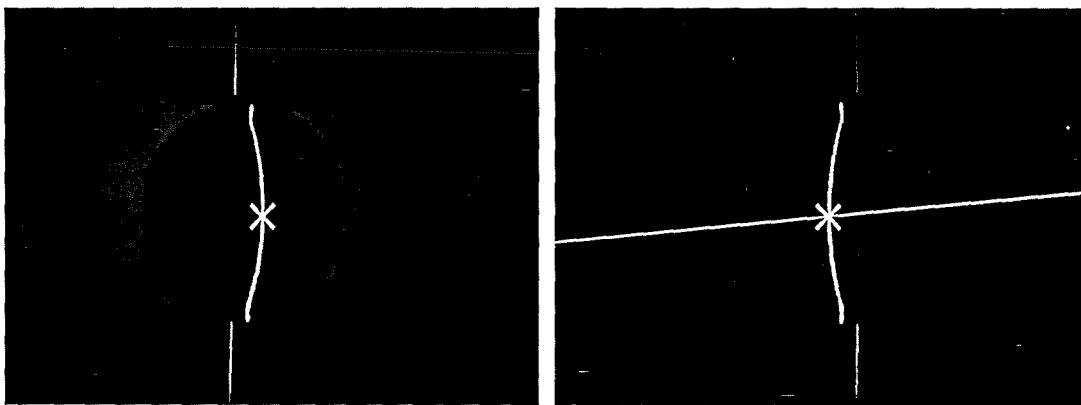
$$P' = ap_1 + \frac{c}{2}(p_1 \times Rp_r) \quad [3.21]$$

3.4 เทคนิคการใช้แถบแสงเลเซอร์ในระบบสเตอริโอ

การใช้แถบแสงเลเซอร์ในระบบสเตอริโอ เป็นการฉายแสงเลเซอร์แบบเส้น (line laser) ลงบนพื้นผิววัตถุ ภาพที่ถ่ายจากกล้อง CCD จะเห็นแนวของเลเซอร์เป็นเส้นโค้งตามลักษณะพื้นผิวของวัตถุ ดังรูปที่ 3.12 เทคนิคนี้ช่วยให้การแก้ correspondence problem ง่ายขึ้น เนื่องจากสามารถใช้ตำแหน่งของแสงเลเซอร์ซึ่งมีความสว่างกว่าส่วนอื่นของภาพ ในการค้นหาจุดของภาพที่ตรงกัน โดยไม่ต้องคำนวณค่าสหสัมพันธ์ของค่าความเข้มของภาพ เหมือนกับวิธี correlation-based methods เมื่อทำการสร้าง epipolar line จะสามารถหาจุดของภาพที่ตรงกัน โดยการหาจุดตัดระหว่าง epipolar line กับเส้นเลเซอร์บนพื้นผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.13 เป็นการช่วยลดปัญหาการจับคู่ผิด และลดความซับซ้อนในการคำนวณพิกัดไปได้มาก



รูปที่ 3.12 แนวของเส้นเลเซอร์บนวัตถุเมื่อถ่ายจากกล้อง CCD



รูปที่ 3.13 จุดของภาพที่ตรงกัน ในภาพซ้ายและขวาที่ได้จากจุดตัด
ของเส้นเลเซอร์และ epipolar line

ในการถ่ายภาพแสงเลเซอร์ จะเห็นเส้นเลเซอร์มีความหนามากกว่า 1 pixel เนื่องจากการกระจายออกของแสงเลเซอร์ตามระยะทาง และข้อจำกัดทางกายภาพของ CCD elements จึงต้องทำการหาจุดกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์ ซึ่งความกว้างของเลเซอร์จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุ และคุณสมบัติการสะท้อนแสงของพื้นผิว

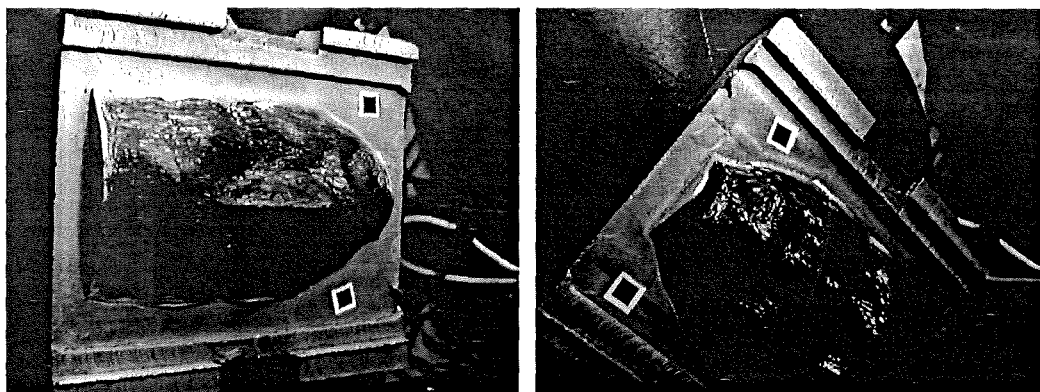
จากการทดลองพบว่าความกว้างของเลเซอร์เมื่อถ่ายภาพจากกล้อง CCD จะอยู่ในช่วง 2-10 pixels โดยในกรณีที่ความกว้างของเส้นเลเซอร์เป็นเลขคู่ตำแหน่งกึ่งกลางของเลเซอร์จะใช้ค่าเป็นทศนิยม เพื่อให้ได้ subpixel accuracy เช่น ในกรณีที่ภาพของเส้นเลเซอร์มีความกว้าง 4 pixels ตำแหน่งกึ่งกลางจะอยู่ที่ pixel ที่ 2.5

3.5 เทคนิคการทำจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน

ในการวัดชิ้นงานที่มีความซับซ้อน เช่น พื้นผิวมีลักษณะเป็นหลุม ร่อง หรือมีความชันสูง เครื่องวัดพิกัดอาจมองเห็นเส้นเลเซอร์จากกล้องเพียงตัวเดียว ในกรณีนี้ไม่สามารถใช้การคำนวณพิกัดแบบสเตอริโอได้ เนื่องจากวิธีการนี้จะต้องนำตำแหน่งของภาพในกล้องซ้ายและขวามาคำนวณทั้งสองจุด หากต้องการคำนวณพิกัดในตำแหน่งดังกล่าวอาจใช้วิธีการของกล้องตัวเดียว แต่ความถูกต้องและความน่าเชื่อถือในการวัดก็อาจลดลงเนื่องจากการใช้ข้อมูลจากกล้องเพียงตัวเดียวในการคำนวณพิกัด ซึ่งอาจมีความผิดพลาดได้

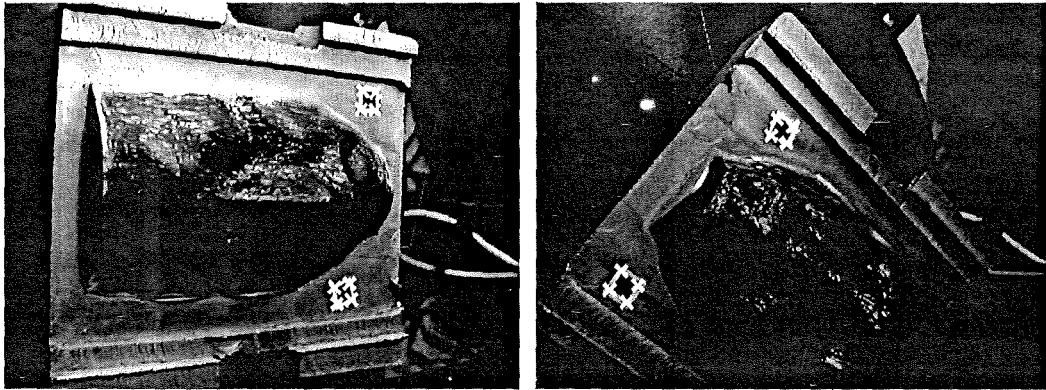
ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้เทคนิคการทำจุดอ้างอิงบนชิ้นงานเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยจุดอ้างอิงที่ใช้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสสีดำขนาด 10×10 มิลลิเมตรบนพื้นสีขาว ขั้นตอนของเทคนิคนี้มีดังต่อไปนี้

1. นำจุดอ้างอิงมาแปะบนพื้นผิวชิ้นงาน
2. ถ่ายภาพจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน ดังแสดงในรูปที่ 3.14
3. ทำการวัดชิ้นงานตามปกติ
4. เมื่อเสร็จสิ้นการวัด หากได้พิกัดไม่ครบถ้วน ให้เปลี่ยนลักษณะการวางชิ้นงานใหม่ โดยจัดชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่กล้องมองเห็นพื้นผิวในส่วนที่ถูกบดบังในการวัดครั้งก่อน
5. ทำการวัดใหม่ โดยทำตามขั้นตอนที่ 2 - 4 จนกว่าจะได้พิกัดในตำแหน่งต่างๆของชิ้นงานครบถ้วน



รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายของจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน

เนื่องจากต้องใช้ตำแหน่งมุมของจุดอ้างอิงในการเชื่อมโยงพิกัดที่วัดได้ในแต่ละครั้ง จึงต้องมีการค้นหามุมในแต่ละภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการค้นหามุมในภาพของ Eduard Sojka [2] ซึ่งจะได้ตำแหน่งมุมของแต่ละภาพดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การค้นหามุมของจุดอ้างอิงในการวัดแต่ละครั้ง

จากการที่ตำแหน่งของจุดอ้างอิงเทียบกับชิ้นงาน ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อทำการเชื่อมโยงตำแหน่งของจุดอ้างอิงในการวัดแต่ละครั้งเข้าด้วยกัน ก็จะสามารถรวมผลจากการวัดหลายๆครั้งได้ แม้ว่า การวัดในแต่ละครั้งจะมีลักษณะการวางชิ้นงานที่แตกต่างกัน

หลังจากที่ได้ตำแหน่งมุมของจุดอ้างอิงในแต่ละภาพแล้ว ตำแหน่งดังกล่าวจะอยู่ในระบบพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์ (pixel coordinate) ให้ทำการแปลงจุดไปยังระบบพิกัดโลก 3 มิติ และใช้คำสั่งในโปรแกรม CATIA เพื่อนำจุดอ้างอิงที่เป็นจุดเดียวกันเข้าหากัน จะทำให้ผลการวัดในแต่ละครั้งวางตัวในแนวเดียวกัน จึงสามารถรวมกันเป็นข้อมูลชุดเดียวได้ ในส่วนของผลการทดลองแสดงไว้ในบทที่ 6

บทที่ 4

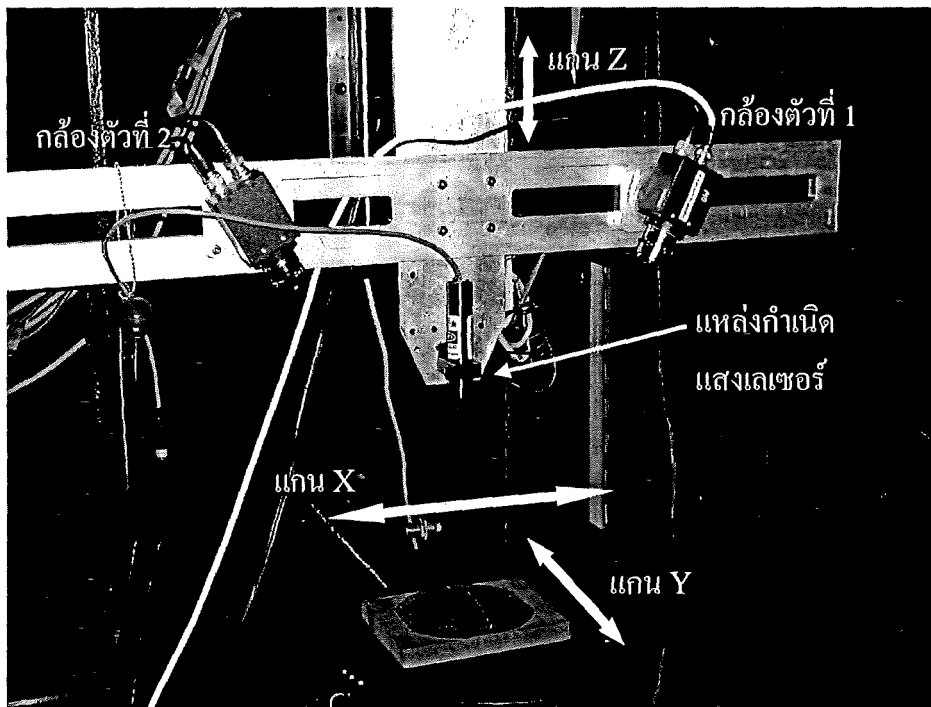
วิธีการและโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องวัดพิกัด

4.1 คำนำ

ในบทนี้กล่าวถึงโครงสร้างของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติในงานวิจัย และโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด รวมถึงลำดับขั้นตอนการทำงานของเครื่อง โครงสร้างของเครื่องทำหน้าที่พาชุดกล้องเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่จะทำการวัด ในขณะที่โปรแกรมมีหน้าที่ส่งคำสั่งและตรวจสอบการทำงานของแกนเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกน ควบคุมการทำงานของการ์ดประมวลผลภาพ และควบคุมลำดับขั้นตอนการวัดให้เป็นไปอย่างถูกต้อง ในตอนท้ายของบทได้อธิบายถึงขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม ซึ่งผู้ใช้จะต้องใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนจะทำการวัดชิ้นงาน เพื่อให้ได้ผลการวัดตามที่ต้องการ

4.2 โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดและการควบคุมการเคลื่อนที่

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติในงานวิจัยนี้มีลักษณะดังรูปที่ 4.1

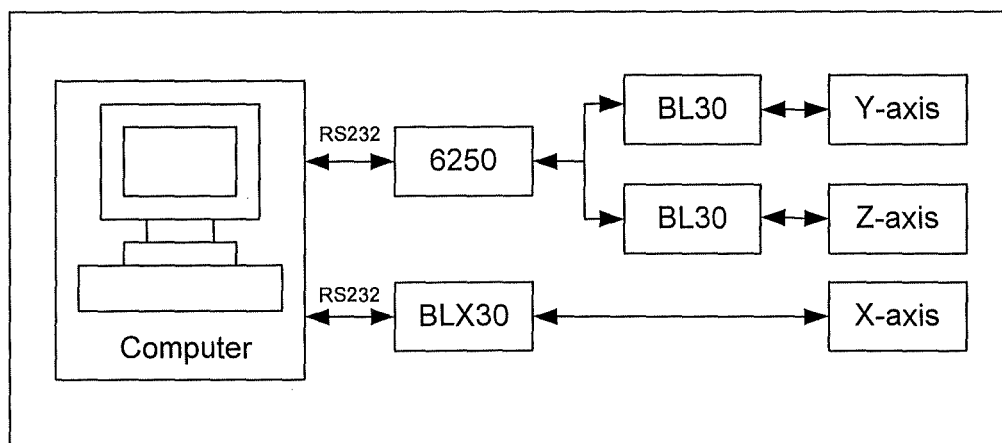


รูปที่ 4.1 โครงสร้างของเครื่องวัดพิกัด

ในรูปที่ 4.1 โครงสร้างของเครื่องมีลักษณะเป็นแกนเคลื่อนที่ 3 แกนคือ แกน X, แกน Y และแกน Z ที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบ Brushless DC Servomotor ผ่านชุดบอลสกรู บนแกน Z จะมีโครงสร้างสำหรับติดตั้งกล้อง CCD 2 ตัว มีลักษณะเป็นรางสำหรับเลื่อนปรับระยะความห่างของกล้อง รวมทั้งสามารถปรับมุมกล้องได้ และใช้ติดตั้งแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิดเส้น (line laser) โดยโครงสร้างนี้เป็น โครงสร้างที่ปรับปรุงเพิ่มเติมจากโครงสร้างเดิมที่มีอยู่ก่อน ซึ่งเป็นแบบใช้กล้องตัวเดียว [7]

แกนเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกนของเครื่องจะถูกควบคุมโดยตัวควบคุม 2 ตัวคือ ตัวควบคุม 6250 ของบริษัท Parker Compumotor ซึ่งจะส่งคำสั่งไปที่อุปกรณ์ขับเคลื่อน BL30 อีกที เพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของแกน Y และแกน Z ส่วนตัวควบคุม BLX30 ของบริษัท Parker Digiplan ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของแกน X โดยมีตัวขับเคลื่อนอยู่ในตัวแล้ว

การควบคุมแกนเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกนนั้น จะใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมผ่านทางพอร์ตอนุกรม (RS232) 2 พอร์ต เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ 2 ตัวคือ อุปกรณ์ควบคุม 6250 และ อุปกรณ์ควบคุม BLX30 รูปที่ 4.2 แสดงระบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์กับคอมพิวเตอร์ สำหรับรายละเอียดของอุปกรณ์ควบคุมและการควบคุมจะแสดงในภาคผนวก ก



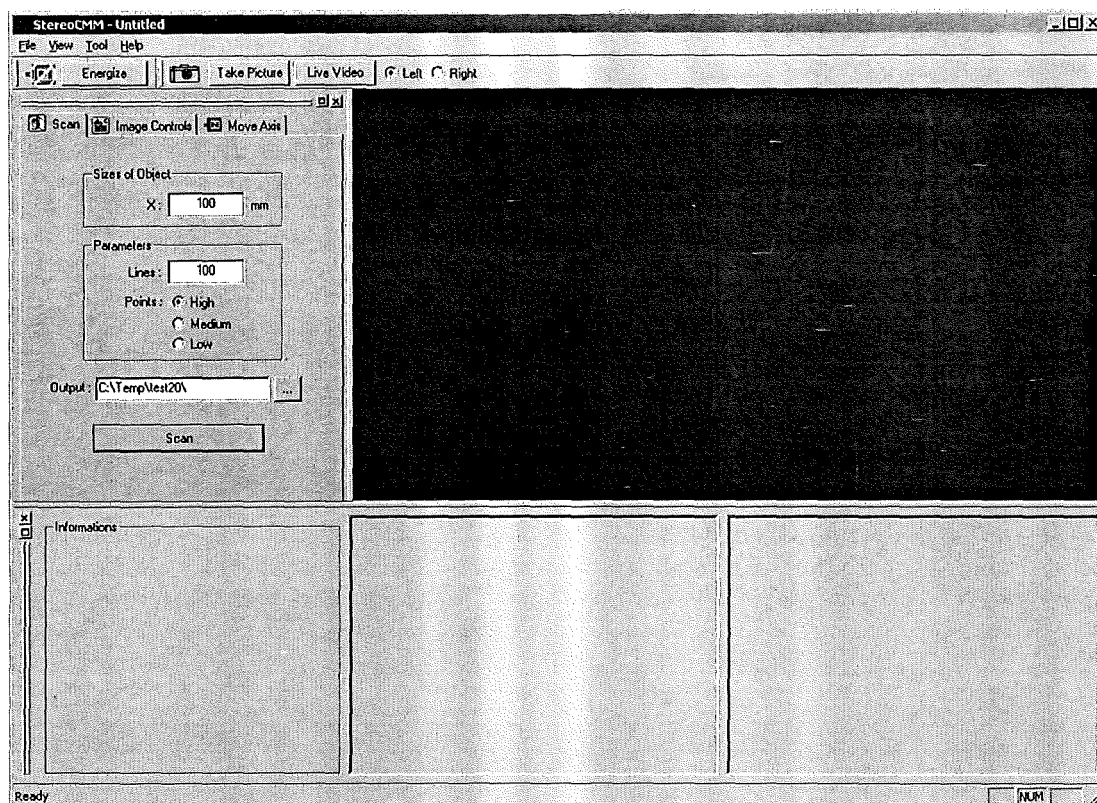
รูปที่ 4.2 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์กับคอมพิวเตอร์

กล้องที่ใช้ในการถ่ายภาพทั้งสองตัวเป็นกล้อง CCD แบบขาวดำยี่ห้อ PULNIX รุ่น TM300 การรับภาพที่ถ่ายจากกล้องใช้การ์ดรับข้อมูลภาพ (image frame grabber) รุ่น DT3155 ของบริษัท Data Translation โดยเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต PCI รายละเอียดของกล้อง CCD และการรับข้อมูลภาพแสดงไว้ในภาคผนวก ข

แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ เป็นเลเซอร์แบบเส้น (line laser) รุ่น LAS 200-635-5 ของบริษัท LaserMax มีความยาวคลื่น 635 nm, Power output 4.25 mW, ความกว้างของเลเซอร์ 0.8 มิลลิเมตร อัตราการกระจายออก (divergence) 0.6 mrad half angle โดยแสงเลเซอร์จะอยู่ห่างจากชิ้นงานที่ทำการวัดในระยะ 120 – 250 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแกน Z และความสูงของชิ้นงาน

4.3 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องวัดพิกัด

ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ นั้น จำเป็นจะต้องพัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ให้สอดคล้องกัน อุปกรณ์ดังกล่าวได้แก่ ตัวควบคุมมอเตอร์ 6250 ตัวควบคุมมอเตอร์ BLX30 และการ์ดรับข้อมูลภาพ DT3155 นอกจากนี้จะใช้ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์แล้ว โปรแกรมควบคุมการทำงานยังมีหน้าที่ควบคุมขั้นตอนการเก็บรวบรวมและบันทึกข้อมูล การคำนวณพิกัด และการแสดงผลการวัดอีกด้วย โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมีชื่อว่า StereoCMM โดยใช้ภาษา C++ ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 2000 โดยใช้ Microsoft Visual C++ 6.0 เป็นคอมไพเลอร์ โปรแกรมมีลักษณะดังรูปที่ 4.3

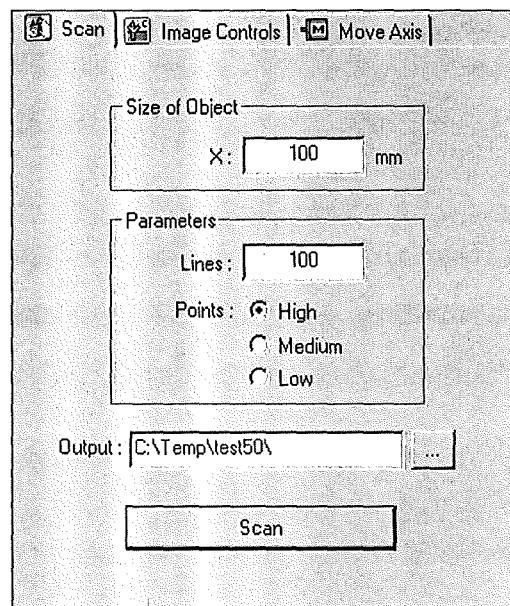


รูปที่ 4.3 โปรแกรม StereoCMM ที่ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

โปรแกรม StereoCMM สามารถเลือกหมวดการทำงานได้จากหน้าต่างทางด้านซ้ายมือ ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มคำสั่งในการทำงาน 3 กลุ่ม คือ Scan, Image Controls และ Move Axis โดยแต่ละกลุ่มจะมีหน้าที่แตกต่างกัน รายละเอียดมีดังนี้

4.3.1 Scan

เป็นหมวดการทำงานที่ใช้ในการวัดพิกัด แสดงในรูปที่ 4.4 โดยต้องกำหนดค่าต่างๆที่จำเป็นต่อการวัดดังนี้



รูปที่ 4.4 หน้าจอของคำสั่งในกลุ่ม Scan

- ขนาดของวัตถุในแนวแกน X (Size of Object)


ใช้กำหนดขนาดโดยประมาณของวัตถุที่ต้องการวัดในแนวแกน X เพื่อให้โปรแกรมรู้ระยะทางทั้งหมดที่ต้องเคลื่อนที่ในการวัด หน่วยที่ใช้เป็นมิลลิเมตร

- ปริมาณจุดและเส้นที่ต้องการวัด (Parameters)

