

การพัฒนาระบบสตอรี่ไอวิชันสามมิติความแม่นยำสูง เพื่อระบุความสูงของ
HGA ในงานประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



นายศิวนท์ ลมชิด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาแมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2556

**DEVELOPMENT OF HIGH PRECISION 3D STEREO
VISION SYSTEM FOR HGA HEIGHT MEASUREMENT
IN HARD DISK DRIVE ASSEMBLY PROCESS**

Siwanat Lomchid



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechatronics
Suranaree University of Technology
Academic Year 2013**

การพัฒนาระบบสตอรี่ไอวีชันตามมิติความแม่นยำสูง เพื่อระบุความสูงของ HGA ใน
งานประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ธีทัต คลวิชัย)

ประธานกรรมการ

(รศ. ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.จิระพล ศรีเจริญผล)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศิวนท์ ลมซิด : การพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูง เพื่อระบุความสูงของ HGA ในงานประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ (DEVELOPMENT OF HIGH PRECISION 3D STEREO VISION SYSTEM FOR HGA HEIGHT MEASUREMENT IN HARD DISK DRIVE ASSEMBLY PROCESS) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว, 85 หน้า.

ในอุตสาหกรรมการประกอบฮาร์ดดิสก์ไครฟ์นั้น ขั้นตอนในการหยิบ-จับ HGA เพื่อนำไปประกอบกับชิ้นส่วนต่างๆของฮาร์ดดิสก์ เป็นอีกหนึ่งขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ซึ่งความเร็วและความแม่นยำในการหยิบ-จับและวาง HGA ที่ตรงตำแหน่งของระบบหยิบ-จับ HGA แบบอัตโนมัติเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ต้องได้รับการควบคุมเป็นอย่างมาก แต่ปัญหาที่พบบ่อยในระหว่างขั้นตอนการหยิบ-จับและวาง HGA ของระบบหยิบ-จับ HGA แบบอัตโนมัติคือการที่ HGA หลุดจากหัวหยิบ-จับ หรือวางไม่ตรงตำแหน่งอันเนื่องมาจากความสูงของ HGA ขณะวางบนฐานรอง HGA และความสูงของฐานรอง HGA ในแต่ละตำแหน่งไม่คงที่ ประกอบกับระบบไม่สามารถกำหนดระยะความสูงระหว่างหัวหยิบ-จับกับ HGA ได้ทุกตัว เพราะไม่สามารถติดตั้งกล้องที่กำหนดระยะความสูงจากด้านข้าง หรือติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะห่าง (displacement sensor) ได้ อันเนื่องมาจากขอบเขตของรูปทรงของถาดรอง HGA และข้อจำกัดในด้านพื้นที่ในการติดตั้ง ดังนั้นระยะหยิบหรือวางที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ HGA หลุดจากหัวหยิบ-จับ หรือวางได้ไม่ตรงตำแหน่ง และทำให้เกิดการสูญเสียทรัพยากร HGA ขึ้นมาได้ งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบสเตอริโอวิชันสามมิติที่มีความแม่นยำสูงเพื่อใช้ในการระบุความสูงของ HGA แต่ละตัวที่วางอยู่บนฐานรอง HGA ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรได้

SIWANAT LOMCHID : DEVELOPMENT OF HIGH PRECISION 3D
STEREO VISION SYSTEM FOR HGA HEIGHT MEASUREMENT IN HARD
DISK DRIVE ASSEMBLY PROCESS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
ARTHIT SRIKAEW, Ph.D., 85 PP.

STEREO VISION/HIGH PRECISION/MULTIPLE REGRESSION CALIBRATION/
PICK & PLACE SYSTEM

In hard disk drive assembly industry, Head Gimbal Assembly (HGA) pick & place system is one of the most important part of hard disk drive assembly process in which the speed and precision of positioning have to be controlled. However, one problem of HGA pick & place process is HGA is dropped from pick & place head which is classified as rejected part or placed at the wrong position. This is because the height of HGA and its supported element are not consistent and the system cannot integrate a side camera or displacement sensor to specify HGA height due to the HGA support element design and mechanical space limitation. This thesis has developed the high precision 3D stereo vision system to specify the individual height of HGA which is placed on HGA support element within $\pm 50\mu\text{m}$ of measurement error.

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2013

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีทั้งด้านวิชาการและด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลกลุ่มต่างๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ศรีแก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน ที่ให้คำแนะนำปรึกษาและแนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิจัย รวมถึงได้ช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ และอีกทั้งได้ให้โอกาสทำให้ผู้วิจัยได้มีประสบการณ์ในการทำงาน และ ให้กำลังใจกับผู้วิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ประจำวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้ให้ความรู้ คำชี้แนะและ โอกาสแก่ผู้วิจัยในการศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณอัญชุตี รักค่านกลาง เลขานุการและธุรการประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเอกสารระหว่างการศึกษา

ขอขอบคุณ คุณกัศกร ต่อชีพ เจ้าหน้าที่ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านเอกสารระหว่างการศึกษา

ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายที่คอยถามไถ่ให้กำลังใจในการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่างๆ ทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน ที่ได้ให้โอกาสผู้วิจัยได้ศึกษาจบจนถึงการศึกษาระดับปริญญาโท และได้ให้กำลังใจทุกอย่างไม่่ว่าผู้วิจัยจะประสบปัญหาใดๆ รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ได้ให้ความรัก ความอบอุ่น ความห่วงใยและให้การสนับสนุนทางด้านการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

ศิวนท์ ลมชิด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 ขั้นตอนปกติของการหีบ HGA ของหัวหีบจับอัตโนมัติ.....	3
1.1.2 ขั้นตอนของการหีบ HGA ของหัวหีบ-จับอัตโนมัติที่เกิดปัญหา ระหว่างการหีบ HGA.....	5
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	8
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	8
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	8
1.4.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	8
1.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	9
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	10
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 บทนำ.....	11
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2.1 การระบุนวลของวัตถุเป้าหมายด้วยการใช้ทฤษฎี Epipolar geometry.....	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.2 การระบุความถี่ของวัตถุเป้าหมายโดยการสอบเทียบด้วยทฤษฎีการถดถอยพหุคูณ (multiple regressions)	12
2.2.2.1 การสอบเทียบ (Calibration)	13
2.2.2.2 หลักการของการถดถอยพหุคูณ	13
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
2.4 สรุป	25
3 การพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูง เพื่อระบุความสูงของ HGA	
 ในงานประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	26
3.1 บทนำ	26
3.2 การคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าความสูงของ HGA	26
3.3 ภาพรวมของระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูง	30
3.3.1 ส่วนประกอบของระบบ	30
3.3.1.1 กล้อง	30
3.3.1.2 เลนส์	31
3.3.1.3 IEEE 1394 Standard Interface PCI Card	32
3.3.1.4 สายสัญญาณเชื่อมต่อ IEEE 1394 (IEEE 1394 cable)	33
3.3.1.5 ซอฟต์แวร์ Vision Pro	34
3.3.1.6 ซอฟต์แวร์ C#	34
3.3.1.7 อุปกรณ์ส่องสว่าง (Light source)	34
3.3.1.8 อุปกรณ์ตรวจจับระยะ (Displacement sensor)	35
3.3.1.9 ชุดจับยึดกล้อง	36
3.3.1.10 Vernier Height gauge	36
3.3.1.11 Calibration gauge	37
3.3.2 การติดตั้งระบบ	38
3.3.3 โปรแกรมควบคุมและการทำงานของระบบ	39
3.3.3.1 ส่วนปฏิบัติการ (Operation)	39
3.3.3.2 ส่วนของการตรวจสอบและปรับตั้งค่า (Diagnostic)	40

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.3.3	ส่วนของการสอบเทียบ	40
3.4	การทดลอง	40
3.4.1	การทดสอบความสามารถในการระบุพิกัด x, y ของตำแหน่งที่กำหนด	40
3.4.2	การสอบเทียบระหว่างค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA เทียบกับ ค่าพิกัด x1, y1, x2, y2.....	45
3.4.2.1	ขั้นตอนการสอบเทียบ.....	46
3.4.3	การระบุค่าความสูงของ HGA	48
3.4.4	การระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายชนิดอื่นและการปรับปรุงโปรแกรม	50
3.4.4.1	การเปลี่ยนวัตถุเป้าหมายจาก HGA เป็น Calibration gauge	50
3.4.4.2	การพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้จริง	51
3.5	สรุป.....	57
4	อภิปรายผลการทดลอง	58
4.1	บทนำ	58
4.2	อภิปรายการจัดสร้างและติดตั้งระบบสเตอริโอวิชัน.....	58
4.2.1	การจัดเตรียมและเลือกอุปกรณ์เพื่อนามาสร้างระบบสเตอริโอวิชัน	58
4.2.1.1	กล้อง	59
4.2.1.2	เลนส์	59
4.2.1.3	อุปกรณ์ส่องสว่าง.....	60
4.2.1.4	อุปกรณ์สำหรับปรับระดับความสูงของ HGA.....	61
4.2.1.5	อุปกรณ์สำหรับวัดระดับความสูงของ HGA.....	61
4.2.2	การติดตั้งระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ.....	61
4.2.2.1	การติดตั้งกล้องและเลนส์.....	61
4.2.2.2	การติดตั้งอุปกรณ์ส่องสว่าง.....	62
4.3	อภิปรายผลการทดลอง	63
4.3.1	ปัจจัยที่อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการระบุค่าความสูงของวัตถุ เป้าหมาย	67

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ข้อผิดพลาดและการปรับปรุงแก้ไขระบบ	68
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ	69
4.4.1 การเตรียมความพร้อมสำหรับการทำ GR&R.....	69
4.4.2 การออกแบบวิธีการทำ GR&R.....	70
4.4.3 ขั้นตอนการทำ GR&R.....	70
4.4.4 วิเคราะห์ผล GR&R.....	71
4.5 การนำระบบไปทดสอบใช้งานจริง	72
4.5.1 ภาพรวมของการนำระบบสแตอริโอวิชชันสามมิติมาติดตั้งกับชุดหัวคู HGA.....	73
4.5.2 ทดสอบการหยิบ – จับ HGA โดยอาศัยการควบคุมความสูงของหัวคู HGA ด้วยระบบสแตอริโอวิชชันสามมิติ	74
4.6 สรุปผล	77
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	79
5.1 สรุปผล	79
5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัยและการแก้ไขปรับปรุง.....	80
5.2.1 ปัญหาที่พบในงานวิจัย	80
5.2.2 การแก้ไขและปรับปรุง.....	81
5.3 การนำระบบไปทดลองใช้งานจริง.....	83
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	83
รายการอ้างอิง	84
ประวัติผู้เขียน	85

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ข้อมูลพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ที่ระบุได้จาก ความสูงของ HGA 5 ระดับ.....	47
3.2	ความสูงของ calibration gauge ในแต่ละระดับที่ถูกวัดด้วยเครื่องวัด CMM	51
3.3	ความสูงของ calibration gauge ที่ระบบระบุได้.....	54
3.4	ความสูงของ calibration gauge ที่ระบบระบุได้หลังจากที่ทำการสอบเทียบแบบ ครอบคลุมพื้นที่	56
4.1	ผลการทดลองหีบจับ HGA ที่มีความสูงต่างกัน 0.9 มิลลิเมตร	76
4.2	ผลการทดลองหีบ - จับ HGA เพื่อทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของระบบ	77

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	จำนวนของ HGA ที่สูญเสียไปต่อสัปดาห์ซึ่งเกิดจากการที่ HGA หลุดจากหัวหีบ-จับแบบอัตโนมัติ.....	2
1.2	ลักษณะการวางชิ้นงาน HGA บนถาดรอง HGA ในสายการผลิต	2
1.3	ขั้นตอนปกติของการหีบ HGA ลำดับที่ 1	3
1.4	ขั้นตอนปกติของการหีบ HGA ลำดับที่ 2	3
1.5	ขั้นตอนปกติของการหีบ HGA ลำดับที่ 3	4
1.6	ขั้นตอนปกติของการหีบ HGA ลำดับที่ 4	4
1.7	ขั้นตอนที่เกิดปัญหาของการหีบ HGA ลำดับที่ 1	5
1.8	ขั้นตอนที่เกิดปัญหาของการหีบ HGA ลำดับที่ 2.....	5
1.9	ขั้นตอนที่เกิดปัญหาของการหีบ HGA ลำดับที่ 3	6
1.10	ขั้นตอนที่เกิดปัญหาของการหีบ HGA ลำดับที่ 4.....	6
2.1	ภาพสเตอริโอที่เกิดจากการถ่ายภาพวัตถุเดียวกันเวลาเดียวกันแต่ต่างมุมมองจากกล้อง 2 ตัว และแสดงตำแหน่งของจุดอ้างอิงจุดต่างๆในภาพสเตอริโอทั้ง 2 ภาพ.....	12
2.2	ระบบและการปรับปรุงภาพให้ได้ขนาดของตารางที่ต้องการ.....	15
2.3	วัตถุอ้างอิงที่ถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบซึ่งค่าความสูงที่แท้จริงของแต่ละระดับถูกทำการวัดและระบุด้วยเครื่องมือวัดชนิด CMM ที่มีความแม่นยำอยู่ที่ 0.1 ไมโครเมตร.....	16
2.4	ภาพของเส้นแสงของ เลเซอร์เซนเซอร์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุอ้างอิงที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัว.....	16
2.5	ผลการทดลองแสดงการระบุค่าของระนาบอ้างอิงในตำแหน่งต่างๆ.....	17
2.6	ตัวอย่างของภาพที่ถ่ายจากกล้องชนิด Telecentric และตัวอย่างของภาพที่ถ่ายจากกล้องชนิด Conventional	18
2.7	ผลการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์เมื่อทำการสอบเทียบ	19

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.8	ค่าตำแหน่ง x, y ของเข็มที่ถูกระบุที่ตำแหน่งต่างๆ และค่าความผิดพลาด สำหรับการระบุค่าที่ตำแหน่งต่างๆ 20
2.9	ลักษณะโครงสร้างของเครื่องวัดพิคคัทที่พัฒนาขึ้น 21
2.10	ผลการวัดพื้นผิวโค้งสี่ดำและเมาส์ 21
2.11	ผลการวัดชิ้นงานแบบจำลองฟันกรามและชิ้นงานรูปใบหน้าคน 22
2.12	แผนภาพการทำงานของระบบวิชันสามมิติโดยวิธีการสอบเทียบกล้อง 23
2.13	การสอบเทียบกล้อง 23
2.14	การกำหนดลักษณะของวัตถุเป้าหมายเป้าหมายโดยใช้วิธีจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) 24
2.15	วัตถุเป้าหมายกีดขวางบนพื้นผิวจราจรที่ระบบตรวจจับได้ 25
3.1	ระบบสเตอริโอวิชันสามมิติโดยรวม (ล่างซ้าย, ล่างขวา) ระบบขณะทำการ ทดลองวัดค่าความสูงของ HGA 30
3.2	กล้อง CCD ความละเอียด 1024 x 768 pixel 31
3.3	ปัญหาความบิดเบือนของภาพซึ่งเกิดจากความโค้งของเลนส์ โดยที่ภาพกลาง เป็นภาพปกติที่ไม่มีการบิดเบือนจากเลนส์ 31
3.4	เลนส์ชนิด Telecentric ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ 32
3.5	อุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างกล้องกับคอมพิวเตอร์ควบคุม ชนิด IEEE 1394 Standard Interface PCI Card 33
3.6	สายสัญญาณเชื่อมต่อ IEEE 1394 (Wi-Fi) 33
3.7	อุปกรณ์ส่องสว่างชนิด Bar light 35
3.8	Laser displacement sensor 36
3.9	ชุดจับยึดกล้อง 36
3.10	Vernier height gauge 37
3.11	Calibration gauge 37
3.12	ตำแหน่งและการติดตั้งระบบสเตอริโอ 3 มิติ 38
3.13	ภาพรวมของโปรแกรมควบคุมหลักของระบบ 39

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14	จุดที่กำหนดให้กล้องสเตอริโอทั้ง 2 ทำการระบุพิกัด x, y คือพิกัดของจุดกึ่งกลางของส่วนโค้งครึ่งวงกลมด้านล่างของ HGA ที่อยู่ภายในกรอบสี่เหลี่ยมในรูป 40
3.15	การตรวจจับหาพิกัด x, y ของจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งด้านล่างของ HGA ด้วยการใช้อุปกรณ์ FindCircleTool โดยซอฟต์แวร์ Vision Pro ของ Cognex..... 41
3.16	การทดสอบการตรวจจับพิกัด x, y ของ HGA ของกล้องสเตอริโอตัวที่ 1 และ 2 41
3.17	จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถตรวจจับความสูงได้ดีในช่วง 1.5 มิลลิเมตร 42
3.18	ค่าพิกัดแกน x ที่อ่านได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวเมื่อเพิ่มจำนวน HGA ในการทดสอบการตรวจจับเป็น 20 ตัวและแต่ละตัวจะถูกทำการตรวจจับพิกัดซ้ำ 20 ครั้งด้วยกัน 44
3.19	ค่าความแปรผันของพิกัด x_1 ที่ค่าความสูงต่างๆที่อ่านได้จากกล้องสเตอริโอตัวที่ 1..... 44
3.20	ค่าความแปรผันของพิกัด x_2 ที่ค่าความสูงต่างๆที่อ่านได้จากกล้องสเตอริโอตัวที่ 2..... 45
3.21	Laser displacement sensor ขณะทำการวัดค่าความสูงของ HGA..... 46
3.22	ค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 ที่คำนวณได้จาก matrix Z และ matrix X ด้วยสมการที่ (7) 47
3.23	ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม Minitab 48
3.24	เปรียบเทียบค่าความสูงของ HGA ระหว่างค่าความสูงที่แท้จริงกับค่าความสูงที่ระบบระบุได้แสดงให้เห็นว่าค่าความสูงที่ระบบระบุได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร (± 0.05 มิลลิเมตร) 48
3.25	ทำการสอบเทียบระบบด้วยค่าความสูงของ HGA 7 ระดับ (บน) คำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel (ล่าง) คำนวณด้วยโปรแกรม Minitab 49
3.26	เปรียบเทียบค่าความสูงของ HGA ระหว่างค่าความสูงที่แท้จริงกับค่าความสูงที่ระบบระบุได้โดยเพิ่มความสูงในการสอบเทียบให้ครอบคลุม 1.5 มิลลิเมตร และทดสอบกับความสูงค่าต่างๆ แสดงให้เห็นว่าค่าความสูงที่ระบบระบุได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร (± 0.05 มิลลิเมตร)..... 50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.27	การสอบเทียบของระบบหลังจากที่ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถ สอบเทียบได้ ในรูปจะเป็นการสอบเทียบโดยการใช้ calibration gauge และ แสดงให้เห็นค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 ที่คำนวณได้..... 52
3.28	การระบุค่าความสูงของ calibration gauge ที่มีความสูงที่แท้จริงที่ 1.955 มิลลิเมตร หลังจากทีระบบได้ผ่านการทำการสอบเทียบแล้ว 53
3.29	ระบบสามารถระบุค่าความสูงได้ถูกต้องเพียงตำแหน่งเดียวคือตำแหน่งกึ่งกลาง ของ field of view เท่านั้น (รูปที่ 3.29 บน) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการสอบเทียบ กล่าวคือ การสอบเทียบไม่ครอบคลุมทุกตำแหน่งของ field of view 54
3.30	การสอบเทียบของระบบแบบครอบคลุมทุกพื้นที่ของ field of view 55
3.31	ระบบทำการอ่านค่าความสูงของ calibration gauge ได้ถูกต้องแม่นยำ ทุกตำแหน่งของ field of view 56
4.1	การจัดวางตำแหน่งของกล้องสเตอริโอและเลนส์ทั้ง 2 ตัว..... 62
4.2	ภาพรวมของระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ 63
4.3	การระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายด้วยค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร..... 64
4.4	ความสามารถในการระบุค่าความสูงในระดับต่างๆของ ระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ 65
4.5	ตัวอย่างการทำใหม่ของผู้ทดสอบทั้ง 3 คนขณะทำ GR&R..... 71
4.6	การประมวลผล GR&R ด้วยโปรแกรม Minitab 72
4.7	ภาพรวมของชุดทดสอบการหยิบ – จับ HGA โดยใช้ระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ เป็นตัวควบคุมความสูงของหัวดูด HGA 73
4.8	กำหนดความสูงของหัวดูด HGA ในการหยิบ – จับ HGA ที่ 0.35 มิลลิเมตร เหนือ HGA 74
4.9	จำลองความลาดเอียงของ HGA ที่มีความสูงต่างกันที่ 0.9 มิลลิเมตร 75
4.10	ใช้แผ่นรองหนา 10 มิลลิเมตรรองที่ฐานด้านหนึ่งของถาดรอง HGA เพื่อให้เกิด

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่

หน้า

	ความลาดเอียงของถาดรอง HGA และเกิดความแตกต่างกันของความสูงของ HGA ตัวที่ 1 และ 10 อยู่ที่ 0.9 มิลลิเมตร	75
5.1	การระบุค่าความสูงของ HGA หลังจากทำการสอบเทียบด้วยวิธีที่ปรับปรุงแล้ว.....	81
5.2	การระบุค่าความสูงของ Calibration gauge หลังจากทำการสอบเทียบด้วย วิธีที่ปรับปรุงแล้ว.....	82

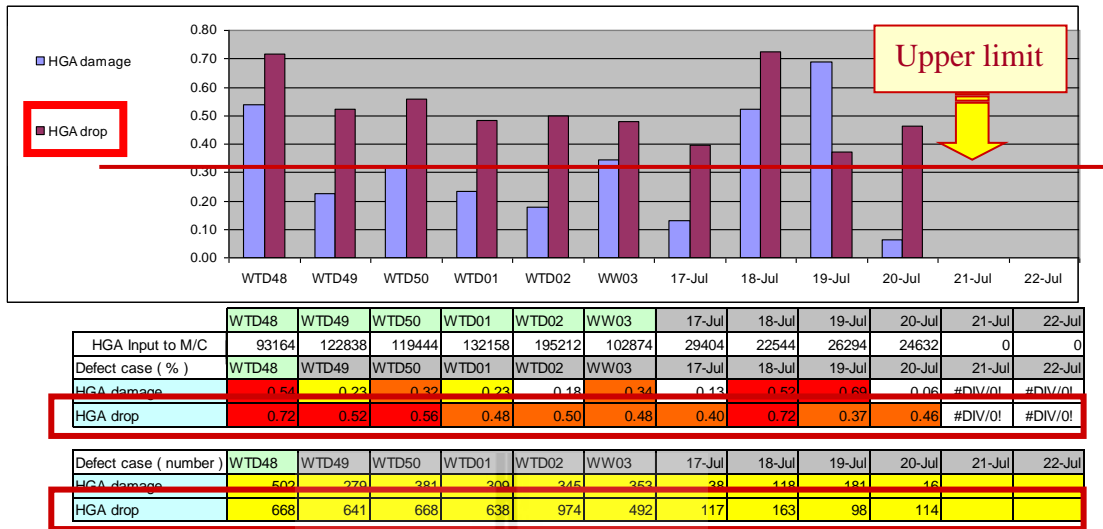


บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

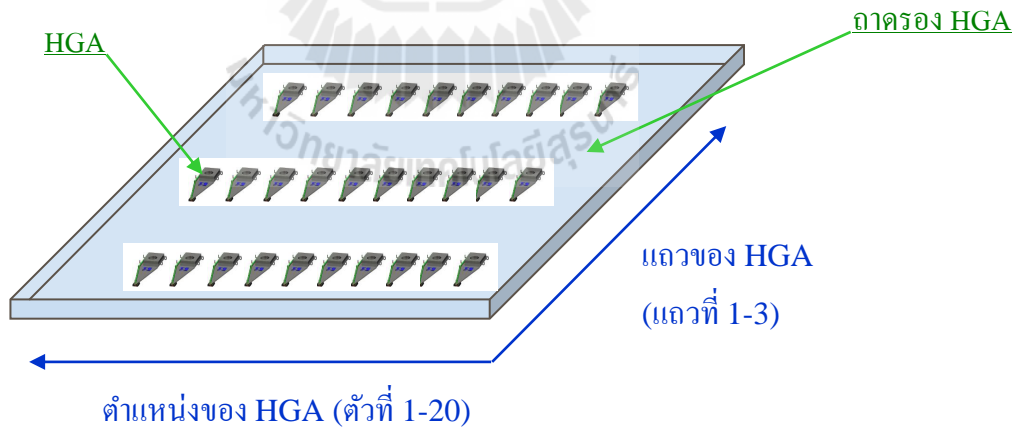
ปัจจุบันในสายการผลิตของอุตสาหกรรมการประกอบฮาร์ดดิสก์ (hard disk) มีอยู่หลายภาคส่วนที่นำเอาระบบหยิบ-จับอัตโนมัติ (Auto pick & place system) เข้ามาช่วยในการเพิ่มความเร็วในการหยิบจับชิ้นงานเพื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆ แทนที่การใช้คนหยิบ-จับเพื่อเพิ่มอัตราการผลิตต่อวันให้ได้เพียงพอต่อความต้องการของลูกค้า แต่ระบบหยิบ-จับอัตโนมัติในปัจจุบันยังพบปัญหาหลายประเภทและหนึ่งในปัญหาที่พบมากในงานระบบหยิบ-จับอัตโนมัติคือความผิดพลาดในการหยิบ-จับของหัวหยิบ-จับ (Pick & Place Head) ที่ไม่สามารถหยิบชิ้นงานขึ้นมาได้ตามต้องการโดยมีสาเหตุจากระยะห่าง (ด้านความสูง) ที่ไม่เหมาะสมระหว่างหัวหยิบ-จับและชิ้นงานที่ต้องการหยิบแต่ละตัว อันเนื่องมาจากความไม่สม่ำเสมอของจุดที่รองรับชิ้นงาน ความสูงของถาดรองรับชิ้นงาน (Tray) ความลาดเอียงของถาดรองรับชิ้นงาน หรือแท่นรองรับชิ้นงาน เป็นต้น ดังนั้นความสามารถในการหยิบชิ้นงานขึ้นจากถาดรองรับชิ้นงานของหัวหยิบ-จับอัตโนมัติจึงไม่สามารถทำได้เต็มประสิทธิภาพ และหากปัญหานี้เกิดขึ้นในกระบวนการการหยิบ HGA อาจจะทำให้ HGA หลุดจากหัวหยิบจับอัตโนมัติ เกิดความเสียหายกับ HGA ทำให้จำนวน HGA ที่ประกอบได้ลดลงและต้องหยุดเครื่องจักรเพื่อทำการแก้ไข โดยทั้งนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียทรัพยากร HGA ที่หลุดจากหัวหยิบจับ และจำนวนงานที่ผลิตได้ต่อวันลดลงเนื่องจากการสูญเสียเวลาในการหยุดแก้ไขเครื่องจักรได้



Note; 1. HGA dropped will be rejected part.