ในช่อง Lines เป็นการเลือกจำนวนเส้น หรือจำนวน section ที่ต้องการวัด ซึ่งจะเป็นจำนวนจุดในแนวแกน X ส่วนในช่อง Points เป็นการเลือกปริมาณของจุดที่ต้องการในแนวแกน Y สามารถเลือกเป็น High, Medium หรือ Low เพื่อให้ได้ปริมาณจุดมาก, ปานกลาง หรือน้อยตามลำดับ โดยเมื่อเลือก High จะได้จำนวนจุด 576 จุด เมื่อเลือก Medium จะได้จำนวนจุด 238 จุด ส่วน Low ได้จำนวนจุด 60 จุด

เหตุผลที่ไม่ให้ผู้ใช้กำหนดเป็นตัวเลขได้อย่างอิสระเนื่องจากจะมีปัญหากรณีที่หารไม่ลงตัวเกิดเป็นเลขทศนิยม ซึ่งไม่สามารถทำได้เนื่องจากตำแหน่งของ pixel เป็นตัวเลขจำนวนเต็มเท่านั้น

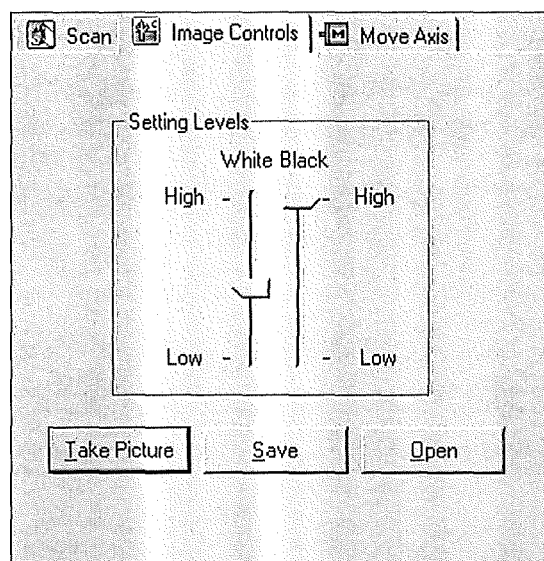
- ชื่อ ไคเร็กทอรีที่จะเก็บบันทึก ไฟล์ข้อมูล

ใช้ในการพิมพ์ชื่อไคเร็กทอรีที่ใช้ในการเก็บไฟล์พิกัดจุด หรืออาจคลิกเลือกได้จากปุ่ม 

เมื่อผู้ใช้ใส่ข้อมูลที่จำเป็นต่อการวัดเรียบร้อยแล้ว สามารถคลิกที่ปุ่ม Scan เพื่อเริ่มต้นทำการวัดได้ทันที

4.3.2 Image Controls

เป็นกลุ่มคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของการ์ดรับข้อมูลภาพ ซึ่งเป็นการควบคุมการถ่ายภาพ บันทึกภาพ เปิดรูปภาพ และปรับค่าความเข้มของภาพ รูปที่ 4.5 แสดงหน้าจอของคำสั่ง Image Controls ซึ่งมีการใช้งานดังนี้



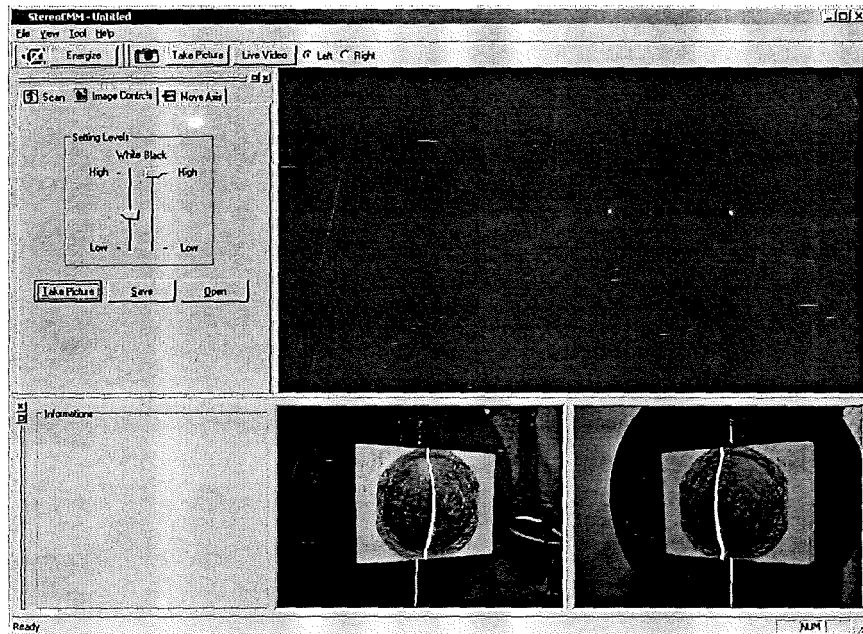
รูปที่ 4.5 หน้าจอของคำสั่งในกลุ่ม Image Controls

- Setting Levels

ใช้ในการกำหนดระดับความเข้มของสีขาวและสีดำในภาพ เพื่อเป็นการตัดค่าของสีขาวและดำ ทำให้การวัดมีผลดีขึ้น สามารถปรับได้โดยใช้ตัวเลื่อน ซึ่งถ้าต้องการปรับค่าความเข้มของสีขาว ให้ปรับตัวเลื่อนในด้าน White แต่ถ้าต้องการปรับความเข้มของสีดำ ให้ปรับตัวเลื่อนในด้าน Black

- Take Picture

เป็นปุ่มที่ใช้ในการถ่ายภาพ ซึ่งภาพที่ถ่ายได้จะแสดงในช่องรูปภาพทางด้านล่างของโปรแกรม ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การแสดงภาพที่ถ่ายจากกล้องในช่องแสดงรูปภาพ

- Save

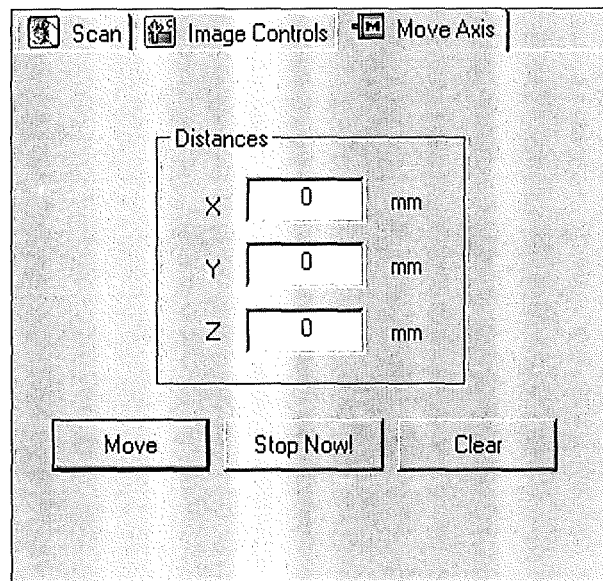
ใช้ในการบันทึกรูปภาพลงบนไฟล์

- Open

ใช้ในการเปิดรูปภาพจากไฟล์ที่มีอยู่

4.3.3 Move Axis

แสดงในรูปที่ 4.7 เป็นกลุ่มคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกน มีรายละเอียดการใช้งานดังนี้



รูปที่ 4.7 หน้าจอของคำสั่งในกลุ่ม Move Axis

- Distances

เป็นช่องสำหรับใส่ระยะทางที่ต้องการให้แต่ละแกนเคลื่อนที่ไป โดยแต่ละแกนจะมีช่องสำหรับใส่ค่าแยกกัน หน่วยที่ใช้เป็นมิลลิเมตร

- Move

เป็นปุ่มที่ใช้กดเมื่อต้องการให้เครื่องวัดเคลื่อนที่ตามค่าที่ใส่ในช่อง Distances โดยก่อนการเคลื่อนที่ จะต้องตรวจสอบสถานะของปุ่ม Energize ที่อยู่ทางด้านบนของโปรแกรมว่าเปิดหรือปิดอยู่ ดังรูปที่ 4.8 หากปิดอยู่ ให้คลิกที่ปุ่ม Energize เพื่อเปิดการทำงานมอเตอร์



รูปที่ 4.8 ปุ่ม Energize ในสถานะปิดและเปิดตามลำดับ

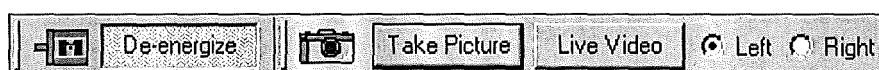
- Stop Now!

สำหรับหยุดการทำงานของแกนเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกนทันที ใช้ในกรณีฉุกเฉินที่เครื่องไม่สามารถควบคุมได้

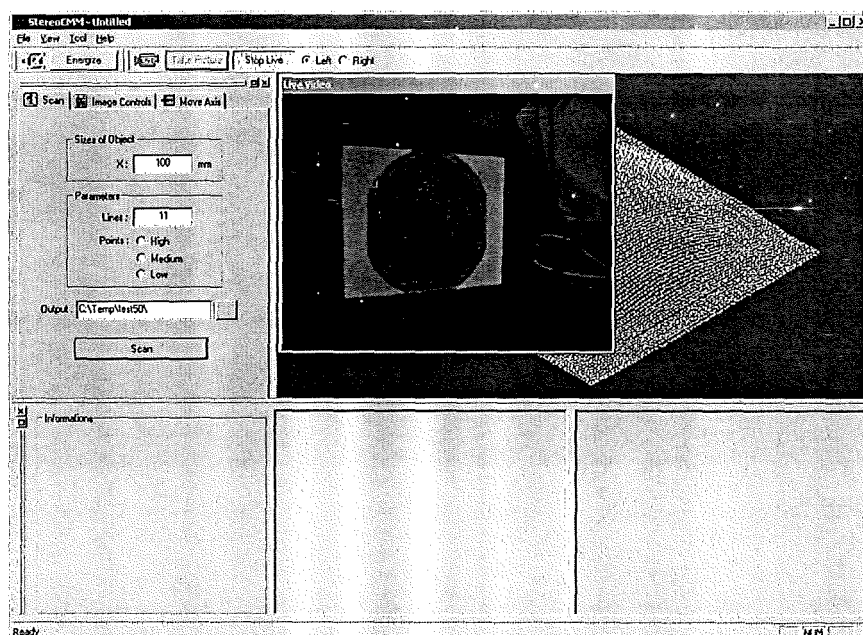
- Clear

ใช้ลบค่าระยะทางในช่อง Distances ทั้งหมด

ทางด้านบนของโปรแกรม มีแถบคำสั่งสำหรับเปิดปิดการทำงานของมอเตอร์ และแถบคำสั่งสำหรับทำงานกับรูปภาพเพิ่มเติมคือ ปุ่ม Take Picture และปุ่ม Live ดังรูปที่ 4.9 ปุ่ม Take Picture มีหน้าที่เหมือนกับปุ่ม Take Picture ที่อยู่ในแท็บ Image Controls ดังที่กล่าวมาแล้ว เพียงแต่การใช้งานจะสะดวกกว่า เนื่องจากผู้ใช้สามารถคลิกเพื่อถ่ายภาพได้โดยไม่ต้องเข้าสู่แท็บ Image Controls สำหรับปุ่ม Live ใช้ในการแสดงภาพต่อเนื่องแบบวิดีโอ เพื่อใช้ดูการเคลื่อนที่ของแกนเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกน และสามารถเลือกได้ว่าต้องการภาพจากกล้องตัวซ้ายหรือกล้องตัวขวา ดังรูปที่ 4.10 โดยเลือกจากปุ่ม Left และปุ่ม Right

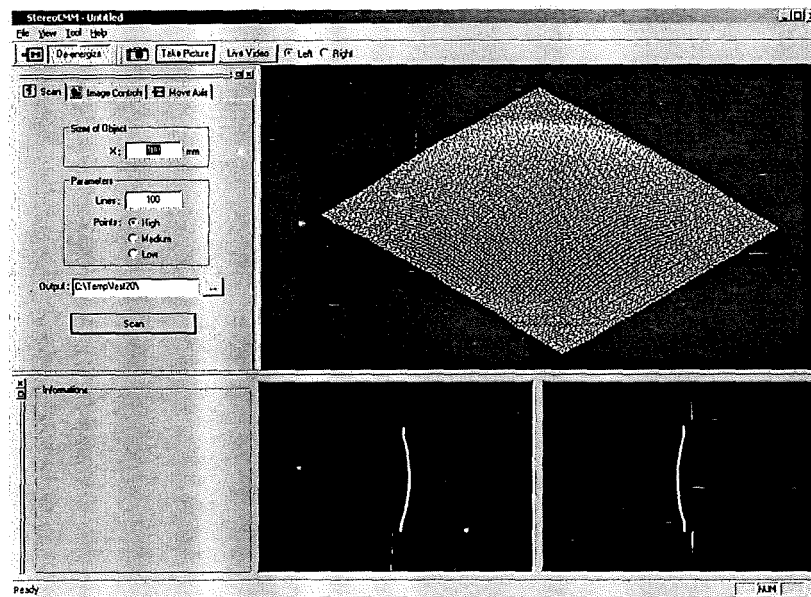


รูปที่ 4.9 แถบคำสั่งทางด้านบนของโปรแกรม

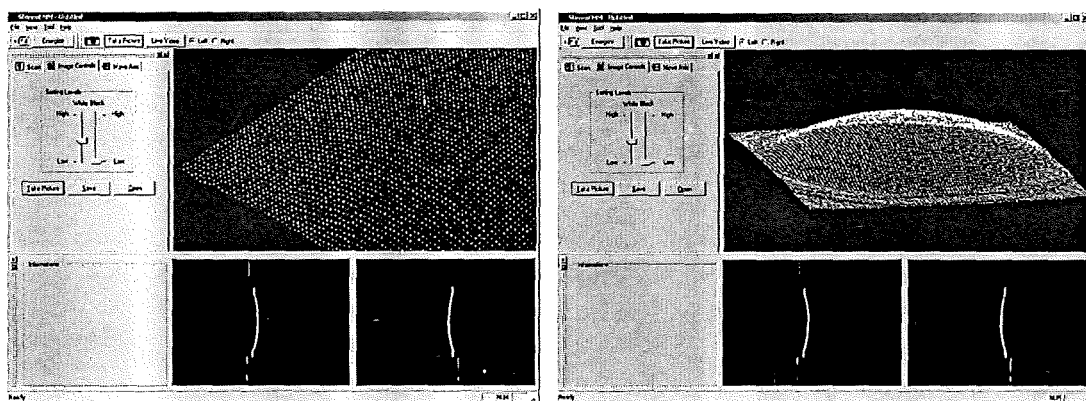


รูปที่ 4.10 การแสดงภาพแบบต่อเนื่องจากการใช้คำสั่ง Live

นอกจากนี้โปรแกรม StereoCMM ยังสามารถแสดงผลการวัดพิกัดในลักษณะ 3 มิติ เพื่อให้การตรวจสอบผลการวัดทำได้สะดวกมากขึ้น โดยผู้ใช้สามารถหมุนภาพ เลื่อนภาพ รวมถึงขยายมุมมองของกลุ่มข้อมูลจุดได้โดยการใช้เมาส์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12



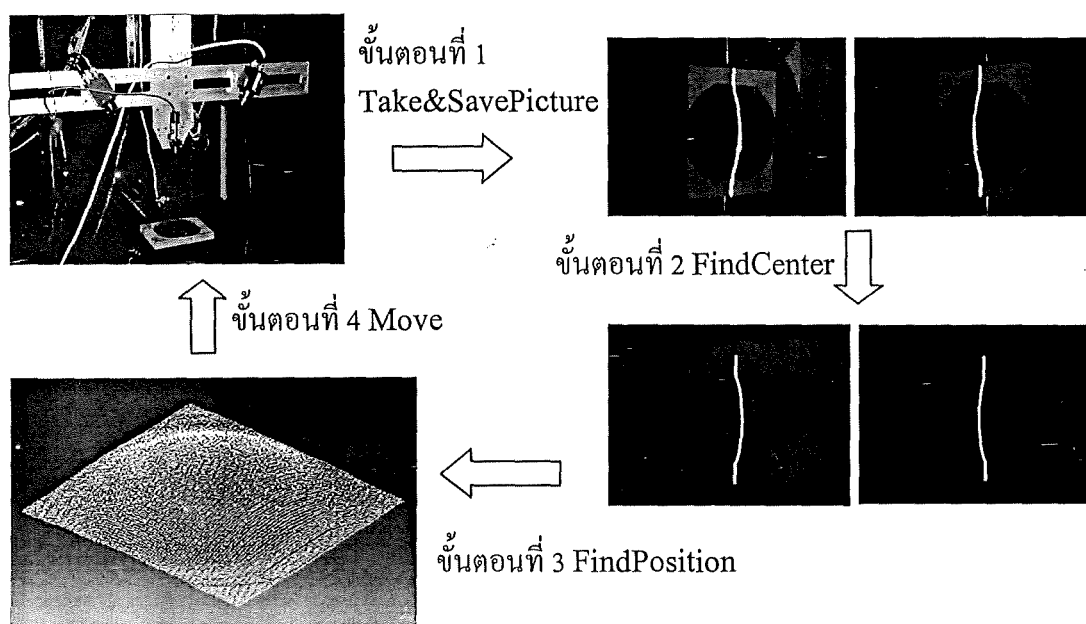
รูปที่ 4.11 การแสดงผลการวัดในรูปแบบ 3 มิติ



รูปที่ 4.12 กลุ่มข้อมูลจุดที่ถูกขยายและหมุนมุมมองโดยใช้เมาส์

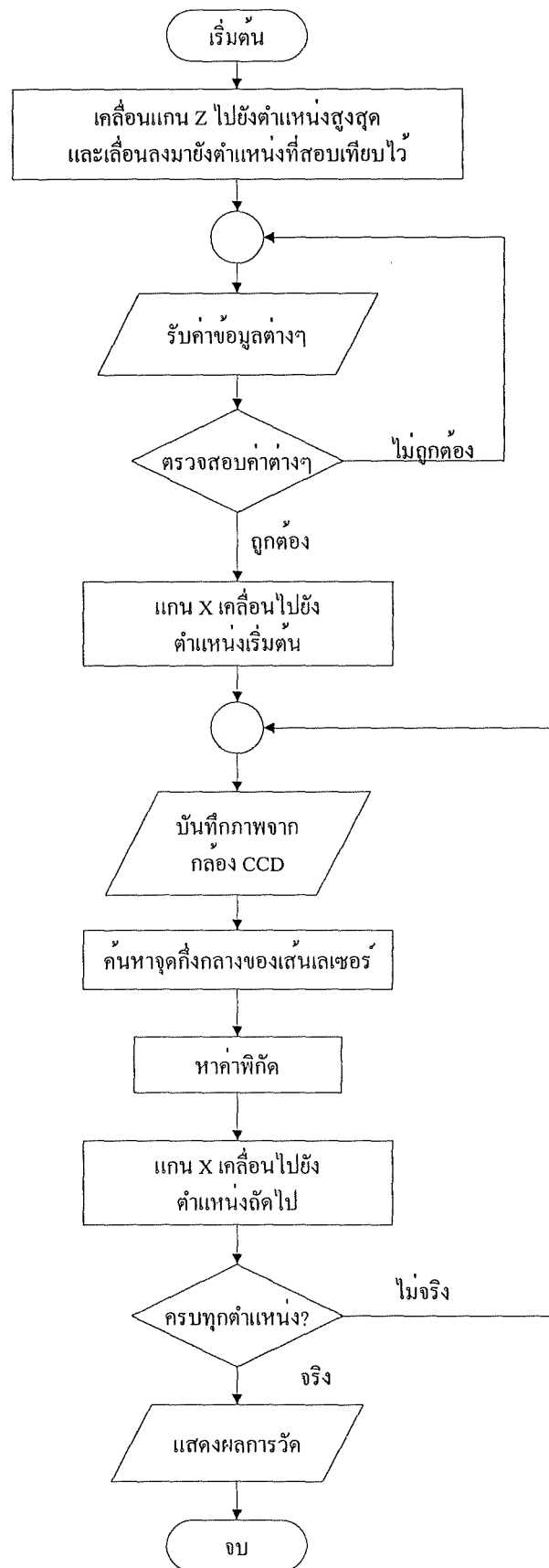
4.4 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

ในการวัดชิ้นงาน ตอนเริ่มการทำงานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ จะต้องทำการเคลื่อนแกน Z ขึ้นไปจนถึงตำแหน่งสูงสุด แล้วเลื่อนลงมาจนถึงตำแหน่งที่ได้ทำการสอบเทียบกล้องไว้ จากนั้นจึงใช้แกนเคลื่อนที่แกน X และ Y เพื่อจัดชิ้นงานให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมกับการมองเห็นของกล้อง CCD เมื่อได้ตำแหน่งชิ้นงานที่เหมาะสมแล้ว จะเริ่มทำการวัดโดยใช้แกนเคลื่อนที่แกน X เพียงแกนเดียว ในการเลื่อนระนาบแสงเลเซอร์ไปยังตำแหน่งต่างๆที่ต้องการวัด ทำการเก็บบันทึกภาพ แล้วนำภาพเหล่านั้นมาประมวลผลเพื่อหาพิกัดตามหลักการของระบบสเตอริโอต่อไป แผนผังการทำงานของเครื่องแสดงไว้ในรูปที่ 4.13

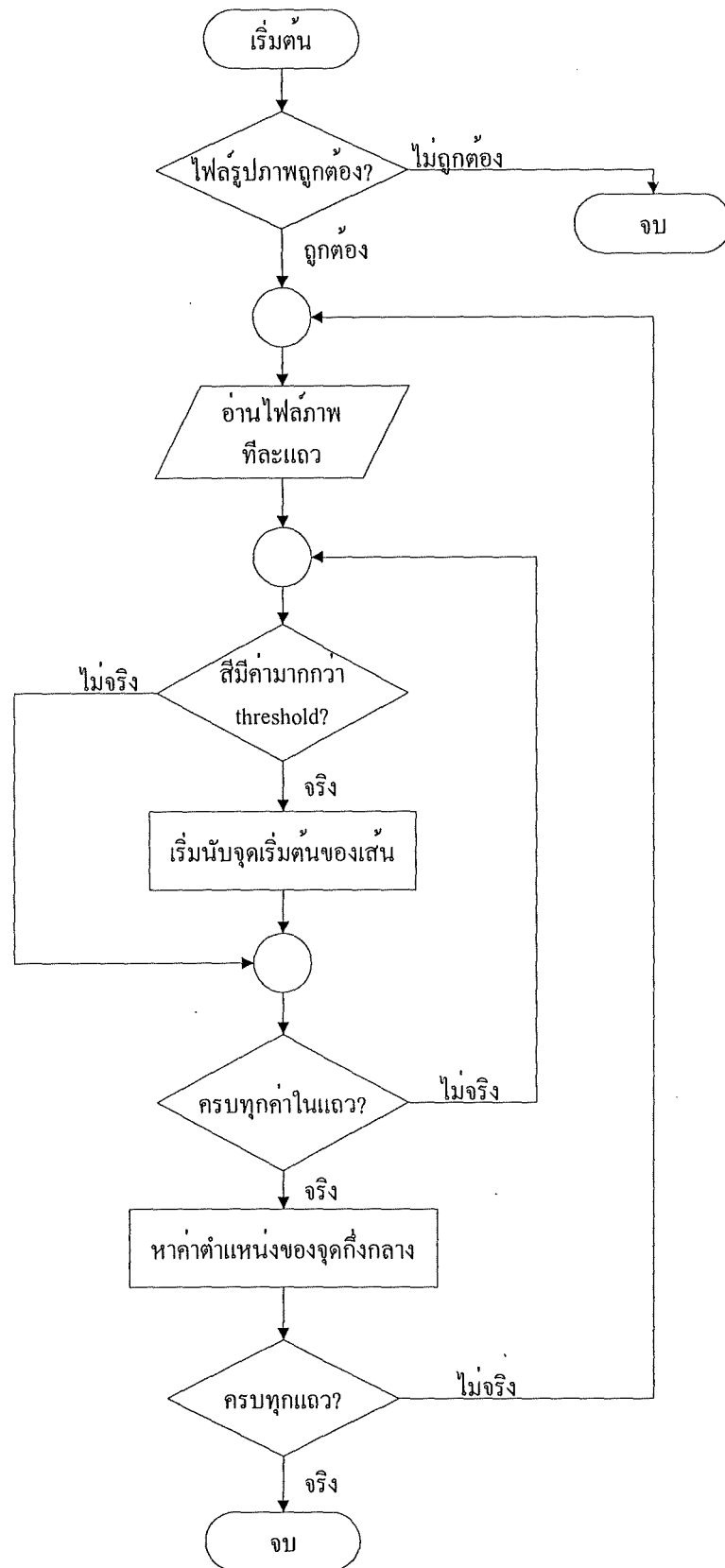


รูปที่ 4.13 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดพิกัด

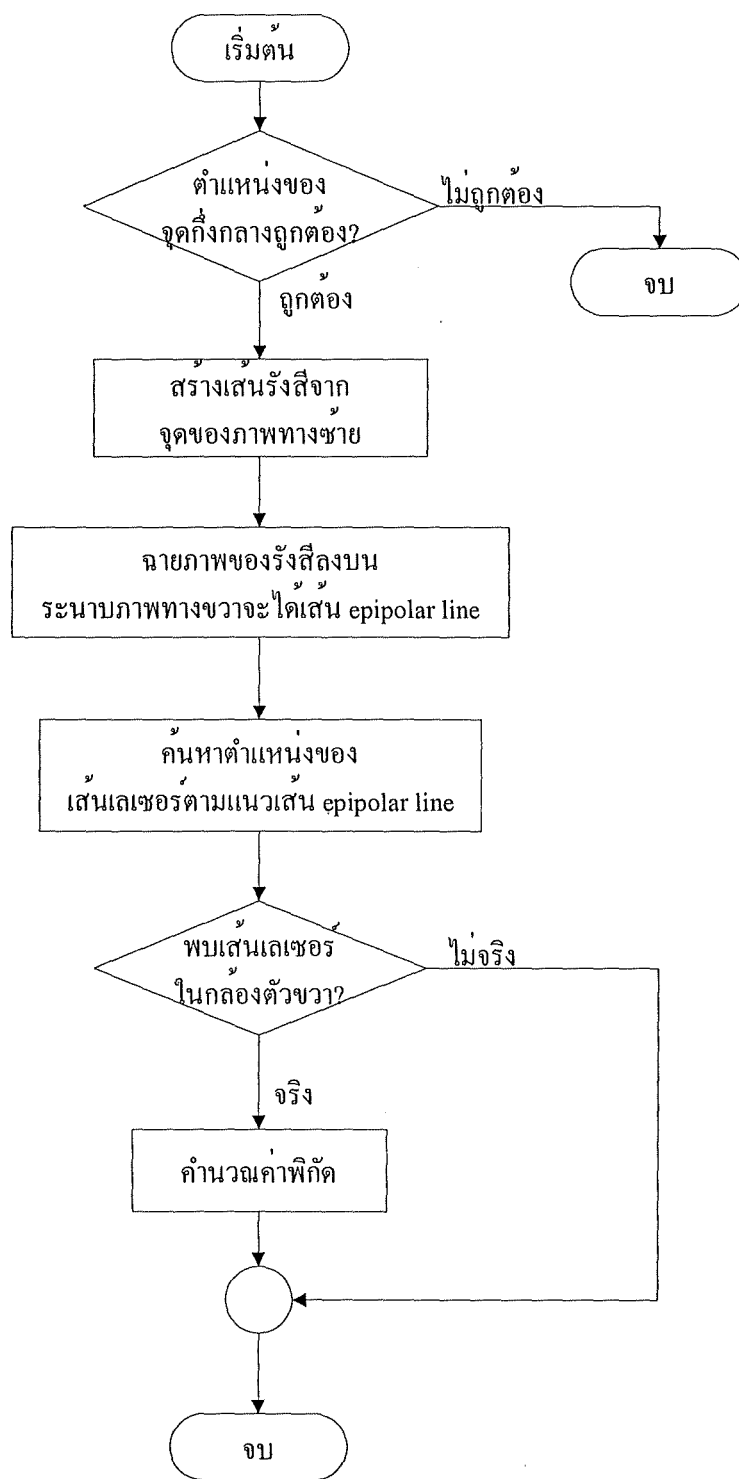
รูปที่ 4.14 ถึง 4.16 แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมในส่วนต่างๆ โดยในรูปที่ 4.14 แสดงการทำงานโดยรวมของโปรแกรม รูปที่ 4.15 แสดงขั้นตอนการหาดำแหน่งจุดกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์ และรูปที่ 4.16 แสดงขั้นตอนการคำนวณค่าพิกัด



รูปที่ 4.14 ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม



รูปที่ 4.15 ขั้นตอนการหาค่าตำแหน่งกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์



รูปที่ 4.16 ขั้นตอนการหาค่าพิกัด

โดยเมื่อทำการวัดเสร็จจะได้ผลลัพธ์เป็นไฟล์ชนิดข้อความนามสกุล .ASCII เพื่อนำเข้าโปรแกรม CATIA ได้ รูปแบบของไฟล์ผลลัพธ์จะเป็นตัวเลข 3 ตัว มีจุดทศนิยม 6 ตำแหน่ง ซึ่งเป็นค่าพิกัดในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ คั่นด้วยเครื่องหมาย “,” ดังรูป 4.17

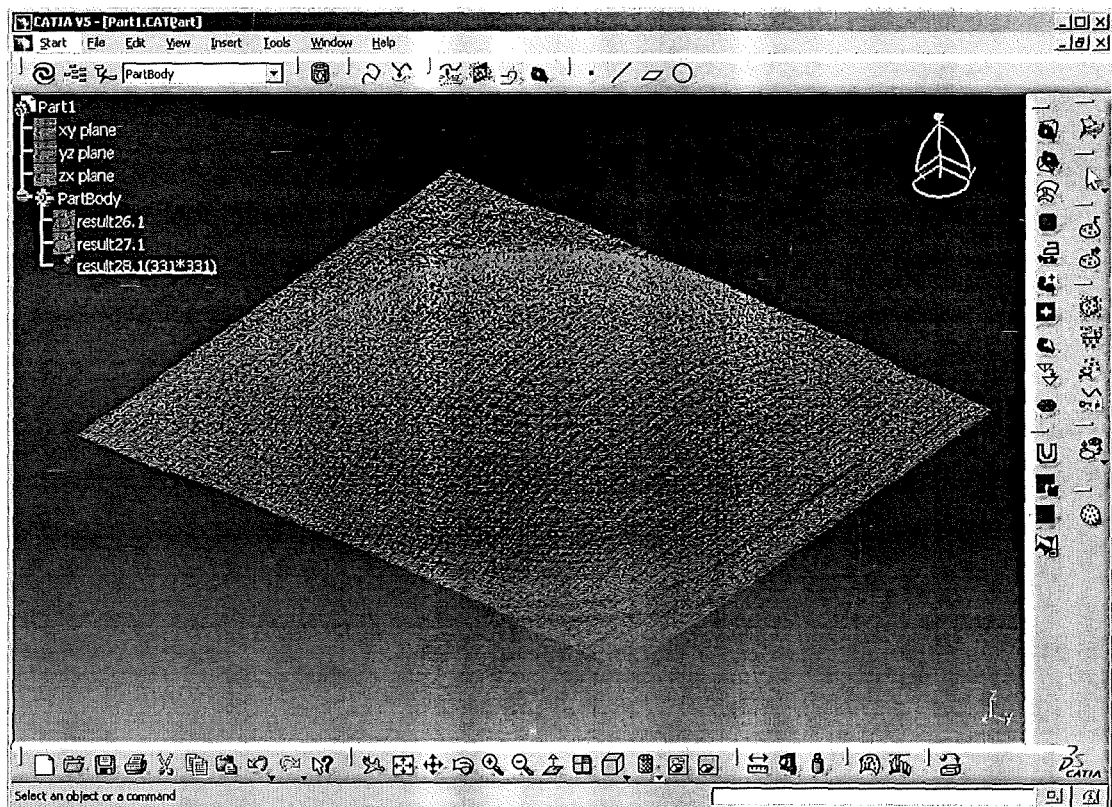

```

0.000000,159.420455,40.792525
0.000000,156.530683,40.648492
0.000000,140.100203,35.451514
0.000000,138.662473,35.292816
0.000000,137.249404,35.143987
0.000000,134.318634,35.539936
0.000000,127.325662,35.486098
0.000000,114.288805,39.034337
0.000000,110.131571,41.180785
0.000000,99.037418,46.277190
0.000000,97.473689,47.294956
0.000000,85.599218,55.964364
0.000000,84.111171,56.943459
0.000000,75.176560,58.414649
0.000000,65.418990,53.762098
0.000000,55.895967,46.989032
0.000000,42.714315,43.849665
0.000000,39.787275,42.910671
0.000000,29.511715,35.687162
0.000000,15.773107,35.416128
0.000000,15.046525,35.403823

```

รูปที่ 4.17 ลักษณะของไฟล์ผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องวัดพิกัด

รูปที่ 4.18 แสดงไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการวัดชิ้นงานพื้นผิวทรงกลม เมื่อนำไปเปิดในโปรแกรม CATIA โดยมีจุดที่ได้จากการวัดจำนวน 109,561 จุด



รูปที่ 4.18 ไฟล์ข้อมูลที่ได้จากการวัดเมื่อนำไปเปิดในโปรแกรม CATIA

บทที่ 5

การสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด

5.1 คำนำ

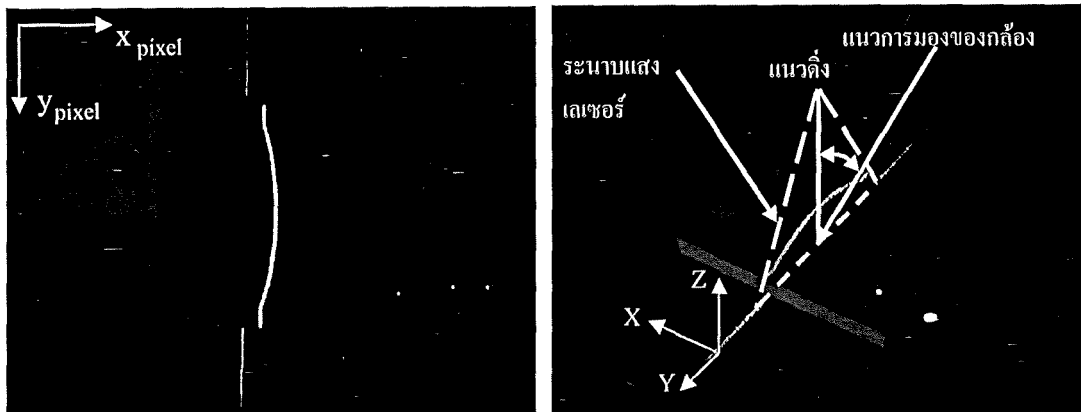
เนื่องจากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติทุกชนิดเป็นเครื่องมือวัดชนิดหนึ่ง จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) ให้มีความถูกต้องมากที่สุดก่อนการใช้งานเสมอ ทั้งนี้เพื่อลดค่าความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากตัวเครื่องวัดพิกัดเอง นอกจากนี้อุปกรณ์วัดที่ใช้ในเครื่องวัดพิกัดจะอาศัยการสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดกับค่าพิกัด 3 มิติของวัตถุ เพื่อที่จะสามารถนำค่าที่วัดได้ แปลงเป็นข้อมูลพิกัดได้อย่างถูกต้อง

การสอบเทียบเครื่องวัดพิกัดในงานวิจัยนี้ เป็นการสอบเทียบกล้องที่ใช้ในการถ่ายภาพวัตถุ โดยเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างจุดของภาพ (Pixel) กับตำแหน่งของวัตถุจริงใน 3 มิติ เพื่อนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาใช้ในการคำนวณหาค่าพิกัดของชิ้นงานต่อไป ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนในการสอบเทียบเครื่องวัดพิกัด รวมถึงการหาค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของเครื่อง

5.2 การออกแบบชิ้นงานที่ใช้ในการสอบเทียบ

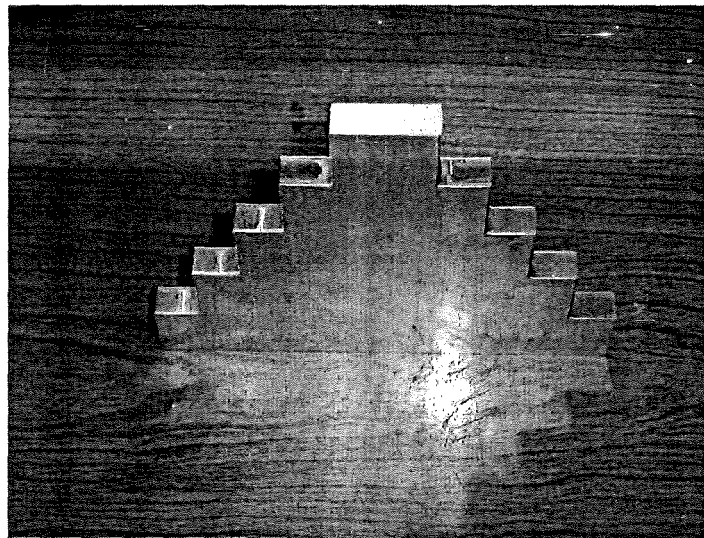
พิจารณารูปที่ 5.1 ซึ่งแสดงภาพที่ถ่ายจากกล้อง CCD และลักษณะของการเกิดภาพ จะเห็นว่า ภาพที่เกิดขึ้นบนกล้อง CCD เกิดจากการตัดกันของระนาบแสงเลเซอร์กับพื้นผิวชิ้นงาน โดยที่พิกัดทางแกน X ของภาพมีความสัมพันธ์กับความสูงหรือค่าทางแกน Z ของชิ้นงาน และพิกัดทางแกน Y ของภาพมีความสัมพันธ์กับค่าทางแกน Y ของชิ้นงาน

ดังนั้นจากภาพถ่ายของกล้อง CCD จะได้ค่าพิกัดทางแกน Y และแกน Z ของชิ้นงานเท่านั้น ส่วนค่าพิกัดทางแกน X จะใช้ค่าที่ส่งให้มอเตอร์ทางแกน X เคลื่อนที่มาเป็นค่าพิกัดของชิ้นงาน



รูปที่ 5.1 ลักษณะการเกิดภาพบนกล้อง CCD

จากรูปที่ 5.1 ทำให้ทราบว่า ลักษณะของชิ้นงานที่ใช้สอบเทียบนั้นจะต้องมีค่าความสูงหรือค่าทางแกน Z และความกว้างหรือค่าทางแกน Y ที่ทราบชัดเจน จึงได้ออกแบบชิ้นงานสำหรับสอบเทียบมีลักษณะดังรูปที่ 5.2 โดยมีลักษณะเป็นขั้นบันได (steps) ที่มีความสูง และความกว้างในแต่ละขั้นเท่ากัน

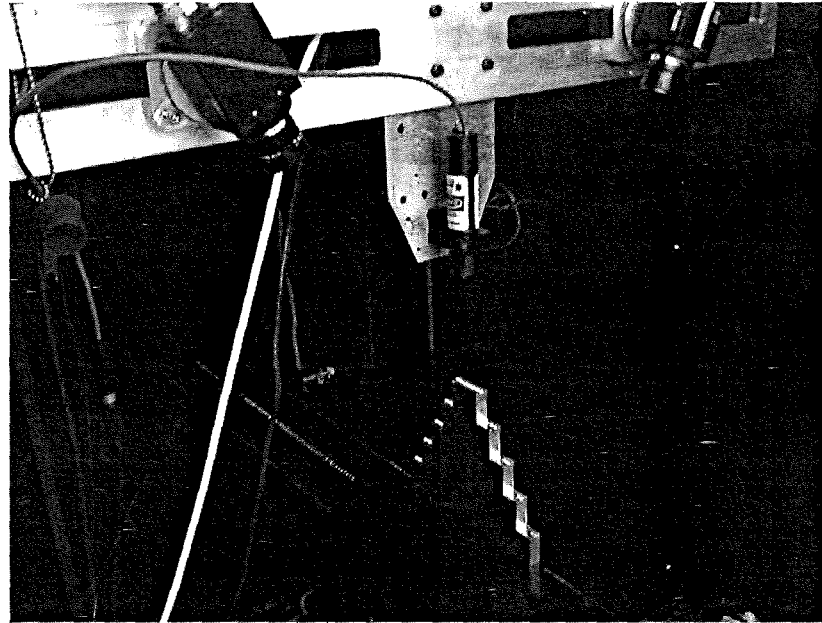


รูปที่ 5.2 ชิ้นงานที่ใช้ในการสอบเทียบ

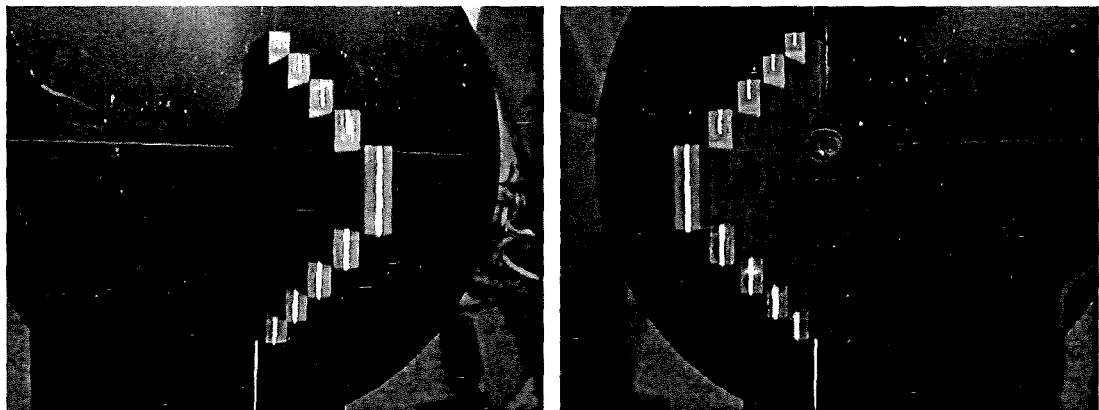
5.3 การสอบเทียบเครื่องวัดพิคัด

การสอบเทียบเครื่องวัดพิคัดในงานวิจัยนี้ เป็นการสอบเทียบกล้องที่ใช้ในการถ่ายภาพ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องดังที่กล่าวในบทที่ 3 ในการสอบเทียบจะตั้งชิ้นงานที่ใช้สอบเทียบบนโต๊ะวางชิ้นงานของเครื่องวัดพิคัดดังรูปที่ 5.3 แล้วทำการถ่ายภาพ จะได้ภาพของเส้นเลเซอร์ที่แสดงในรูปที่ 5.4 นำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของเส้นเลเซอร์ เพื่อหาจุดมุมของขั้นบันไดในแต่ละขั้น และเนื่องจากทราบขนาดที่แน่นอนของชิ้นงานที่ใช้สอบเทียบ จะได้ค่าพิคัด

ของจุดที่ตรงกันระหว่างตำแหน่งในภาพ กับตำแหน่งของวัตถุใน 3 มิติ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ซึ่งเป็นของกล้องตัวซ้ายและขวาตามลำดับ เมื่อทำการวัดที่ระยะ 100 มิลลิเมตรจากจุดบนสุดของแกน Z



รูปที่ 5.3 การตั้งชิ้นงานเพื่อสอบเทียบเครื่องวัดพิคัด



รูปที่ 5.4 ภาพของชิ้นงานสอบเทียบเมื่อถ่ายจากกล้องทั้งสองตัว

ตารางที่ 5.1 ผลที่ได้จากการสอบเทียบกล้องตัวซ้าย

ตำแหน่งที่	ตำแหน่งของภาพ		ตำแหน่งของชิ้นงาน		
	X	Y	x	y	z
1	413.5	91.5	150.0	24.0	0.0
2	447.0	124.0	135.0	48.0	0.0
3	486.0	162.0	120.0	72.0	0.0
4	530.0	205.5	105.0	96.0	0.0

5	581.0	255.0	90.0	120.0	0.0
6	578.0	361.0	60.0	120.0	0.0
7	526.0	404.5	45.0	96.0	0.0
8	480.5	439.5	30.0	72.0	0.0
9	440.5	470.0	15.0	48.0	0.0
10	405.5	496.0	0.0	24.0	0.0

ตารางที่ 5.2 ผลที่ได้จากการสอบเทียบกล้องตัวขวา

ตำแหน่งที่	ตำแหน่งของภาพ		ตำแหน่งของชิ้นงาน		
	X	Y	x	y	z
1	390.0	86.0	150.0	24.0	0.0
2	357.0	119.0	135.0	48.0	0.0
3	319.0	156.5	120.0	72.0	0.0
4	276.0	200.0	105.0	96.0	0.0
5	226.0	250.0	90.0	120.0	0.0
6	228.0	357.0	60.0	120.0	0.0
7	278.0	401.0	45.0	96.0	0.0
8	321.0	437.0	30.0	72.0	0.0
9	359.0	468.5	15.0	48.0	0.0
10	392.0	496.5	0.0	24.0	0.0

เมื่อนำค่าในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ไปทำการสอบเทียบกล้อง ด้วยวิธีการสอบเทียบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการของ Tsai [3] จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของกล้องแต่ละตัวดังแสดงในตารางที่ 5.3 และ 5.4

ตารางที่ 5.3 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องตัวซ้าย

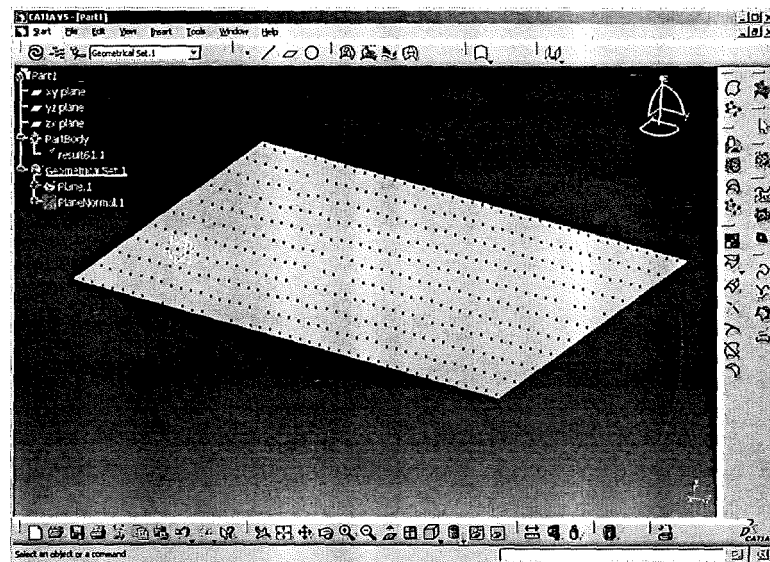
พารามิเตอร์	ค่าที่ได้จากการสอบเทียบ
f	7.948680
$kappa_1$	6.681259e-003
s_x	1.000000
C_x	383.500000
c_y	287.500000
r_x	-61.233492
r_y	1.333306
r_z	-88.961996
T_x	-3.182106
T_y	77.315314
T_z	370.958688

ตารางที่ 5.4 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องตัวขวา

พารามิเตอร์	ค่าที่ได้จากการสอบเทียบ
f	8.160111
kappa1	4.897426e-003
sx	1.000000
cx	383.500000
cy	287.500000
r_x	-119.235910
r_y	1.550535
r_z	-90.286880
T_x	14.900035
T_y	76.386798
T_z	377.380164

5.4 การหาค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของเครื่องวัดพิกัด