2. Color code
- | |
|-----------|
| 0.2%-0.3% |
| 0.3%-0.4% |
| >0.5% |

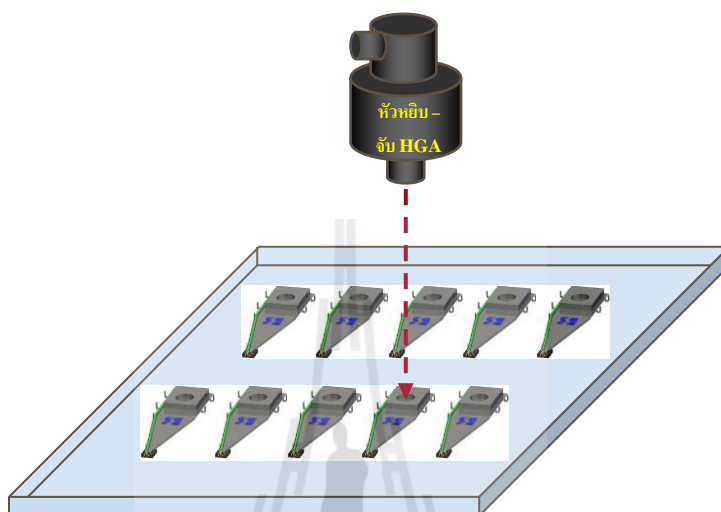
รูปที่ 1.1 จำนวนของ HGA ที่สูญเสียไปต่อสัปดาห์ซึ่งเกิดจากการที่ HGA หลุดจากหัวหยิบ- จับแบบอัตโนมัติ



รูปที่ 1.2 ลักษณะการวางชิ้นงาน HGA บนถาดรอง HGA ในสายการผลิต

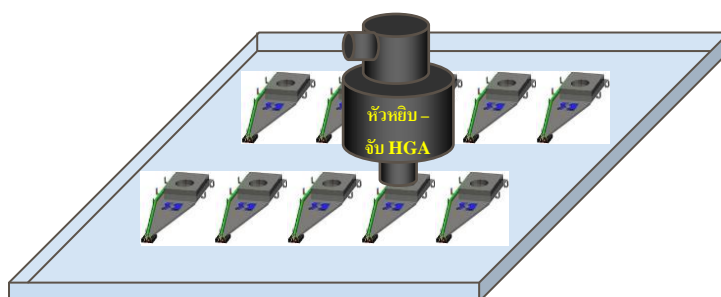
1.1.1 ขั้นตอนปกติของการหยิบ HGA ของหัวหยิบจับอัตโนมัติ

1. ถาดรอง HGA เลื่อนเข้ามาที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับให้ หัวหยิบจับอัตโนมัติเคลื่อนที่ลงมาหยิบ HGA แสดงในรูปที่ 1.3



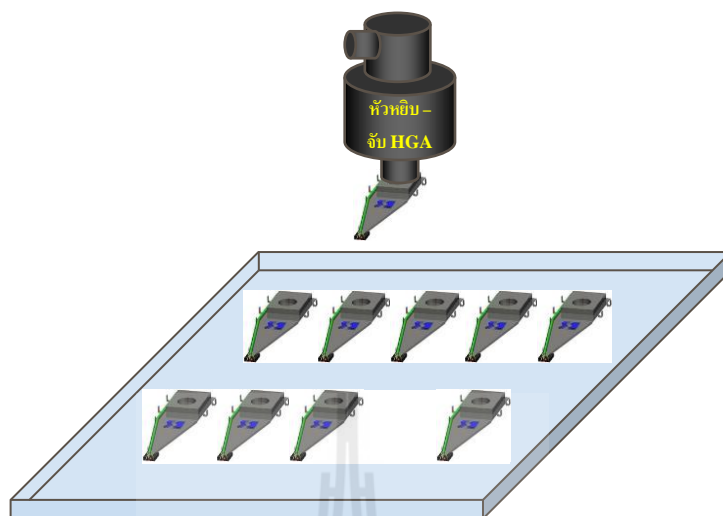
รูปที่ 1.3 ขั้นตอนปกติของการหยิบ HGA ลำดับที่ 1

2. หัวหยิบจับอัตโนมัติเคลื่อนที่ลงมาเพื่อดูด HGA ด้วยระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างหัวหยิบจับและ HGA ซึ่งหัวหยิบจับในที่นี้ใช้แบบลมดูด (vacuum) แสดงในรูปที่ 1.4



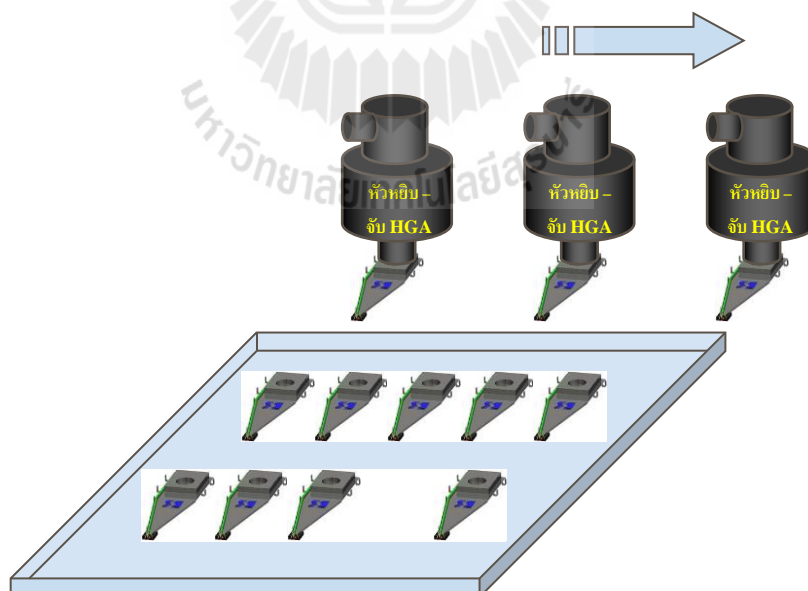
รูปที่ 1.4 ขั้นตอนปกติของการหยิบ HGA ลำดับที่ 2

3. หัวหีบ-จับอัตโนมัติเคลื่อนที่ขึ้นพร้อมกับ HGA ที่ดูดติดแล้วแสดงในรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 ขั้นตอนปกติของการหีบ HGA ลำดับที่ 3

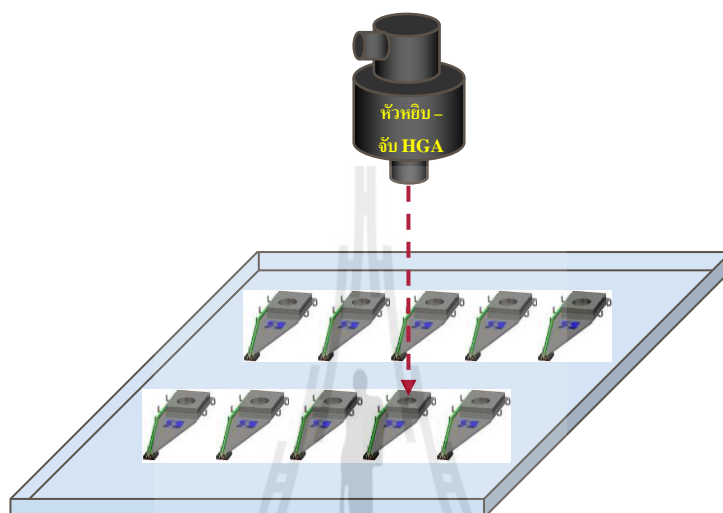
4. หัวหีบจับอัตโนมัติเคลื่อนที่พา HGA ที่ดูดติดแล้วไปยังตำแหน่งที่ต้องการจะประกอบกับชิ้นส่วนอื่นๆของฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ต่อไป แสดงในรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ขั้นตอนปกติของการหีบ HGA ลำดับที่ 4

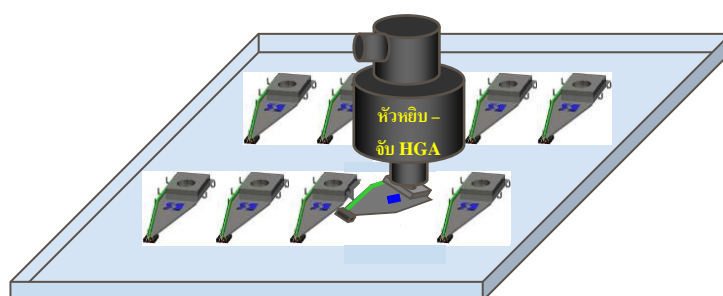
1.1.2 ขั้นตอนของการหยิบ HGA ของหัวหยิบ-จับอัตโนมัติที่เกิปัญหาระหว่างการหยิบ HGA

1. ถาดรอง HGA เลื่อนเข้ามาที่ตำแหน่งที่กำหนดไว้เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับให้ หัวหยิบ-จับอัตโนมัติเคลื่อนที่ลงมาหยิบ HGA แสดงในรูปที่ 1.7



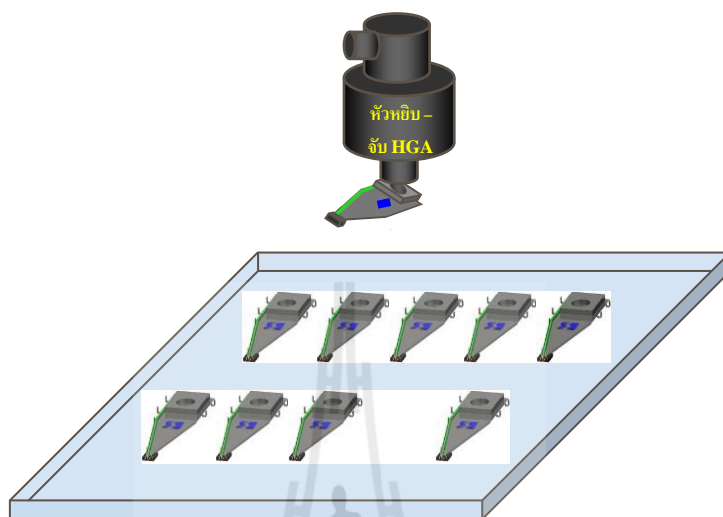
รูปที่ 1.7 ขั้นตอนที่เกิดปัญหาของการหยิบ HGA ลำดับที่ 1

2. หัวหยิบจับอัตโนมัติเคลื่อนที่ลงมาเพื่อคูด HGA ด้วยระยะห่างที่ไม่เหมาะสม ระหว่างหัวหยิบจับอัตโนมัติและ HGA (ห่างมากเกินไปหรือใกล้เกินไป) แสดงในรูปที่ 1.8



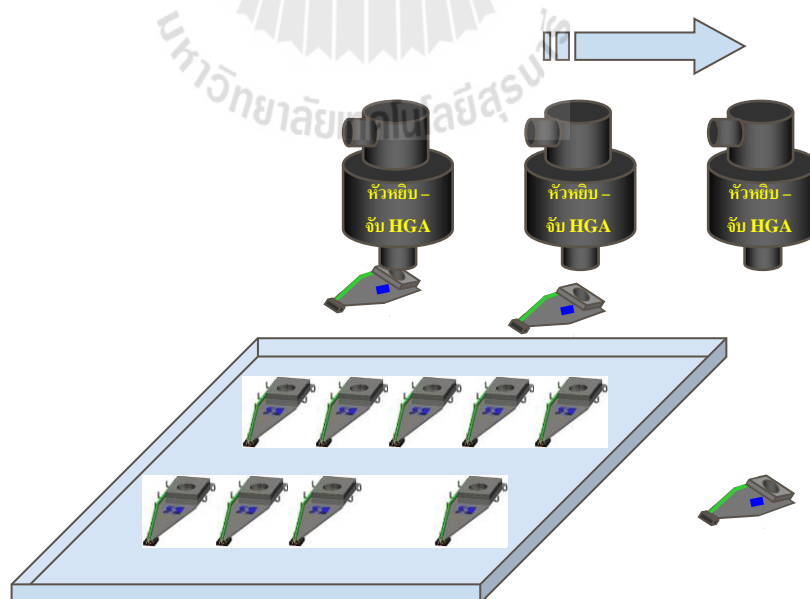
รูปที่ 1.8 ขั้นตอนที่เกิดปัญหาของการหยิบ HGA ลำดับที่ 2

3. หัวหยิบจับอัตโนมัติเคลื่อนที่ขึ้นพร้อมกับ HGA ที่ไม่อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง แสดงในรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 ขั้นตอนที่เกิดปัญหาของการหยิบ HGA ลำดับที่ 3

4. HGA หลุดจากหัวหยิบจับอัตโนมัติขณะกำลังเคลื่อนที่เพื่อที่จะนำ HGA ไป ประกอบกับอุปกรณ์อื่นและ HGA ที่หลุดออกนี้จะถูกจัดให้เป็นงานเสียแสดงในรูปที่ 1.10



รูปที่ 1.10 ขั้นตอนที่เกิดปัญหาของการหยิบ HGA ลำดับที่ 4

จากการวิเคราะห์ปัญหาเบื้องต้นพบว่าปัญหาการหยิบ-จับที่มีสาเหตุจากความสูงของชิ้นงานที่ไม่สม่ำเสมอในขณะที่ความสูงของหัวหยิบ-จับสามารถตั้งค่าไว้ได้เพียงระดับเดียวในลักษณะนี้สามารถปรับปรุงแก้ไขให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นได้โดยการระบุความสูงของ HGA แบบตัวต่อตัว จากนั้นเมื่อระบบสามารถระบุความสูงของ HGA แต่ละตัวได้แล้วระบบก็จะสามารถระบุตำแหน่งความสูงของหัวหยิบ-จับ สำหรับ HGA แต่ละตัวได้ ดังนั้น ระยะห่างระหว่างหัวหยิบ-จับกับ HGA จะมีค่าเท่ากันทุกครั้งที่ระบบทำการหยิบ-จับ ดังนั้นปัญหา HGA หลุดระหว่างการหยิบ-จับก็จะน้อยลง ปัญหาการสูญเสียทรัพยากร HGA ก็จะมีน้อยลง และจำนวนงานที่ผลิตได้ต่อวันก็จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากการไม่มีการสูญเสียเวลาในการหยุดแก้ไขเครื่องจักร

การระบุความสูงของชิ้นงานนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีหากแต่แต่ละวิธีจะมีข้อจำกัดซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะการของการประยุกต์ใช้งาน สภาพแวดล้อม ขั้นตอนของกระบวนการผลิต ความเร็วที่ต้องการในการผลิต คุณภาพของชิ้นงาน ผลกระทบข้างเคียงกับระบบเช่น ติดตั้งแล้วชิ้นส่วน ไปกระทบกับชิ้นส่วนเดิมของระบบ เป็นต้น

ยกตัวอย่างเช่นระบบต้องการทราบทั้งจุดศูนย์กลาง (x, y) และความสูงของชิ้นงาน เพื่อที่จะได้ทำการคำนวณและสั่งการให้หัวหยิบ-จับเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการ ในแนวแกน x, y และ z แต่ระบบ สามารถระบุได้เพียงแนวแกน x, y ด้วยระบบ แมชชีน วิชัน (machine-vision) แต่ยังไม่สามารถระบุความสูงของชิ้นงานได้ การระบุความสูงของชิ้นงานในลักษณะนี้สามารถทำได้โดยใช้ เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง (displacement sensor) ในการระบุความสูงของชิ้นงาน แต่ด้วยข้อจำกัดของเวลาที่ถูกจำกัดในแต่ละขั้นตอนการผลิต (cycle time) การใช้เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่างจึงไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในระบบนี้ได้ เพราะการใช้เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่างจะต้องเพิ่มเวลาในการทำงานสำหรับการพาเซนเซอร์ตรวจจับระยะห่างเคลื่อนที่ไปหยุดอยู่บนชิ้นงานเพื่อนำการระบุความสูง ก่อนหรือหลังจากที่ระบบทำการระบุตำแหน่งในแนวแกน x, y ด้วยระบบ machine vision เพราะเซนเซอร์ตรวจจับระยะห่างไม่สามารถติดตั้งในตำแหน่งที่จะอ่านค่าความสูงของชิ้นงานในขณะเดียวกันกับที่ machine vision ทำการระบุตำแหน่ง x, y ของชิ้นงานได้

ตัวอย่างที่สอง ระบบต้องการทราบทั้งจุดศูนย์กลาง (x, y) และความสูงของชิ้นงาน เพื่อที่จะได้ทำการคำนวณและสั่งการให้หัวหยิบ-จับเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการในแนวแกน x, y และ z แต่ระบบสามารถระบุได้เพียงแนวแกน x, y ด้วยระบบ machine vision แต่ยังไม่สามารถระบุความสูงของชิ้นงานได้ (ระบบเดียวกันกับตัวอย่างข้างต้น) จากนั้นผู้พัฒนาพิจารณาเลือกใช้ วิธีระบุความสูงของ HGA โดยการใช้กล้องวัดความสูงจากด้านข้าง แต่ไม่สามารถทำได้เนื่องจาก

ลักษณะของถาดวางชิ้นงานมีการกีดขวางระหว่างชิ้นงานกับกล้องด้านข้าง จึงไม่สามารถใช้วิธีระบุด้วยกล้องด้านข้างได้

ปัญหาในตัวอย่างข้างต้นทั้งสองตัวอย่างสามารถแก้ไขได้โดยการประยุกต์ใช้งานระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ เนื่องจากสามารถระบุได้ทั้งตำแหน่ง x , y และ z (ความสูง) ในเวลาเดียวกัน และลักษณะของถาดวาง HGA ก็ไม่มีผลกระทบกับระบบนี้เช่นเดียวกันแต่ความละเอียดของการระบุความสูงของระบบเป็นสิ่งสำคัญที่สุดที่ต้องคำนึงถึงเพราะระยะห่างระหว่างหัวหยิบ-จับ กับ HGA นั้นละเอียดมาก หากคำนวณผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจเกิดปัญหาในการหยิบ-จับ HGA ขึ้นมาได้

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและวิจัยวิธีการระบุค่าความสูงของชิ้นงาน HGA ด้วยระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูง ซึ่งมีจุดมุ่งหมายให้สามารถระบุความสูงของ HGA และ มีความคลาดเคลื่อนอยู่ภายใต้ของเขตที่ยอมรับได้สำหรับการหยิบ-จับ HGA ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาและพัฒนาการทำงานของระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูงเพื่อระบุความสูงของชิ้นงาน HGA แต่ละตัวได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาและพัฒนาาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติให้มีขีดความสามารถและมีความแม่นยำสูงเพื่อนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งในแนวแกน z ของชิ้นงาน HGA ที่อยู่บน HGA Tray โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความสูงที่ระบบระบุได้กับค่าความสูงจริงที่ผ่านการวัดด้วยเครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้แล้วมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ขั้นตอนการวิจัย

1.4.1.1 ศึกษาค้นคว้าเทคโนโลยีสเตอริโอวิชันสามมิติจากวิทยานิพนธ์และบทความต่างๆ ให้เข้าใจถึงวิธีการทำงาน เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการทำการวิจัย

1.4.1.2 เก็บรวบรวมข้อมูลความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิทยานิพนธ์

1.4.1.3 แบบจำลองและทดสอบระบบ

1. ออกแบบและจัดทำแบบจำลองระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ

2. ระบุพิกัด x_1, y_1 และ x_2, y_2 ของกล้องสเตอริโอทั้งสองเพื่อเป็นตัวแปรสำหรับคำนวณหาพิกัดความสูงในแนวแกน z ของ HGA ด้วยระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ
3. คำนวณหาพิกัดความสูงในแนวแกน z ของ HGA
4. นำค่าพิกัดความสูงในแนวแกน z ที่ได้จากการระบุตำแหน่งด้วยระบบสเตอริโอวิชันสามมิติไปเปรียบเทียบกับค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA ที่ผ่านการวัดด้วยเครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้ โดยในที่นี่จะนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง
5. กำหนดช่วงที่เหมาะสมที่ระบบจะสามารถระบุค่าพิกัดความสูงในแนวแกน z ที่วัดได้ให้มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร
6. วิเคราะห์ข้อมูล
7. สรุปผล
8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

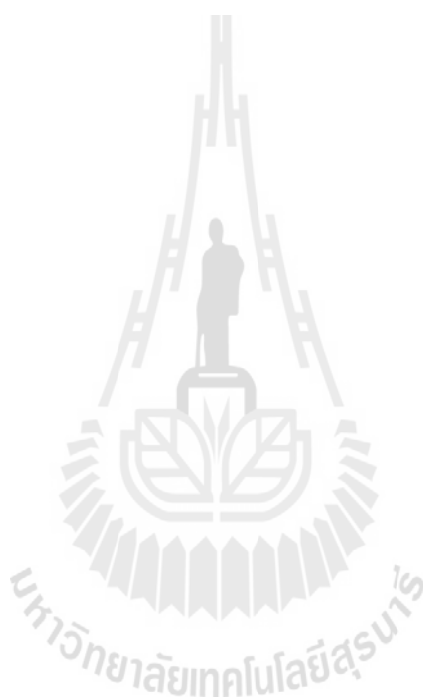
1.4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. Cognex Vision hardware
2. กล้องชนิด CCD
3. เลนส์ชนิด Telecentric
4. Light Source สำหรับเป็นอุปกรณ์ส่องสว่างให้กับระบบ
5. IEEE 1394 Standard Interface Card
6. IEEE 1394 Cable
7. โปรแกรม VisionPro
8. โปรแกรม Microsoft Visual Studio
9. ชุดจับยึดกล้อง
10. ตัวอย่าง HGA และฐานรองชิ้นงาน
11. Height gauge สำหรับปรับความสูงของฐานรองชิ้นงาน HGA
12. Calibration gauge
13. Displacement laser sensor สำหรับวัดความสูงที่แท้จริงของชิ้นงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับเทคโนโลยีสเตอริโอวิชันสามมิติ

1.5.2 สามารถนำเทคโนโลยีสเตอริโอวิชันสามมิติมาพัฒนาใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูงในการระบุความสูงของชิ้นงานที่มีความละเอียดระดับ ± 50 ไมโครเมตรได้



บทที่ 2

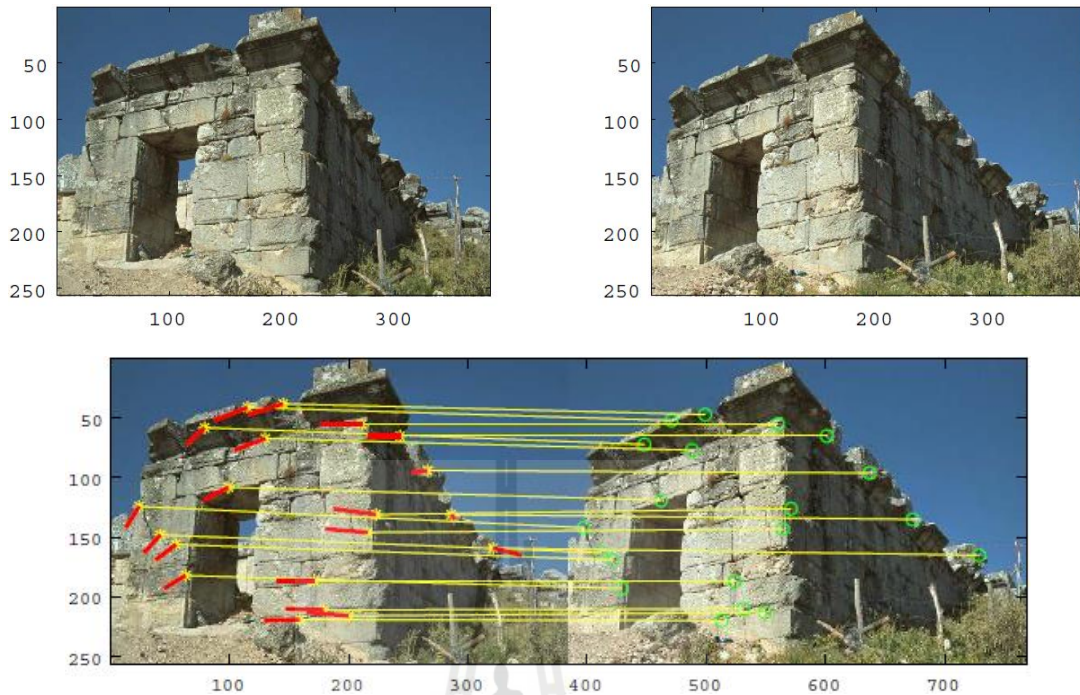
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

สืบเนื่องจากผู้ทำการวิจัยต้องการที่จะศึกษาและพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติให้มีขีดความสามารถและมีความแม่นยำสูงเพื่อนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งความสูงของชิ้นงาน HGA ที่อยู่บน HGA Tray โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความสูงที่ระบบระบุได้กับค่าความสูงจริงที่ผ่านการวัดด้วยเครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้แล้วมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร ดังที่ได้กล่าวในบทที่แล้วนั้น ผู้ทำการวิจัยจึงได้ทำการศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำมาเป็นแนวทางและประยุกต์ใช้กับงานวิจัยของผู้ทำการวิจัย โดยในบทนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ระบบสเตอริโอวิชันสามมิติในการระบุตำแหน่งความสูงหรือความลึกของชิ้นงาน เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โดยปกติแล้วภาพถ่ายของวัตถุที่ถูกบันทึกด้วยกล้องนั้นจะมีข้อมูลในรูปของมิติแสดงเพียงแค่ 2 มิติคือ ความกว้างและความยาว (x, y) แต่จะไม่สามารถบอกถึงความลึกของภาพได้ ระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ เป็นการนำภาพ 2 มิติ ของวัตถุเป้าหมายเดียวกันที่เกิดจากการถ่ายจากมุมมองที่ต่างกันเล็กน้อย มากกว่า 1 มุมมอง (ในการวิจัยนี้ใช้ 2 มุมมอง) ในเวลาเดียวกัน โดยที่วัตถุเป้าหมายนั้นจะมีจุดอ้างอิงที่ถูกกำหนดเอาไว้ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และภาพที่ถ่ายจากแต่ละมุมมอง จะระบุพิกัดของจุดอ้างอิงในแกน x, y ของแต่ละมุมมองเอาไว้ จากนั้นจะนำพิกัดของจุดอ้างอิงที่ระบุไว้ของมุมมองเหล่านั้นมาผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้มาซึ่งความลึกหรือความสูงของวัตถุเป้าหมายนั้นออกมา



รูปที่ 2.1 (บน) ภาพสเตอริโอที่เกิดจากการถ่ายภาพวัตถุเดียวกันเวลาเดียวกันแต่ต่างมุมมองจากกล้อง 2 ตัว (ล่าง) แสดงตำแหน่งของจุดอ้างอิงจุดต่างๆในภาพสเตอริโอทั้ง 2 ภาพ (Kuffar, H. และ Takaya, K.)