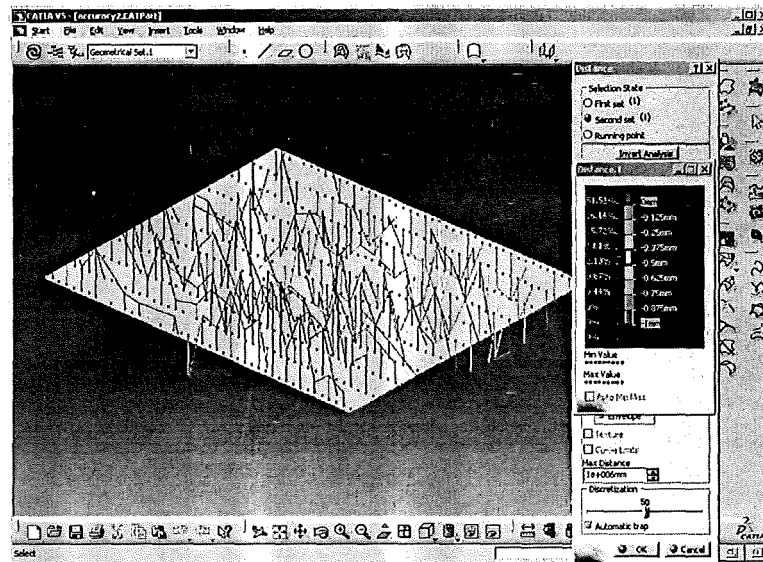
ค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของเครื่องวัดพิกัด เป็นการประเมินความสามารถของเครื่องวัดพิกัดในเชิงคุณภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความแม่นยำของเครื่อง โดยทำการวัดชิ้นงานที่เป็นระนาบ แล้วนำค่าพิกัดที่ได้มาสร้างระนาบจากกลุ่มข้อมูลจุดด้วยโปรแกรม CATIA ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การสร้างระนาบจากจุดข้อมูลที่วัดได้

จากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างตำแหน่งต่างๆของพิกัดที่ได้ กับระนาบที่สร้างขึ้น ดังรูปที่ 5.6 พบว่ามีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 0.2087 มิลลิเมตร และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

0.1381 มิลลิเมตร เมื่อทำการสอบเทียบเครื่องวัดพิคคที่ระยะ 100 มิลลิเมตรจากตำแหน่งบนสุดของแกน Z จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความแม่นยำ (Accuracy) ของเครื่องอยู่ที่ประมาณ 0.35 มิลลิเมตร หรือ 350 ไมครอน



รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างจุดที่วัดได้กับระยะนาบที่สร้างขึ้น

จากการทดสอบและการใช้งานเครื่องวัดพิคค พบว่าความแม่นยำของเครื่องขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญคือ คุณภาพของแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่ใช้ หากต้องการเพิ่มความแม่นยำในการวัดพิคคควรใช้แถบแสงเลเซอร์ (line laser) ที่มีความบางกว่าที่ใช้อยู่ เพื่อให้การค้นหาคำแหน่งของเส้นเลเซอร์ในภาพมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การคำนวณพิคค 3 มิติมีความถูกต้องมากขึ้นด้วย

บทที่ 6

การทดลอง

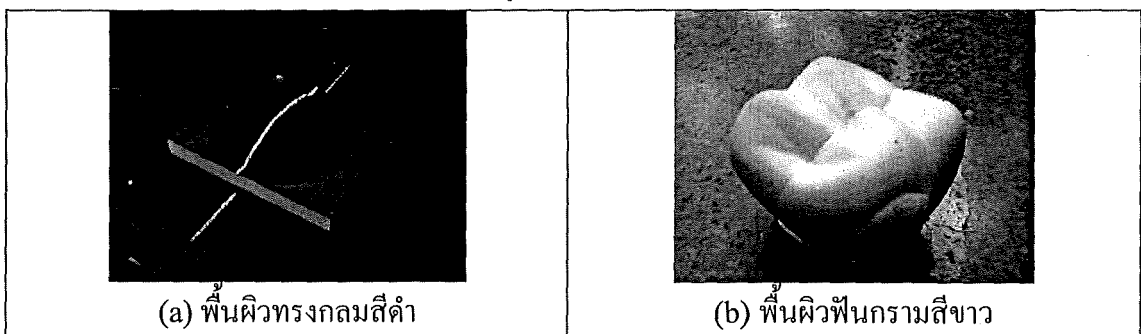
6.1 คำนำ

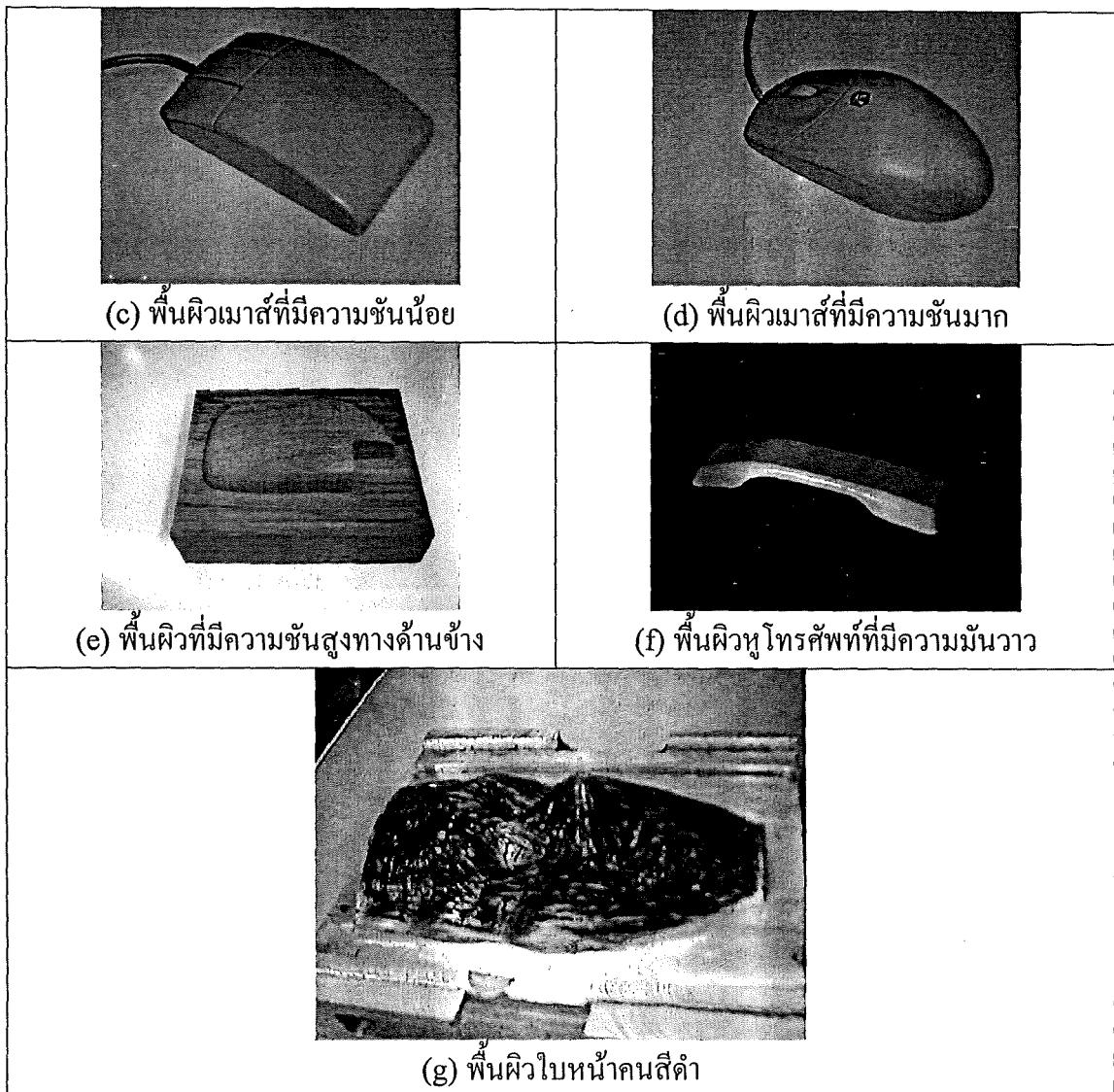
ในบทนี้เป็นการทดลองเครื่องวัดพิกัด เพื่อทดสอบความสามารถของเครื่อง รวมทั้งหาสิ่งที่มีผลต่อการวัด โดยทดลองวัดพื้นผิวลักษณะต่างๆ เช่น พื้นผิวที่มีความชันสูง มีความมันวาว พื้นผิวที่มีความซับซ้อน และทำการทดลองวัดที่ระยะห่างระหว่างกล้องและที่จำนวนจุดข้อมูลต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 6 การทดลอง รายละเอียดมีดังนี้

1. ทดลองวัดที่ระยะห่างระหว่างกล้องต่างๆ กับพื้นผิวทรงกลมสีดำ
2. ทดลองวัดพื้นผิวเมาส์ที่มีความชันน้อยกับที่มีความชันมาก
3. ทดลองวัดพื้นผิวพื้นกรามสีขาวที่จำนวนจุดแตกต่างกัน
4. ทดลองวัดพื้นผิวที่มีความชันสูงทางด้านข้าง
5. ทดลองวัดพื้นผิวที่มีความมันวาว
6. ทดลองวัดพื้นผิวใบหน้าคนสีดำ โดยใช้เทคนิคการทำจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน

ในการทดลองที่ 1 เป็นการทดลองกับพื้นผิวที่เป็นทรงกลมสีดำโดยทำการวัดพิกัดที่ระยะห่างระหว่างกล้องต่างๆกัน คือที่ 300, 350 และ 400 มิลลิเมตร การทดลองที่ 2 เป็นการทดลองเปรียบเทียบการวัดพื้นผิวที่มีความชันน้อยกับพื้นผิวที่มีความชันมาก ส่วนในการทดลองที่ 3 ทดลองวัดชิ้นงานที่มีความซับซ้อน โดยใช้จำนวนจุดในการวัดแตกต่างกัน การทดลองที่ 4 เป็นการวัดพื้นผิวที่มีความชันสูงทางด้านข้าง การทดลองที่ 5 ทดลองวัดพื้นผิวหุ้โทรศัพท์ที่มีความมันวาว และสุดท้ายเป็นการทดลองวัดพื้นผิวใบหน้าคนสีดำที่มีความชันสูง โดยใช้เทคนิคการทำจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน เพื่อสามารถทำการวัดหลายครั้ง แล้วนำจุดที่ได้ในแต่ละครั้งมาทำการเชื่อมโยงกัน

พื้นผิวที่ใช้ในการทดลอง แสดงในรูปที่ 6.1(a) – 6.1(g)





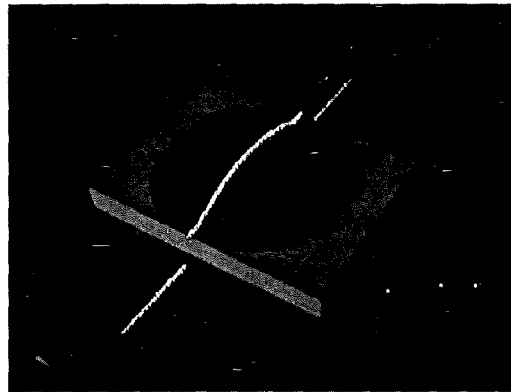
รูปที่ 6.1 ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

6.2 การทดลองที่ 1

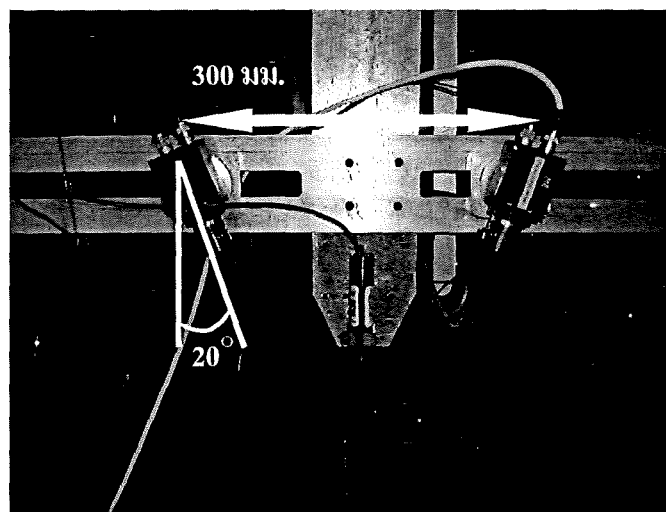
ทดลองวัดที่ระยะห่างระหว่างกล้องต่างๆ กับพื้นผิวทรงกลมสีดำ

วัตถุประสงค์

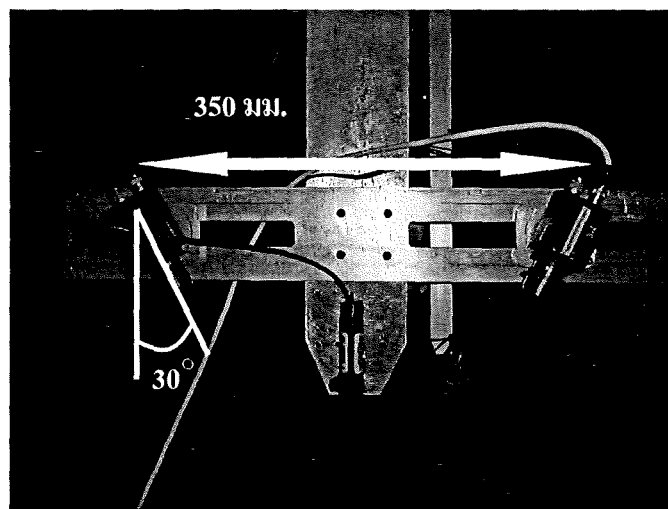
เพื่อทดสอบว่าระยะห่างระหว่างกล้องทั้ง 2 ตัวมีผลต่อค่าพิกัดที่วัดได้หรือไม่ นอกจากปรับระยะห่างแล้วยังต้องปรับมุมกล้องด้วย เพื่อให้ได้มุมมองของแนวเส้นเลเซอร์ที่เหมาะสม ทำการทดลองที่ระยะห่าง 300 มิลลิเมตร มุมกล้อง 20 องศา, ระยะห่าง 350 มิลลิเมตร มุมกล้อง 30 องศา และระยะห่าง 400 มิลลิเมตร มุมกล้อง 40 องศา ดังรูปที่ 6.3, 6.4 และ 6.5 โดยทำการวัดที่ 100 มิลลิเมตรจากจุดบนสุดของแกน Z ชิ้นงานที่ใช้ในการวัดแสดงดังรูปที่ 6.2



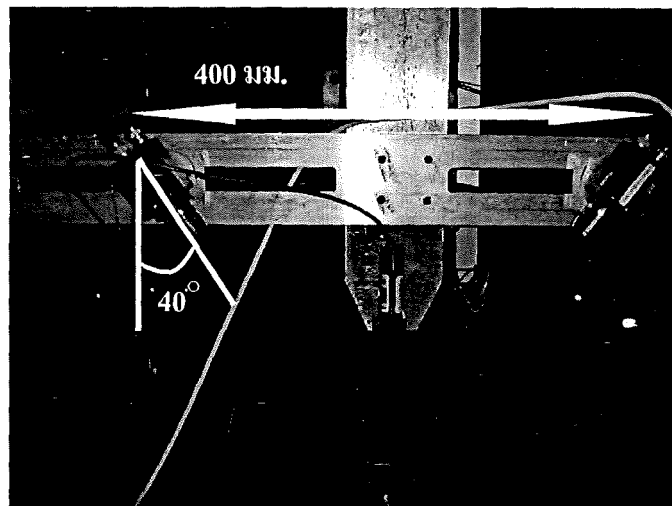
รูปที่ 6.2 ชิ้นงานพื้นผิวทรงกลมสีดำ



รูปที่ 6.3 การทดลองที่ระยะห่างก๊อ้ง 300 มิลลิเมตร มุมก๊อ้ง 20 องศา



รูปที่ 6.4 การทดลองที่ระยะห่างก๊อ้ง 350 มิลลิเมตร มุมก๊อ้ง 30 องศา



รูปที่ 6.5 การทดลองที่ระยะห่างกล้อง 400 มิลลิเมตร มุมกล้อง 40 องศา

สมมติฐานการทดลอง

กรณีที่กล้องทั้ง 2 ตัวมีระยะห่างกันมาก น่าจะให้ผลการวัดที่ไม่ดีนัก เนื่องจากพื้นผิวจะอยู่ห่างจากกล้องมาก ทำให้เครื่องมีค่า Resolution หยาบกว่า

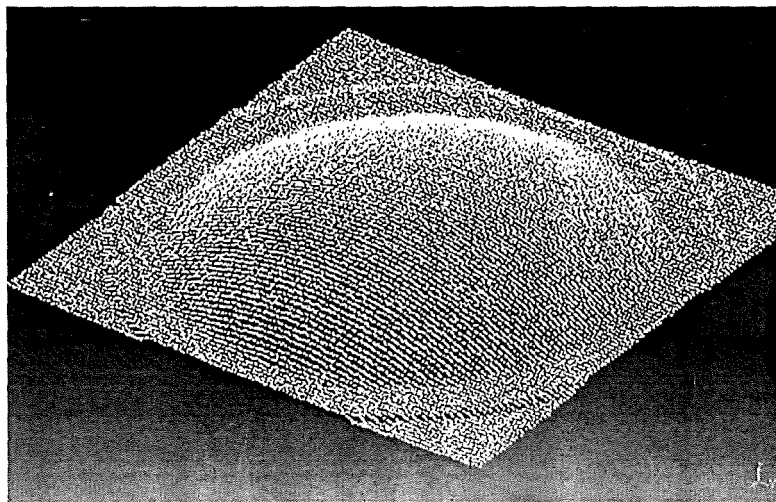
ขั้นตอนการทดลอง

1. เปิดเครื่องวัดพิกัด และ โปรแกรมควบคุมการทำงาน StereoCMM (เปิดการควบคุมมอเตอร์โดยกดปุ่ม Energize และปุ่ม Live เพื่อการเคลื่อนที่
2. เคลื่อนแกน Z ของเครื่องวัดพิกัด ให้ขึ้นสูงสุด
3. เคลื่อนแกน Z ลงมายังตำแหน่งที่ 100 มิลลิเมตร
4. วางชิ้นงานพื้นผิวทรงกลมสีดำลงบนเครื่อง และเคลื่อนแกน X ให้แนวของแสงเลเซอร์อยู่กลางชิ้นงาน
5. ใส่ค่าขนาดชิ้นงานในแนวแกน X เป็น 110 มิลลิเมตร จำนวนเส้น 70 เส้น จำนวนจุดเลือกเป็น High และใส่ตำแหน่งไดเรกทอรีที่ต้องการเก็บไฟล์พิกัด
6. ปิดม่าน
7. กดปุ่ม Scan เพื่อเริ่มทำการวัด
8. ทดลองนำเข้าโปรแกรม CATIA
9. ทดลองซ้ำแต่ปรับระยะกล้องใหม่ ดังรูปที่ 6.4 และ 6.5

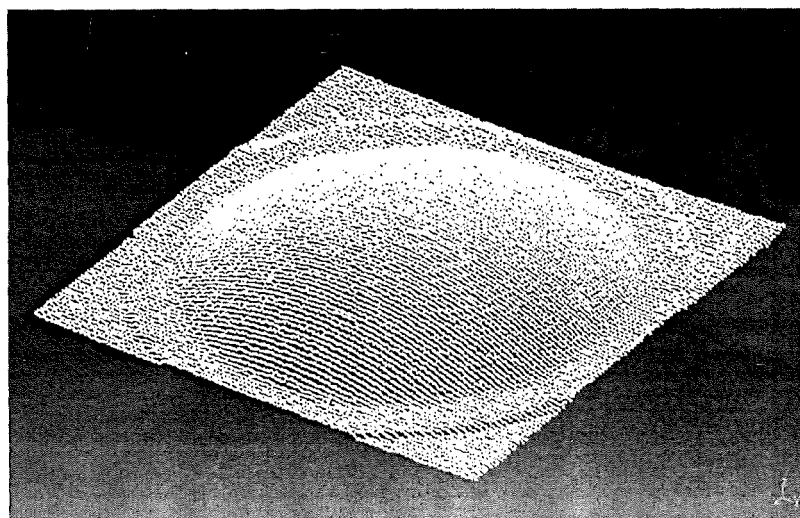
ผลการทดลอง

จากผลการวัดที่ได้พบว่า ที่ระยะห่างระหว่างกล้อง 350 มิลลิเมตร และมุมกล้อง 30 องศา ได้ผลการวัดที่ดีที่สุด การวัดที่ระยะห่าง 300 มิลลิเมตร มุมกล้อง 20 องศา ลักษณะจุดที่ได้จะหยาบ

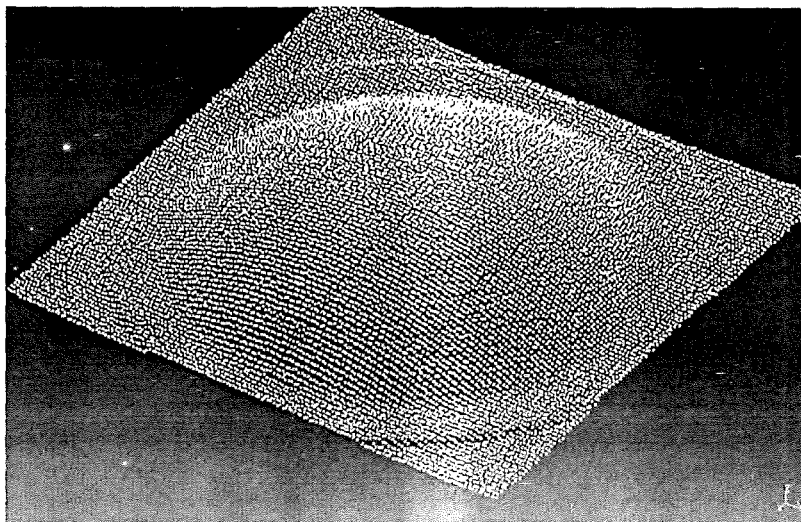
ทางแกน Z เนื่องจากมุมเอียงของกล้องน้อย ทำให้ Resolution หยิบ ส่วนการวัดที่ระยะห่าง 400 มิลลิเมตร มุมกล้อง 40 องศา ผลการวัดจะหยิบทางแกน Y เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าว กล้องมีระยะห่างจากวัตถุมาก เมื่อนำไฟล์ที่ได้มาเปิดในโปรแกรม CATIA จะได้ดังรูปที่ 6.6, 6.7 และ 6.8



รูปที่ 6.6 ผลการวัดชิ้นงานที่ระยะห่างของกล้อง 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.7 ผลการวัดชิ้นงานที่ระยะห่างของกล้อง 350 มิลลิเมตร



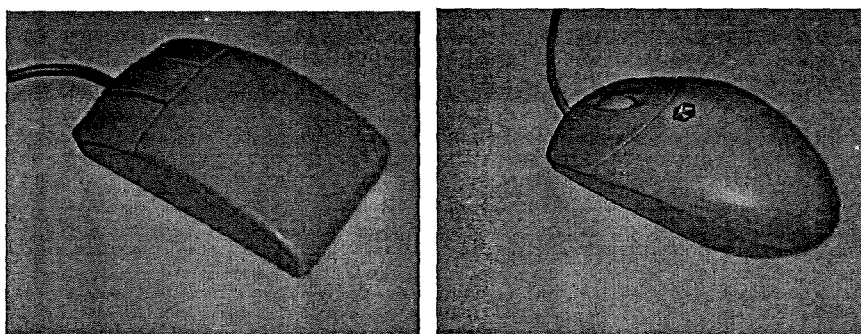
รูปที่ 6.8 ผลการวัดชิ้นงานที่ระยะห่างของกล้อง 400 มิลลิเมตร

6.3 การทดลองที่ 2

ทดลองวัดพื้นผิวเมาส์ที่มีความชันน้อยกับที่มีความชันมาก

วัตถุประสงค์

ทำการทดลองวัดพิกัดพื้นผิวที่ลักษณะความชันต่างกัน เพื่อดูความสามารถในการวัดพื้นผิวที่มีความชันต่างกัน รวมถึงลักษณะของพิกัดที่ได้ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 ชิ้นงานเมาส์ที่มีความชันน้อยและความชันมาก

สมมติฐานการทดลอง

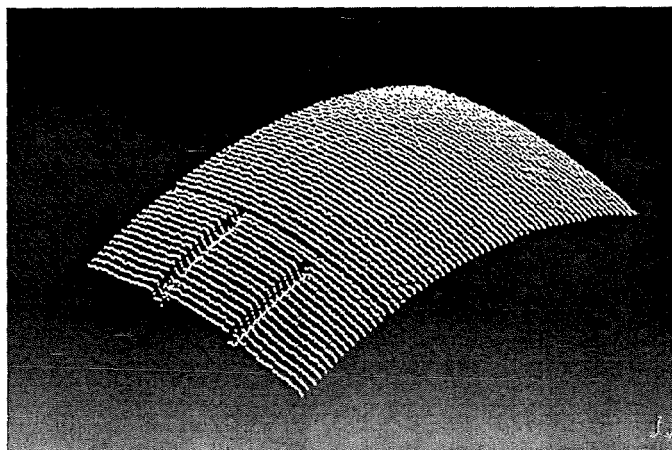
เครื่องวัดพิกัดน่าจะสามารถวัดพื้นผิวที่มีความต่อเนื่องได้ดี แม้ว่าจะมีความชันมากหรือน้อยก็ตาม

ขั้นตอนการทดลอง

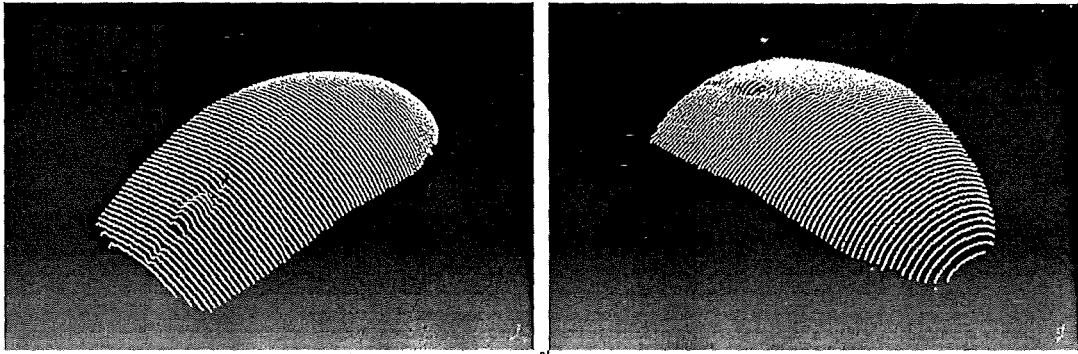
1. เปิดเครื่องวัดพิกัด และ โปรแกรมควบคุมการทำงาน StereoCMM (เปิดการควบคุมมอเตอร์โดยกดปุ่ม Energize และปุ่ม Live เพื่อการเคลื่อนที่
2. เคลื่อนแกน Z ของเครื่องวัดพิกัด ให้ขึ้นสูงสุด
3. เคลื่อนแกน Z ลงมายังตำแหน่งที่ 100 มิลลิเมตร
4. วางชิ้นงานเมาส์ที่มีความชันน้อยลงบนเครื่อง และเคลื่อนแกน X ให้แนวของแสงเลเซอร์อยู่กลางชิ้นงาน
5. ใส่ค่าขนาดชิ้นงานในแนวแกน X เป็น 100 มิลลิเมตร จำนวนเส้น 70 เส้น จำนวนจุดเลือกเป็น High และใส่ตำแหน่งที่ต้องการเก็บไฟล์พิกัด
6. ปิดม่าน
7. กดปุ่ม Scan เพื่อเริ่มทำการวัด
8. ทดลองนำเข้าโปรแกรม CATIA
9. ทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนชิ้นงานเป็นเมาส์ที่มีความชันมาก

ผลการทดลอง

ผลการวัดเมื่อนำเข้าโปรแกรม CATIA แล้วมีลักษณะดังรูปที่ 6.10 และ 6.11



รูปที่ 6.10 ผลการวัดพื้นผิวที่มีความชันน้อย



รูปที่ 6.11 ผลการวัดพื้นผิวที่มีความชันมาก

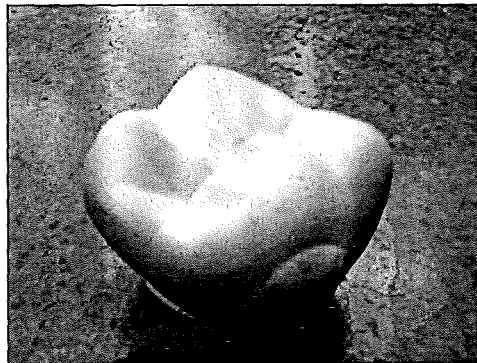
จะเห็นว่าเครื่องวัดพิกัดสามารถให้ผลการวัดที่ดีในชิ้นงานทั้งสองแบบ ทั้งนี้เนื่องจากชิ้นงานมีลักษณะพื้นผิวที่มีความต่อเนื่อง และไม่มีความซับซ้อนมากนัก

6.4 การทดลองที่ 3

ทดลองวัดพื้นผิวพื้นกรามสี่ขาที่จำนวนจุดแตกต่างกัน

วัตถุประสงค์

ทำการทดลองวัดพิกัดพื้นผิวที่มีลักษณะซับซ้อน โดยกำหนดให้จำนวนจุดที่ต้องการแตกต่างกัน เพื่อดูว่าเมื่อพื้นผิวมีความซับซ้อนมากขึ้น ปริมาณของจุดจะช่วยให้สามารถเห็นรูปร่างของชิ้นงานได้ดีขึ้นหรือไม่ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 ชิ้นงานพื้นกรามสี่ขา

สมมติฐานการทดลอง

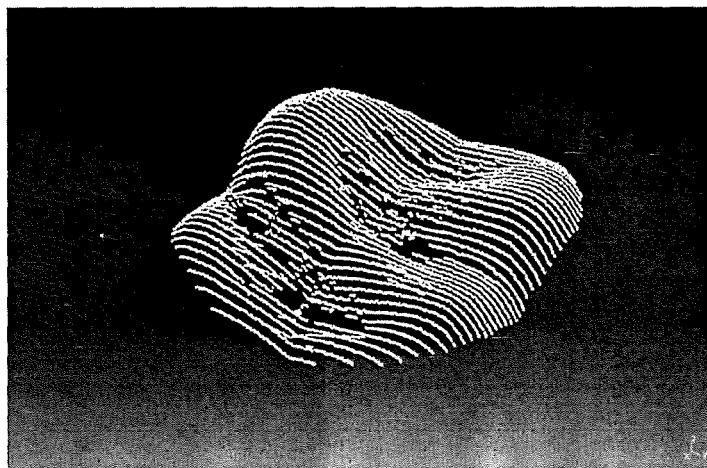
ในกรณีที่พื้นผิวมีความซับซ้อนมาก การเลือกจำนวนจุดที่ใช้ในการวัดมาก ควรจะช่วยให้ได้ลักษณะจุดข้อมูลที่ดีขึ้น เนื่องจากจะเห็นรายละเอียดส่วนต่างๆของพื้นผิวได้มากขึ้น

ขั้นตอนการทดลอง

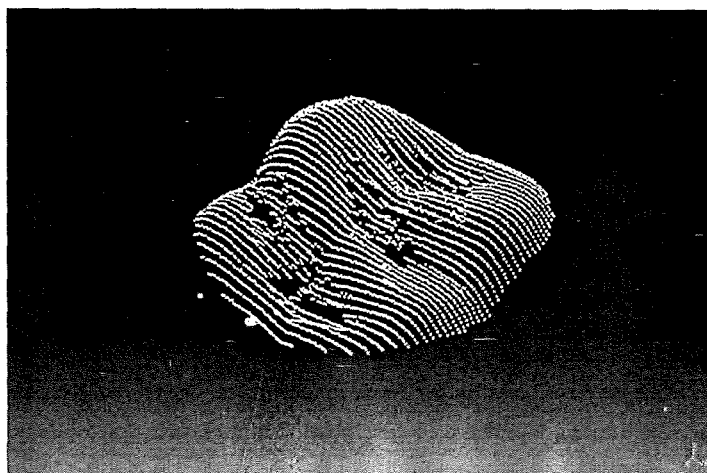
- 1 เปิดเครื่องวัดพิกัด และ โปรแกรมควบคุมการทำงาน StereoCMM (เปิดการควบคุมมอเตอร์โดยกดปุ่ม Energize และปุ่ม Live เพื่อการเคลื่อนที่
- 2 เคลื่อนแกน Z ของเครื่องวัดพิกัด ให้ขึ้นสูงสุด
- 3 เคลื่อนแกน Z ลงมายังตำแหน่งที่ 100 มิลลิเมตร
- 4 วางชิ้นงานพินกรามสี่ขาของบนเครื่อง และเคลื่อนแกน X ให้แนวของแสงเลเซอร์อยู่กลางชิ้นงาน
- 5 ใสค่าขนาดชิ้นงานในแนวแกน X เป็น 140 มิลลิเมตร จำนวนเส้น 85 เส้น จำนวนจุดเลือกเป็น High และใส่ตำแหน่งที่ต้องการเก็บไฟล์พิกัด
- 6 ปิดม่าน
- 7 กดปุ่ม Scan เพื่อเริ่มทำการวัด
- 8 ทดลองนำเข้า โปรแกรม CATIA
- 9 ทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนจำนวนจุดที่ใช้เป็นแบบ Medium และ Low

ผลการทดลอง

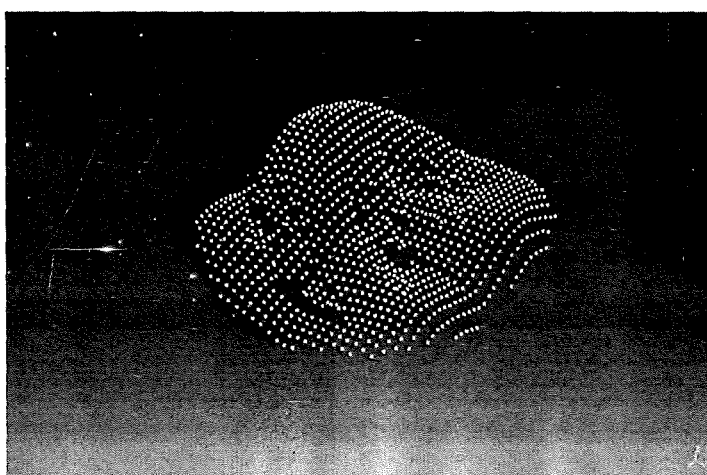
ผลการวัดเมื่อนำเข้า โปรแกรม CATIA แล้วมีลักษณะดังรูปที่ 6.13, 6.14 และ 6.15



รูปที่ 6.13 ผลการวัดพื้นผิวโดยใช้ปริมาณจุดมาก



รูปที่ 6.14 ผลการวัดพื้นผิวโดยใช้ปริมาณจุดปานกลาง



รูปที่ 6.15 ผลการวัดพื้นผิวโดยใช้ปริมาณจุดน้อย

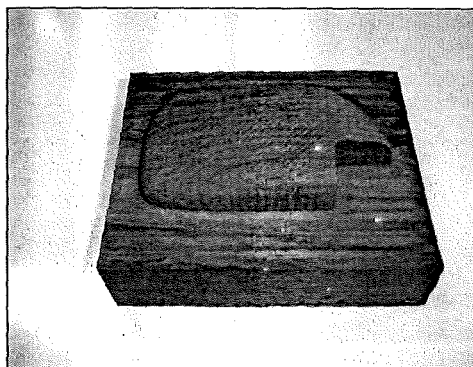
จะเห็นได้ว่าการเลือกจำนวนจุดมากในการวัด จะทำให้ผลการวัดออกมาดีที่สุด เนื่องจากจะได้รายละเอียดส่วนต่างๆของพื้นผิวมากขึ้น จึงมีส่วนช่วยให้เครื่องสามารถวัดพื้นผิวที่มีความซับซ้อนได้ดีขึ้น

6.5 การทดลองที่ 4

ทดลองวัดพื้นผิวที่มีความชันสูงทางด้านข้าง

วัตถุประสงค์

ทำการทดลองวัดพิกัดพื้นผิวที่มีความชันสูงทางด้านข้าง เพื่อทดสอบข้อจำกัดของเครื่อง ซึ่งงานที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 6.16



รูปที่ 6.16 ชิ้นงานที่มีความชันสูงทางด้านข้าง

สมมติฐานการทดลอง

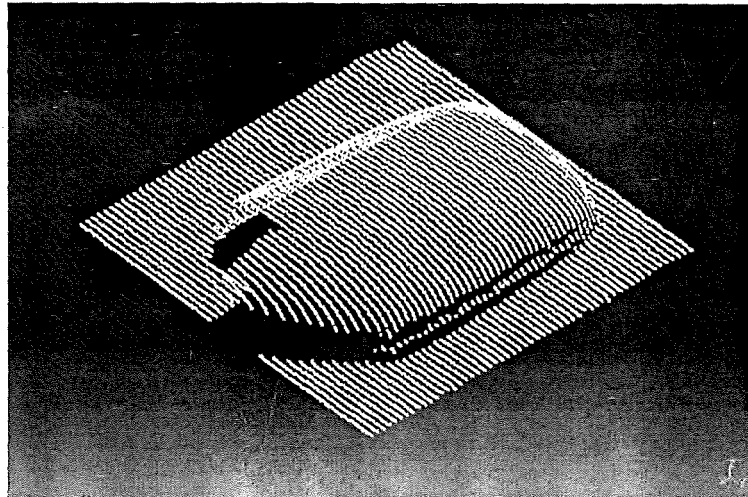
เครื่องวัดพิกัดที่พัฒนาขึ้นอาจไม่สามารถวัดพื้นผิวที่มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงความชันสูงได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวแสงเลเซอร์อาจส่องลงไปไม่ถึง

ขั้นตอนการทดลอง

- 1 เปิดเครื่องวัดพิกัด และโปรแกรมควบคุมการทำงาน StereoCMM (เปิดการควบคุมมอเตอร์โดยกดปุ่ม Energize และปุ่ม Live เพื่อการเคลื่อนที่
- 2 เคลื่อนแกน Z ของเครื่องวัดพิกัด ให้ขึ้นสูงสุด
- 3 เคลื่อนแกน Z ลงมายังตำแหน่งที่ 100 มิลลิเมตร
- 4 วางชิ้นงานลงบนเครื่อง และเคลื่อนแกน X ให้แนวของแสงเลเซอร์อยู่กลางชิ้นงาน
- 5 ใส่ค่าขนาดชิ้นงานในแนวแกน X เป็น 110 มิลลิเมตร จำนวนเส้น 85 เส้น จำนวนจุดเลือกเป็น High และใส่ตำแหน่งที่ต้องการเก็บไฟล์พิกัด
- 6 ปิดม่าน
- 7 กดปุ่ม Scan เพื่อเริ่มทำการวัด
- 8 ทดลองนำเข้าโปรแกรม CATIA

ผลการทดลอง

ผลการวัดเมื่อนำเข้าโปรแกรม CATIA แล้วมีลักษณะดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 ผลการวัดพื้นผิวที่มีความชันสูงทางด้านข้าง

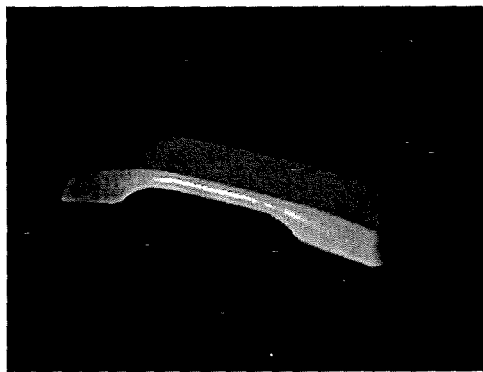
จากรูปที่ 6.17 จะเห็นว่าบริเวณพื้นผิวด้านบนของชิ้นงานจะได้ผลการวัดที่ดี เนื่องจากเป็นพื้นผิวที่มีความต่อเนื่องของความชัน แต่ในบริเวณที่เป็นขอบทางด้านข้างซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงความชันสูง จุดจะหายไปบางส่วน ซึ่งเกิดจากแสงเลเซอร์ส่องลงไปไม่ถึง ทำให้ไม่มีภาพของเส้นเพื่อใช้ในการคำนวณพิกัด

6.6 การทดลองที่ 5

ทดลองวัดพื้นผิวหูโทรศัพท์ที่มีความมันวาว

วัตถุประสงค์

ทำการทดลองวัดพิกัดพื้นผิวที่มีความมันวาว เพื่อทดสอบข้อจำกัดของเครื่อง โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 ชิ้นงานหูโทรศัพท์ที่มีพื้นผิวมันวาว

สมมติฐานการทดลอง

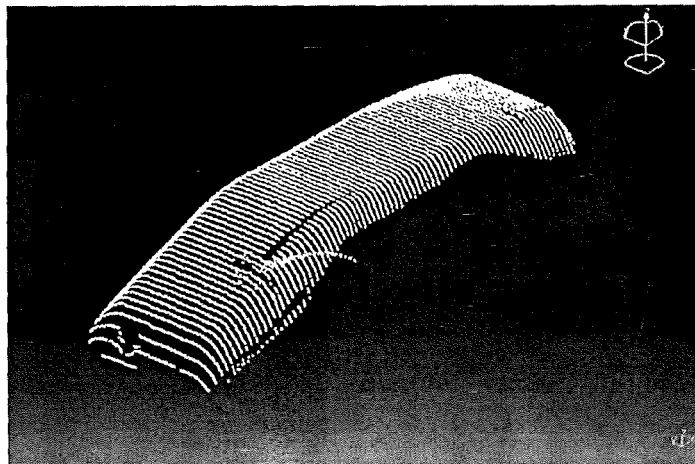
ชิ้นงานที่มีความมันวาว หรือสามารถสะท้อนแสงได้ดีอาจมีปัญหาเกี่ยวกับการวัด เนื่องจากแสงเลเซอร์ที่ตกลงบนพื้นผิวชิ้นบางส่วนอาจสะท้อนเข้าสู่กล้องทำให้พิกัดที่วัดได้มีความผิดพลาด

ขั้นตอนการทดลอง

- 1 เปิดเครื่องวัดพิกัด และโปรแกรมควบคุมการทำงาน StereoCMM (เปิดการควบคุมมอเตอร์โดยกดปุ่ม Energize และปุ่ม Live เพื่อดูการเคลื่อนที่
- 2 เคลื่อนแกน Z ของเครื่องวัดพิกัด ให้ขึ้นสูงสุด
- 3 เคลื่อนแกน Z ลงมายังตำแหน่งที่ 100 มิลลิเมตร
- 4 วางชิ้นงานหุโทรศัพที่ลงบนเครื่อง และเคลื่อนแกน X ให้แนวของแสงเลเซอร์อยู่กลางชิ้นงาน
- 5 ใส่ค่าขนาดชิ้นงานในแนวแกน X เป็น 220 มิลลิเมตร จำนวนเส้น 90 เส้น จำนวนจุดเลือกเป็น High และใส่ตำแหน่งที่ต้องการเก็บไฟล์พิกัด
- 6 ปิดม่าน
- 7 กดปุ่ม Scan เพื่อเริ่มทำการวัด
- 8 ทดลองนำเข้าโปรแกรม CATIA

ผลการทดลอง

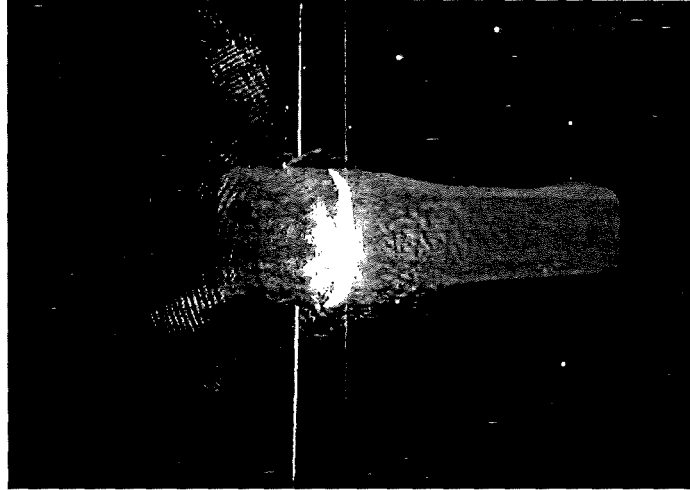
ผลการวัดเมื่อนำเข้าโปรแกรม CATIA แล้วมีลักษณะดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 ผลการวัดชิ้นงานหุโทรศัพที่ที่มีความมันวาว

จากรูปที่ 6.19 พบว่ามีบางส่วนของจุดที่ได้ มีความผิดพลาด ทั้งนี้เนื่องจากการสะท้อนแสงจากเลเซอร์เข้าสู่กล้อง ดังรูปที่ 6.20 ทำให้เครื่องเข้าใจว่าบริเวณที่แสงสะท้อนมานั้นเป็น

ตำแหน่งของพื้นผิวที่แท้จริง จึงนำค่าดังกล่าวมาคำนวณค่าพิกัด ทำให้ตำแหน่งพิกัดที่ได้ผิดพลาด ซึ่งจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวบริเวณที่มีทิศทางเอียงเข้าหากล่อง



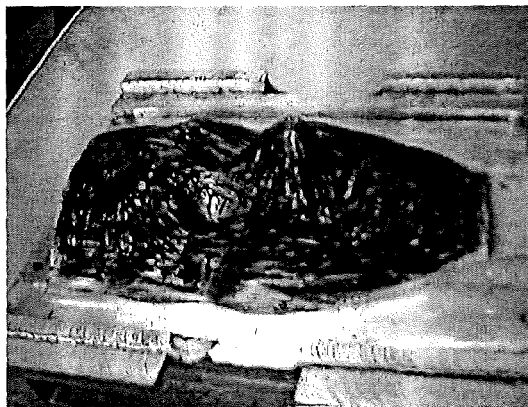
รูปที่ 6.20 การสะท้อนแสงจากเลเซอร์เข้าสู่กล้อง

6.7 การทดลองที่ 6

ทดลองวัดพื้นผิวใบหน้าคนสีดำ โดยใช้เทคนิคการทำจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน

วัตถุประสงค์

ทดลองวัดพื้นผิวใบหน้าคนสีดำ ซึ่งมีความชันสูง และมีส่วนที่เป็นหลุมลึก โดยใช้เทคนิคการทำจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน เพื่อทดสอบว่าเทคนิคดังกล่าวจะช่วยให้ผลการวัดที่ดีขึ้นหรือไม่ ชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.21



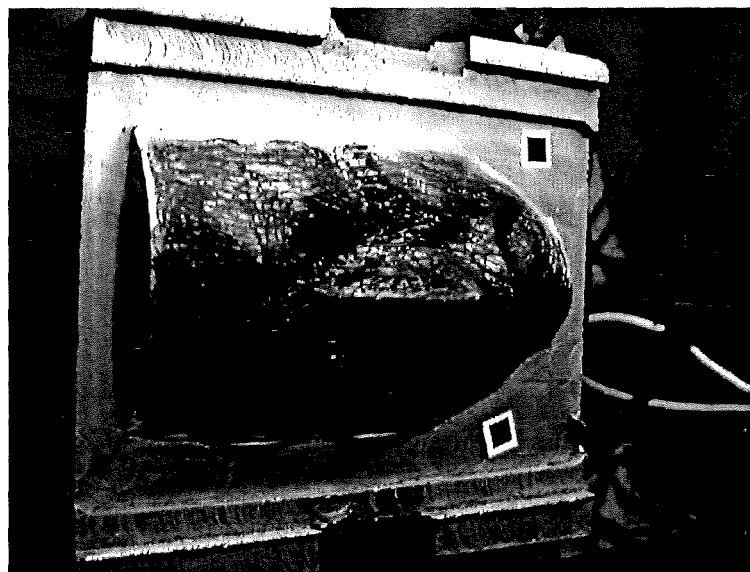
รูปที่ 6.21 ชิ้นงานพื้นผิวใบหน้าคนสีดำ

สมมติฐานการทดลอง

การใช้เทคนิคของการทำจุดอ้างอิงบนชิ้นงาน จะช่วยให้สามารถวัดพื้นผิวที่มีความชันสูงได้ดีขึ้น เนื่องจากสามารถทำการวัดได้หลายครั้ง และเปลี่ยนตำแหน่งการวางของชิ้นงานให้เหมาะสมได้