2.2.1 การระบุความลึกของวัตถุเป้าหมายด้วยการใช้ทฤษฎี **Epipolar geometry** ในการคำนวณหาความลึกของวัตถุเป้าหมาย (Hartley, R. และ Zisserman, A. “Multiple View Geometry in Computer Vision Second Edition”)

2.2.2 การระบุความลึกของวัตถุเป้าหมายโดยการสอบเทียบด้วยทฤษฎีการถดถอยพหุคูณ (multiple regressions)

การระบุความลึกของวัตถุเป้าหมายด้วยวิธีนี้ เป็นวิธีที่ผู้วิจัยเลือกที่จะทำการศึกษาและนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยเนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติให้มีขีดความสามารถและมีความแม่นยำที่ค่อนข้างสูงกล่าวคือเมื่อเปรียบเทียบค่าความสูงที่ระบบระบุได้กับค่าความสูงจริงที่ผ่านการวัดด้วยเครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้แล้ว จะต้องมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ค่อนข้างละเอียดมาก ดังนั้นการใช้วิธีการสอบเทียบโดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงที่แท้จริงของวัตถุเป้าหมายที่ผ่านการวัดด้วยเครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้ กับค่าพิกัด x, y ของกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัว จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้

2.2.2.1 การสอบเทียบ (Calibration)

การสอบเทียบ (Calibration) หมายถึง การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่แท้จริงที่ได้จากเครื่องวัดมือวัดที่เป็นค่าจริงที่ยอมรับร่วมกัน (Conventional True Value) เทียบกับค่าที่ถูกวัดได้ด้วยเครื่องมือหรือระบบของผู้ใช้งาน

2.2.2.2 หลักการของการถดถอยพหุคูณ (ผศ.ดร.ฉัตรศิริ ปิยะพิมลสิทธิ์ “การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)”) เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ชนิดคือ

X เป็นตัวแปรอิสระ (Independent variable) หรือตัวแปรทำนาย (Predictor variable) สามารถมีได้ตั้งแต่ 1 ตัวหรือมากกว่า

Y เป็นตัวแปรตาม (Dependent variable) มี 1 ตัว

ซึ่งการถดถอยพหุคูณนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 2 ชนิด เพื่อให้สามารถที่จะทำนายค่าของตัวแปรตามด้วยกลุ่มของตัวแปรทำนายได้ โดยหากมีตัวแปรทำนายตัวเดียวจะเรียกว่า Simple Regression Analysis หากมีตัวแปรทำนายมากกว่า 1 ตัวจะเรียกว่า Multiple Regression Analysis

โดยสมการทั่วไปของ multiple regression (อ้างอิงจากหนังสือ Applied Linear Statistical Models; 4th ed ของ John Neter และคณะ) คือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon$$

โดยที่

Y คือ ตัวแปรตาม

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ คือ ตัวแปรอิสระ

β_0 คือ ค่าคงที่

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

ϵ คือ ค่าความผิดพลาดของค่าที่ทำนายได้เทียบกับค่าจริง

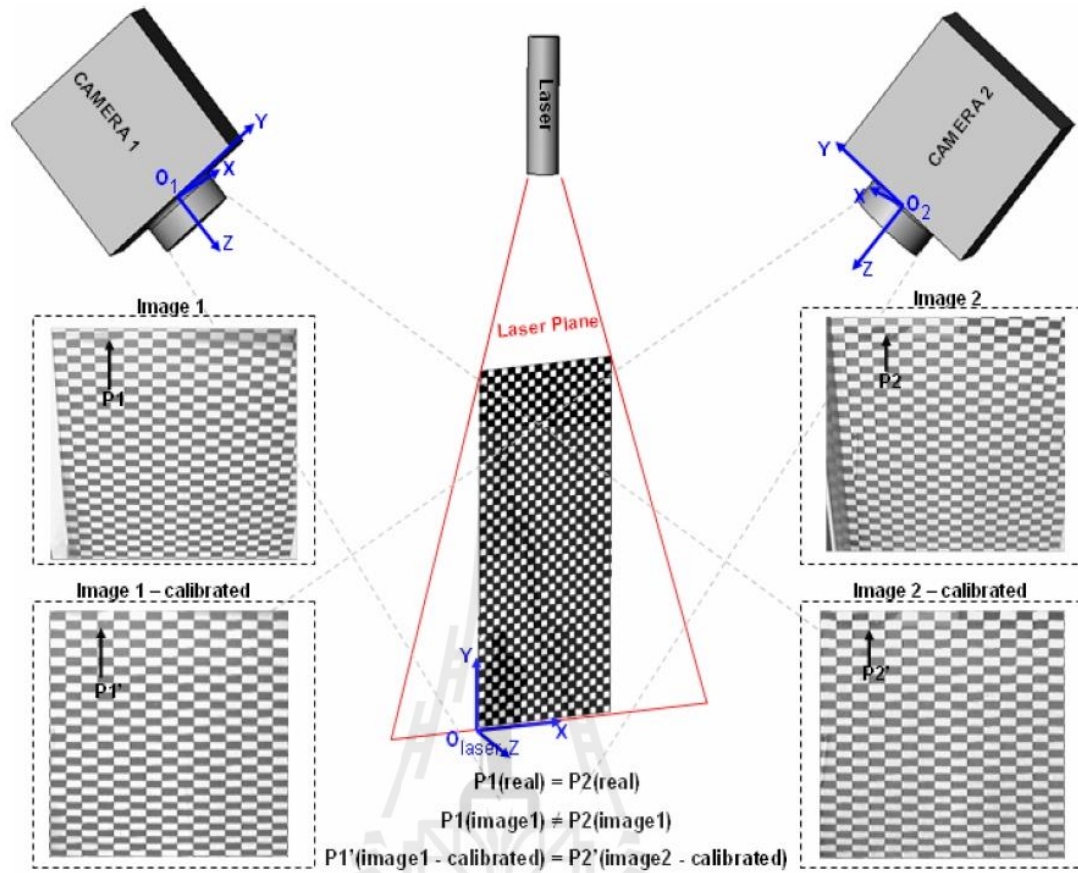
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sarkis, M. Senft, C.T. และ Diepold, K. (2009) นำเสนอการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายของภาพ (Zoom) ของเลนส์ที่มีต่อระยะโฟกัสที่จะทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนที่สุดเพื่อพัฒนาระบบของการปรับระยะโฟกัสแบบอัตโนมัติของกล้อง โดยในงานวิจัยนี้ผู้ทำการวิจัยได้นำเสนอเทคนิค MLS (Moving Least Squares) เข้ามาใช้ในการพัฒนาและในขั้นตอนของการหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการขยายของภาพกับระยะโฟกัสที่จะทำให้ได้ภาพที่ชัดเจนที่สุดนั้น ผู้ทำการวิจัยใช้วิธีการติดกล้องเข้ากับมอเตอร์แล้วให้มอเตอร์เคลื่อนที่เข้า-ออกทีละระดับจากนั้นผู้ทำการวิจัยได้ใช้วิธีการถดถอยพหุคูณ (Multiple regression) เข้ามาช่วยในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยเพื่อนำไปทำนายระยะโฟกัสที่ต้องจะต้องใช้เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนที่สุดเมื่อทำการปรับอัตราการขยายของภาพไปที่ค่าต่างๆ

Vilaca, J.L. Fonseca, J. และ Pinho, A.C. (2006) นำเสนอวิธีการคำนวณหาค่าความลึกของพื้นผิวของวัตถุจากภาพสเตอริโอ โดยใช้วิธีการสอบเทียบซึ่งระบบประกอบด้วยกล้องสเตอริโอ 2 ตัวที่ทำงานร่วมกับเลเซอร์เซนเซอร์ วิธีการดำเนินงานคือผู้ทำการวิจัยได้จัดเตรียมอุปกรณ์สำหรับการสอบเทียบโดยการพิมพ์ตารางสี่เหลี่ยมผืนผ้าสีขาวสลับดำ (คล้ายตารางหมากรุก) ขนาด 10×5 มิลลิเมตรลงบนแผ่นอะซิเตด จากนั้นใช้แผ่นกระจกใส 2 แผ่นประกบทั้งสองด้านของแผ่นอะซิเตด โดยกระจกแต่ละแผ่นมีความหนาที่ 1.2 มิลลิเมตร จากนั้นนำแผ่นตาราง (แผ่นอะซิเตดที่ถูกประกบด้วยกระจกใสดังกล่าว) มาวางตั้งไว้ที่ตำแหน่งระหว่างกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัว โดยมีระยะนาบตั้งฉากกับกล้องทั้ง 2 เพื่อให้กล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวมองเห็นตารางสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังกล่าวทั้งคู่ จากนั้นใช้การฉายแสงเลเซอร์ลงมาที่ตำแหน่งบนของแผ่นตารางเพื่อทำให้กล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวสามารถระบุพิกัดของจุดบนตารางได้ง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 2.2 การสอบเทียบจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนคือ

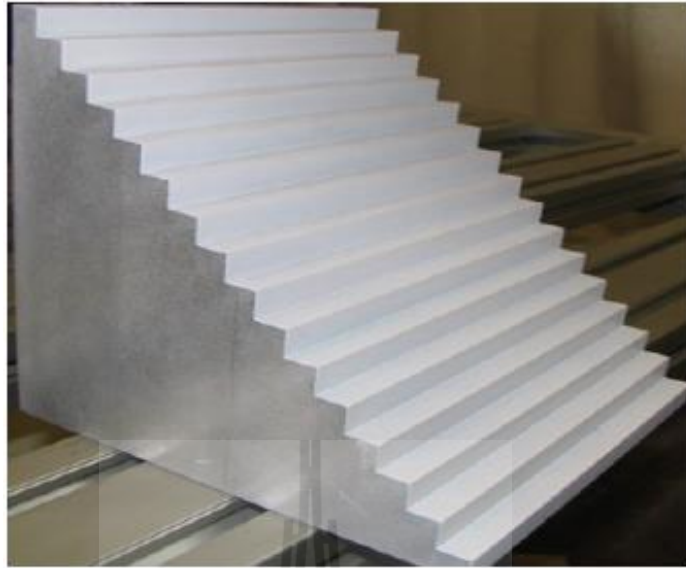
- 1.) การปรับปรุงภาพในแนวนอนให้ถูกต้อง
- 2.) การแก้ไขภาพในแนวตั้งให้ถูกต้อง
- 3.) การสอบเทียบกับค่าความลึกจริงของระยะนาบอ้างอิง

ซึ่งเมื่อพิจารณารูปที่ 2.2 จะเห็นว่า ภาพของตารางที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวก่อนทำการปรับปรุงภาพนั้นแสดงให้เห็นในตารางแฉกบน (Image 1 และ Image 2) และ หลังจากทำการปรับปรุงภาพแล้วสามารถแสดงให้เห็นในตารางแฉกล่าง (Image1-Calibrated และ Image 2-Calibrated)



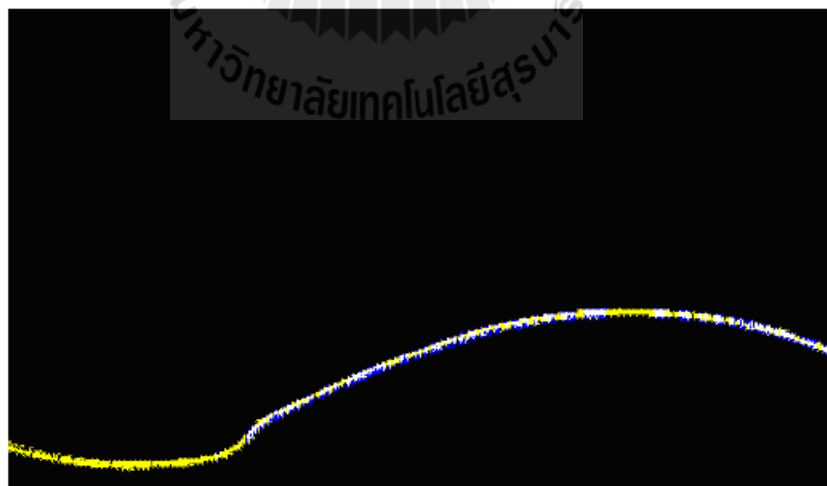
รูปที่ 2.2 ระบบและการปรับปรุงภาพให้ได้ขนาดของตารางที่ถูกต้องโดย ภาพตารางแฉกบน เป็นภาพที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวก่อนทำการปรับปรุงภาพ และ ภาพตาราง แฉกล่างเป็นภาพที่ได้หลังจากทำการปรับปรุงภาพแล้ว (ที่มาของภาพต้นฉบับ: Vilaca, J.L. Fonseca, J. และ Pinho, A.C. (2006))

หลังจากที่ทำการปรับปรุงภาพแล้วค่าที่คำนวณในการปรับปรุงภาพมาใช้ทำการสอบเทียบกับค่า ความสูงจริงของระนาบแต่ละระดับของวัตถุอ้างอิง โดยที่ค่าความสูงที่แท้จริงในแต่ละระดับจะถูก ทำการวัดและระบุค่าด้วยเครื่องมือวัดชนิด CMM ซึ่งมีค่าความแม่นยำอยู่ที่ 0.1 ไมโครเมตร(แต่ละ ระดับมีค่าความสูงอยู่ที่ 10 มิลลิเมตรโดยประมาณ) โดยที่วัตถุอ้างอิงที่นำมาใช้ทำการสอบเทียบนั้น แสดงในรูปที่ 2.3



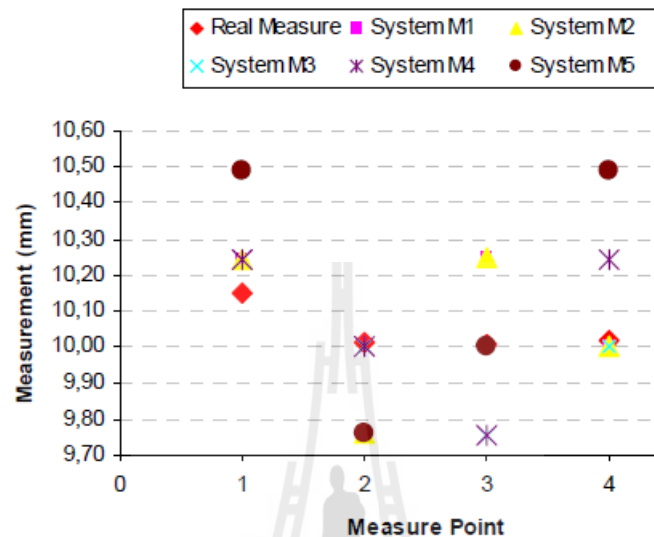
รูปที่ 2.3 วัตถุอ้างอิงที่ถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบซึ่งค่าความสูงที่แท้จริงของแต่ละระดับถูกทำการวัดและระบุด้วยเครื่องมือวัดชนิด CMM ที่มีความแม่นยำอยู่ที่ 0.1 ไมโครเมตร(ที่มาของภาพต้นฉบับ: Vilaca, J.L. Fonseca, J. และ Pinho, A.C. (2006))

จากนั้นลักษณะการสอบเทียบและระบุค่าความสูงของระบบนั้น จะทำใช้วิธีทำงานร่วมกันระหว่างกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัว กับ เลเซอร์เซนเซอร์ โดยที่ภาพที่ได้แสดงในรูปที่ 2.4



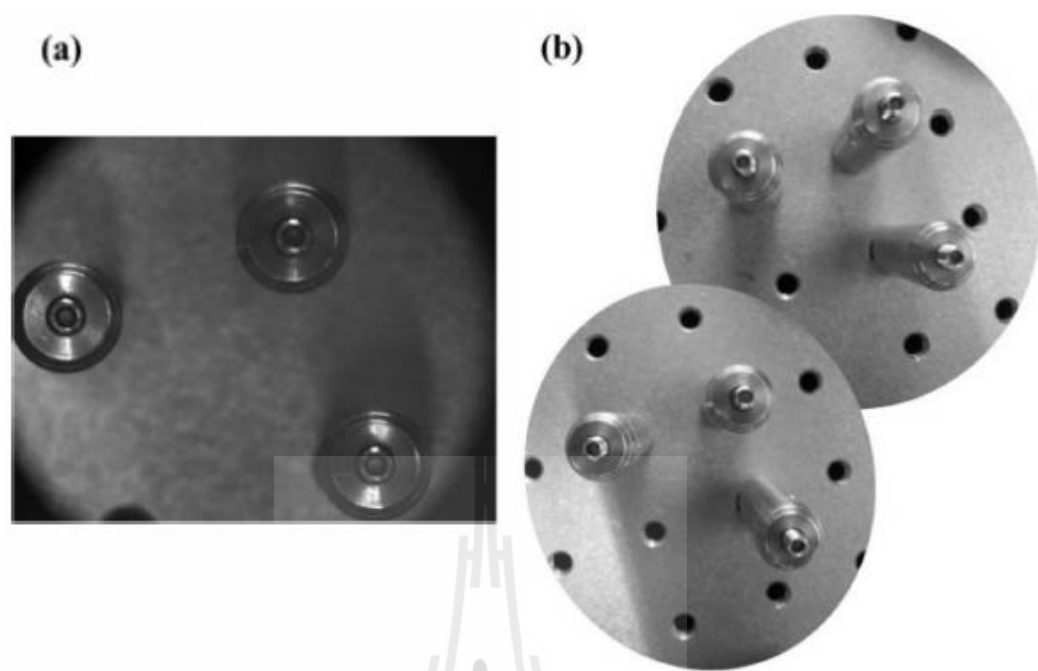
รูปที่ 2.4 ภาพของเส้นแสงของ เลเซอร์เซนเซอร์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวของวัตถุอ้างอิงที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัว (ที่มาของภาพต้นฉบับ: Vilaca, J.L. Fonseca, J. และ Pinho, A.C. (2006))

และหลังจากทำการสอบเทียบแล้วผู้วิจัยทดลองทำการระบุค่าความสูงของระนาบของวัตถุอ้างอิง และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 2.5



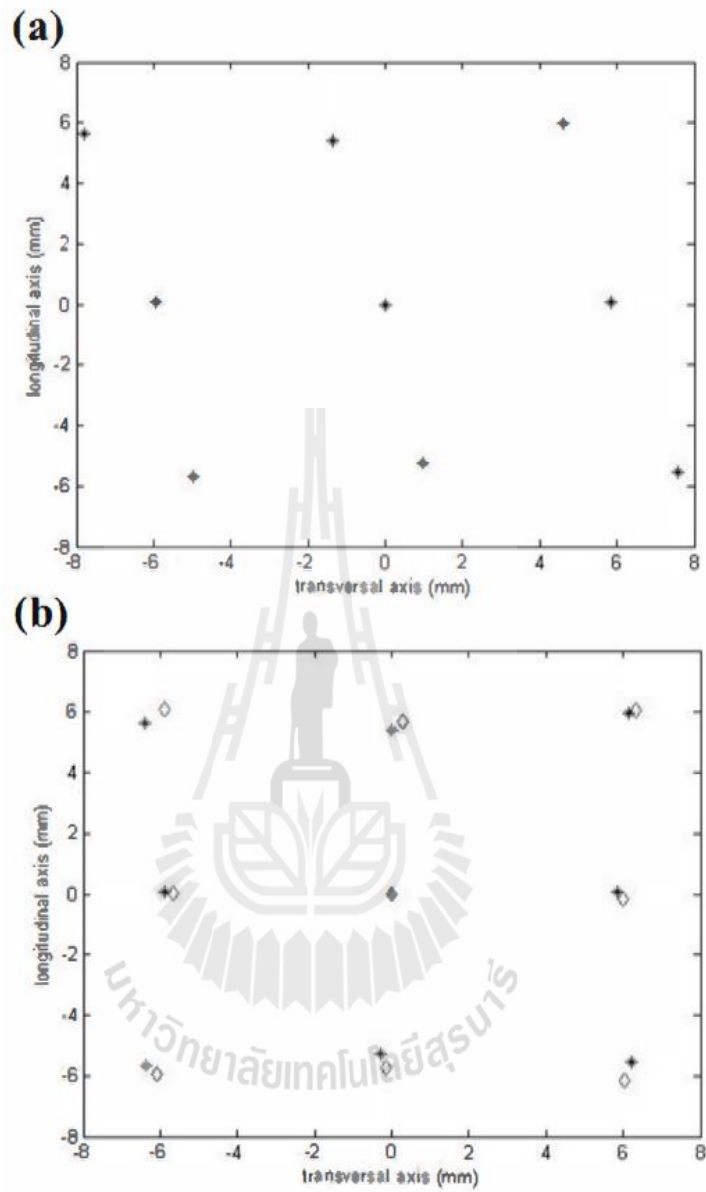
รูปที่ 2.5 ผลการทดลองแสดงการระบุค่าของระนาบอ้างอิงในตำแหน่งต่างๆ (ที่มาของภาพต้นฉบับ: Vilaca, J.L. Fonseca, J. และ Pinho, A.C. (2006))

Hyowon Moon Yong-Won Song Sungchul Kang และ Jinseok Kim (2013) นำเสนอวิธีการระบุตำแหน่งของเข็มที่ใช้ในการทำศัลยกรรม (ซึ่งมีขนาดค่อนข้างเล็กมาก) โดยการใช้เซนเซอร์ทำการระบุตำแหน่ง x, y ของเข็มและทำการสอบเทียบค่าที่ระบุได้จากเซนเซอร์เทียบกับที่ระบุจากกล้องที่ใช้เลนส์ชนิด Telecentric โดยเหตุผลที่เลนส์ชนิด Telecentric ถูกนำมาใช้ในการสอบเทียบนั้น เพื่อลดปัญหาของการบิดเบือนของภาพซึ่งอาจทำให้การคำนวณเพื่อระบุตำแหน่งของเข็มผิดพลาดโดยความแตกต่างของภาพที่ได้จากเลนส์ชนิด Telecentric กับเลนส์ชนิด Conventional สามารถเปรียบเทียบได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 (a) ตัวอย่างของภาพที่ถ่ายจากกล้องชนิด Telecentric (b) ตัวอย่างของภาพที่ถ่ายจากกล้องชนิด Conventional (ที่มาของภาพต้นฉบับ: Hyowon Moon Yong-Won Song Sungchul Kang และ Jinseok Kim (2013))