ขั้นตอนการทดลอง

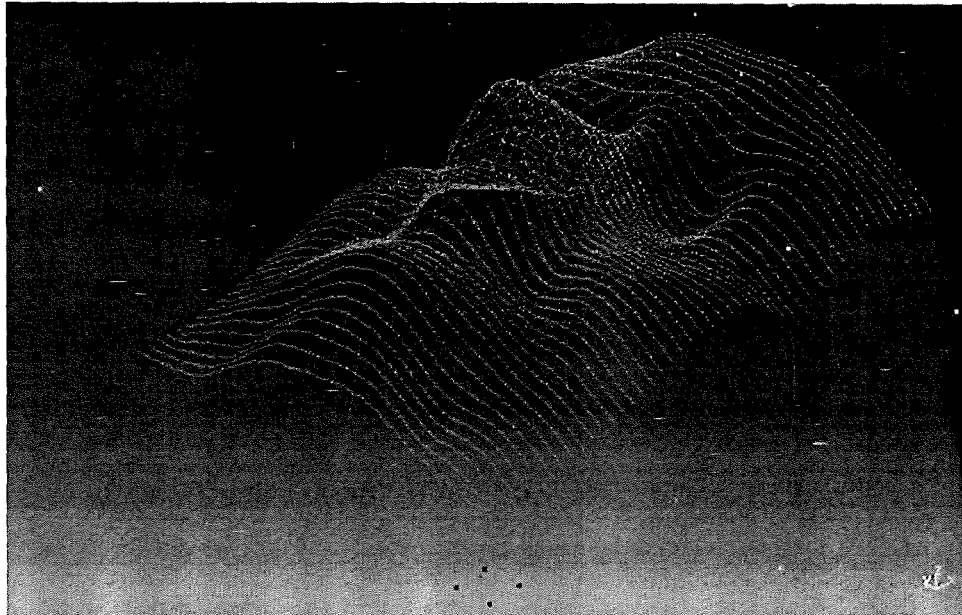
- 1 เปิดเครื่องวัดพิกัด และ โปรแกรมควบคุมการทำงาน StereoCMM (เปิดการควบคุมมอเตอร์โดยกดปุ่ม Energize และปุ่ม Live เพื่อดูการเคลื่อนที่
- 2 เคลื่อนแกน Z ของเครื่องวัดพิกัด ให้ขึ้นสูงสุด
- 3 เคลื่อนแกน Z ลงมายังตำแหน่งที่ 100 มิลลิเมตร
- 4 แปะจุดอ้างอิงบนพื้นผิวชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 6.22
- 5 วางชิ้นงานพื้นผิวไบหน้าคนสีต่ำลงบนเครื่อง และเคลื่อนแกน X ให้แนวของแสงเลเซอร์อยู่กลางชิ้นงาน
- 6 ใส่ค่าขนาดชิ้นงานในแนวแกน X เป็น 160 มิลลิเมตร จำนวนเส้น 85 เส้น จำนวนจุดเลือกเป็น High และใส่ตำแหน่งที่ต้องการเก็บไฟล์พิกัด
- 7 ถ่ายภาพจุดอ้างอิง
- 8 ปิดม่านและกดปุ่ม Scan เพื่อเริ่มทำการวัด
- 9 ทดลองนำเข้าโปรแกรม CATIA
- 10 ทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนตำแหน่งการวางชิ้นงาน



รูปที่ 6.22 การแปะจุดอ้างอิงบนพื้นผิวชิ้นงาน

ผลการทดลอง

เมื่อทำการวัด 3 ครั้ง และนำมาเชื่อมโยงจุดอ้างอิงด้วยคำสั่งใน โปรแกรม CATIA ได้พิกัด ที่มีลักษณะดังรูปที่ 6.23 และ 6.24



รูปที่ 6.23 กลุ่มข้อมูลจุดที่ได้จากการเชื่อมโยงการวัดหลายครั้ง



รูปที่ 6.24 มุมมองต่างๆของกลุ่มข้อมูลจุดที่ได้จากพื้นผิวใบหน้าคน

จะเห็นได้ว่าการใช้เทคนิคการทำจุดอ้างอิง สามารถช่วยให้ผลการวัดดีขึ้นเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นจมูกและตา สามารถให้จุดได้ครบถ้วนมากขึ้น เนื่องจากสามารถวัดพื้นผิวในส่วนที่ขาดหายไปในการวัดครั้งแรก โดยการเปลี่ยนตำแหน่งการวางของชิ้นงาน เพื่อให้ได้มุมมองในจุดที่มีปัญหาได้ดีขึ้น

บทที่ 7

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการทำวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ โดยใช้ภาพสเตอริโอและมีการฉายแถบแสงเลเซอร์ลงบนพื้นผิวชิ้นงานเพื่อช่วยในการวัด โครงสร้างที่ใช้เป็นโครงสร้างเดิม ที่มีอยู่ก่อนแล้ว แต่ทำการสร้างชุดจับยึดคล้องเข้าไปเพิ่มเติม เพื่อใช้ในการยึดคล้อง CCD 2 ตัว ในส่วนของการคำนวณหาค่าพิกัด 3 มิติใช้หลักการของระบบสเตอริโอวิชั่น ซึ่งเป็นการคำนวณหาค่าพิกัดใน 3 มิติจากคู่จุดในภาพแต่ละภาพที่เป็นจุดเดียวกันบนวัตถุ พิกัดจุดที่ได้สามารถนำเข้าโปรแกรม CATIA เพื่อใช้ในการสร้างพื้นผิว และสามารถนำไปใช้งานต่อไป

ในส่วนของ โปรแกรม ได้มีการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องวัดพิกัด ตัวโปรแกรมมีลักษณะที่ใช้งานง่าย มีการแบ่งกลุ่มของคำสั่งไว้เป็นหมวดหมู่ชัดเจน รวมทั้งได้เพิ่มเติมส่วนแสดงผลการวัดในรูปแบบกราฟิกเพื่อความสะดวกในการดูผลการวัดของผู้ใช้ โดยโปรแกรมมีชื่อว่า StereoCMM พัฒนาโดยใช้ภาษา C++ ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows 2000 โดยใช้ Microsoft Visual C++ 6.0 เป็นคอมไพเลอร์

ในการทดลองเครื่องวัดพิกัดที่พัฒนาขึ้น ได้ทำการทดลองวัดพื้นผิวที่มีลักษณะต่าง ๆ กัน ผลการทดลองที่ได้พบว่าเครื่องมีความสามารถในการวัดชิ้นงานดีชิ้นกว่าเครื่องวัดพิกัดที่ใช้แบบกล้องตัวเดียวซึ่งเป็นงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยสามารถวัดชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ดี แต่มีข้อจำกัดกับชิ้นงานบางชนิดที่มีความชันสูง รวมทั้งชิ้นงานที่มีความมันเงา ซึ่งทำให้การวัดมีความผิดพลาดได้ สำหรับพื้นผิวที่มีความชันสูง สามารถแก้ไขโดยการใช้นิยามการวัดอย่างอิงบนชิ้นงาน ขนาดของชิ้นงานที่ทำการวัดจะต้องไม่เกิน $200 \times 150 \times 120$ มิลลิเมตร และค่าความแม่นยำในการวัดของเครื่องอยู่ที่ 350 ไมครอน (0.35 มิลลิเมตร) เมื่อทำการวัดที่ระยะ 100 มิลลิเมตรจากตำแหน่งบนสุดของแกน Z

7.2 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนนี้เป็นข้อเสนอแนะสำหรับการปรับปรุงตัวเครื่องวัดพิกัดในงานวิจัยต่อไป โดยจะเสนอแนะในแต่ละส่วน ดังต่อไปนี้

7.2.1 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเพิ่มความแม่นยำของการวัด

ในการเพิ่มความแม่นยำของการวัดสามารถทำได้ 3 แนวทางด้วยกัน แนวทางแรก คือ การใช้ฮาร์ดแวร์ที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การใช้การ์ดรับข้อมูลภาพที่มีความละเอียดสูงขึ้น ใช้กล้อง CCD ที่มีความละเอียดมากขึ้นและการใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีความยาวกว่าที่ใช้อยู่ แนวทางที่สองคือ การพัฒนาในส่วนของโปรแกรมที่ใช้ควบคุมเครื่องวัดพิคค โดยส่วนที่น่าสนใจ คือ การพัฒนาส่วนของการตรวจสอบลักษณะของแสงเลเซอร์ ให้มีความสามารถในการแยกแยะ ลักษณะของเส้นเลเซอร์ ระหว่างแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นโดยพื้นผิว กับแสงที่เกิดจากการสะท้อนกันเองภายในวัตถุซึ่งมีลักษณะกระจัดกระจาย ส่วนในแนวทางที่สาม คือ การนำเอาอุปกรณ์การวัด ชนิดอื่นเข้ามาใช้ร่วมกันเพื่อให้การวัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะต้องพัฒนาในส่วนของกรรวม ข้อมูลเข้าด้วยกันจากอุปกรณ์วัดในแต่ละชนิด เพื่อให้ได้ข้อมูลการวัดเพียงชุดเดียว

7.2.2 ข้อเสนอแนะในส่วนของเวลาที่ใช้ในการวัด

เวลาที่ใช้ในการวัดสามารถลดลงได้โดยการเลิกใช้แกนเคลื่อนที่แบบมอเตอร์ ขนาดใหญ่ เนื่องจากทำให้ช้า โดยอาจเปลี่ยนไปใช้แสงที่ได้จากโปรเจกเตอร์ที่มีมอเตอร์ขนาดเล็ก ขับเคลื่อนแทน รวมทั้งการใช้เส้นกริดแทนการใช้แถบแสงเลเซอร์เพียงเส้นเดียว ทำให้สามารถรับ ข้อมูลในแต่ละส่วนของพื้นผิวได้จากการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียว โดยไม่ต้องเสียเวลาในการเคลื่อนที่ ไปรับข้อมูลที่ตำแหน่ง

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์และการควบคุมมอเตอร์ทั้ง 3 แกน ซึ่งเป็นมอเตอร์แบบ Brushless DC Motor และส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนทั้ง 3 แกนของเครื่องวัดพิทช์ 3 มิติ คือ ตัวควบคุมมอเตอร์ ซึ่งได้ถูกประยุกต์ใช้อยู่ในอุปกรณ์ควบคุม 2 ตัวคือ ตัวควบคุม 6250 และตัวควบคุม BLX30 ซึ่งตัวแรกจะใช้ควบคุม 2 แกน คือแกน Y และ Z ส่วนตัวหลังจะใช้ควบคุมแกน X

ก่อนที่จะกล่าวถึงอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ จะขอกล่าวถึงตัวมอเตอร์ก่อน โดยมอเตอร์ที่ใช้ควบคุมตำแหน่งแกนทั้ง 3 แกน เป็นมอเตอร์แบบ Brushless DC Servomotor หลังจากนั้นจะกล่าวถึงอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ 6250 และ BLX30

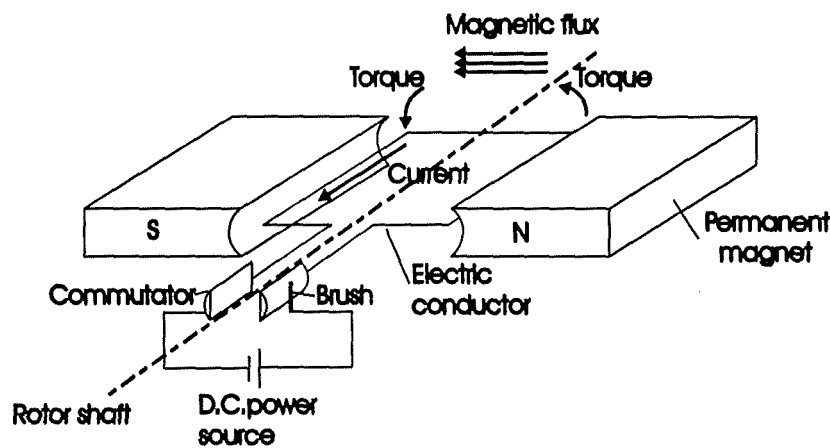
1. หลักการทำงานของมอเตอร์

เซอร์โวมอเตอร์มีการใช้งานกันในระบบควบคุมอัตโนมัติอย่างกว้างขวาง เพราะสามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้ง่าย มีความแม่นยำสูง และควบคุมแรงได้ดี โดยทั่วไปจะสามารถแบ่งประเภทของเซอร์โวมอเตอร์ได้เป็น DC Servomotor และ AC Servomotor มอเตอร์ทั้งสองแบบจะมีส่วนประกอบชิ้นหนึ่งคือแปรงถ่าน ซึ่งจะเป็ตัวที่ทำหน้าที่ป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดเหนี่ยวนำ ที่แปรงถ่านนี้เองจะเกิดการเสียดสีซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียของพลังงานไฟฟ้าไปส่วนหนึ่ง ทำให้เกิดความร้อนและความไม่เชิงเส้น (Non-linear) อันเนื่องมาจากแรงเสียดทาน ซึ่งผลเสียเหล่านี้เป็นข้อจำกัดในการใช้งานมอเตอร์มาโดยตลอด ในเซอร์โวมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless) จะไม่มีปัญหาเหล่านี้ ทำให้สามารถควบคุมได้ถูกต้องและแม่นยำมากกว่ามอเตอร์แบบมีแปรงถ่าน

เซอร์โวมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่านจัดอยู่ในกลุ่ม AC Servomotor แต่กลับมีคุณลักษณะคล้ายกับ DC Servomotor ดังนั้นในบางครั้งจึงถูกเรียกว่าเป็น Brushless DC Servomotor นั่นเอง เพื่อให้เข้าใจในหลักการทำงานของ Servomotor ดังนั้นจะขออธิบายถึงหลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงและกระแสสลับดังนี้

1.1 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง

อาศัยหลักการเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่านแปรงถ่าน (Brush) และตัวเหนี่ยวนำ (Commutator) ไปยังขดลวดเหนี่ยวนำที่อยู่ท่ามกลางสนามแม่เหล็กที่สร้างจากแม่เหล็กถาวร ก็จะก่อให้เกิดแรงบิด (Torque) ในทิศทางกฏมือซ้าย ดังรูปที่ ก.1 แรงบิดที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงสุดเมื่อแกนหมุนทำมุม 0 องศากับระนาบสนามแม่เหล็ก และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จนน้อยที่สุดที่ตำแหน่ง 90 องศา

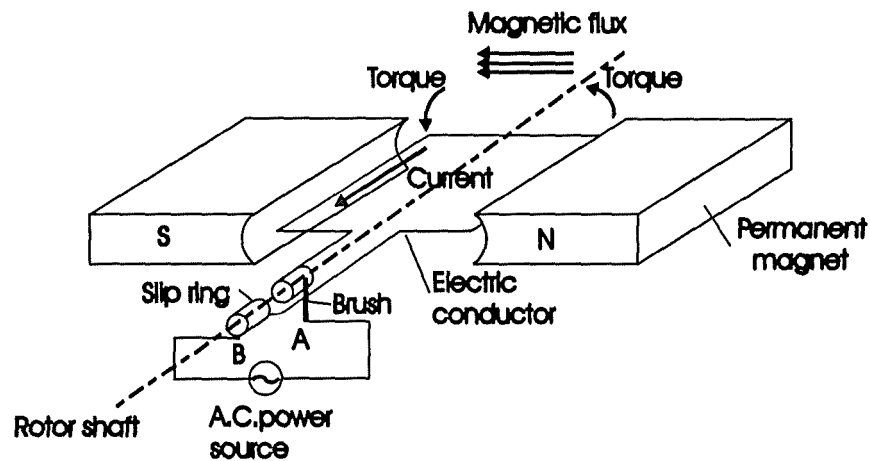


รูปที่ ก.1 การทำงานของมอเตอร์กระแสตรง

ในมอเตอร์กระแสตรงทุกๆ ไปที่ใช้งานจริง จะมีตัวเหนี่ยวนำหลายตัว ซึ่งจะทำให้แรงบิดที่ได้มีค่าราบเรียบมากขึ้น ซึ่งค่าแรงบิดนี้จะแปรผันตรงกับกระแสที่นั่นเอง

1.2 หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสสลับ

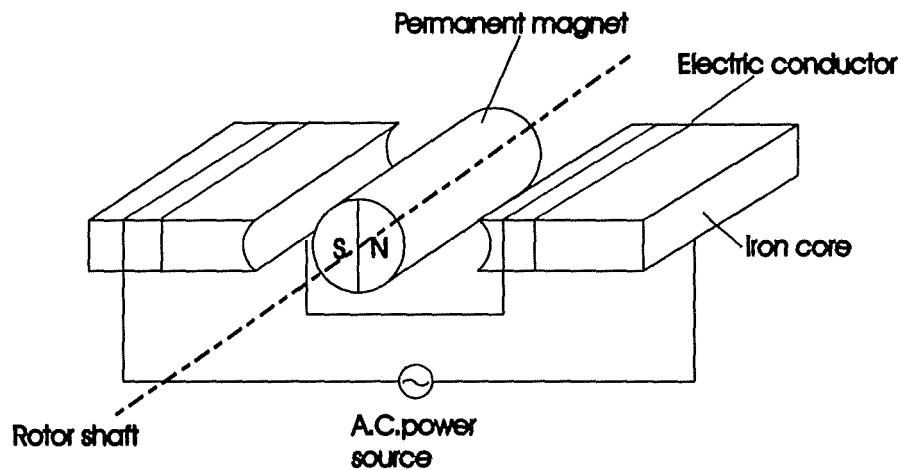
มอเตอร์กระแสสลับนั้นจะต่างจากมอเตอร์กระแสตรง โดยตัวเหนี่ยวนำจะถูกแทนที่ด้วย Slip Ring เมื่อมอเตอร์เริ่มทำงาน ที่แปรงถ่าน A จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก ที่แปรงถ่าน B จะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ จะเกิดแรงบิดหมุนขดลวดจากตำแหน่ง 0 องศาไปที่ตำแหน่ง 90 องศา ที่ตำแหน่งนี้แรงบิดจะเป็นศูนย์ แต่แรงเฉื่อยของขดลวดจะทำให้ขดลวดหมุนต่อไปอีก เมื่อเลยตำแหน่ง 90 องศา ศักย์ไฟฟ้าที่แปรงถ่าน A และ B จะเปลี่ยนขั้วกัน ซึ่งก็จะทำให้เกิดแรงบิดหมุนขดลวดไปถึงตำแหน่ง 270 องศา ศักย์ไฟฟ้าก็จะสลับอีกครั้ง และเกิดแรงบิดหมุนขดลวดไปเรื่อยๆ ซึ่งความเร็วของขดลวดจะขึ้นอยู่กับความถี่ของกระแสสลับที่แหล่งกำเนิดป้อนให้



รูปที่ ก.2 การทำงานของมอเตอร์กระแสสลับ

1.3 หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless)

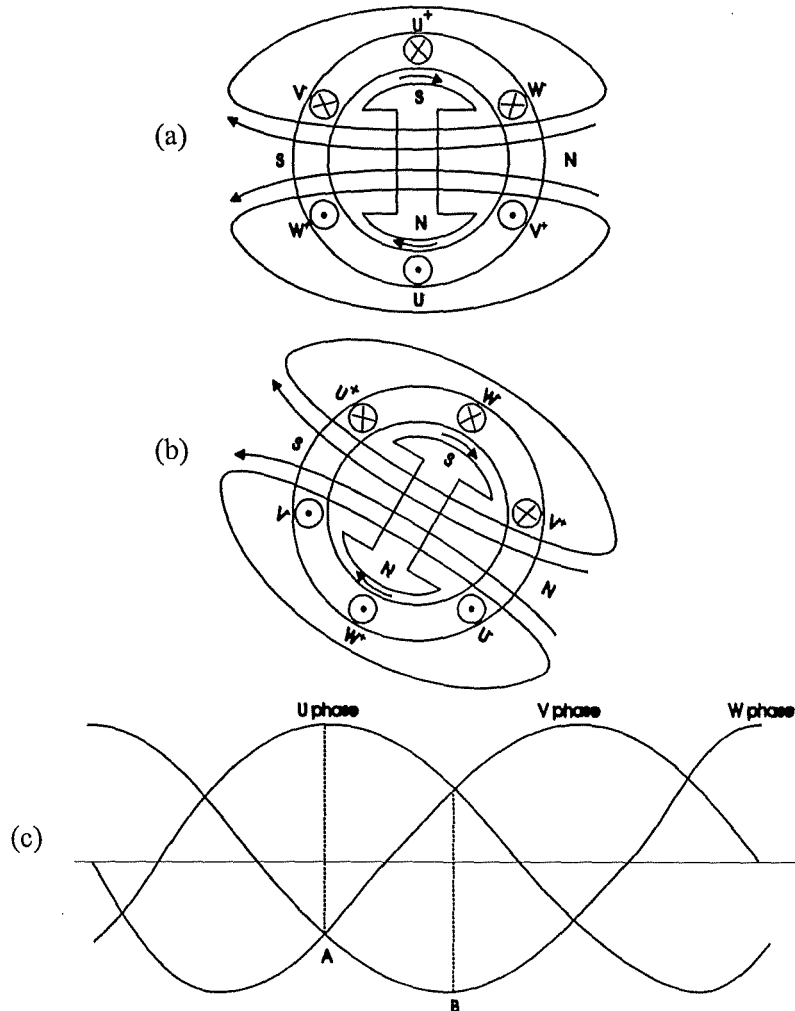
ในส่วนมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless) ก็จะกลับกับกันมอเตอร์กระแสสลับตรงที่ขดลวดอาร์เมเจอร์จะอยู่นิ่ง และขดลวดสนามจะเป็นตัวหมุนแทน ดังรูปที่ ก.3 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าไม่มีแปรงถ่านและ Slip Ring



รูปที่ ก.3 การทำงานของมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน

เนื่องจากไม่มีแปรงถ่าน ดังนั้นจึงต้องอาศัยอุปกรณ์ในการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าให้มีเฟสและขนาดสัมพันธ์กับตำแหน่งของแกนหมุน คุณลักษณะที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือความราบเรียบของแรงบิดที่ถูกเหนี่ยวนำในกรณีของมอเตอร์กระแสตรง หากเราเพิ่มจำนวนของตัวเหนี่ยวนำ (Commutator) จะทำให้แรงบิดที่ได้ราบเรียบขึ้น ส่วนกรณีของเซอร์โวมอเตอร์

แบบไม่มีแปรงถ่าน แรงบิดที่ได้จะราบเรียบขึ้นเมื่อแบ่งขดลวดเหนี่ยวนำเป็น 3 เฟสและแปลงกระแสของแต่ละเฟสให้เป็นรูปคลื่นไซน์ (Sine Curve) ดังในรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน เมื่อมีขดลวดเหนี่ยวนำ 3 เฟส