ในการสอบเทียบนั้น จะทำการสอบเทียบที่ตำแหน่งต่างๆ เพื่อให้ครอบคลุมกับการใช้งาน โดยตำแหน่งที่ได้จากการระบุของเซนเซอร์หลังจากทำการสอบเทียบสามารถแสดงดังรูปที่ 2.7(a) และ (b) และค่าที่ระบุได้และค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละตำแหน่งสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.8

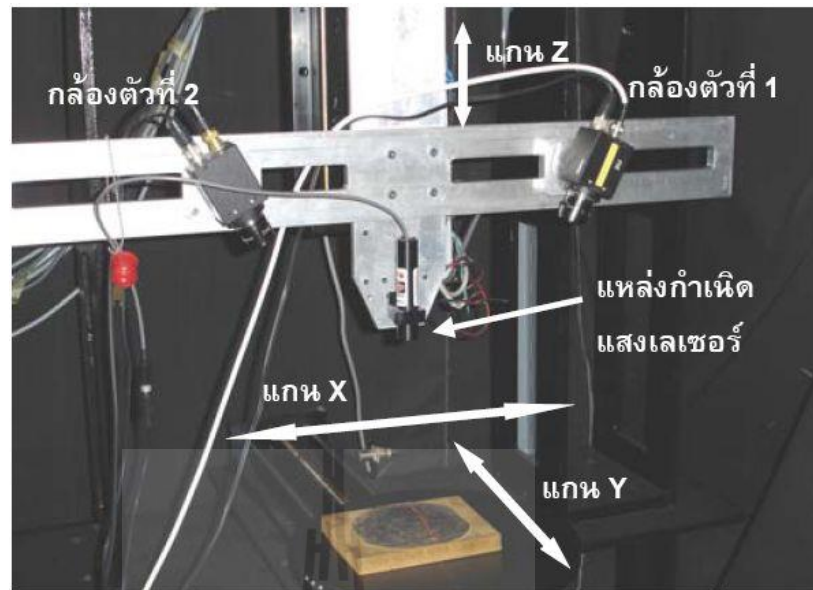


รูปที่ 2.7 ผลการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์เมื่อทำการสอบเทียบโดย (a) จุดกากบาทแสดงตำแหน่งของเข็มที่วัดได้จากกล้องที่ใช้เลนส์ชนิด Telecentric (b) จุดวงกลมแสดงตำแหน่งของเข็มที่ระบุด้วยเซนเซอร์ที่ผ่านการสอบเทียบมาแล้ว (ที่มาของภาพต้นฉบับ : Hyowon Moon Yong-Won Song Sungchul Kang และ Jinseok Kim (2013))

Position	Calibrated coordinate		Measured coordinate		Error (mm)	Error (%)
	x	y	x	y		
Neutral	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Up	-0.01	5.39	0.24	5.67	0.37	0.32
Upper right	6.14	5.99	6.31	6.07	0.19	0.16
Right	5.86	0.06	5.99	-0.16	0.26	0.22
Upper left	6.20	-5.55	6.03	-6.15	0.62	0.54
Down	-0.31	-5.25	-0.16	-5.75	0.52	0.45
Lower left	-6.38	-5.68	-6.11	-5.95	0.38	0.33
Left	-5.89	0.06	-5.67	0.04	0.23	0.20
Lower right	-6.39	5.63	-5.87	6.11	0.71	0.62

รูปที่ 2.8 ค่าตำแหน่ง x, y ของเข็มที่ถูกระบุที่ตำแหน่งต่างๆ และค่าความผิดพลาดสำหรับการระบุค่าที่ตำแหน่งต่างๆ (ที่มาของภาพต้นฉบับ: Hyowon Moon Yong-Won Song Sungchul Kang และ Jinseok Kim (2013))

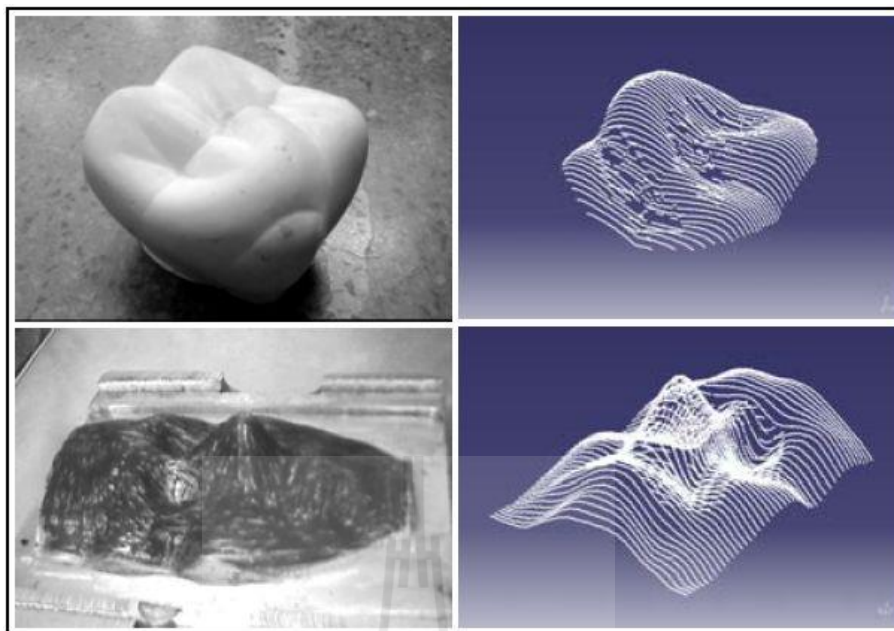
วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ พงศกร เพชรพันธ์ศิริ (พ.ศ.2548) ได้นำเสนอการพัฒนาเครื่องวัดพิทักสามมิติโดยใช้ระบบสเตอริโอวิชันร่วมกับแถบแสงเลเซอร์เพื่อใช้วัดพิทักพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการ โดยมีลักษณะโครงสร้างของเครื่องวัดพิทักต้นแบบดังรูปที่ 2.9 การทำงานคือระบบจะทำการฉายแสงเลเซอร์ลงบนชิ้นงานก่อนแล้วหลังจากนั้นระบบสเตอริโอวิชันสามมิติก็จะถ่ายภาพ ณ จุดที่ถูกฉายแสงเลเซอร์แล้วจากนั้นเข้ากระบวนการ image processing เพื่อลดรายละเอียดส่วนอื่นของภาพออกให้เหลือไว้เฉพาะเส้นแสงเลเซอร์ แล้วคำนวณค่าพิทักออกมาด้วยวิธี epipolar geometry โดยพิทักที่ได้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยสามารถนำมาสร้างพื้นผิวและสร้างเป็นแบบของชิ้นงานในคอมพิวเตอร์ได้ ดังรูปที่ 2.10 และ รูปที่ 2.11 การศึกษาการวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงวิธีทำงานร่วมกันระหว่าง กล้อง 2 ชุดกับแสงเลเซอร์ในระบบ stereo vision ซึ่งสามารถวัดความสูงของชิ้นงานออกมาได้ดี โดยเมื่อทำการทดสอบวัดพื้นผิวในลักษณะต่างๆ พบว่าเครื่องสามารถให้ผลการวัดที่ดี โดยความแม่นยำของเครื่องอยู่ในระดับ 350 ไมครอน (0.35 มิลลิเมตร) และเจ้าของงานวิจัยมีข้อเสนอแนะว่าหากใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ที่มีคุณภาพดีขึ้นจะทำให้ความแม่นยำของระบบดีขึ้น



รูปที่ 2.9 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องวัดพิกัดที่พัฒนาขึ้น
(ที่มาของภาพต้นฉบับ: วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ พงศกร เพชรพันธ์ศิริ (พ.ศ.2548))

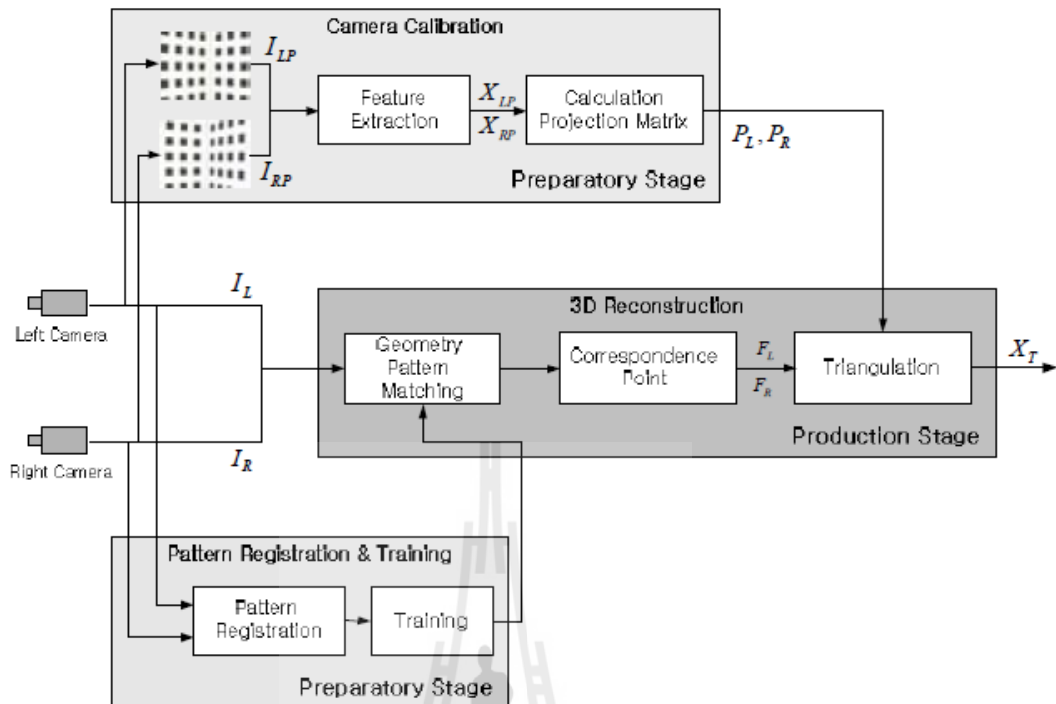


รูปที่ 2.10 ผลการวัดพื้นผิวโค้งสีดำและเมาส์
(ที่มาของภาพต้นฉบับ: วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ พงศกร เพชรพันธ์ศิริ (พ.ศ.2548))

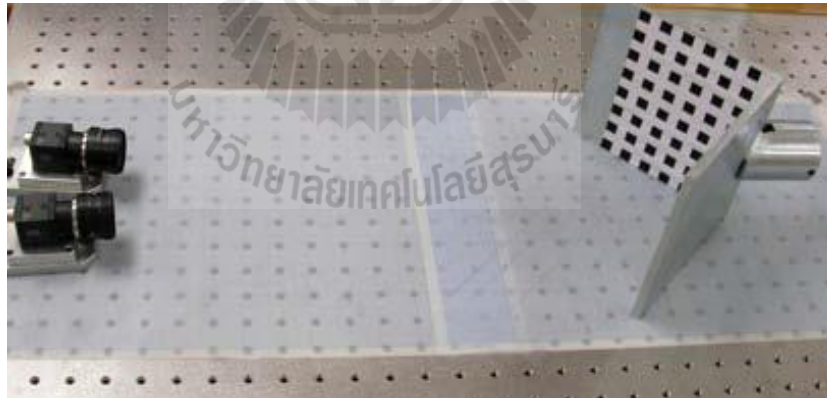


รูปที่ 2.11 ผลการวัดชิ้นงานแบบจำลองพื้นแกรมและชิ้นงานรูปไบหน้าคน
(ที่มาของภาพต้นฉบับ: วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ พงศกร เพชรพันธ์ศรี (พ.ศ.2548))

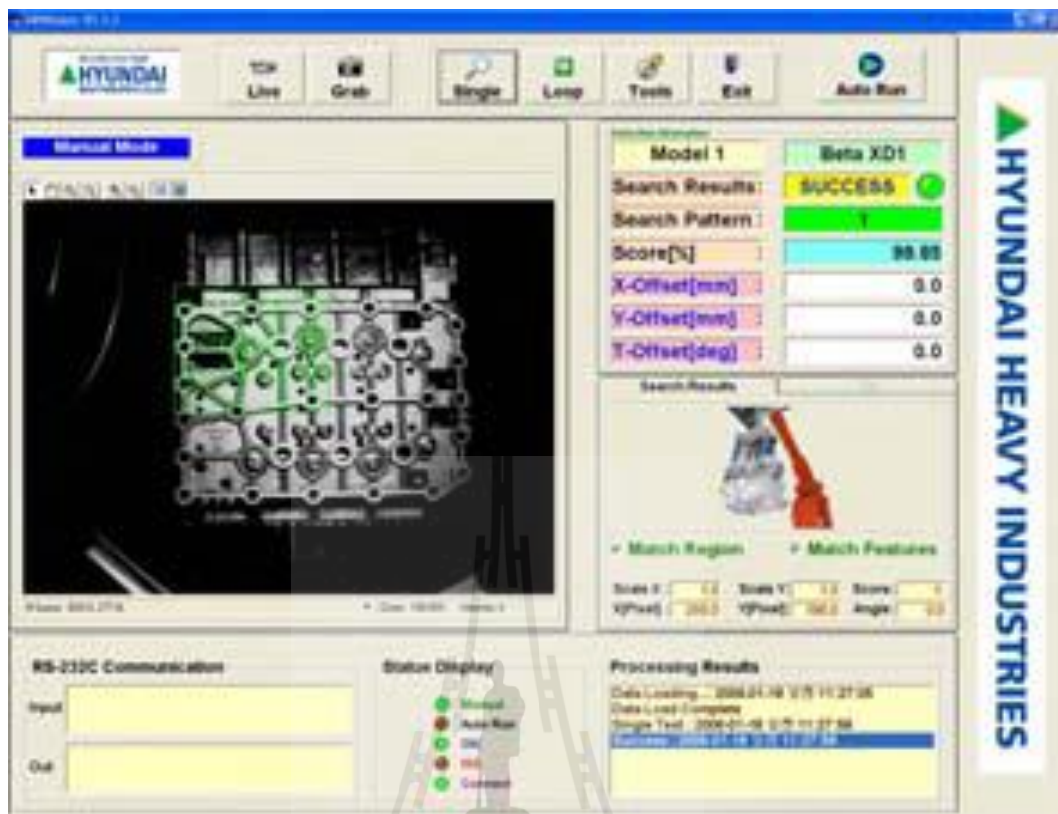
Jong-Kyu Oh และ Chan-Ho Lee (2007) ได้นำระบบสตรีโอวิชันสามมิติมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ประกอบชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรม โดยทำการพัฒนาระบบการคำนวณหาระยะห่างระหว่างกล้องที่ติดอยู่กับหุ่นยนต์กับชิ้นงานต่างๆที่หุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่ไปหยิบ-จับ ด้วยระบบสตรีโอวิชันสามมิติแทนที่การระบุระยะห่างด้วยการใช้เลเซอร์เซนเซอร์ โดยการใช้วิธีสอบเทียบกล้อง (camera calibration) ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 เพื่อระบุระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุเป้าหมายชนิดต่างๆที่ต้องการ นอกจากนี้ระบบสามารถเลือกลักษณะของวัตถุเป้าหมายเป้าหมายได้ว่าต้องการระบุระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุเป้าหมายชนิดใด โดยการใช้วิธีจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) ดังรูปที่ 2.14 โดยระบบนี้สามารถระบุระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุเป้าหมายเป้าหมายในระยะ-50 mm ถึง 50 mm ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนของระยะห่างจริงกับที่คำนวณได้ไม่เกิน 0.6%



รูปที่ 2.12 แผนภาพการทำงานของระบบวิชันสามมิติโดยวิธีการสอบเทียบกล้อง
(ที่มาของภาพต้นฉบับ: Jong-Kyu Oh และ Chan-Ho Lee (2007))

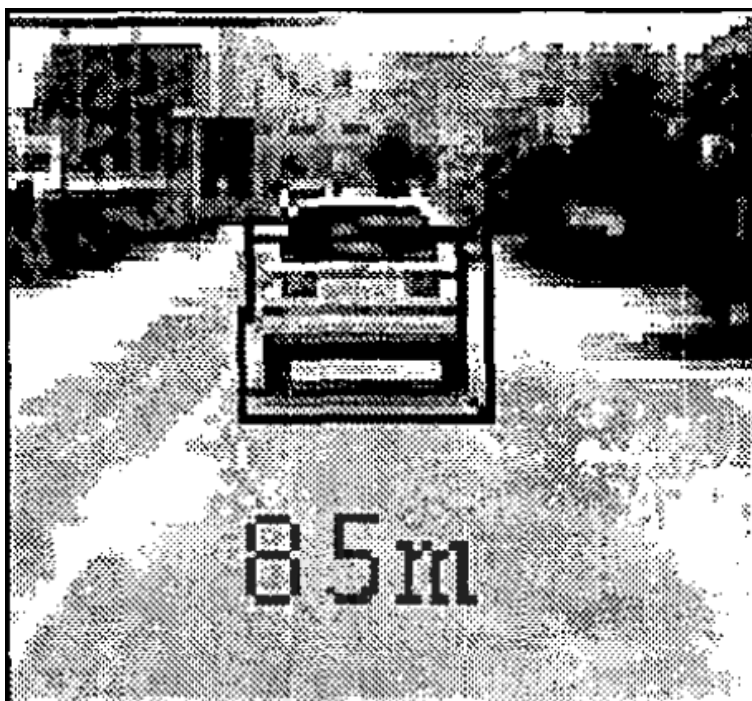


รูปที่ 2.13 การสอบเทียบกล้อง
(ที่มาของภาพต้นฉบับ: Jong-Kyu Oh และ Chan-Ho Lee (2007))



รูปที่ 2.14 การกำหนดลักษณะของวัตถุเป้าหมายเป้าหมายโดยใช้วิธีจดจำรูปแบบ (Pattern recognition) (ที่มาของภาพต้นฉบับ: Jong-Kyu Oh และ Chan-Ho Lee (2007))

Sergiu Nedeveschi และคณะ (2004) ได้นำระบบสเตอริโอวิชันสามมิติมาใช้ในการตรวจจับสิ่งกีดขวางบนพื้นผิวจราจรขณะขับขี้นานพาหนะ โดยสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางและสามารถระบุพิกัดของสิ่งกีดขวางในระบบสามมิติบนสภาวะพื้นผิวถนนจริงได้ โดยเจ้าของงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบระบบกับสภาวะท้องถนนและการจราจรที่หลากหลายเช่นสภาพการจราจรในเขตชุมชนทางหลวงหรือถนนในเขตชานเมือง ซึ่งระบบสามารถทำงานได้ดีในทุกสถานการณ์ โดยที่ระบบถือว่าทำงานแบบ real time ได้เพราะมีอัตราการถ่ายภาพอยู่ที่ 10 ภาพต่อวินาที (fps) การทำงานของระบบนี้มีระยะตรวจจับที่ไกลที่สุดอยู่ที่ 90 เมตร และมีความเชื่อถือได้อยู่ที่ ระยะ 10 – 60 เมตร ซึ่งความคลาดเคลื่อนจะแปรผันตามระยะของสิ่งกีดขวาง โดยจากการทดสอบจะเห็นว่า สิ่งกีดขวางที่มีระยะห่างอยู่ที่ 10 เมตร ระบบจะทำการคำนวณระยะห่างโดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 10 เซนติเมตร หากสิ่งกีดขวางที่มีระยะห่างอยู่ที่ 45 เมตร ระบบจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 30 เซนติเมตร และหากสิ่งกีดขวางที่มีระยะห่างอยู่ที่ 90 เมตร ระบบจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 2 เมตร ลักษณะการตรวจจับสิ่งกีดขวางแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วัตถุเป้าหมายกีดขวางบนพื้นผิวจราจรที่ระบบตรวจจับได้
(ที่มาของภาพต้นฉบับ: Sergiu Nedevschi และคณะ (2004))

2.4 สรุป

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาที่จะทำการวิจัยนั้นเป็นสิ่งที่ผู้วิจัยต้องทำการศึกษาค้นคว้าเพื่อที่จะสามารถนำทฤษฎีและวิธีการที่ผู้วิจัยท่านอื่นค้นคว้ามาแล้วนั้น มาทำการประยุกต์ใช้กับงานวิจัยของผู้วิจัยเพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ตรงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ของการวิจัยนี้ต่อไป ซึ่งจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้น เมื่อพิจารณาถึงเป้าหมายของงานวิจัยที่จะต้องพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติเพื่อให้สามารถระบุค่าความสูงของ HGA บนอาคารอง HGA ให้มีความแม่นยำสูงโดยที่ต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรนั้น ผู้วิจัยเห็นว่าหนึ่งในวิธีการที่เหมาะสมที่จะทำให้บรรลุเป้าหมายของงานวิจัยนี้คือการใช้วิธีการสอบเทียบโดยนำทฤษฎีการถดถอยพหุคูณ (Multiple regression) เข้ามาใช้ร่วมในการสอบเทียบโดยวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของการถดถอยพหุคูณและวิธีการสอบเทียบเพื่อให้ได้มาซึ่งการระบุค่าความสูงของ HGA ที่ถูกต้องแม่นยำนั้นสามารถแสดงได้ในบทต่อไป

บทที่ 3

การพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูง เพื่อระบุความสูงของ HGA ในงานประกอบชิ้นส่วนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

3.1 บทนำ

การพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติให้มีความแม่นยำสูงนั้นหนึ่งในวิธีการที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการระบุความสูงของชิ้นงานในระดับ ± 50 ไมโครเมตรคือวิธีสอบเทียบ (calibration) ระหว่างความสูงที่แท้จริงของวัตถุเป้าหมายกับพิกัดของจุด (x, y) ในระนาบ 2 มิติ จากกล้องสเตอริโอ 2 ตัวซึ่งถ่ายที่วัตถุเป้าหมายเดียวกัน (กำหนดให้ระบุพิกัดที่จุดเดียวกัน) เวลาเดียวกันแต่คนละมุมมอง กล่าวคือเป็นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีการถดถอยพหุคูณ (multiple regression) ในการหาความสัมพันธ์แบบหลายตัวแปรระหว่าง x_1, y_1, x_2, y_2 (ค่าพิกัด x, y ของกล้องตัวที่ 1 และ 2) กับความสูงที่แท้จริง (z_{actual}) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของ x_1, y_1, x_2, y_2 จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์ของ x_1, y_1, x_2, y_2 ที่ได้มาคำนวณกลับเพื่อหาค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายด้วยค่า x_1, y_1, x_2, y_2 ที่ตำแหน่งใดๆ ต่อไป

3.2 การคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าความสูงของ HGA

สมการทั่วไปของการถดถอยพหุคูณ คือ

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (3.1)$$

โดยที่

Y คือ ตัวแปรตาม

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ คือ ตัวแปรอิสระ

β_0 คือ ค่าคงที่

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_k$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว

\mathcal{E} คือ ค่าความผิดพลาด

สามารถนำสมการถดถอยพหุคูณ (3.1) มาประยุกต์ใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัด x , y ของ HGA ที่ได้จากกล้อง stereo ทั้งสองตัว (x_1, y_1, x_2, y_2) ได้โดยที่สมการของความสัมพันธ์คือ

$$z_{\text{actual}} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 y_1 + \beta_3 x_2 + \beta_4 y_2 \quad (3.2)$$

โดยที่

z_{actual} คือ ค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA

x_1, y_1 คือ พิกัดที่ถูกกำหนดให้ระบุในระนาบ 2 มิติ ของจุดบน HGA ที่ได้จากกล้องตัวที่ 1

x_2, y_2 คือ พิกัดที่ถูกกำหนดให้ระบุในระนาบ 2 มิติ ของจุดบน HGA ที่ได้จากกล้องตัวที่ 2

β_0 คือ ค่าคงที่

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ x_1, y_1, x_2, y_2 ตามลำดับ

จากนั้นทำการสอบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ของ $z_{\text{actual}}, x_1, y_1, x_2, y_2$ และสามารถนำสมการที่ (3.2) ไปแก้สมการเพื่อหาค่า $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ ได้

เมื่อเราทราบค่า $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ แล้ว เราก็จะสามารถคำนวณกลับเพื่อหาค่าความสูง z_{cal} ของ HGA ที่ตำแหน่งใดๆ ได้ดังนี้

$$Z_{\text{cal}} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 y_1 + \beta_3 x_2 + \beta_4 y_2 \quad (3.3)$$

โดยที่ Z_{cal} คือค่าความสูงของ HGA ที่ได้จากการคำนวณ

สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นทั่วไป (General linear regression) สามารถหาในรูปแบบของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$Y = Xb$$

$$X^T Y = X^T X b$$

$$b = (X^T X)^{-1} (X^T Y)$$

$$\begin{matrix} p \times 1 & p \times p & p \times 1 \end{matrix} \quad (3.4)$$

(ที่มาของสมการ: Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. and Wasserman, W. (1996). Applied Linear Statistical Models. 4th Ed. USA: WCB McGraw Hill)

โดยที่

$$Y = \begin{matrix} n \times 1 \\ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad X = \begin{matrix} n \times p \\ \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1,p-1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2,p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{n,p-1} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$b = \begin{matrix} p \times 1 \\ \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{p-1} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Y คือ เมทริกซ์ของตัวแปรตาม

X คือ เมทริกซ์ตัวแปรอิสระ

b คือ เมทริกซ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยเชิงเส้นทั่วไป

ดังนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับวิทยานิพนธ์ได้ดังนี้

$$Z = Xb \quad (3.5)$$

$$X^T Z = X^T X b \quad (3.6)$$

$$b = (X^T X)^{-1} (X^T Z) \quad (3.7)$$

$$5 \times 1 \quad 5 \times 5 \quad 5 \times 1$$

โดยที่

$$Z = \begin{matrix} n \times 1 \\ \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \end{matrix} \quad X = \begin{matrix} n \times 5 \\ \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & y_{11} & x_{12} & y_{12} \\ 1 & x_{21} & y_{21} & x_{22} & y_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & y_{n1} & x_{n2} & y_{n2} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$b = \begin{matrix} 5 \times 1 \\ \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Z คือ เมทริกซ์ของค่าความสูงของ HGA

X คือ เมทริกซ์ของค่าพิกัด x, y ที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้งสองตัว (x_1, y_1, x_2, y_2)

b คือ เมทริกซ์ของค่าสัมประสิทธิ์ของค่าพิกัด x, y

จากนั้นเมื่อทราบค่าของ เมทริกซ์ b จากสมการที่ (3.7) แล้ว สามารถนำกลับไปคำนวณ
กลับหาค่าความสูงของ HGA ได้ ดังนั้นจะได้ว่าค่าความสูงของ HGA ที่ได้จากการคำนวณคือ

$$Z_{cal} = b_0 + b_1x_1 + b_2y_1 + b_3x_2 + b_4y_2$$

(3.8)



3.3 ภาพรวมของระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูง

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการที่จะพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติที่มีความแม่นยำสูง จึงจำเป็นต้องจัดทำระบบจำลองขึ้นมาเพื่อที่จะได้ใช้ทำการทดลองสมมุติฐานต่างๆตามต้องการได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้จัดทำต้นแบบของระบบ สเตอริโอวิชันสามมิติขึ้น ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 (บน) ระบบสเตอริโอวิชันสามมิติโดยรวม (ล่างซ้าย, ล่างขวา) ระบบขณะทำการทดลองวัดค่าความสูงของ HGA

3.3.1 ส่วนประกอบของระบบ

ส่วนประกอบของระบบสามารถจำแนกได้ดังนี้

3.3.1.1 กล้อง: เลือกใช้กล้องชนิด CCD ยี่ห้อ Point Grey รุ่น Flea 1394IEE

แสดงในรูปที่ 3.2



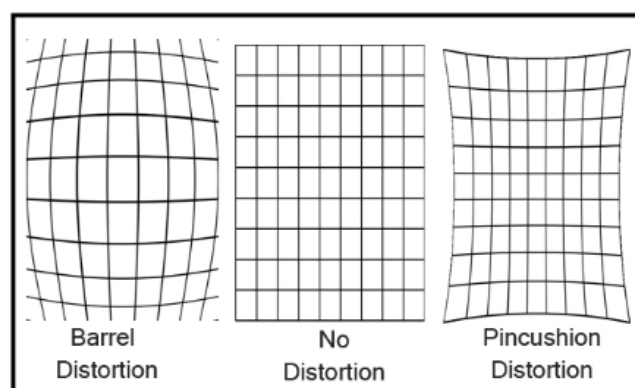
รูปที่ 3.2 กล้อง CCD ความละเอียด 1024 x 768 pixel

(<http://www.ptgrey.com>)

ข้อมูลของกล้องโดยสังเขป:

- ขนาดของจอร์รับภาพ: 1/3"
- ความละเอียด: 1024 x 768 pixel
- อัตราการถ่ายภาพ: 30 ภาพต่อวินาที

3.3.1.2 เลนส์: เนื่องจากต้องการลดปัญหาความบิดเบือนของภาพ (image distortion) ซึ่งเกิดจากความโค้งงอของเลนส์ดังรูปที่ 3.3 ผู้วิจัยได้ทำการเลือกเลนส์ประเภท Telecentric ซึ่งเลนส์ประเภทนี้เป็นเลนส์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาคือความบิดเบือนของภาพที่เกิดจากความโค้งงอของเลนส์และเลนส์ประเภท Telecentric นี้นิยมใช้กันแพร่หลายในระบบ machine vision ในอุตสาหกรรมการผลิตที่มีชิ้นงานขนาดเล็กเนื่องจากเป็น เลนส์ที่ลดปัญหาความบิดเบือนของภาพ และให้ความละเอียดของภาพสูง เมื่อเทียบกับเลนส์ประเภท CCTV ในที่นี้ผู้วิจัยเลือกใช้เลนส์ชื่อ MORITEX รุ่น MML05-HR65D ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ปัญหาความบิดเบือนของภาพซึ่งเกิดจากความโค้งงอของเลนส์ โดยที่ภาพกลาง เป็นภาพปกติที่ไม่มีการบิดเบือนจากเลนส์ (<http://yongsak.com>)



รูปที่ 3.4 เลนส์ชนิด Telecentric ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ข้อมูลของเลนส์โดยสังเขป:

- ชนิดของเลนส์: Telecentric
- กำลังขยาย: 0.5 เท่า
- Working distance: 65 มิลลิเมตร
- ความละเอียด (resolution): 12.8 ไมโครเมตร
- Depth of Field: 3.04 มิลลิเมตร
- อัตราความบิดเบือนของแสง (distortion): -0.001%

3.3.1.3 IEEE 1394 Standard Interface PCI Card: เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ติดต่อถ่ายโอนข้อมูลระหว่างกล้องกับคอมพิวเตอร์ควบคุม เนื่องจากกล้องที่ใช้ มีลักษณะการเชื่อมต่อสื่อสาร (interface) เป็นแบบ IEEE 1394 (Fi-Wi) ดังนั้นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างกล้องกับคอมพิวเตอร์ควบคุมจึงต้องเป็นแบบ IEEE 1394 ด้วยเช่นกัน แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างกล่องกับคอมพิวเตอร์ควบคุม ชนิด IEEE 1394 Standard Interface PCI Card (http://www.usbgear.com/PCI_IEEE1394_Card/)

3.3.1.4 สายสัญญาณเชื่อมต่อ IEEE 1394 (IEEE 1394 cable): เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณภาพจากกล้องมายัง IEEE 1394 card โดยสายสัญญาณเชื่อมต่อ IEEE 1394 แสดงในรูปที่ 3.6



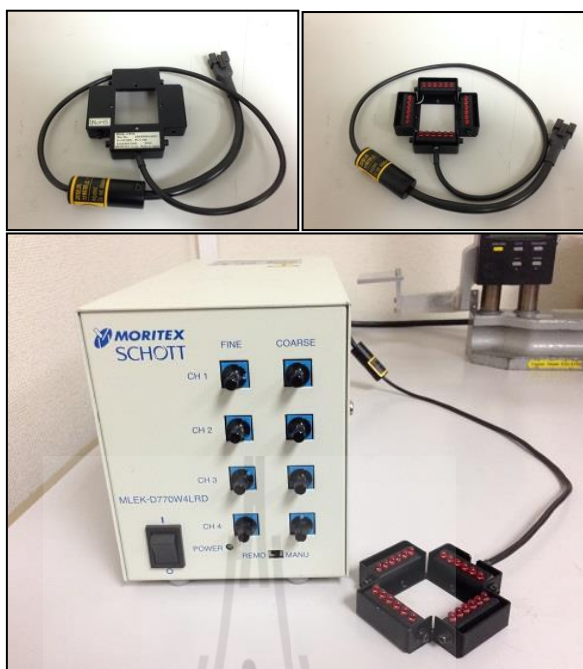
รูปที่ 3.6 สายสัญญาณเชื่อมต่อ IEEE 1394 (Wi-Fi)

3.3.1.5 ซอฟต์แวร์ Vision Pro: เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานในส่วนของการตรวจจับพิกัด x, y ของ HGA พัฒนาโดยบริษัท COGNEX

3.3.1.6 ซอฟต์แวร์ C#: เป็น ซอฟต์แวร์ ที่ใช้เขียนโปรแกรมหลักของระบบ มีหน้าที่โดยรวมดังนี้

1. เชื่อมต่อและควบคุมการทำงานของ Vision Pro ซอฟต์แวร์ ในการตรวจจับ HGA และรับข้อมูลพิกัดของ HGA จาก Vision Pro ซอฟต์แวร์ มาเพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะความสูงด้วยระบบวิชันสามมิติ
2. สอบเทียบความสูงเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์และนำกลับไปใช้ในการประมวลผลหาระยะความสูงของ HGA
3. ประมวลผลหาระยะความสูงของ HGA
4. พัฒนาหน้าหลักของโปรแกรมเพื่อแสดงผลและติดต่อกับผู้ใช้งาน

3.3.1.7 อุปกรณ์ส่องสว่าง (Light source): เป็นอีกหนึ่งส่วนสำคัญที่จะบอกถึงประสิทธิภาพของระบบในการระบุค่าความสูงของ HGA นอกเหนือไปจากกล้องและเลนส์ เนื่องจากในการที่จะได้มาซึ่งตำแหน่งพิกัด x, y ที่ถูกต้อง ภาพที่ได้มาต้องมีรายละเอียดที่ชัดเจนและส่วนสำคัญที่ทำให้ภาพชัดเจนก็คือการจัดวางตำแหน่งและการเลือกใช้นชนิดของอุปกรณ์ส่องสว่างที่เหมาะสมกับลักษณะทางกายภาพของตำแหน่งที่ต้องการระบุพิกัดเพื่อให้ได้มาซึ่งรายละเอียด ของตำแหน่งที่ต้องการที่ชัดเจนที่สุด โดยในการวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้อุปกรณ์ส่องสว่างยี่ห้อ MORITEX ชนิด Oblique Light ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 อุปกรณ์ส่องสว่างชนิด Bar light

3.3.1.8 อุปกรณ์ตรวจจับระยะห่าง (Displacement sensor): เป็นอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ในการทดลองเพื่อระบุค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA โดยการที่จะทราบค่าความสูงที่แท้จริงนั้น HGA จะต้องถูกวัดค่าความสูงด้วยเครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐานเชื่อถือได้ ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกใช้เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่างชนิดใช้แสงเลเซอร์ (laser displacement sensor) ยี่ห้อ KEYENCE รุ่น LK-G32 ดังแสดงในรูปที่ 3.8 โดย อุปกรณ์ตรวจจับระยะห่างชนิดใช้แสงเลเซอร์นี้ถูกนำไปใช้เป็นเครื่องมือสำหรับวัดระยะห่างของวัตถุโดยเฉพาะและนิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำสูงในด้านการระบุระยะของชิ้นงาน

ข้อมูลของเซนเซอร์ตรวจจับระยะห่างโดยสังเขป:

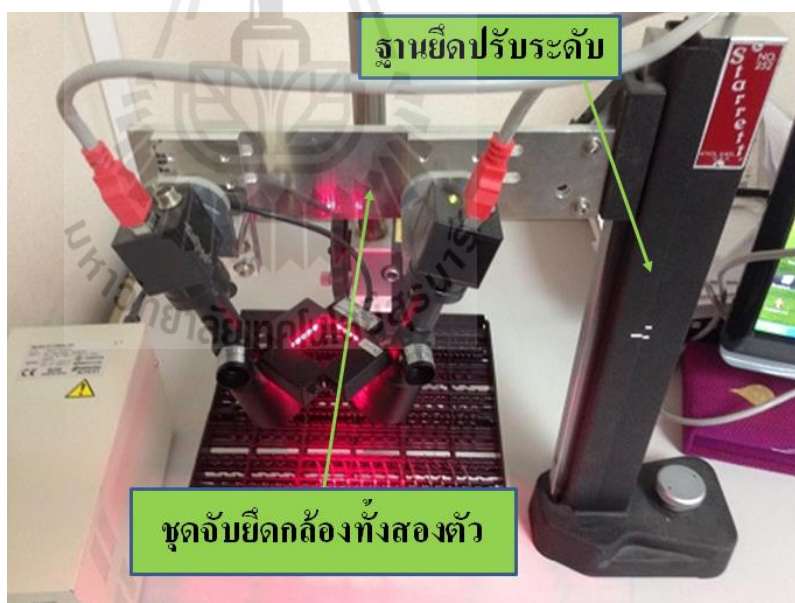
- ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์กับชิ้นงาน: 23.5มิลลิเมตร
- ขอบเขตที่สามารถวัดได้: ± 4.5 มิลลิเมตร (ครอบคลุมความลึกของ HGA ที่ระบบสามารถวัดได้ที่ 1.5มิลลิเมตร)
- อัตราการทำซ้ำ (Repeatability): 0.05 ไมโครเมตร (0.00005มิลลิเมตร)



รูปที่ 3.8 เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง

(<http://www.keyence.co.th/products/measure/laser/lkg/lkg.php>)

3.3.1.9 ชุดจับยึดกล้อง: ประกอบด้วยขาตั้งปรับระดับได้ที่ยึดติดอยู่กับชุดจับยึด
 ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ชุดจับยึดกล้อง

3.3.1.10 Vernier Height gauge: เป็นเครื่องมือสำหรับวัดความสูงของชิ้นงาน
 สามารถปรับขึ้น - ลงได้ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ในการทดลองนี้ ผู้วิจัยใช้ Height gauge เป็นอุปกรณ์

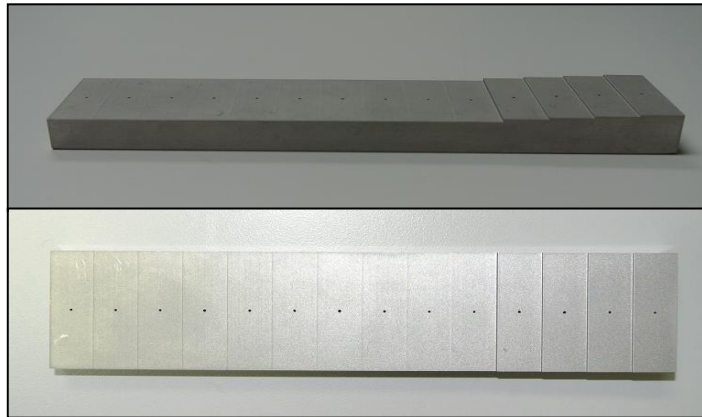
สำหรับปรับถาดรอง HGA ขึ้น-ลง เพื่อให้ได้ความสูงตามต้องการส่วนการอ่านค่าความสูงของ HGA นั้นใช้เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง เป็นเครื่องมือในการวัด



รูปที่ 3.10 Vernier height gauge

3.3.1.11 Calibration gauge(ตัวกำหนดความสูงมาตรฐานในการสอบเทียบ):

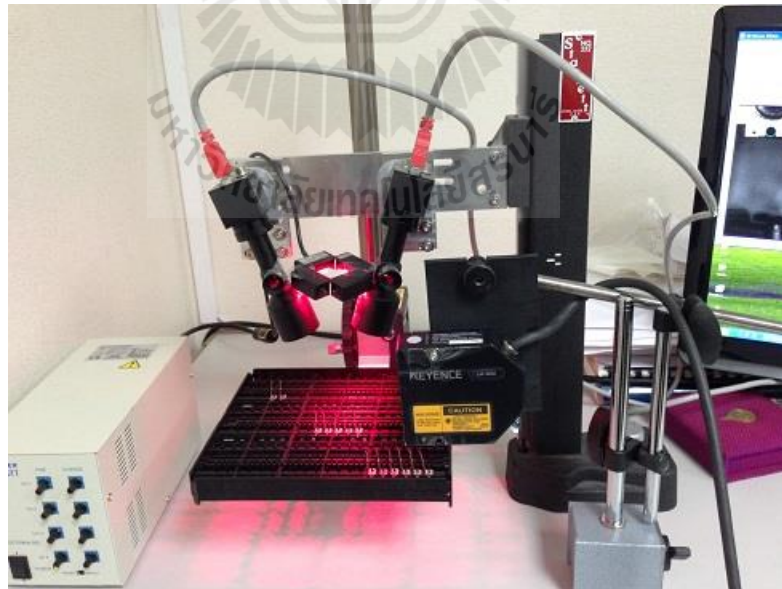
เป็นชิ้นงานมาตรฐานที่มีความสูงหลายระดับโดยความสูงในระดับต่างๆ ซึ่งถูกวัดและระบุค่าด้วยเครื่องวัด CMM (Coordinate Measuring Machine) ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐาน มีความน่าเชื่อถืออย่างมากและถูกใช้ในการระบุขนาดของชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมที่ผู้วัดต้องการทราบขนาดจริงของชิ้นงานที่มีขนาดค่อนข้างเล็กโดย calibration gauge นี้ถูกออกแบบเพื่อนำมาใช้ในการทดลองเพิ่มเติมในการระบุค่าความสูงของวัตถุอื่นนอกเหนือไปจาก HGA ซึ่ง calibration gauge แสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 Calibration gauge

3.3.2 การติดตั้งระบบ

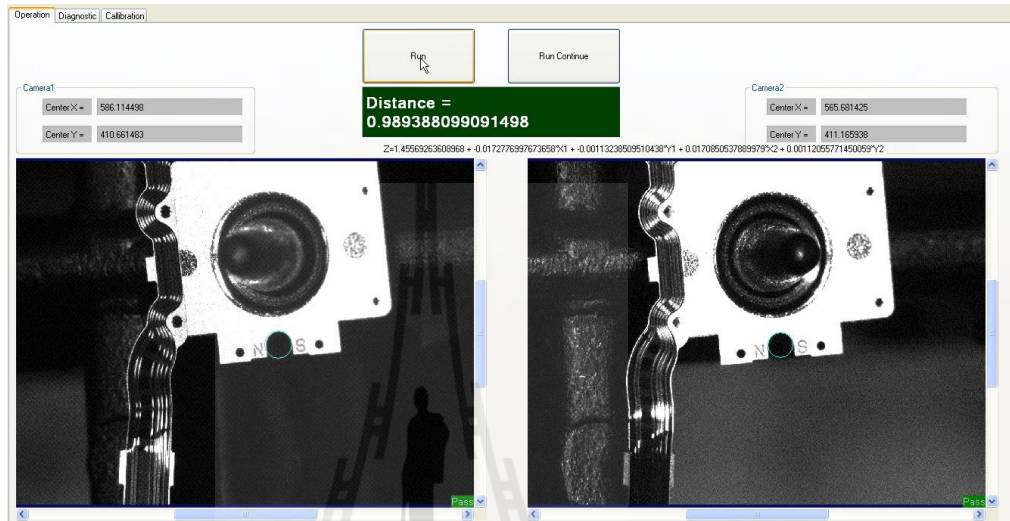
การติดตั้งประกอบอุปกรณ์ต่างๆเข้าด้วยกันนั้น มีจุดที่ต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษ คือ ตำแหน่งการติดตั้งของกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัว ที่ต้องให้มีระยะห่างจาก HGA เท่ากันเพื่อเพิ่มความลึกภาพที่สามารถใช้งานได้ของระบบ (depth of field) และแสงสว่าง ต้องให้เทียบเท่ากันระหว่างกล้องทั้ง 2 ตัวดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งและการติดตั้งระบบสเตอริโอ 3 มิติ

3.3.3 โปรแกรมควบคุมและใช้งานระบบ

ตัวโปรแกรมจะประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วนคือ ส่วนปฏิบัติการ (Operation), ส่วนของการตรวจสอบและตั้งค่า (Diagnostic) และส่วนของการสอบเทียบ (calibration) ดังแสดงในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ภาพรวมของ โปรแกรมควบคุมหลักของระบบ

3.3.3.1 ส่วนปฏิบัติการ (Operation) ประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้:

1. ปุ่มคำสั่งคำนวณความสูงของ HGA แบบ 1 ครั้ง (ปุ่ม Run)
2. ปุ่มคำสั่งคำนวณความสูงของ HGA แบบต่อเนื่อง (ปุ่ม Run Continue)
3. ส่วนแสดงผลภาพที่ถูกถ่ายจากกล้องตัวที่ 1 และตัวที่ 2 และแสดงผลการตรวจจับพิกัดของจุดที่ต้องการ
4. ส่วนแสดงผลการระบุพิกัด x, y ของกล้องทั้ง 2 ตัว
5. ส่วนแสดงผลสูตรการคำนวณ (แสดงให้เห็นค่าของสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณ โดยสัมประสิทธิ์เหล่านี้ถูกคำนวณได้จากการสอบเทียบซึ่งวิธีการสอบเทียบจะกล่าวถึงต่อไป ในหัวข้อที่ 3.3.2.3 การสอบเทียบ)
6. ส่วนแสดงผลการคำนวณหาค่าความสูงของ HGA

3.3.3.2 ส่วนของการตรวจสอบและปรับตั้งค่า (Diagnostic) ใช้ เครื่องมือของซอฟต์แวร์ Cognex Vision Pro ในการปรับแก้และตรวจจับพิกัดของ HGA หรือ วัตถุเป้าหมายที่ต้องการ

3.3.3.3 ส่วนของการสอบเทียบ: ส่วนนี้เป็นส่วนสำคัญที่จะบ่งบอกถึงความสามารถในคำนวณความสูงของ HGA หรือวัตถุเป้าหมาย ว่าคำนวณได้ถูกต้องและแม่นยำเพียงใด

3.4 การทดลอง

3.4.1 การทดสอบความสามารถในการระบุพิกัด x, y ของตำแหน่งที่กำหนด

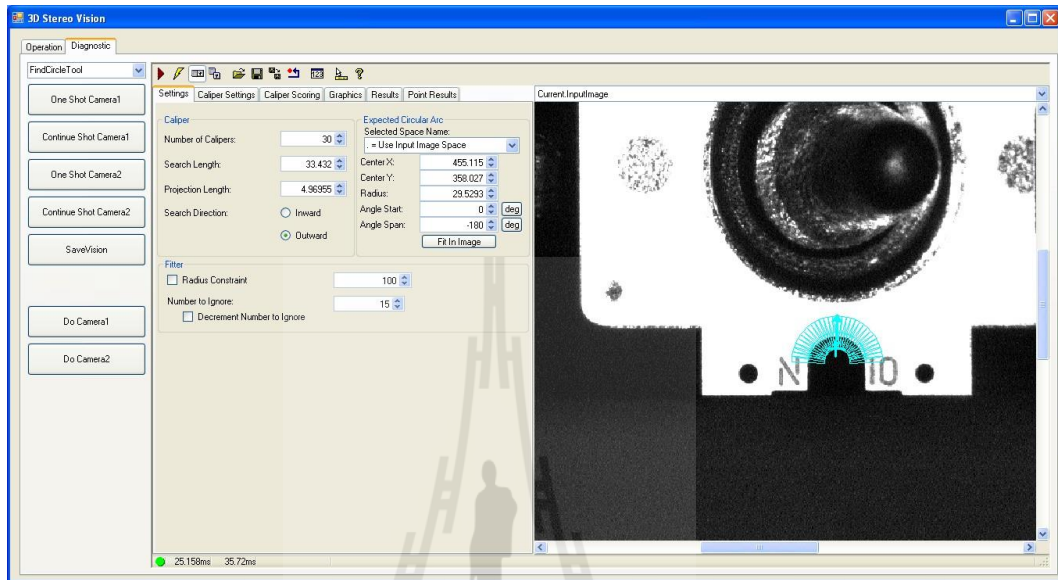
หลังจากที่ผู้วิจัยจัดทำชุดต้นแบบของระบบทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เบื้องต้นแล้ว เริ่มทำการทดสอบระบบโดยให้ระบบลองตรวจจับหาพิกัด x, y ของจุดที่กำหนด ด้วยกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวโดยโปรแกรมเป็นเวอร์ชันที่ 1 ซึ่งยังไม่มีฟังก์ชันการสอบเทียบและยังไม่สามารถคำนวณความสูงของ HGA ได้

ค่าพิกัด x, y ของ HGA ที่ถูกกำหนดให้กล้องสเตอริโอระบุนั้น ผู้วิจัยกำหนดให้ใช้จุดศูนย์กลางของส่วนโค้งครึ่งวงกลมด้านล่างของ HGA ดังแสดงในรูปที่ 3.14



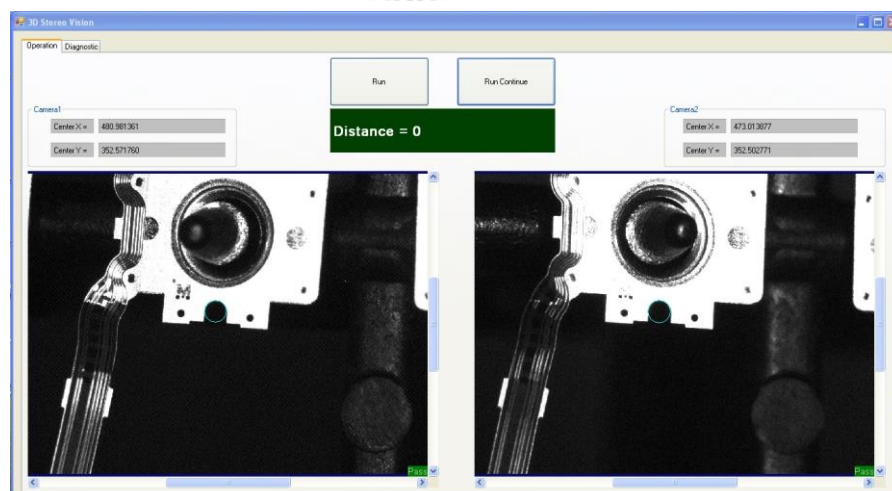
รูปที่ 3.14 จุดที่กำหนดให้กล้องสเตอริโอทั้ง 2 ทำการระบุพิกัด x, y คือพิกัดของจุดกึ่งกลางของส่วนโค้งครึ่งวงกลมด้านล่างของ HGA ที่อยู่ภายในกรอบสี่เหลี่ยมในรูป