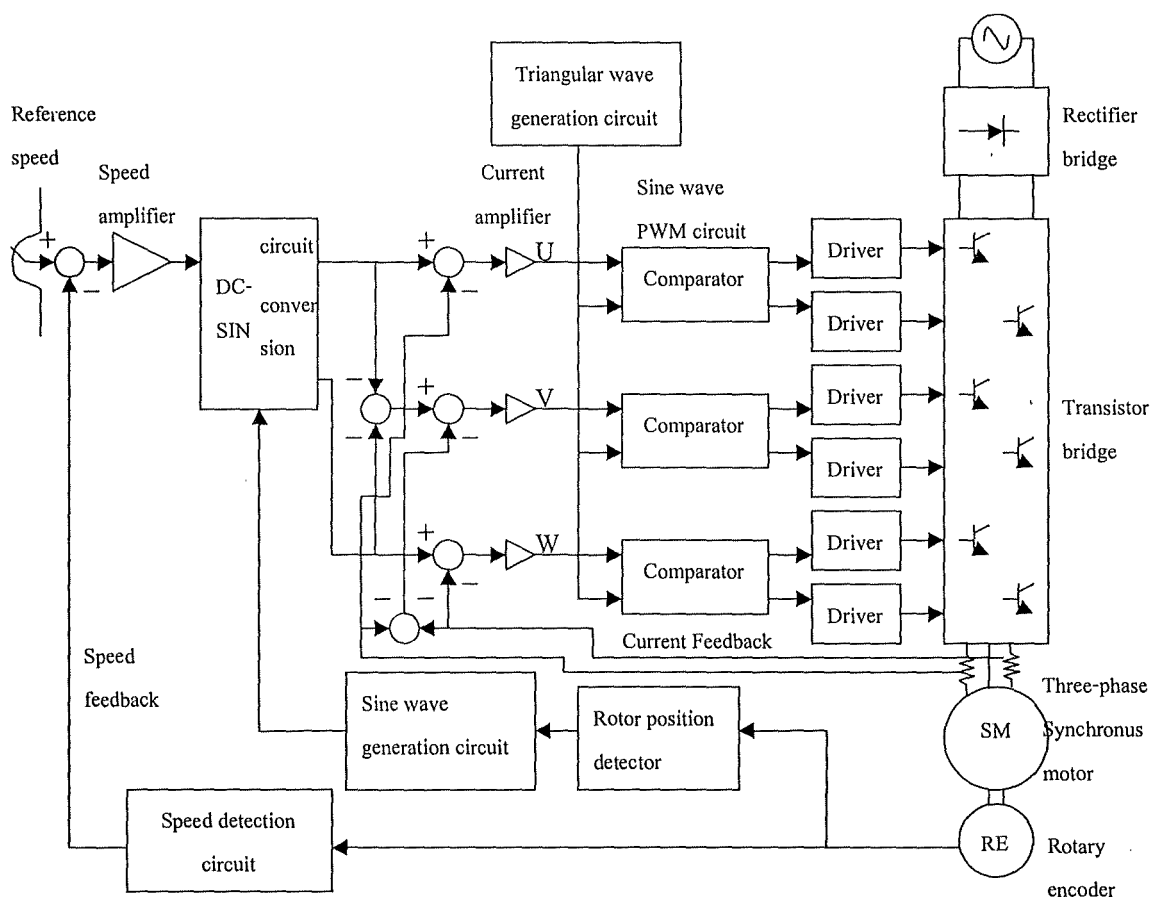
รูปที่ ก.4a และ ก.4b เป็นภาพหน้าตัดของมอเตอร์แบบ 3 เฟสซิงโครนัส มี U+, U-, V+, V-, W+ และ W- แสดงจุดเริ่ม (จุด) และปลาย (กากบาท) ของขดลวด เมื่อมอเตอร์ได้รับกระแสไฟ 3 เฟส ดังในรูป ก.4c ที่จุด A มีเพียงเฟส U เท่านั้นที่เป็นบวก ในขณะที่เฟส V และ W เป็นลบ ทั้งคู่ ดังนั้นทิศทางของกระแสในขดลวดจะเป็นดังรูป ก.4a และเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กที่ถูกเหนี่ยวนำมีทิศทางจากขั้วเหนือ (N) ไปยังขั้วใต้ (S) ตามหัวลูกศร เมื่อสนามแม่เหล็กที่เกิดจากแกนหมุนตัดกับฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการเหนี่ยวนำโดยทำมุมกันเป็นมุมฉากก็จะเกิดแรงบิดในการหมุนขึ้น ทำให้แกนหมุนหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ที่ตำแหน่ง B ฟลักซ์แม่เหล็กจะทำมุม 60 องศากับตำแหน่ง A

จะเห็นได้ว่าถ้าเราป้อนกระแส 3 เฟสให้ไหลผ่านขดลวดทั้ง 3 จะทำให้ได้สนามแม่เหล็กที่หมุนอย่างต่อเนื่อง ถ้าเฟสของคลื่น ไซน์และตำแหน่งของการหมุนทำมุมกันอย่างถูกต้องตลอด จะทำให้ได้แรงบิดที่ราบเรียบมากขึ้นและมอเตอร์จะมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้นเป็นหลักการทำงานของมอเตอร์แบบต่างๆ ต่อไปจะกล่าวถึงวงจรที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ หรือทำหน้าที่สร้างกระแสไฟฟ้าที่มีขนาดและเฟสเพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งของแกนหมุนตามต้องการ

1.4 วงจรควบคุมเซอร์โวมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน

ในการควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน จุดมุ่งหมายหลักก็คือเพื่อให้พัลส์แม่เหล็กมีทิศทางตั้งฉากกับกระแส ดังแสดงในรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 ระบบสำหรับควบคุมเซอร์โวมอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน

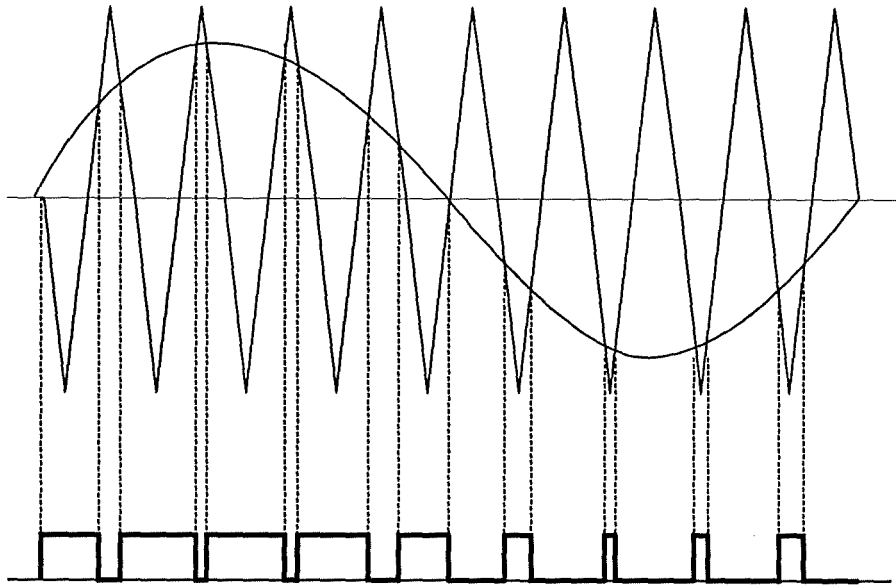
1.4.1 Rotor position detector เป็นวงจรที่รับสัญญาณจากตัววัดตำแหน่งของมอเตอร์ ได้แก่ Encoder แล้วแปลงสัญญาณดังกล่าวให้อยู่ในรูปที่วงจรสร้างคลื่นไซน์ (Sine wave generation circuit) สามารถรับได้

1.4.2 Sine wave generation circuit เป็นวงจรที่สร้างแบบของคลื่นรูปไซน์จากข้อมูลที่ได้จาก Rotor Position detector เนื่องจากใช้ไฟ 3 เฟส ดังนั้นจึงต้องสร้างแบบของคลื่นรูปไซน์ 2 แบบ สำหรับไฟ 2 เฟสคือเฟส U และเฟส W ส่วนไฟเฟสที่ 3 (เฟส V) สามารถคำนวณแบบได้จาก $V = -(U+W)$

1.4.3 DC-SIN conversion circuit ข้อมูลที่ได้จากวงจรก่อนหน้านี้จะเป็นแบบของคลื่นไซน์ที่ไม่ได้เป็นขนาดจริง วงจรนี้ทำหน้าที่ในการแปลงแบบดังกล่าวให้เป็นคลื่นไซน์ที่แท้จริง หลักการแปลงสัญญาณจะอาศัยผลคูณของ Output จากตัวขยายสัญญาณความเร็ว (Speed amplifier) กับสัญญาณของกระแสจากวงจร Sine wave generation

1.4.4 Triangular wave generator circuit เป็นวงจรสร้างกระแสคลื่นรูปฟันเลื่อย ที่ใช้สำหรับวงจร Sine wave PWM circuit เพื่อทำการแปลงคลื่นไซน์ไปเป็นพัลส์หลายๆ ลูก

1.4.5 Sine wave PWM circuit เมื่อเราได้กระแสคลื่นรูปไซน์ หากเราขยายขนาดของกระแสแล้วป้อนเข้ามอเตอร์โดยตรงจะเกิดปัญหาเมื่ออุณหภูมิของอุปกรณ์สูงขึ้น วิธีแก้ไขวิธีการหนึ่งคือการแปลงสัญญาณรูปไซน์เป็นพัลส์หลายๆลูกที่มีความกว้างแปรผันกับขนาดของคลื่นไซน์ ดังรูป ก.6 คลื่นรูปฟันเลื่อยเป็นคลื่นที่สร้างขึ้นมีความถี่เดียวหรือใกล้เคียงกับความถี่ในการสวิตช์ของทรานซิสเตอร์ ผลของความถี่ดังกล่าวที่มีต่อระบบคือหากความถี่ดังกล่าวมีค่าต่ำจะทำให้การตอบสนองของระบบช้า หากมีค่าสูงจะทำให้เกิดการสูญเสียกำลังไฟมาก



รูปที่ ก.6 การแปลงสัญญาณจากคลื่นรูปไซน์ไปเป็นพัลส์

2. อุปกรณ์ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ 2 แกน 6250

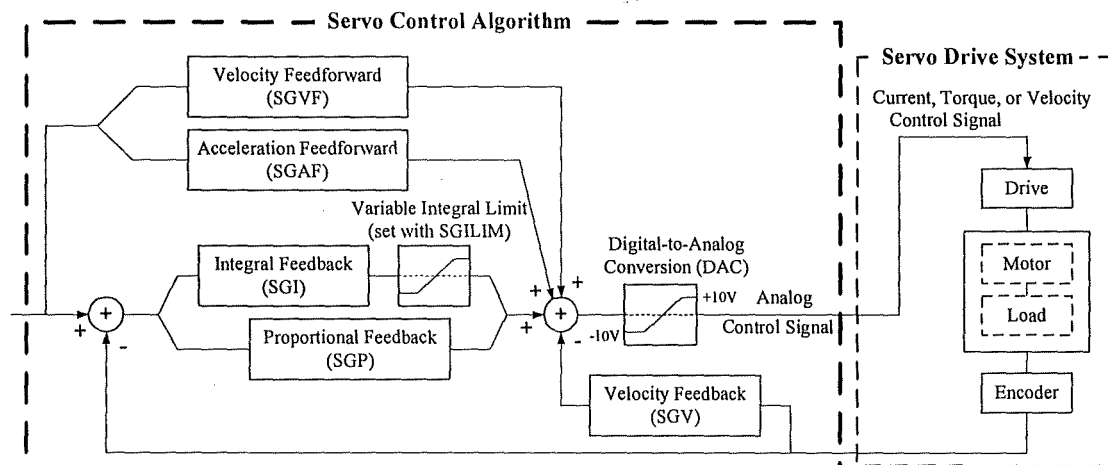
เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานมาตรฐานสำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนระบบที่ให้สัญญาณ Output แบบ Analog ขนาด ± 10 Volt ตัวควบคุม 6250 ใช้ตัวประมวลผล 2 ตัว ตัวที่หนึ่งเป็นไมโครโปรเซสเซอร์ใช้ประมวลผลโปรแกรมการเคลื่อนที่ระดับสูงและอีกตัวเป็นตัวประมวลผลดิจิทัล (Digital signal processing, DSP) สำหรับการควบคุมที่ซับซ้อนและใช้ความเร็วสูง การใช้ตัวประมวลผล 2 ตัว ช่วยให้ปฏิบัติตามคำสั่งได้เร็วขึ้น การโปรแกรม 6250 สามารถทำได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ PC ผ่านทางพอร์ตสื่อสาร RS232C หรือผ่านทางตัวเชื่อมต่อเฉพาะสำหรับ 6250 แต่ในงานวิจัยนี้ใช้การเชื่อมต่อโดย RS232C โดยเซตค่าพารามิเตอร์ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้กับพอร์ตสื่อสาร RS232C

Baud Rate	Data Bits	Parity	Stop Bits	Full Duplex	XON/XOFF
9600	8	None	1	/	Enabled

ตัวควบคุม 6250 ใช้วิธีการควบคุมแบบดิจิทัลในการควบคุมตำแหน่งและความเร็ว การควบคุมใช้สมการในการคำนวณสัญญาณควบคุม ในสมการจะประกอบด้วยตัวแปรของคำสั่ง, ตำแหน่งปัจจุบัน, ตำแหน่งในอดีต, และค่าเกณฑ์ต่างๆ สำหรับวิธีการควบคุมที่ใช้คือวิธี PIV&F พิจารณารูปที่ ก.7 แสดงวิธีการควบคุมดังกล่าว ในรูปส่วนที่เป็นการควบคุมจะมีบล็อกที่เป็นพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคือ Velocity Feedforward (SGVF), Acceleration Feedforward

(SGAF), Integral Feedback (SGI), Proportional Feedback (SGP), Velocity Feedback (SGV) ในรูปบล็อก Drive คือตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ที่ได้กล่าวถึงในตอนที่ผ่านมา



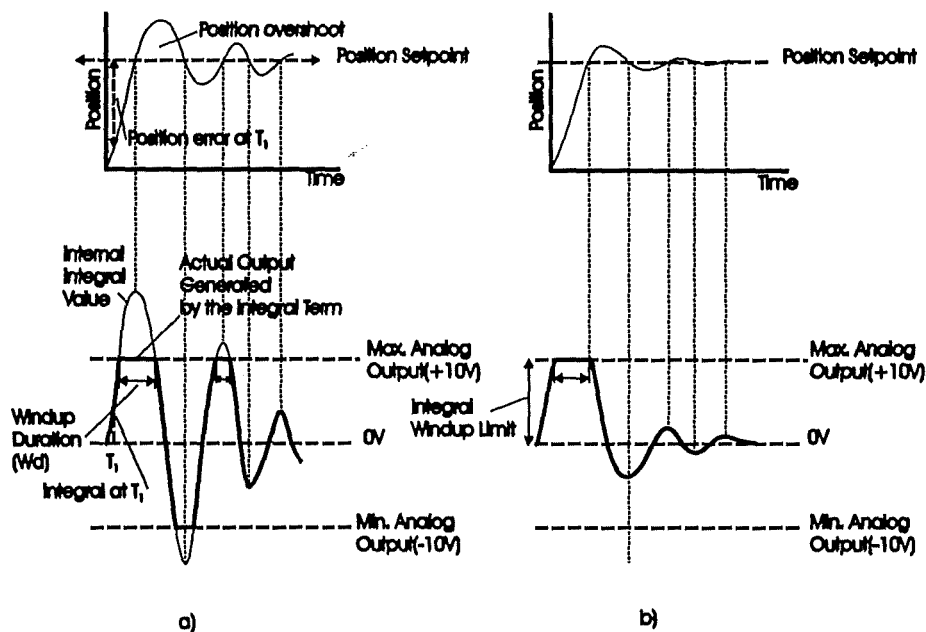
รูปที่ ก.7 วิธีการควบคุมแบบ PIV&F

2.1 Proportional Feedback Control (SGP) ใช้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งกับคำสั่งในการคำนวณสัญญาณควบคุม ค่าเกณฑ์ที่ใช้คือ SGP หน้าที่ของการควบคุมแบบนี้หนึ่งคือการกำจัดสัญญาณรบกวนเพราะเมื่อมีสิ่งรบกวนระบบทำให้เกิดความผิดพลาดของตำแหน่งขึ้น ระบบก็จะทำการปรับตัวเพื่อลดความผิดพลาดที่เกิด แต่ค่าเกณฑ์ที่ใช้หากปรับให้มีค่ามากเกินไป จะทำให้ระบบเกิดการสั่นและไม่เสถียรได้

2.2 Integral Feedback Control (SGI) สัญญาณควบคุมได้จากการอินทิเกรตค่าความผิดพลาดของตำแหน่งอัตราเร็วของการอินทิเกรตกำหนดได้จากค่า SGI หน้าที่หลักของการควบคุมแบบอินทิกรัลคือการเอาชนะความเสียดทานหรือแรงโน้มถ่วงเพื่อลดความผิดพลาดที่สถานะคงตัว (Steady State Error) ให้น้อยที่สุดหรือไม่มีเลย การทำงานของการควบคุมแบบนี้จะต่างจากแบบ Proportional คือเมื่อมีความผิดพลาดเกิดขึ้นระบบจะเพิ่มสัญญาณควบคุมตามการสะสมของความผิดพลาดเมื่อค่าสัญญาณควบคุมมีค่ามากพอที่จะขับเคลื่อนระบบให้ลดค่าความผิดพลาดลง หลักการดังกล่าวสามารถใช้ได้กับการติดตามเส้นทาง (tracking) ด้วยอัตราเร็วคงที่ได้

แต่การควบคุมแบบอินทิกรัลนี้มีข้อควรระวังคือเมื่อความผิดพลาดสะสมจนเกินความสามารถที่อุปกรณ์ควบคุมสามารถให้ได้สัญญาณควบคุมก็จะมีค่าอิมพัลส์ที่ระดับใดระดับหนึ่งซึ่งเราเรียกว่า Integrator windup เมื่อเกิด Integrator windup จะต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งกว่าที่ค่าสัญญาณควบคุมจะลดลงมาอยู่ในช่วงที่ตัวควบคุมสามารถทำได้ แต่ในขณะที่เกิดการอิมพัลส์นี้ก็จะเกิด Overshoot และมีการสั่นสะเทือนมาก ดังนั้นเมื่อค่าสัญญาณควบคุมถึงขีดจำกัดแล้วจึงควร

หยุดการอินทิเกรตความผิดพลาด จนกระทั่งค่าสัญญาณควบคุมจะกลับเข้าสู่ช่วงที่ทำงานได้ รูปที่ ก.8 แสดงการเกิด Integrator windup และการแก้ไขที่ได้กล่าวมา



รูปที่ ก.8 การเกิด Integrator windup

2.3 Velocity Feedback Control (SGV) สัญญาณควบคุมจะแปรตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง ค่าเกณฑ์ที่ใช้คือ SGV การควบคุมแบบนี้ทำหน้าที่ปรับความผิดพลาดของตำแหน่งก่อนที่ จะมีค่ามาก มันจะช่วยเพิ่มค่าความหน่วง (Damping) และเพิ่มเสถียรภาพของระบบด้วย ค่าเกณฑ์ SGV เมื่อมีค่ามากจะทำให้ความผิดพลาดของการติดตามเส้นทาง (tracking) ด้วยความเร็วคงที่มากขึ้นไปด้วย นอกจากนี้ยังทำให้ระบบช้าลงด้วย

2.4 Velocity Feedforward Control (SGVF) วัตถุประสงค์ของการควบคุมแบบ Velocity Feedforward Control คือเพื่อลดความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อระบบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ซึ่ง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจาก แรงเสียดทาน, ภาระแรงบิด, และการควบคุม Velocity feedback control สัญญาณควบคุมจะได้จากผลคูณของความเร็วของคำสั่งกับค่าเกณฑ์ SGVF ในกรณีที่ใช้งานแบบติดตาม (tracking) การควบคุมแบบนี้มีประโยชน์มากแต่ถ้าเป็นการทำงานแบบ Point-to-point ก็ไม่จำเป็นต้องใช้การควบคุมแบบนี้ การควบคุมแบบนี้จะไม่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบเลย

2.5 Acceleration Feedforward Control (SGAF) การควบคุมแบบนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามตำแหน่ง เมื่อมีการเพิ่มหรือลดความเร็ว แต่เช่นเดียวกับการควบคุมแบบ SGVF ในงานที่เป็นแบบ Point-to-point ไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้การควบคุมแบบนี้

คำสั่งต่างๆ ที่ใช้ควบคุม 6250 เป็นคำสั่งภาษา 6000 Series ของบริษัท Compumotor เป็นภาษาระดับสูง ประกอบด้วยรหัสที่เป็น ASCII ดังเช่นในตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ตัวอย่างคำสั่งต่างๆ ที่ใช้ควบคุมตัวควบคุม 6250

คำสั่ง	คำอธิบาย
Dx,x	ใช้กำหนดระยะทางในการเคลื่อนที่
Vx,x	ใช้กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่
Ax,x	ใช้กำหนดความเร่งในการเคลื่อนที่
GOxx	คำสั่งให้เริ่มเคลื่อนที่

3. อุปกรณ์ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ BLX30

มีลักษณะเช่นเดียวกับตัวควบคุม 6250 กล่าวคือเป็นตัวควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ สามารถติดต่อสื่อสารและโปรแกรมได้โดยคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม RS232C แตกต่างกันเพียงการใช้คำสั่งที่เป็นภาษา X-code ดังเช่นในตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 ตัวอย่างคำสั่งต่างๆ ที่ใช้ควบคุมตัวควบคุม BLX30

คำสั่ง	คำอธิบาย
1Dx	ใช้กำหนดระยะทางในการเคลื่อนที่
1Vx	ใช้กำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่
1Ax	ใช้กำหนดความเร่งในการเคลื่อนที่
G	คำสั่งให้เริ่มเคลื่อนที่

ภาคผนวก ข

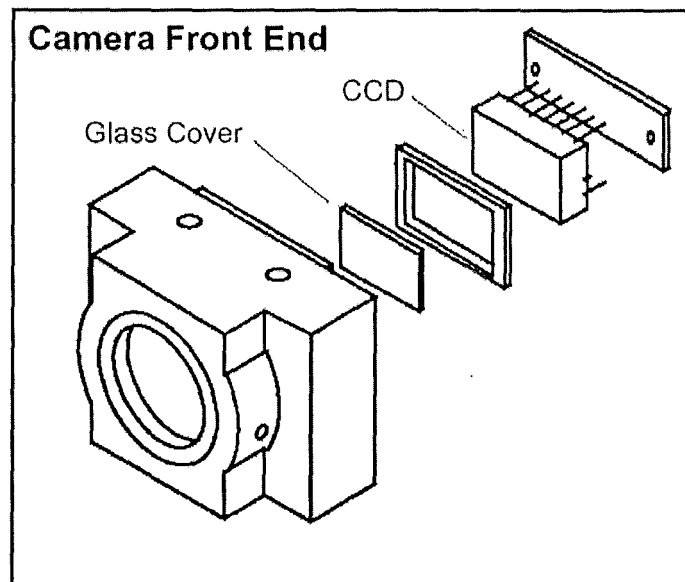
กล้อง CCD และการประมวลผลภาพ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่สำคัญที่จะต้องศึกษาและทำความเข้าใจในหลักการทำงานก็คือส่วนของกล้อง CCD (Charge Coupled Device) และการประมวลผลภาพ (Image Processing Card) ซึ่งมีหน้าที่หลักคือเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บบันทึกภาพ แล้วทำการสังเคราะห์ภาพนั้นให้อยู่ในลักษณะที่จะสามารถนำไปคำนวณหาพิกัดได้ง่าย

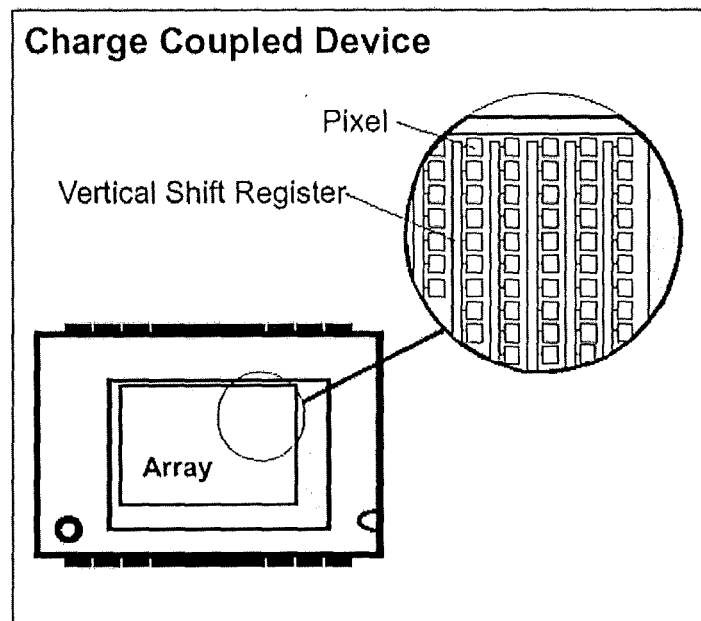
ข.1 กล้อง CCD (Charge Coupled Device)