การระบุพิกัด x, y ของจุดที่กำหนดบน HGA นั้นสามารถทำได้โดยการใช้เครื่องมือในการระบุจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งใน Software Vision Pro ที่ชื่อ “FindCircleTool” ดังรูปที่ 3.15



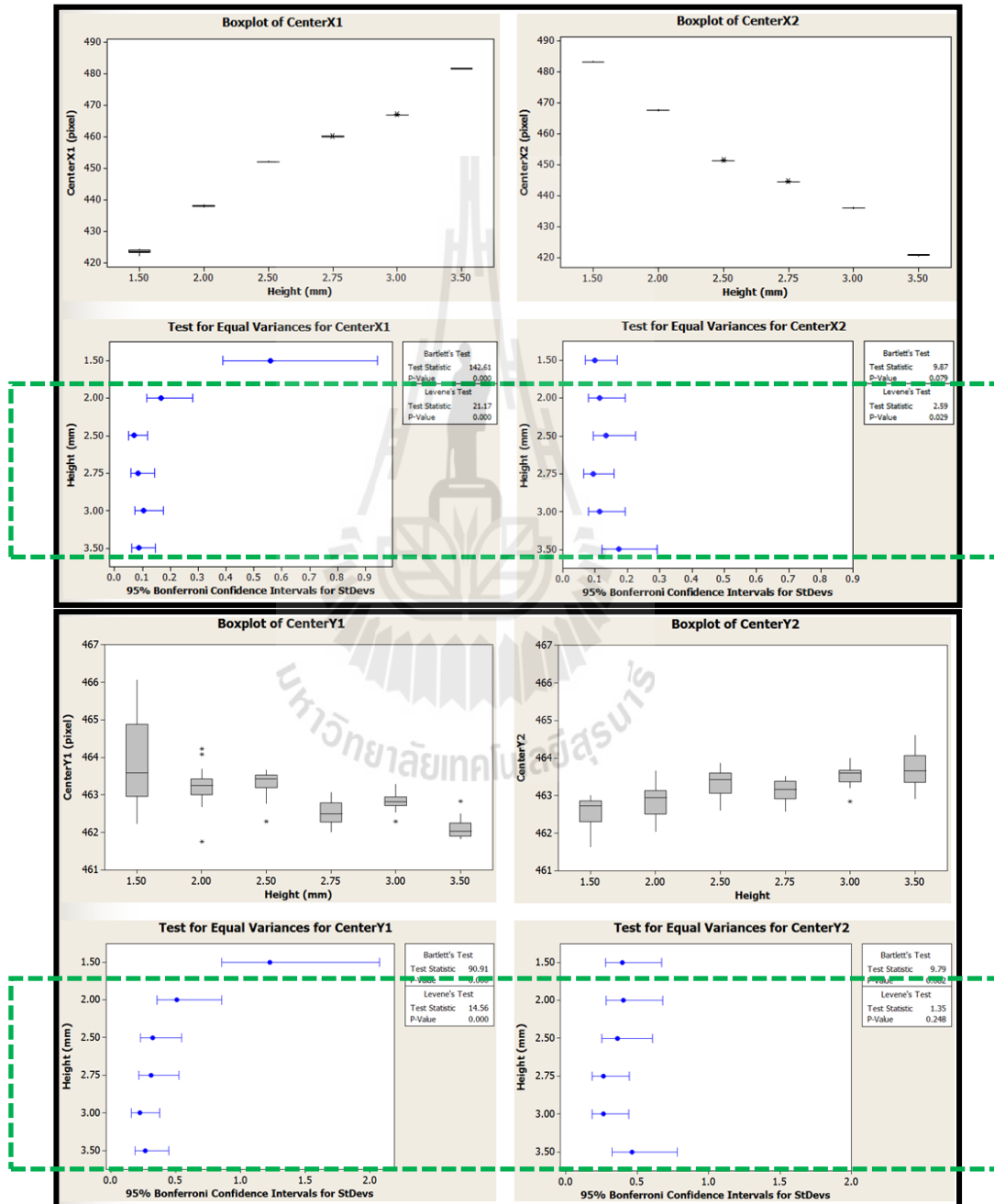
รูปที่ 3.15 แสดงการตรวจจับหาพิกัด x, y ของจุดศูนย์กลางของส่วนโค้งด้านล่างของ HGA ด้วยการใช้อุปกรณ์ “FindCircleTool” โดยซอฟต์แวร์ Vision Pro ของ Cognex

จากการทดสอบได้ผลว่าระบบสามารถตรวจจับพิกัดของ HGA ได้ตามวัตถุประสงค์ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 การทดสอบการตรวจจับพิกัด x, y ของ HGA ของกล้องสเตอริโอตัวที่ 1 และ 2

จากนั้นได้ทำการปรับระดับความสูงของ HGA ขึ้น-ลง ทีละ 50ไมโครเมตร โดยใช้ digital height gauge เพื่อระบุความลึกที่สามารถทำงานได้ของระบบ โดยจากการทดลองจะได้ว่า ระบบสามารถทำงานได้ดีที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตร โดยหากที่ความลึกมากกว่านี้ความสามารถในการตรวจซ้ำ (repeatability) ของระบบจะไม่คงที่ ดังรูปที่ 3.17

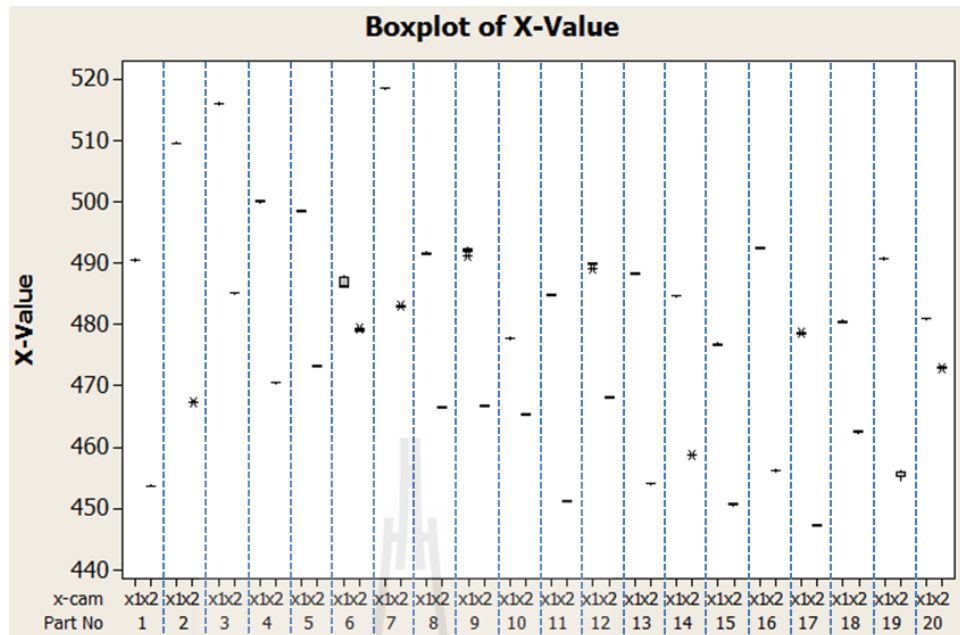


รูปที่ 3.17 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถตรวจซ้ำความสูงได้ดีในช่วง 1.5 มิลลิเมตร

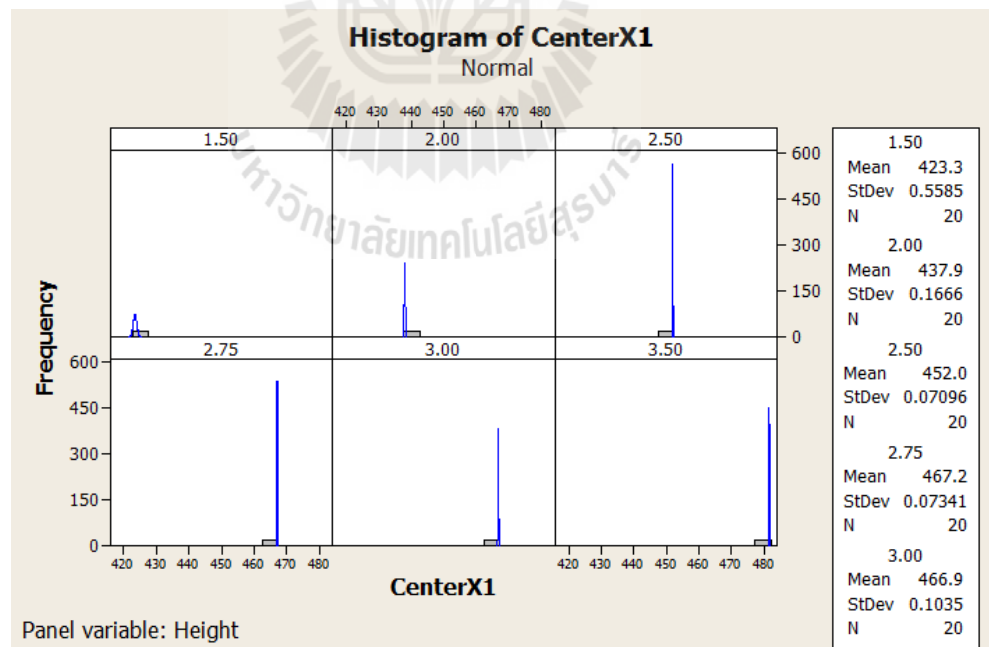
และจากระยะความสูงของ HGA ที่ถูกปรับทีละ 50 ไมโครเมตรนั้นจะเห็นว่าพิกัดในแนวแกน x ที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัว ถูกแยกออกเป็นกลุ่มโดยชัดเจนดังรูปที่ 3.17 (บน) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถแยกแยะข้อมูลพิกัด x, y ของความสูงแต่ละตัวออกจากกันได้ ดังนั้นข้อมูลนี้จะชี้ให้เห็นว่า ระบบมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถแยกแยะความสูงของ HGA ที่ต่างกัน 50 ไมโครเมตรได้ (ความละเอียด ± 50 ไมโครเมตร)

เมื่อพิจารณาจากวิธีการที่จะได้มาซึ่งค่าความสูงของ HGA ที่ถูกต้องแม่นยำแล้ว สิ่งที่มีผลต่อความถูกต้องของการระบุความสูงของ HGA คือความถูกต้องในการระบุพิกัด x, y ของตำแหน่งที่กำหนดบน HGA ของกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัว เพราะ พิกัด x, y ที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวนั้น เป็นปัจจัยหลักที่ต้องถูกนำมาคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การสอบเทียบในสมการที่ (3.7) และถูกนำมาคำนวณหาค่าความสูงของ HGA ในสมการที่ (3.8)

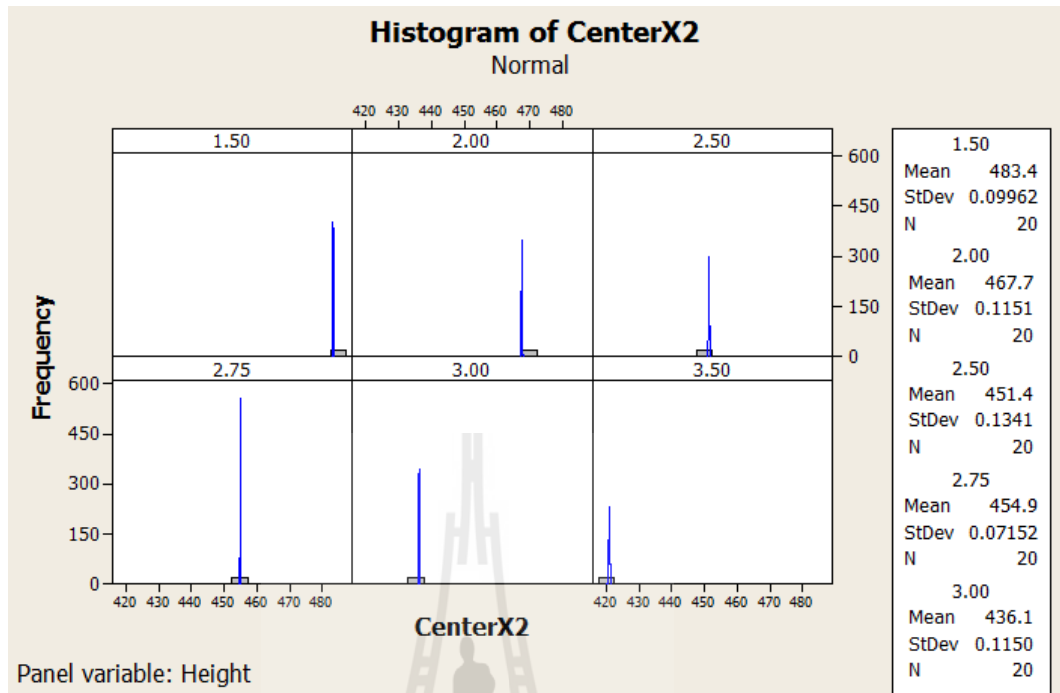
เมื่อทราบดังนี้แล้วผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อทดสอบความสามารถในการตรวจจับพิกัด x, y ของตำแหน่งที่กำหนด ว่ามีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอต่อการนำมาคำนวณหาระยะความสูงของ HGA ที่ความละเอียด ± 50 ไมโครเมตร หรือไม่ โดยผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มจำนวนของ HGA ในการตรวจจับพิกัด เป็น 20 ตัวเพื่อทดสอบความเชื่อมั่นในระยะยาว (reliability) ของระบบโดยที่ HGA ทุกตัวที่จะถูกทำการอ่านหาค่าพิกัด x, y จะถูกวางอยู่กับที่ในตำแหน่งเดิมแล้วให้ระบบตรวจจับพิกัด x, y ซ้ำกัน 20 ครั้ง เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการทำซ้ำ (repeatability) ของระบบ ซึ่งจากผลการทดลองข้างต้นจะเห็นว่า ระบบสามารถตรวจจับและแยกแยะค่าพิกัดที่ได้จากกล้องตัวที่ 1 และตัวที่ 2 อย่างชัดเจนดังรูปที่ 3.18 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าพิกัด x_1 และ x_2 ที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัว ถูกแยกออกจากกันอย่างเห็นได้ชัด สำหรับ HGA ทั้ง 20 ตัว และมีค่าความแปรผัน (standard deviation) น้อยทั้ง 20 ตัวเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 3.19 และรูปที่ 3.20 จึงเป็นที่น่าเชื่อถือได้ว่าการคำนวณหาค่าความสูงของ HGA จะมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความผิดพลาดจากการตรวจจับพิกัดของกล้องสเตอริโอทั้งสองตัวน้อยมาก



รูปที่ 3.18 ค่าพิสัยแกน x ที่อ่านได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวเมื่อเพิ่มจำนวน HGA ในกาทดสอบ การตรวจจับเป็น 20 ตัวและแต่ละตัวจะถูกทำการตรวจจับพิสัยซ้ำ 20 ครั้งด้วยกัน



รูปที่ 3.19 ค่าความแปรผันของพิสัย x_1 ที่ค่าความสูงต่างๆที่อ่านได้จากกล้องสเตอริโอตัวที่ 1



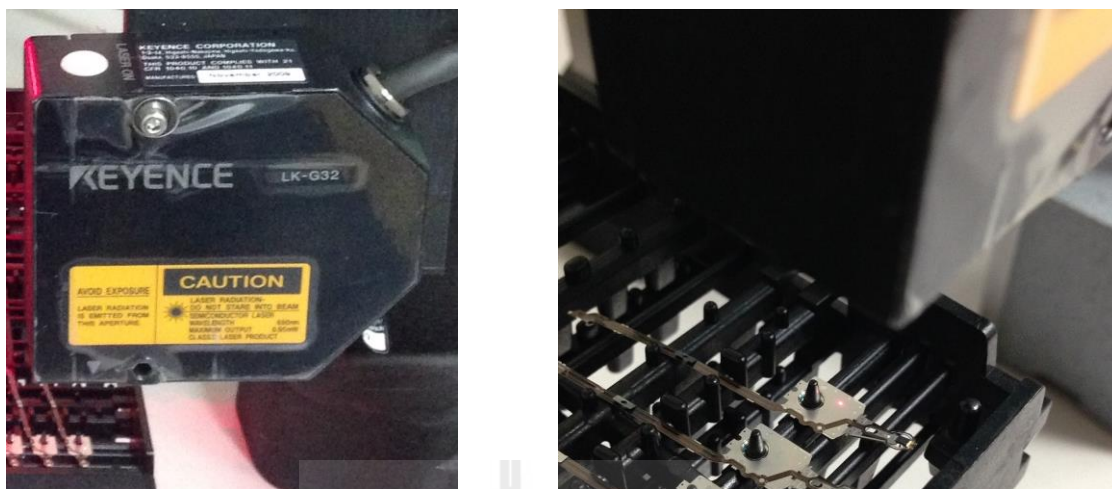
รูปที่ 3.20 ค่าความแปรผันของพิกัด x_2 ที่ค่าความสูงต่างๆที่อ่านได้จากกล้องสเตอริโอตัวที่ 2

3.4.2 การสอบเทียบระหว่างค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA เทียบกับค่าพิกัด $x_1, y_1, x_2,$

y_2

หลังจากที่ระบบทำการระบุพิกัด x, y ของกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสอบเทียบ (calibration) ระหว่างค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA กับค่าพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของการสอบเทียบตามสมการที่ (3.7) เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความสูงของ HGA ในขั้นตอนสุดท้ายตามสมการที่ (3.8) ต่อไป

การสอบเทียบนั้นระบบต้องการทราบค่าสัมประสิทธิ์ของการสอบเทียบ 5 ค่า ซึ่งก็คือ b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 โดยขั้นแรก ผู้วิจัยจะต้องทราบค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA ก่อน โดยการที่จะทราบค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA นั้น HGA จะต้องถูกวัดค่าความสูงด้วยเครื่องมือวัดที่ได้มาตรฐานเชื่อถือได้ ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยเลือกใช้ เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง ยี่ห้อ KEYENCE รุ่น LK-G32 ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับวัดระยะห่างของวัตถุโดยเฉพาะ โดยลักษณะการวัดแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง ขณะทำการวัดค่าความสูงของ HGA

3.4.2.1 ขั้นตอนการสอบเทียบ

1. วาง HGA ลงบนถาดรอง HGA และวางถาดรอง HGA ลงบนฐานของ Digital Height gauge
2. ปรับระยะห่างระหว่างกล้องสเตอริโอทั้งสองตัวกับ HGA ให้ได้ระยะโฟกัสของภาพที่ชัดเจนที่สุด
3. ใช้ เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง วัดความสูงของ HGA และตั้งค่าเริ่มต้นให้เป็น 0.000 มิลลิเมตร (เนื่องจากไม่สามารถใช้ เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง วัดความสูงของ HGA ขณะที่ใช้กล้องตรวจจับ HGA ได้ จึงได้ทำการวัดค่าความสูงของ HGA ตัวอื่นที่อยู่บนระนาบบนถาด HGA เดียวกันแทน ซึ่งระดับความสูงที่ปรับขึ้น-ลงสามารถอ้างอิงระยะห่างระหว่างความสูงแต่ละระดับของ HGA ตัวที่ระบบกำลังวัดความสูงได้)
4. ปรับระดับความสูงของ HGA ลงมาที่ระดับ-0.5มิลลิเมตร โดยปรับความสูงด้วย Height gauge และ อ่านค่าความสูงจาก เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง
5. บันทึกค่า ความสูงที่แท้จริงของ HGA
6. ให้ระบบทำการระบุพิกัด x, y ของ HGA
7. บันทึกข้อมูลพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2
8. ปรับระดับความสูงของ HGA ขึ้นมาที่ระดับ-0.15 มิลลิเมตร แล้วทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 6 และ 7
9. ปรับระดับความสูง และ ระบุพิกัด x, y ของ HGA ที่ระดับ 0.00 0.015 และ 0.5 มิลลิเมตร โดยทำซ้ำตามขั้นตอนที่ 6 และ 7

10. หลังจากทำซ้ำจนได้ข้อมูลพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ของความสูงครบ 5 ค่าแล้วได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ที่ระบุได้จาก ความสูงของ HGA 5 ระดับ

Z_{actual}	x_1	y_1	x_2	y_2
-0.500	470.6224634	353.2669	410.6624	353.6898367
-0.152	459.7172612	353.1881	420.958	352.7194983
0.000	455.4406109	354.0359	425.7766	353.2032846
0.156	450.5493498	353.2444	429.9379	352.2253285
0.505	437.0780677	346.7886	443.5165	345.0896492

หลังจากที่ได้ข้อมูลความสูงที่แท้จริงและพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ของ HGA ที่ระบุได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวแล้ว นำข้อมูลทั้งหมดมาจัดให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์โดยที่เมตริกซ์ Z (ขนาด 5×1) คือ เมตริกซ์ของค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA และเมตริกซ์ X (ขนาด 5×5) คือ เมตริกซ์ของค่าพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ของ HGA ที่ระบุโดยกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวและสามารถนำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 ตามสมการที่ (3.7) ได้ด้วยโปรแกรม Microsoft excel ดังรูปที่ 3.22

Calibration parameters						
Matrix Z		Matrix X				
z_i -actual	k_i	x_{1i}	y_{1i}	x_{2i}	y_{2i}	
-0.500	1	470.6224634	353.2669	410.6624	353.6898367	
-0.152	1	459.7172612	353.1881	420.958	352.7194983	
0.000	1	455.4406109	354.0359	425.7766	353.2032846	
0.156	1	450.5493498	353.2444	429.9379	352.2253285	
0.505	1	437.0780677	346.7886	443.5165	345.0896492	

Calculated by excel from $b = (X'X)^{-1} (X'Z)$	
Matrix b (Calculated Coefficient)	
b	
$b_0 =$	9.486872658
$b_1 =$	-0.03567789
$b_2 =$	-0.046984869
$b_3 =$	0.001700795
$b_4 =$	0.064190958

รูปที่ 3.22 ค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 ที่คำนวณได้จากเมตริกซ์ Z และ เมตริกซ์ X ด้วยสมการที่ (3.7)

เมื่อเปรียบเทียบค่าของสัมประสิทธิ์ที่คำนวณจากโปรแกรม Minitab แล้วผลปรากฏว่าค่าของสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จากสมการที่ (3.7) มีค่าตรงกับค่าที่คำนวณได้ด้วยโปรแกรม Minitab ดังรูปที่ 3.23

Results for: Exel calculation	
General Regression Analysis: z versus x1, y1, x2, y2	
Regression Equation	
z = 9.48687 - 0.0356779 x1 - 0.0469849 y1 + 0.00170079 x2 + 0.064191 y2	

รูปที่ 3.23 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณด้วยโปรแกรม Minitab

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 แล้วนำมาแทนค่าในสมการที่ (3.8)

จะได้ว่า $Z = 9.486872658 - 0.03567789x_1 - 0.046984869y_1 + 0.001700795x_2 + 0.064190958y_2$

ซึ่งเมื่อทดลองนำกลับมาคำนวณกลับเพื่อหาระยะความสูงของ HGA เพื่อเปรียบเทียบกับค่าความสูงที่แท้จริงที่วัดจาก เซนเซอร์ตรวจจับระยะห่าง แล้ว ผลที่ได้คือระบบสามารถระบุความสูงของ HGA ได้ใกล้เคียงกับค่าความสูงที่แท้จริงที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรตามเป้าหมายที่วางไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.24

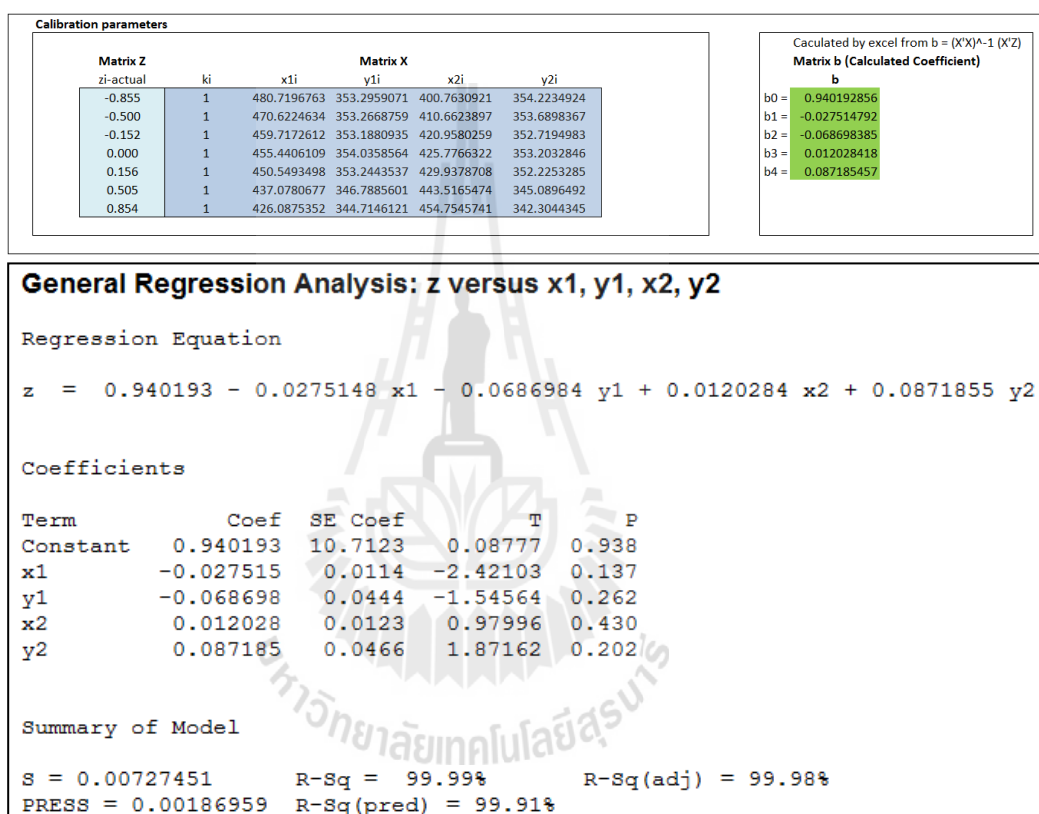
	x1	y1	x2	y2	z-actual (mm)	z-calculated (mm)	z-difference (mm)
Calibration value	470.6224634	353.2668759	410.6623897	353.6898	-0.500	-0.500	0.000
	459.7172612	353.1880935	420.9580259	352.7195	-0.152	-0.152	0.000
	455.4406109	354.0358564	425.7766322	353.2033	0.000	0.000	0.000
	450.5493498	353.2443537	429.9378708	352.2253	0.156	0.156	0.000
	437.0780677	346.7885601	443.5165474	345.0896	0.505	0.505	0.000

รูปที่ 3.24 เปรียบเทียบค่าความสูงของ HGA ระหว่างค่าความสูงที่แท้จริงกับค่าความสูงที่ระบบระบุได้แสดงให้เห็นว่าค่าความสูงที่ระบบระบุได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร (± 0.05 มิลลิเมตร)

3.4.3 การระบุค่าความสูงของ HGA

หลังจากที่ได้ทำการสอบเทียบและระบบสามารถระบุค่าได้ถูกต้องแม่นยำได้ใกล้เคียงกับค่าความสูงที่แท้จริงที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรตามเป้าหมายที่วางไว้

ในช่วงความสูงของการสอบเทียบในหัวข้อที่ 3.4.2 แล้ว เพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้จริงตามช่วงความสูงที่ระบบสามารถระบุได้ ผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบด้วยค่าความสูงที่ครอบคลุมกับช่วงความลึกที่ระบบสามารถระบุได้ดีที่ 1.5 มิลลิเมตร ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.4.1 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกค่าความสูงที่ใช้สอบเทียบอยู่ที่ค่า -0.85 ถึง 0.85 มิลลิเมตร และเลือกสอบเทียบกับค่าความสูงของ HGA 7 ระดับ ได้ผลการสอบเทียบดังรูปที่ 3.25 โดยจะเห็นว่าค่า R-Sq (adj) = 99.98% ซึ่งบ่งบอกว่าสมการความสัมพันธ์มีความน่าเชื่อถือค่อนข้างมาก



รูปที่ 3.25 ทำการสอบเทียบระบบด้วยค่าความสูงของ HGA 7 ระดับ (บน) คำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel (ล่าง) คำนวณด้วยโปรแกรม Minitab

จากนั้นทดสอบที่ค่าความสูงค่าต่างๆเพื่อทดสอบความสามารถในการระบุความสูงของ HGA ของระบบ ได้ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ คือระบบสามารถระบุความสูงของ HGA ได้ใกล้เคียงกับค่าความสูงที่แท้จริงที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรตามเป้าหมายที่วางไว้ดังแสดงในรูปที่ 3.26

	x1	y1	x2	y2	z-actual (mm)	z-calculated (mm)	z-difference (mm)
Calibration value	480.7196763	353.2959071	400.7631	354.2235	-0.855	-0.854	-0.001
	470.6224634	353.2668759	410.6624	353.6898	-0.500	-0.502	0.002
	459.7172612	353.1880935	420.958	352.7195	-0.152	-0.157	0.005
	455.4406109	354.0358564	425.7766	353.2033	0.000	0.003	-0.003
	450.5493498	353.2443537	429.9379	352.2253	0.156	0.157	-0.001
	437.0780677	346.7885601	443.5165	345.0896	0.505	0.512	-0.007
	426.0875352	344.7146121	454.7546	342.3044	0.854	0.849	0.005
Test Value	473.6648912	353.2776442	407.7071	353.7344	-0.610	-0.618	0.008
	471.8673722	353.2974749	409.2687	353.5743	-0.550	-0.565	0.015
	458.6401956	353.1733035	422.1246	352.6562	-0.114	-0.118	0.004
	456.8054445	353.1366259	424.0501	352.5706	-0.050	-0.049	-0.001
	453.7482012	353.1223939	427.045	352.3701	0.056	0.055	0.001
	452.3480063	353.3927103	428.3954	352.254	0.100	0.081	0.019
	452.352713	353.3257834	428.4037	352.2012	0.099	0.081	0.018
	446.9962409	348.2954511	433.6639	347.0725	0.200	0.190	0.010
	445.2237541	348.0352615	435.378	346.6545	0.253	0.241	0.012
	443.2012477	346.8747881	437.3078	345.5063	0.305	0.299	0.006
	435.4180268	345.8184238	445.3775	343.9678	0.555	0.549	0.006
	429.465313	345.7032326	451.3884	343.5691	0.756	0.758	-0.002
427.5340611	344.9196689	453.4023	342.441	0.807	0.791	0.016	

รูปที่ 3.26 เปรียบเทียบค่าความสูงของ HGA ระหว่างค่าความสูงที่แท้จริงกับค่าความสูงที่ระบบระบุได้โดยเพิ่มความสูงในการสอบเทียบให้ครอบคลุม 1.5 มิลลิเมตรและทดสอบกับความสูงค่าต่างๆ แสดงให้เห็นว่าค่าความสูงที่ระบบระบุได้มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร (± 0.05 มิลลิเมตร)

3.4.4 การระบุความสูงของวัตถุเป้าหมายชนิดอื่นและการปรับปรุงโปรแกรม

3.4.4.1 การเปลี่ยนวัตถุเป้าหมายจาก HGA เป็น Calibration gauge

หลังจากได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจสำหรับการวัดค่าความสูงของ HGA ในหัวข้อที่ 3.4.2 แล้ว ผู้วิจัยได้วางแผนที่จะทดลองเปลี่ยนวัตถุเป้าหมายจาก HGA เป็น calibration gauge ที่มีระดับความสูงต่างกันหลายค่าเพื่อทดสอบความสามารถของระบบโดยค่าความสูงของ calibration gauge นี้ถูกระบุด้วยเครื่องวัด CMM ซึ่งเป็นอีกหนึ่งเครื่องมือวัดมาตรฐานที่มีความเชื่อถืออย่างมากและถูกใช้ในการระบุขนาดของชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมที่ผู้วัดต้องการทราบขนาดจริงของชิ้นงานที่มีขนาดค่อนข้างเล็ก โดยลักษณะของ calibration gauge แสดงในรูปที่ 3.11 และค่าความสูงในแต่ละระดับของ calibration gauge ที่ถูกระบุด้วยเครื่องวัด CMM แสดงในตารางที่ 3.2 และการทดลองระบุความสูงของ calibration gauge จะได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ 3.4.3.4 ต่อไป

ตารางที่ 3.2 ความสูงของ calibration gauge ในแต่ละระดับที่ถูกวัดด้วยเครื่องวัด CMM

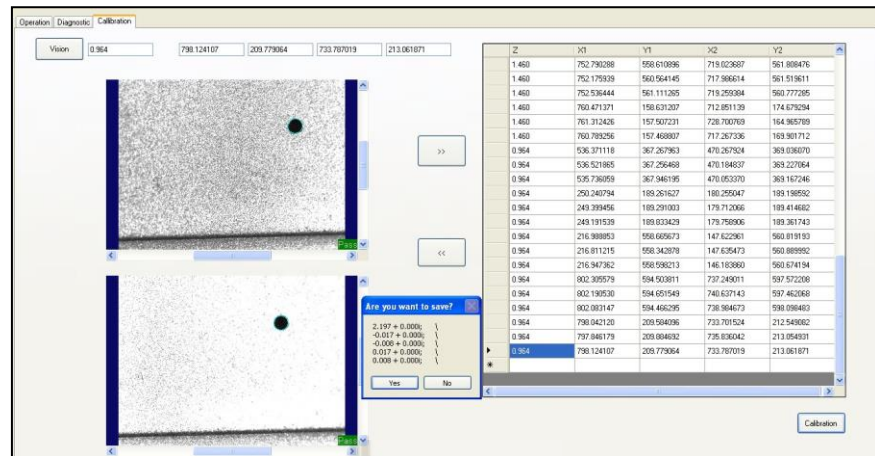
ระดับความสูง	ความสูงที่แท้จริง
1	0.000
2	0.021
3	0.046
4	0.068
5	0.091
6	0.111
7	0.134
8	0.000
9	0.175
10	0.196
11	0.964
12	1.460
13	1.955
14	2.450

3.4.4.2 การพัฒนาโปรแกรมให้สามารถใช้งานได้จริง

ในส่วนของการพัฒนาโปรแกรม หลังจากที่ได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจในหัวข้อที่ 3.4.2 แล้ว ได้นำสมการที่ (3.7) และ (3.8) มาเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมเพื่อให้ระบบสามารถใช้งานได้จริงในการสอบเทียบและระบุความสูงของวัตถุเป้าหมายได้ โดยตัวโปรแกรมจะประกอบด้วยส่วนหลัก 3 ส่วนคือ ส่วนปฏิบัติการ (Operation) ส่วนของการตรวจสอบและตั้งค่า (Diagnostic) และส่วนของการสอบเทียบ (calibration) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.3.3

i. การสอบเทียบของระบบด้วยโปรแกรมที่พัฒนาแล้ว

หลังจากที่โปรแกรมถูกพัฒนาให้สามารถสอบเทียบ คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์และระบุความสูงของวัตถุเป้าหมายแล้ว ผู้วิจัยได้เริ่มทำการทดลองระบบโดยเริ่มต้นจากการสอบเทียบ อนึ่ง การสอบเทียบของระบบด้วยโปรแกรมที่ถูกพัฒนาแล้วมีขั้นตอนการทำงานโดยอ้างอิงจากรูปที่ 3.27 ดังนี้



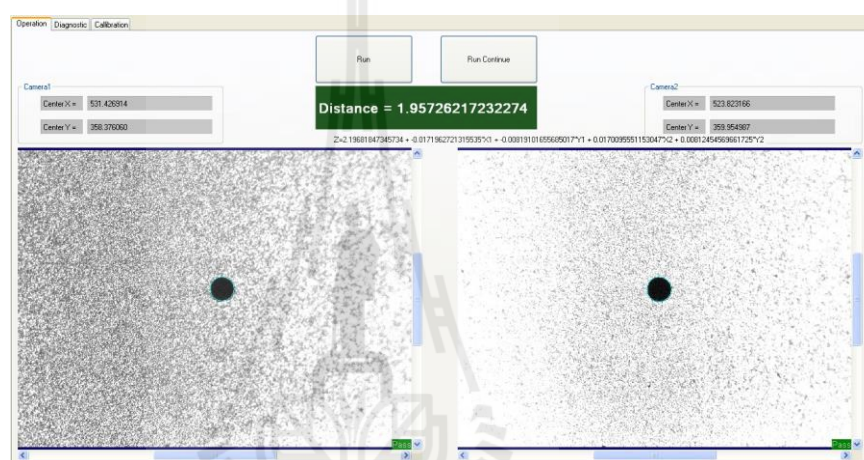
รูปที่ 3.27 การสอบเทียบของระบบหลังจากที่ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมให้สามารถสอบเทียบได้ ในรูปจะเป็นการสอบเทียบโดยการ ใช้ calibration gauge และแสดงให้เห็นค่าสัมประสิทธิ์ b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 ที่คำนวณได้

- 1) วาง calibration gauge ลงบนตำแหน่งที่กล้องสเตอริโอทั้งสองตัวสามารถระบุพิกัดจุดศูนย์กลางของวงกลมของระดับความสูงระดับกลางที่ต้องการจะสอบเทียบได้
- 2) ปรับระยะห่างระหว่างกล้องสเตอริโอทั้งสองตัวกับวงกลมบน calibration gauge ให้ได้ระยะโฟกัสของภาพที่ชัดเจนที่สุด
- 3) ที่หน้าโปรแกรมหลัก เลือกเข้าไปที่หน้า Calibration ดังแสดงในรูปที่ 3.calbprog
- 4) ระบุค่าความสูงที่แท้จริงของระดับที่กำลังจะสอบเทียบ แล้วกดที่ปุ่ม “Vision” โปรแกรมจะแสดงค่าพิกัดของจุดศูนย์กลางของวงกลม x_1, y_1, x_2, y_2 ที่ระบบระบุได้
- 5) กดเลือกที่ปุ่ม “>>” เพื่อนำไปคำนวณในการสอบเทียบ
- 6) เลื่อน calibration gauge ไปที่ความสูงระดับถัดไป
- 7) ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 4 ถึง 5 อย่างน้อย 5 ค่า
- 8) เมื่อได้ข้อมูล x_1, y_1, x_2, y_2 ของความสูงต่างๆครบอย่างน้อย 5 ค่าแล้วกดที่ปุ่ม “Calibration”
- 9) หลังจากทีกดปุ่ม “Calibration” แล้ว จะปรากฏ pop-up ขึ้นมาแสดงค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้

10) กดที่ปุ่ม “Yes” เป็นอันสำเร็จขั้นตอนของการสอบเทียบและพร้อมสำหรับการคำนวณหาค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายต่อไป

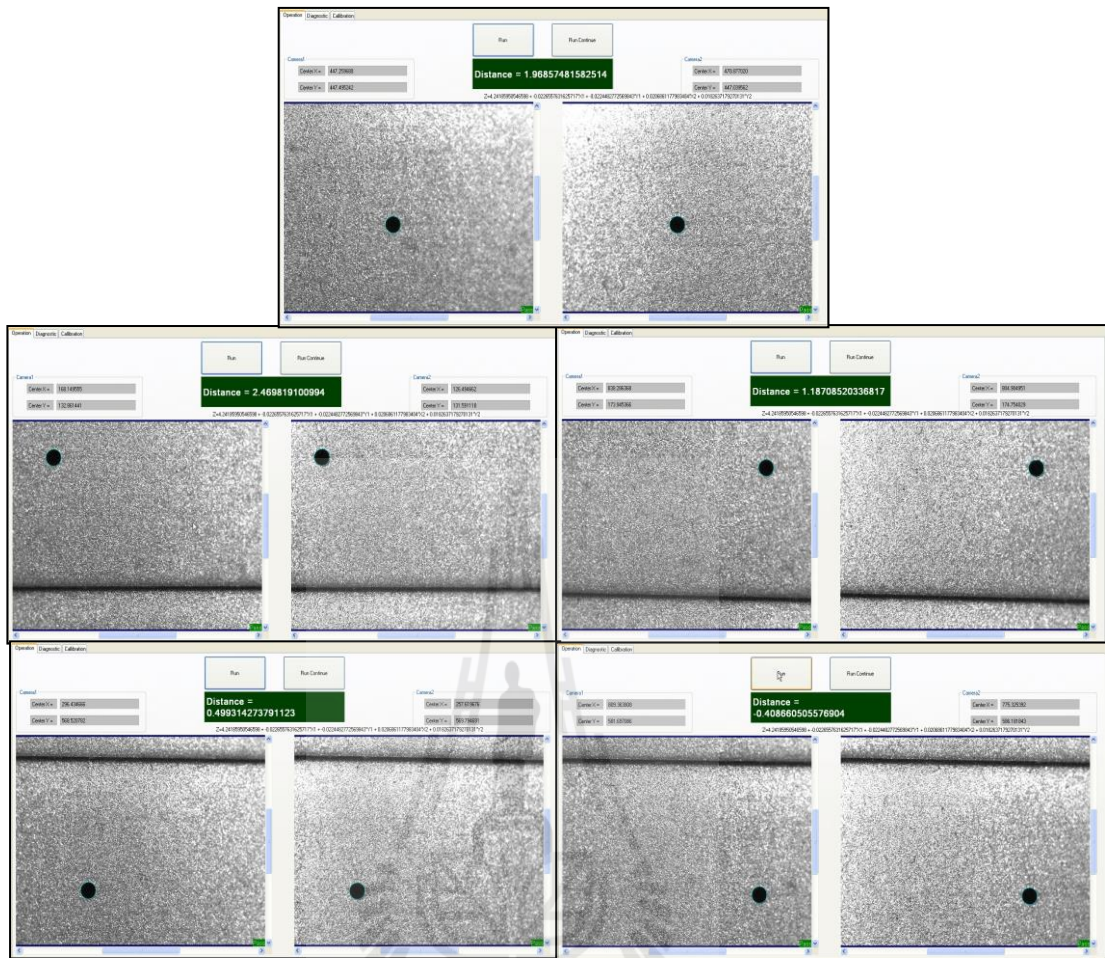
ii. การระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมาย

หลังจากที่ทำการสอบเทียบด้วยระบบแล้ว ผู้วิจัยทำการทดสอบความสามารถในการระบุความสูงของ calibration gauge ในระดับต่างๆ ได้ผลว่าระบบสามารถระบุความสูงของ calibration gauge ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร (± 0.05 มิลลิเมตร) ตามเป้าหมายที่วางไว้ ดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 แสดงการระบุค่าความสูงของ calibration gauge ที่มีความสูงที่แท้จริงที่ 1.955 มิลลิเมตร หลังจากทีระบบได้ผ่านการทำการสอบเทียบแล้ว

หลังจากทีระบบสามารถระบุความสูงที่ใกล้เคียงกับค่าจริงโดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร (± 0.05 มิลลิเมตร) ตามเป้าหมายที่วางไว้แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความสามารถของระบบเพิ่มเติมโดยการทดลองให้ระบบระบุค่าความสูงของ calibration gauge ค่าเดียวกันแต่ วางพิกัด x, y ให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆ ในขอบเขตของภาพ (field of view) ซึ่งประกอบด้วย มุมด้านบนซ้าย มุมด้านล่างซ้าย มุมด้านล่างขวา มุมด้านบนขวาและที่ตำแหน่งกึ่งกลาง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ตำแหน่งที่ต่างกันระบบระบุค่าความสูงที่แตกต่างกันค่อนข้างมากโดยระบุค่าได้ถูกต้องเพียงแค่ตำแหน่งกึ่งกลางของขอบเขตของภาพเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 3.29 และค่าความสูงทีระบุได้แสดงในตารางที่ 3.3



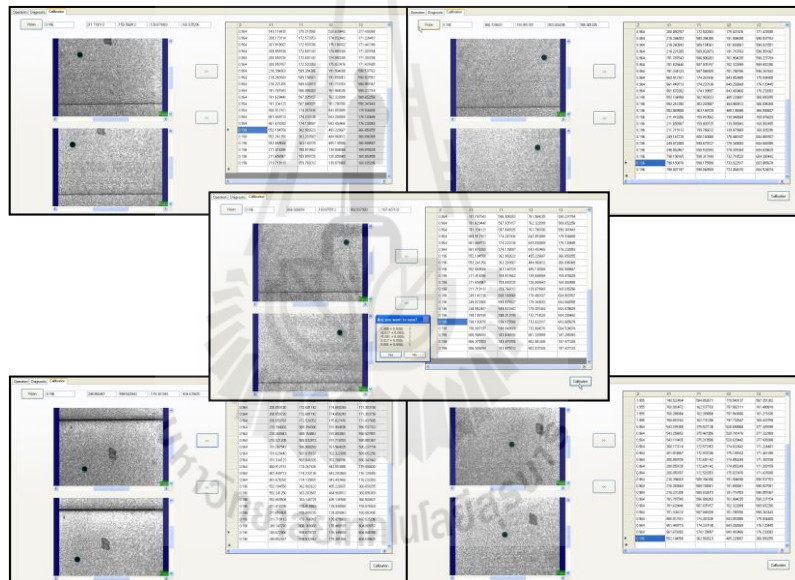
รูปที่ 3.29 ระบบสามารถระบุค่าความสูงได้ถูกต้องเพียงตำแหน่งเดียวคือตำแหน่งกึ่งกลางของขอบเขตของภาพเท่านั้น (รูปที่ 3.29 บน) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการสอบเทียบ กล่าวคือ การสอบเทียบไม่ครอบคลุมทุกตำแหน่งของ field of view

ตารางที่ 3.3 ความสูงของ calibration gauge ที่ระบบระบุได้

ตำแหน่งของ calibration gauge บน field of view	ความสูงที่ระบบระบุได้ (มิลลิเมตร)
กึ่งกลาง	0.9686
บน – ซ้าย	2.4698
ล่าง – ซ้าย	0.4993
บน – ขวา	1.1871
ล่าง – ขวา	-0.4087

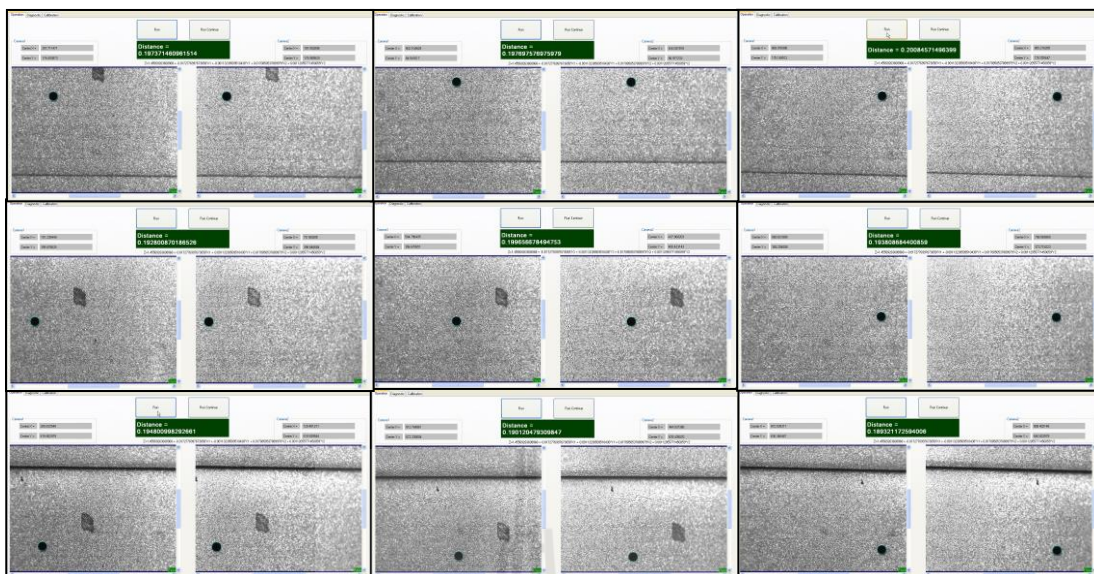
จากรูปที่ 3.29 และตารางที่ 3.3 จะเห็นว่าระบบสามารถระบุค่าความสูงของ calibration gauge ได้ถูกต้องในกรณีที่ calibration gauge อยู่ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ ขอบเขตของภาพเท่านั้น ส่วนตำแหน่งอื่นๆ (บนซ้าย ล่างซ้าย บนขวา ล่างขวา) นั้นค่าความสูงที่ระบุได้เป็นค่าที่ไม่ถูกต้อง ซึ่งผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่าปัญหาเกิดจากการสอบเทียบที่ไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ของขอบเขตของภาพจึงทำให้เกิดปัญหาการระบุค่าผิดพลาดของระบบได้

ผู้วิจัยทำการแก้ไขปัญหาโดยการทำการสอบเทียบเพิ่มเติมโดยการสอบเทียบนี้จะให้ระบบระบุพิกัด x, y ที่ตำแหน่งต่างๆประกอบด้วย มุมด้านบนซ้าย มุมด้านล่างซ้าย ด้านบนขวา และมุมด้านล่างขวาของขอบเขตของภาพเพิ่มเข้าไปในข้อมูลของการสอบเทียบด้วยดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 การสอบเทียบของระบบแบบครอบคลุมทุกพื้นที่ของ field of view

หลังจากที่ทำการสอบเทียบแบบครอบคลุมทุกพื้นที่ของขอบเขตของภาพแล้ว ทดลองให้ระบบระบุค่าความสูงของ calibration gauge อีกครั้ง ผลปรากฏว่าระบบสามารถอ่านค่าความสูงของ calibration gauge ได้ถูกต้องในทุกตำแหน่งของขอบเขตของภาพด้วยความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรตามเป้าหมายที่วางไว้ ดังรูปที่ 3.31 และตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.31 ระบบทำการอ่านค่าความสูงของ calibration gauge ได้ถูกต้องแม่นยำทุกตำแหน่งของ field of view

ตารางที่ 3.4 ความสูงของ calibration gauge ที่ระบบระบุได้หลังจากที่ทำการสอบเทียบแบบครอบคลุมพื้นที่