ข.1.1 หลักการทำงานของกล้อง CCD

กล้อง CCD ทำงานโดยการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่ออนุภาคของแสง (Photon) ตกกระทบไดโอด (Diode) ไดโอดก็จะเกิดการสะสมพลังงานแล้วแปรเปลี่ยนไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยปกติกล้อง CCD ทั่วไปจะมีไดโอดจำนวนมากเรียงกันอยู่เป็นแถวลำดับ (Array) ด้านหลังเลนส์ ดังรูปที่ ข.1 และ ข.2 ซึ่งความละเอียดของภาพที่ได้ก็จะขึ้นอยู่กับจำนวนไดโอดในแถวลำดับ ไดโอดเหล่านี้จะส่งสัญญาณไฟฟ้าได้ 2 วิธีคือ

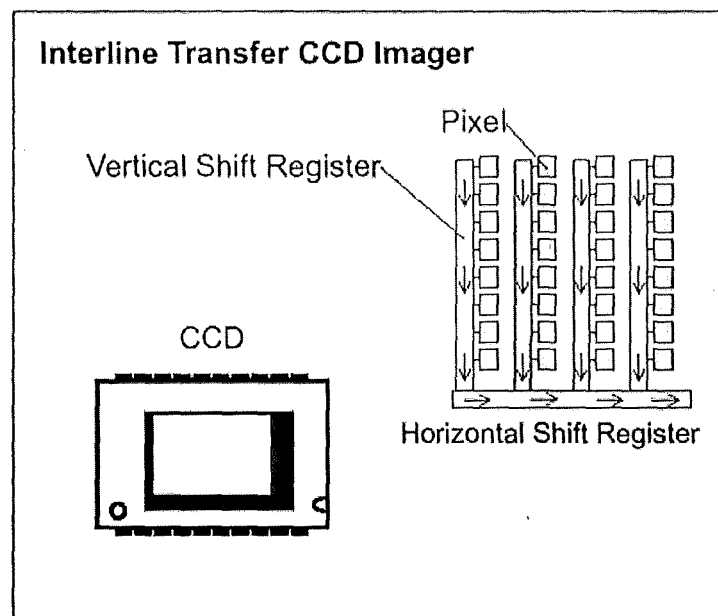


รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบของกล้อง CCD



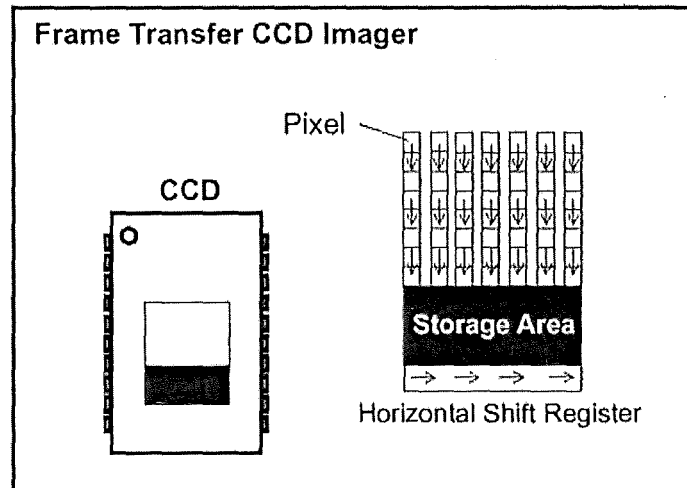
รูปที่ ข.2 การเรียงตัวของไดโอดเป็นแถวลำดับ

ข.1.1.1 Interline Transfer วิธีนี้ไดโอดจะส่งสัญญาณผ่าน Vertical Shift Register ภายในแถวของมันเองก่อน หลังจากนั้น Vertical Shift Register จึงจะส่งสัญญาณต่อไปให้ Horizontal Shift Register ซึ่งจะส่งสัญญาณต่อออกไปยังวงจรที่ใช้ควบคุมต่อไป ดังรูปที่ ข.3



รูปที่ ข.3 วิธี Interline Transfer

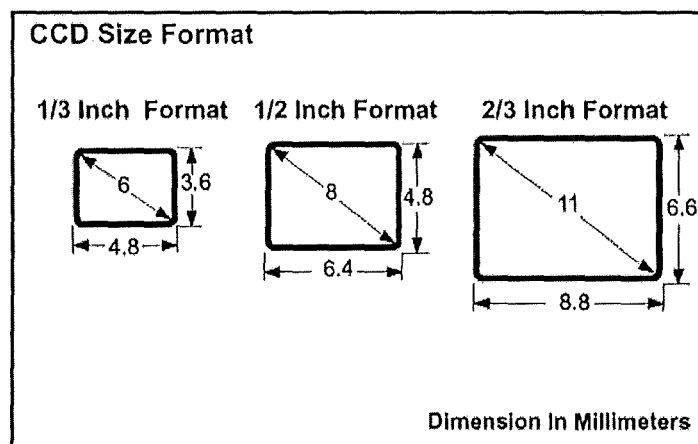
ข.1.1.2 Frame Transfer วิธีนี้ไดโอดจะทำหน้าที่ส่งสัญญาณภายในแถวด้วยตัวมันเอง โดยจะส่งไปยัง Storage Area แล้วจึงส่งผ่านต่อไปยัง Horizontal Shift Register ซึ่งจะส่งสัญญาณต่อออกไปยังวงจรภายนอก ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 วิธี Frame Transfer

ข.1.2 การกำหนดขนาดของกล้อง CCD

การกำหนดขนาดของกล้อง CCD จะมีลักษณะคล้ายกับการกำหนดขนาดของโทรทัศน์ กล่าวคือจะใช้การวัดขนาดตามแนวทแยงมุมของแถวลำดับของไดโอด ดังรูปที่ ข.5 ซึ่งแสดงขนาดของแถวลำดับ 3 ขนาด จะเห็นได้ว่า แถวลำดับที่กำหนดขนาด 1/3 (0.333) นิ้ว จะมีขนาดจริงเล็กกว่าเล็กน้อย คือมีขนาดประมาณ 0.236 นิ้ว (6 มิลลิเมตร) เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดขนาดตามมาตรฐานเดิมของการกำหนดขนาดหลอดภาพของโทรทัศน์



รูปที่ ข.5 การกำหนดขนาดของแถวลำดับ

ขนาดของแฉวลำดับที่เล็ก ก็จะทำให้กล้องมีขนาดเล็กลงไปด้วย แต่ก็ทำให้พื้นที่ที่กล้องมองเห็น (Field of View) เล็กลงไปด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงต้องเลือกขนาดของกล้องให้เหมาะสมกับงานที่จะต้องใช้

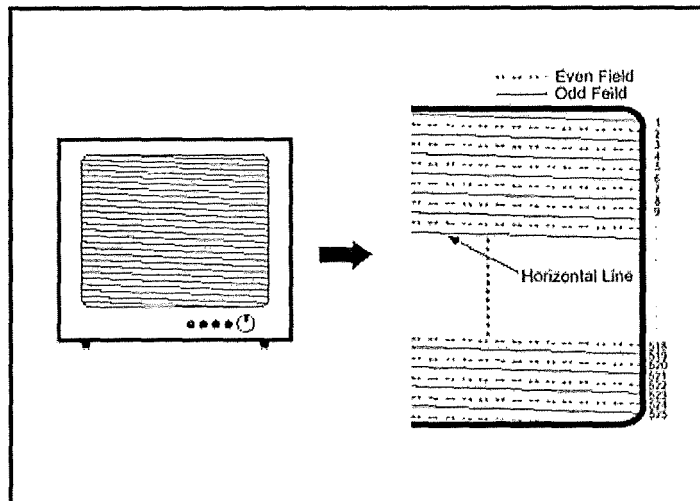
ข.1.3 ระบบภาพ

ระบบภาพที่ใช้กันในปัจจุบันจะมีอยู่ 4 ระบบคือ RS-170 และ NTSC (National Television System Committee) ซึ่งใช้กันในแถบอเมริกาเหนือ ส่วนระบบ CCIR (International Radio Consultative Committee) และ PAL (Phase Alternation Line) จะใช้กันในทวีปยุโรป โดยทั่วไประบบ RS-170 และ CCIR จะใช้กับกล้องขาวดำ ระบบ NTSC กับ PAL จะใช้กับกล้องสี ในการเลือกใช้ระบบใดนั้นจะต้องดูอุปกรณ์โดยรวมด้วย เช่น การ์ดประมวลผลภาพใช้ระบบ CCIR กล้องที่จะเลือกใช้ก็ต้องเป็นระบบ CCIR ด้วยเช่นกัน

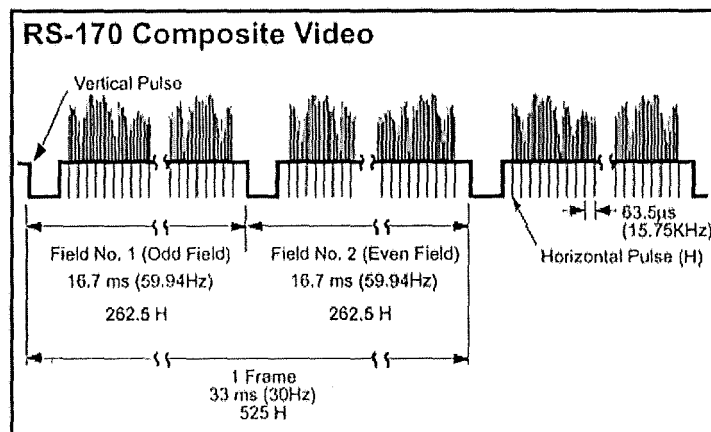
ข.1.4 ความถี่ในการทำงานของกล้อง CCD

ในการทำงานร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ เช่น การ์ดประมวลผลภาพ สัญญาณที่กล้องส่งออกมาจะต้องมีจังหวะ (Timing) สอดคล้องกับการ์ดประมวลผลภาพ ซึ่งก็คือความถี่ในการทำงานของกล้องนั่นเอง แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงความถี่ของกล้อง จะขออธิบายถึงระบบการสแกนภาพของกล้องก่อน

การสแกนภาพของกล้องนั้นแบ่งออกได้เป็น 2 วิธีคือ แบบ Interlace กับแบบ Non-Interlace แบบ Interlace จะใช้วิธีสแกนภาพทีละเส้น (Horizontal Line) โดยเริ่มจากเส้นคู่ (หมายถึงเส้นที่ 0, 2, 4, ...) เมื่อสแกนจนจบเส้นก็จะสแกนคู่เส้นถัดไป จนเมื่อสแกนเส้นคู่จนหมด จะได้ภาพย่อย 1 ภาพ หลังจากนั้นก็จะเริ่มสแกนเส้นคี่ (เส้นที่ 1, 3, 5, ...) ไปเรื่อยๆ จนหมด ได้ภาพย่อยอีก 1 ภาพ แล้วนำภาพย่อยจากการสแกนเส้นคู่กับเส้นคี่มารวมกัน ก็จะได้ภาพสมบูรณ์ 1 ภาพ ดังรูปที่ ข.6 ช่วงเวลาในการสแกนเส้นแต่ละเส้นจะมีค่าเท่ากับคาบของ Horizontal Pulse ส่วนช่วงเวลาในการสแกนกลุ่มเส้นคู่ (เท่ากับช่วงเวลาที่ใช้สแกนกลุ่มเส้นคี่) จะมีค่าเท่ากับคาบของ Vertical Pulse ดังรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.6 วิธีสแกนภาพแบบ Interlace



รูปที่ ข.7 คาบการทำงานของกล้อง CCD ในระบบ RS-170

ส่วนแบบ Non-Interlace นั้นจะทำการสแกนเส้นทุกๆ เส้น ไปเรื่อยๆ โดยไม่แบ่งแยกเส้นคู่หรือเส้นคี่แต่อย่างใด

ความถี่ในการทำงานของกล้องระบบ RS-170 กับ NTSC ที่สแกนภาพแบบ Interlace จะส่งภาพย่อย 2 ภาพออกมาทุกๆ 1/30 วินาที (ภาพย่อย 2 ภาพจะรวมเป็นภาพสมบูรณ์ 1) นั่นคือภาพย่อย 1 ภาพจะถูกส่งออกมาทุกๆ 1/60 วินาที ซึ่งจะตรงกับ 1 คาบของ Vertical Pulse และ 1 คาบของ Vertical Pulse ประกอบด้วย Horizontal Pulse 262.5 ลูก หรือคิดเป็น Horizontal Line จำนวน 262.5 เส้น กล่าวโดยสรุปคือ ในทุกๆ 1/30 วินาทีจะมีภาพย่อย 2 ภาพถูกส่งออกมารวมเป็นภาพสมบูรณ์ 1 ภาพซึ่งมีจำนวน Horizontal Line 525 เส้นนั่นเอง

ในระบบ RS-170 กับ NTSC คาบของ Vertical Pulse จะยาวประมาณ 1/60 วินาที (ความถี่ 60 Hz) ซึ่งจะเป็นช่วงเวลาที่กล้องใช้ในการสแกนเส้นภาพในแต่ละกลุ่มเส้น (Horizontal Line) ซึ่งจะมี 2 กลุ่มคือกลุ่มเส้นคี่ และกลุ่มเส้นคู่ ในแต่ละกลุ่มเส้นจะประกอบด้วยเส้นภาพจำนวน 262.5 เส้น ส่วน Horizontal Pulse จะมีคาบประมาณ 1/15750 วินาที (ความถี่ 15.75 kHz) ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่กล้องใช้ในการสแกนเส้นภาพ 1 เส้น

ส่วนในระบบ CCIR กับ PAL นั้น Vertical Pulse จะมีคาบ 1/50 วินาที (ความถี่ 50 Hz) ประกอบด้วย Horizontal Line จำนวน 312.5 เส้น นั่นคือ ในทุกๆ 1/25 วินาทีจะมีภาพย่อย 2 ภาพถูกส่งออกมารวมเป็นภาพสมบูรณ์ 1 ภาพซึ่งมีจำนวน Horizontal Line 625 เส้น

ข.1.5 ขนาดรูรับแสงและความเร็วชัตเตอร์

ในการรับแสงของไดโอดในกล้อง CCD นั้น จะมีปัจจัยที่สำคัญดังนี้ คือ ขนาดของรูรับแสง และความเร็วชัตเตอร์ โดยจะขออธิบายความหมายดังนี้

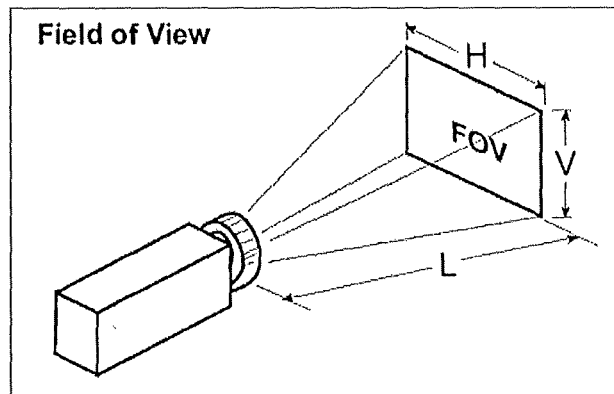
ขนาดรูรับแสงของกล้อง CCD โดยปกติจะหมายถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเลนส์ ซึ่งจะหมายความว่าไปถึงปริมาณแสงที่ไดโอดจะได้รับ ถ้าขนาดของรูรับแสงมาก แสงก็จะผ่านเลนส์ไปได้มาก และไดโอดก็จะได้รับแสงมากเช่นกัน อันจะมีผลให้ภาพที่ได้มีความสว่าง แต่ถ้ารูรับแสงมีขนาดเล็ก แสงจะผ่านเลนส์ไปถึงไดโอดได้น้อย ภาพที่ได้ก็จะค่อนข้างมืด

ความเร็วชัตเตอร์ของกล้อง CCD จะหมายถึงช่วงเวลาที่ไดโอดถูกอนุภาคแสง (Photon) และทำการสะสมประจุ แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าส่งออกไปยังวงจรควบคุม ถ้าความเร็วชัตเตอร์มีค่าต่ำ หมายถึง เวลาที่ไดโอดสะสมประจุจะมาก ก็จะทำให้ภาพสว่างมาก แต่ถ้าความเร็วชัตเตอร์มีค่าสูง เวลาที่ไดโอดสะสมประจุก็จะน้อย ภาพก็จะค่อนข้างมืด

ทั้งขนาดรูรับแสงและความเร็วชัตเตอร์จะต้องมีความสัมพันธ์กัน เพื่อที่จะให้ภาพที่ได้มีความสว่างที่เหมาะสม เช่น เมื่อรูรับแสงของกล้อง (ขนาดของเลนส์) มีขนาดใหญ่ ไดโอดจะสะสมประจุได้มาก ความเร็วชัตเตอร์ก็ต้องสูงเพื่อไม่ให้ไดโอดสะสมประจุมากเกินไป แต่ถ้ารูรับแสงของกล้องมีขนาดเล็ก ความเร็วชัตเตอร์ก็ต้องต่ำ เพื่อให้ไดโอดได้สะสมประจุได้นานขึ้นนั่นเอง

ข.1.6 พื้นที่การมองเห็น

พื้นที่การมองเห็นของกล้อง CCD (Field of View) จะมีพื้นที่เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้าง H และความสูง V โดยวัดห่างจากกล้องเป็นระยะทาง L ดังรูปที่ ข.8 จะสามารถคำนวณได้จากสูตรในตารางที่ ข.1



รูปที่ ข.8 พื้นที่การมองเห็นของกล้อง CCD

ตารางที่ ข.1 สูตรการหาพื้นที่การมองเห็น

ขนาด กล้อง	1 นิ้ว	2/3 นิ้ว	1/2 นิ้ว
H	$\frac{12.8 \times L}{f}$	$\frac{8.8 \times L}{f}$	$\frac{6.4 \times L}{f}$
V	$\frac{9.6 \times L}{f}$	$\frac{6.6 \times L}{f}$	$\frac{4.8 \times L}{f}$

โดยที่ f = ความยาวโฟกัสของเลนส์

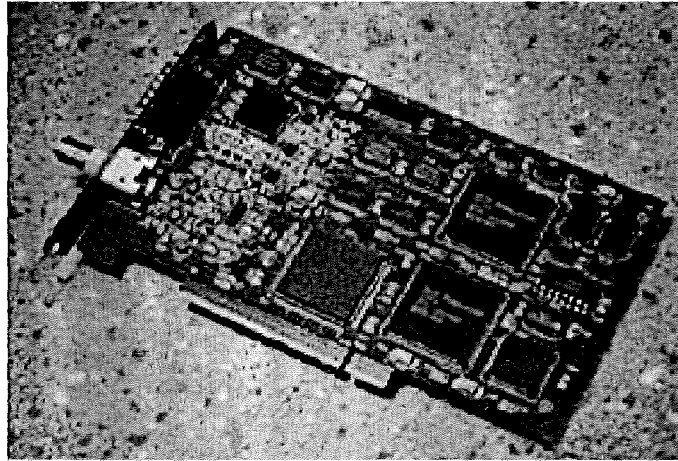
H = ความกว้างของพื้นที่การมองเห็น

V = ความสูงของพื้นที่การมองเห็น

L = ระยะห่างจากกล้อง

ข.2 การ์ดประมวลผลภาพ

การ์ดประมวลผลภาพ (Image Processing Card) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เชื่อมต่อกับกล้อง CCD กับคอมพิวเตอร์ มีหน้าที่รับสัญญาณภาพมาจากกล้อง CCD แล้วนำสัญญาณนั้นมาประมวลผลในลักษณะต่างๆ ที่ผู้ใช้ต้องการ เช่น ปรับแสง ปรับความคมชัด บันทึกรูปภาพ ฯลฯ ดังรูปที่ ข.9 แสดงการ์ดประมวลผลภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือรุ่น DT3155 ของบริษัท Data Translation จำกัด



รูปที่ ข.9 การ์ดประมวลผลภาพรุ่น DT3155 ของบริษัท Data Translation จำกัด

ข.2.1 การ์ด DT3155

การ์ด DT3155 นี้เป็นการ์ดประมวลผลภาพขาวดำแบบดิจิทัล ใช้พอร์ต PCI ในการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ สามารถรับสัญญาณอินพุตจากกล้อง CCD ได้ 4 ช่องสัญญาณ และรับรูปแบบของสัญญาณได้ 4 แบบคือ แบบ RS-170, NTSC, CCIR และ PAL ลักษณะภาพขาวดำจะเป็นแบบ 8 บิต (256 ระดับสีเทา) ตั้งความละเอียดได้ 2 ระดับคือ 640×480 จุด (กว้าง \times สูง) สำหรับระบบ RS-170 และ NTSC และ 768×576 จุด (กว้าง \times สูง) สำหรับระบบ CCIR และ PAL

ข.2.2 การใช้งานการ์ด DT3155

ในการใช้งานการ์ด DT3155 นี้สามารถควบคุมการทำงานโดยใช้ภาษาซี โดยเรียกฟังก์ชันที่ทางบริษัทได้พัฒนาขึ้น ตัวอย่างฟังก์ชันที่สามารถเรียกใช้งานได้ เช่น

ข.2.2.1 ฟังก์ชัน InitBoard เมื่อเรียกใช้ฟังก์ชันนี้ การ์ด DT3155 จะทำการตรวจสอบตัวเองว่าพร้อมใช้งานหรือไม่ เป็นฟังก์ชันที่ต้องเรียกใช้ก่อนฟังก์ชันอื่น

ข.2.2.2 ฟังก์ชัน TakePicture ใช้สำหรับถ่ายภาพที่ได้จากกล้อง CCD แล้วเก็บไว้ในหน่วยความจำ

ข.2.2.3 ฟังก์ชัน SetWBCurrentLevels เป็นฟังก์ชันที่ใช้สำหรับปรับระดับความขาวและดำของภาพ ระดับความขาวจะอยู่ในช่วง $351100 \mu\text{Volt}$ (ขาวน้อย) ถึง

1009000 μ Volt (ขามาก) และระดับความดำจะอยู่ในช่วง 1275 μ Volt (ดำมาก) ถึง 306000 μ Volt (ดำน้อย)

ข.2.2.4 ฟังก์ชัน StartLiveVideo เป็นฟังก์ชันที่ใช้เปิดการส่งภาพอย่างต่อเนื่อง (ถ่ายทอดสด)

ข.2.2.5 ฟังก์ชัน OpenBMPFile เป็นฟังก์ชันที่ใช้เปิดไฟล์ภาพที่มีรูปแบบเป็น Bitmap (นามสกุล BMP) แล้วเก็บไว้ในหน่วยความจำ

ข.2.2.6 ฟังก์ชัน SaveBMPFile เป็นฟังก์ชันที่ใช้บันทึกภาพในหน่วยความจำเป็นไฟล์ที่มีรูปแบบเป็น Bitmap

รายการอ้างอิง

- [1] Bosch, J.A. Coordinate Measuring Machines and Systems. New York: Marcel Dekker, 1995.
- [2] Sojka, E. A new algorithm for direct corner detection in digital images. VŠB-TU Technical Report, 2002.
- [3] Tsai, R. Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. 3,4(Aug,1987): 323–344.
- [4] Trucco, E., and Verri, A. Introductory Techniques for 3-D Computer Vision. Prentice Hall, 1998.
- [5] Jain, R., Kasturi, R., and Schunck, B. Machine Vision. McGraw-Hill, 1995.
- [6] Gonzalez, R.C., and Woods, R.E. Digital image processing. Addison-Wesley, 1992.
- [7] นพศักดิ์ ธรรมศักดิ์ภูษณาวิณ. เครื่องวัดพิทัก 3 มิติ แบบใช้แถบแสงเลเซอร์และกล้องตัวเดียว. ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
- [8] ปัญญา ดีประเสริฐกุล, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. อุปกรณ์วัดพิทัก 3 มิติที่ใช้ในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีพื้นผิวต่อเนื่องและโปรแกรมเชื่อมโยงกับ CATIA. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 13, 2542.
- [9] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, ธิตินพล ศรีททาพร. การพัฒนาสถานะการทำงานบนเครือข่ายสำหรับระบบปฏิบัติการระยะไกลบนอินเทอร์เน็ตเพื่อระบบการผลิต. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 14, 2543.
- [10] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