ตำแหน่งของ calibration gate บน field of view	ความสูงที่แท้จริงของ Calibration gauge	ความสูงที่ระบบระบุได้ (มิลลิเมตร)	ความคลาดเคลื่อน (มิลลิเมตร)
บน – ซ้าย	0.196	0.197	0.001
ซ้าย	0.196	0.193	0.003
ล่าง – ซ้าย	0.196	0.195	0.001
บน	0.196	0.197	0.001
กึ่งกลาง	0.196	0.199	0.002
ล่าง	0.196	0.190	0.006
บน – ขวา	0.196	0.201	0.005
ขวา	0.196	0.194	0.002
ล่าง – ขวา	0.196	0.189	0.010

3.5 สรุป

จากการทดลองและผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าทฤษฎีการถดถอยพหุคูณ สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบสเตอริโอวิชันสามมิติในการสอบเทียบของระบบเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการสอบเทียบและนำไปคำนวณกลับเพื่อระบุค่าความสูงของ HGA ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยที่ระบบสามารถระบุความสูงของ HGA และ calibration gauge ได้อย่างถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับค่าความสูงที่แท้จริงในทุกตำแหน่งของขอบเขตของภาพโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรตามเป้าหมายที่วางไว้ของวิทยานิพนธ์นี้และสามารถนำระบบจำลองนี้ไปประยุกต์ใช้กับงานอุตสาหกรรมการผลิต HGA ที่ต้องการความแม่นยำสูงในการระบุค่าความสูงของ HGA ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรต่อไปได้



บทที่ 4

อภิปรายผลและการนำไปใช้งานจริง

4.1 บทนำ

จากการทดลองในบทที่แล้วจะเห็นว่าการสร้างแบบจำลองเพื่อพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูงให้สามารถระบุความสูงของ HGA ที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้นั้นสามารถทำได้สำเร็จดังได้แสดงให้เห็นในการทดลองและผลการทดสอบต่างๆในบทที่แล้ว และจะได้นำผลการทดสอบดังกล่าวมาอภิปรายในบทนี้ต่อไป

4.2 อภิปรายการจัดสร้างและติดตั้งระบบสเตอริโอวิชัน

การจัดสร้างและติดตั้งระบบจำลองสเตอริโอวิชันสามมิตินั้นเป็นส่วนสำคัญสำหรับการทดลองเพราะหากเกิดความผิดพลาดขึ้น ผลการทดสอบที่ได้จะออกมาผิดเพี้ยน และผู้วิจัยจะใช้เวลาก่อนข้างมากในการระบุสาเหตุของปัญหาว่าเกิดจากส่วนใดของระบบ เช่นการประมวลผลผิดพลาดของอุปกรณ์ประมวลผล อุปกรณ์ส่องสว่างให้กำเนิดแสงไม่เพียงพอ อุปกรณ์ส่องสว่างให้แสงไม่ครอบคลุมพื้นที่การมองเห็นของภาพ ระยะห่างระหว่างวัตถุเป้าหมายกับกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวห่างไม่เท่ากันมากเกินไปทำให้การระบุตำแหน่ง x, y ผิดเพี้ยน ฯลฯ ซึ่งความผิดพลาดเหล่านี้จะส่งผลเสียต่อการทดลองก่อนข้างมาก โดยจากการจัดสร้างและติดตั้งระบบสเตอริโอวิชันในการทดลองที่ผ่านมาที่มีข้อสำคัญที่ควรคำนึงถึงดังนี้

4.2.1 การจัดเตรียมและเลือกอุปกรณ์เพื่อนำมาสร้างระบบสเตอริโอวิชัน

การเลือกอุปกรณ์ทุกอย่างที่จะนำมาประกอบและติดตั้งเป็นระบบนั้นจะต้องเลือกอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อความต้องการของระบบ เพื่อที่ระบบจะได้นำข้อมูลที่ถูกต้องไปใช้ในการประมวลผลต่อไปและจากการทดลองสามารถสรุปข้อสำคัญในการเลือกอุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยได้ดังนี้

4.2.1.1 กล้อง

การระบุตำแหน่ง x, y ของ HGA เป็นตัวแปรหลักที่จะถูกนำไปประมวลผลเพื่อระบุค่าความสูงของ HGA ดังนั้นความละเอียดของกล้องจึงเป็นสิ่งสำคัญในการที่จะได้มาซึ่งตำแหน่ง x, y ที่ถูกต้องซึ่งผู้วิจัยจะต้องเลือกกล้องที่มีความละเอียดเพียงพอสำหรับการระบุตำแหน่ง x, y และจากการทดลองในบทที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าระบบที่จะสามารถระบุความสูงของ HGA ที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรได้นั้น กล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวที่จะถูกนำมาใช้สำหรับการระบุตำแหน่ง x, y ของ HGA ให้ระบบ จะต้องมีความละเอียดอยู่ที่ 1024×768 พิกเซล (0.78M pixel) ขึ้นไป ซึ่งในปัจจุบัน ความละเอียดของกล้องในระดับ เมกะพิกเซล (M pixel) สามารถหาได้ง่ายในท้องตลาดทั่วไป

4.2.1.2 เลนส์

เลนส์เป็นอีกหนึ่งปัจจัยหลักของการที่จะได้มาซึ่งค่าพิกัด x, y ที่ถูกต้องของ HGA ดังนั้นเลนส์ที่ถูกนำมาใช้ในการวิจัยนี้จึงเป็นเลนส์ Telecentric ชนิดความละเอียดสูง (high resolution) ซึ่งเหตุผลที่เลือกเลนส์ชนิด Telecentric นั้นเพราะว่าผู้วิจัยต้องการลดปัญหาความบิดเบือนของภาพที่ได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 3.3.1.2 ในบทที่แล้ว โดยข้อสำคัญในการพิจารณาเลือกเลนส์คือ

i. กำลังขยาย

กำลังขยายของเลนส์ที่เลือกต้องเหมาะสมกับภาพที่จะใช้เป็นตำแหน่งสำหรับการระบุพิกัด x, y ของ HGA โดยปัญหาที่พบหากเลือกใช้เลนส์ที่มีกำลังการขยายมากหรือน้อยเกินไปสามารถอธิบายได้โดยสังเขปดังนี้

1.) กรณีที่กำลังขยายของเลนส์มากจนเกินไปจนทำให้

ตำแหน่งดังกล่าวหลุดกรอบของภาพ (frame) ไป เช่นในกรณีที่ทำการระบุความสูงของ HGA หลายๆตัวที่ถูกลวางอยู่บนถาดรอง HGA ซึ่งแต่ละตัวจะถูกลวางในตำแหน่งที่ต่างกัน และการทดลองระบุความสูงของ HGA นั้น จะทำการระบุทีละตัวเมื่อระบุเสร็จแล้วจะเลื่อน HGA ตัวต่อไปเข้ามาแทนที่ ดังนั้นหากเลนส์ที่เลือกใช้มีกำลังขยายมากเกินไปอาจทำให้ตำแหน่งที่ต้องการระบุพิกัด x, y หลุดกรอบของภาพไปได้เป็นผลให้เกิดการระบุความผิดพลาดหรือไม่สามารถระบุความสูงได้เลย

2.) กรณีที่กำลังขยายของเลนส์น้อยจนเกินไป จะทำให้การระบุพิกัด x, y ของ HGA ผิดเพี้ยนไปค่อนข้างมากเนื่องจากจุดที่ถูกนำมาพิจารณาในการระบุพิกัด x, y มีรายละเอียดของภาพที่น้อยเกินไป ทำให้การระบุค่าพิกัด x, y ของ HGA เกิดความผิดพลาด ส่งผลให้เกิดปัญหาการระบุค่าความสูงของ HGA ที่ผิดพลาดขึ้นมาได้

ii. ความลึกของภาพ (depth of field)

ความลึกของภาพ (depth of field) หมายถึงระยะความลึกที่มากที่สุดที่ภาพยังคงสภาพความคมชัดของภาพอยู่ได้ ยกตัวอย่างเช่นผู้ทดลองทำการปรับระยะห่างระหว่างกล้องกับวัตถุเป้าหมายที่ระยะโฟกัสของเลนส์แล้ว จากนั้นทำการทดลองปรับความสูงของกล้องขึ้น-ลง โดยให้วัตถุเป้าหมายอยู่กับที่แล้วสังเกตเห็นว่าภาพยังมีความคมชัดเท่าเดิมที่ความสูง 0.0-1.5 มิลลิเมตร แสดงว่าเลนส์ชนิดนี้ มีความลึก (depth of field) อยู่ที่ 1.5 มิลลิเมตร

เนื่องจากการจัดสร้างระบบสเตอริโอวิชันสามมิตินั้น ระบบจะต้องประกอบไปด้วยกล้องสเตอริโอ 2 ตัว ดังนั้นจึงต้องจัดหาเลนส์สำหรับสร้างระบบนี้มา 2 ตัวเช่นกัน ซึ่งจากการทดลองติดตั้งระบบในการทดลองที่ผ่านมาแล้วในบทที่ 3 นั้น การทำการติดตั้งกล้อง สเตอริโอทั้ง 2 ตัวให้มีระยะโฟกัสที่เท่ากันนั้นเป็นเรื่องที่ทำได้ค่อนข้างยากเนื่องจากข้อจำกัดของชุดจับยึดที่ปรับระยะได้ค่อนข้างลำบาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้เลนส์ที่มีค่าความลึกของภาพที่ค่อนข้างมากเพื่อช่วยให้การติดตั้งระยะห่างระหว่าง HGA กับเลนส์ทั้ง 2 ตัวสามารถทำได้ง่ายขึ้น และระบบยังคงได้ภาพที่มีความชัดเจนจากกล้องทั้ง 2 ตัว เพื่อนำไปประมวลผลและระบุค่าความสูงของ HGA ที่แม่นยำต่อไปได้

โดยปกติแล้วเลนส์ที่มีกำลังขยายสูงขึ้นจะให้ระยะความลึกของภาพที่ชัดเจนที่น้อยลงซึ่งผู้วิจัยจำเป็นต้องเลือกใช้เลนส์ที่เหมาะสมกับการใช้งานทั้งในด้านกำลังขยายและความลึกของภาพดังนั้นในการวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงพิจารณาเลือกใช้เลนส์รุ่นที่มีคุณสมบัติของ กำลังขยาย 0.5 เท่า และมีความลึกอยู่ที่ 3.04 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่ากำลังขยายและความลึกที่เหมาะสมสำหรับการวิจัยนี้

4.2.1.3 อุปกรณ์ส่องสว่าง

อุปกรณ์ส่องสว่างเป็นอีกหนึ่งส่วนสำคัญในการที่จะทำให้ได้มาซึ่งค่าพิกัด x, y ของ HGA ที่ถูกต้อง เพราะการที่จะได้มาซึ่งค่าพิกัดที่ถูกต้องนั้นจำเป็นต้องมาจากภาพที่ชัดเจน ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกชนิดของอุปกรณ์ส่องสว่างที่เหมาะสมกับลักษณะพื้นผิวของวัตถุเป้าหมาย อย่างเช่น HGA ให้มากที่สุด

จากการทดลองที่ผ่านมาในบทที่ 3 นั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองใช้อุปกรณ์ส่องสว่างชนิดต่างๆเช่น ชนิดวงแหวน (ring light) ชนิดแท่งยาว (bar light) ชนิด สี่เหลี่ยม (oblique light) ชนิดส่องตรง (coaxial light) เป็นต้น ซึ่งจากการทดลองได้ผลว่าอุปกรณ์ที่ให้แสงสว่างที่ครอบคลุมพื้นที่ของตำแหน่งที่ต้องการระบุพิกัด x, y และให้ภาพที่ชัดเจนที่สุดคืออุปกรณ์ส่องสว่างชนิด สี่เหลี่ยม (Oblique light)

4.2.1.4 อุปกรณ์สำหรับปรับระดับความสูงของ HGA

ในการทดลองที่ผ่านมา HGA จะต้องมีการปรับระดับความสูงขึ้น-ลง อยู่ตลอดเวลา และเนื่องจากการวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาระบบที่สามารถระบุความสูงที่ระยะ ± 50 ไมโครเมตรได้ ดังนั้นอุปกรณ์ที่จะนำมาใช้ในการปรับระดับจะต้องมีความละเอียดเพียงพอที่จะสามารถจะปรับระดับความสูงที่ความละเอียด อย่างน้อยที่ละ 10 ไมโครเมตรได้ โดยในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการเลือก Height gauge Vernier ที่สามารถปรับความสูงขึ้น-ลง ที่ความละเอียด 10 ไมโครเมตรได้

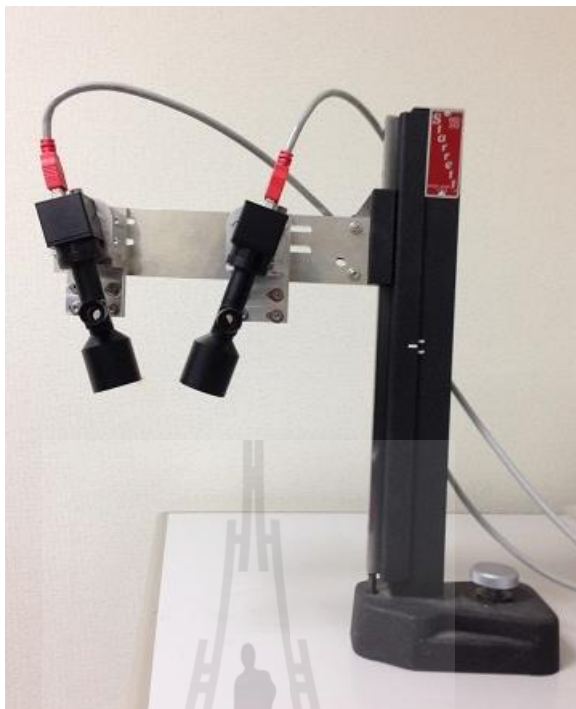
4.2.1.5 อุปกรณ์สำหรับวัดระดับความสูงของ HGA

ในการทดลองที่ผ่านมา ระดับความสูงที่แท้จริงของ HGA นั้นจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องถูกวัดด้วยเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานและเชื่อถือได้และมีความละเอียดมากเพียงพอที่จะใช้เป็นมาตรฐานในการสอบเทียบของระบบ โดยในการวิจัยนี้ได้เลือกเครื่องมือวัดชนิด laser displacement sensor เป็นเครื่องมือวัดที่ใช้ระบุความสูงที่แท้จริงของ HGA เนื่องจาก laser displacement sensor เป็นเครื่องมือที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในงานวัดระยะห่างระหว่างวัตถุกับตัวเซนเซอร์โดยเฉพาะ และ laser displacement sensor รุ่นที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีอัตราการอ่านซ้ำอยู่ที่ 0.05 ไมโครเมตร ซึ่งถือว่าละเอียดเพียงพอต่อการระบุค่าความสูงจริงของ HGA ในการวิจัยนี้

4.2.2 การติดตั้งระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ

4.2.2.1 การติดตั้งกล้องและเลนส์

การติดตั้งระบบสเตอริโอวิชันสามมิตินั้น ตำแหน่งการจัดวางกล้องสเตอริโอและเลนส์ทั้ง 2 ตัวต้องพยายามจัดวางให้ทำมุมกับระนาบของ HGA ให้เท่ากันให้มากที่สุด และระยะห่างระหว่างเลนส์ทั้ง 2 ตัวกับระนาบของ HGA จะต้องถูกจัดวางให้ได้ระยะใกล้เคียงกันมากที่สุดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในด้านของระยะความลึก (depth of field) ที่ระบบสามารถระบุได้ให้มากขึ้นและหลังจากที่จัดวางตำแหน่งของกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวแล้ว จะต้องยึดเลนส์กับกล้องและยึดกล้องเข้ากับชุดจับยึดให้มั่นคงและมั่นใจว่าจะไม่มีการเคลื่อนตำแหน่งของกล้องเกิดขึ้นเพราะหากตำแหน่งของกล้องไม่อยู่ในตำแหน่งเดิมในขณะที่ทำการสอบเทียบ หรือ หลังจากสอบเทียบแล้ว ค่าความสูงของ HGA ที่ประมวลผลออกมาจะเป็นค่าที่ผิดพลาดโดยการจัดวางตำแหน่งของกล้องสเตอริโอและเลนส์ทั้ง 2 ตัวแสดงในรูปที่ 4.1

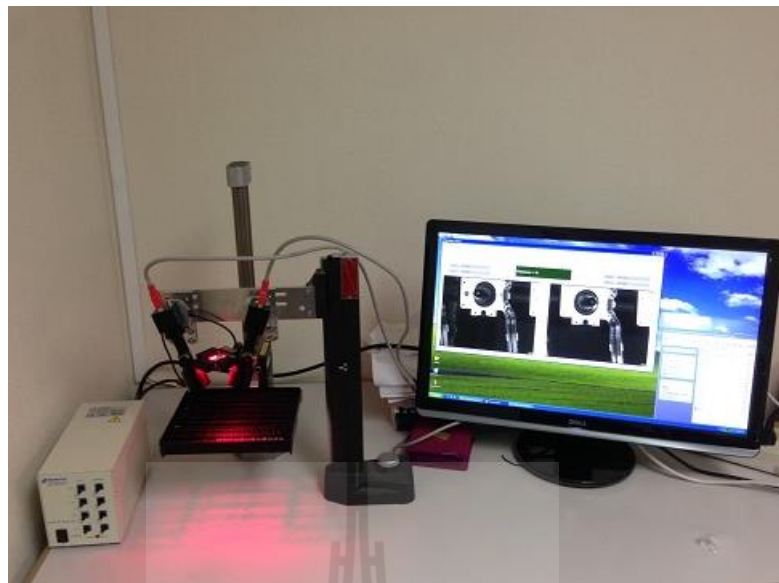


รูปที่ 4.1 การจัดวางตำแหน่งของกล้องสเตอริโอและเลนส์ทั้ง 2 ตัว

4.2.2.2 การติดตั้งอุปกรณ์ส่องสว่าง

อุปกรณ์ส่องสว่างต้องติดตั้งในตำแหน่งที่สามารถให้แสงสว่างกับกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวได้เท่าเทียมกันและแสงสว่างต้องเพียงพอต่อการที่จะทำให้กล้องระบุตำแหน่งได้ถูกต้องไม่ผิดพลาดและต้องยึดติดกับจุดยึดให้มั่นคงด้วยเช่นกัน

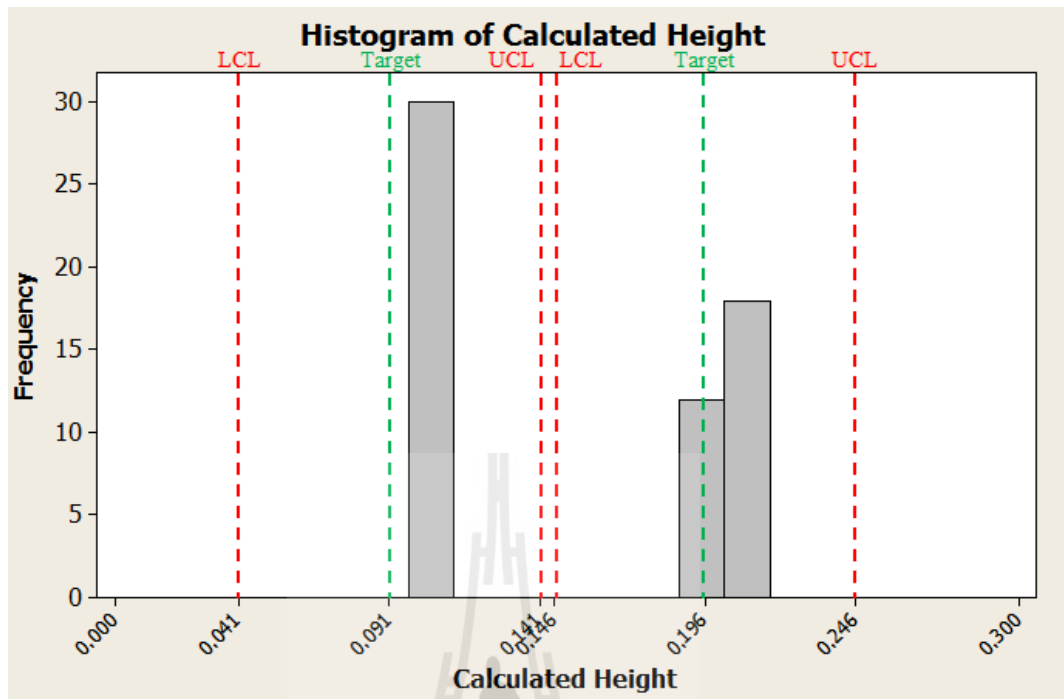
หลังจากที่ได้ทำการจัดเตรียมและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆสำเร็จแล้วจะได้ระบบสเตอริโอวิชันสามมิติดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ภาพรวมของระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ

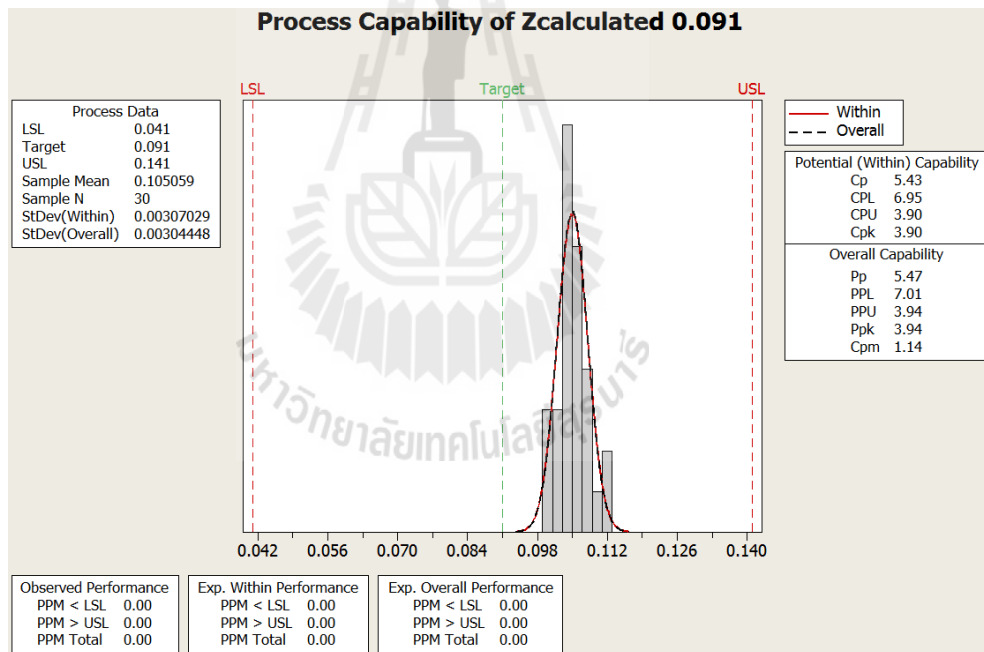
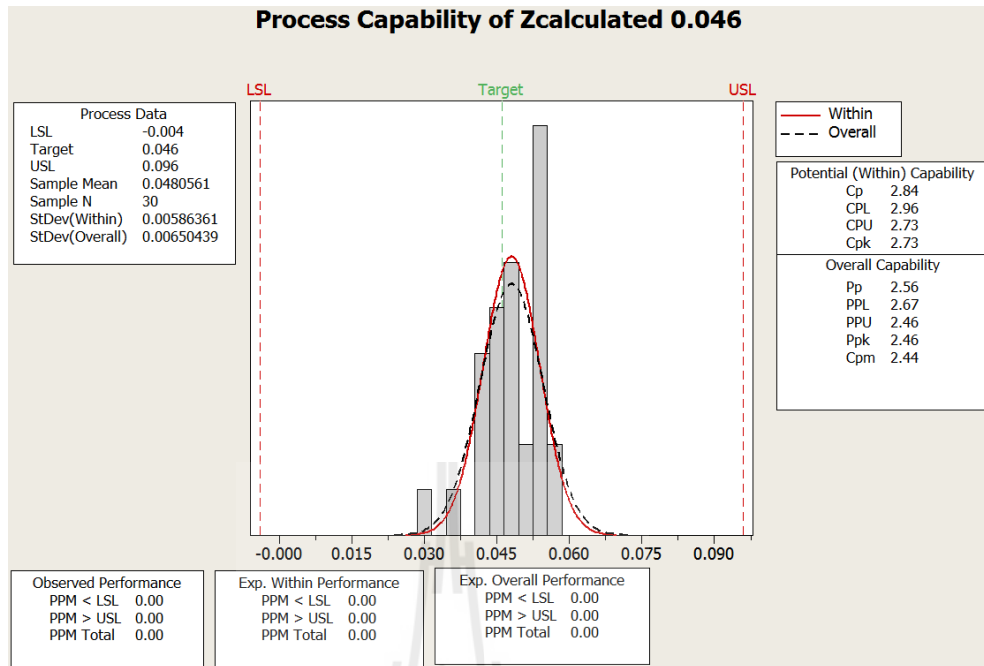
4.3 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองในบทที่ 3 แสดงให้เห็นว่าระบบสเตอริโอวิชันสามมิติสามารถที่จะระบุความสูงของวัตถุเป้าหมายได้อย่างแม่นยำและสำเร็จตามเป้าหมายที่วางไว้ของงานวิจัยนี้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรดังแสดงในรูปที่ 4.3 และความสามารถในการระบุค่าความสูงในระดับต่างๆของระบบสามารถแสดงได้ในรูปที่ 4.4a 4.4b และ 4.4c ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบมีความสามารถในการระบุค่าความสูงที่ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในขอบเขต ± 50 ไมโครเมตรที่ทุกระดับความสูง

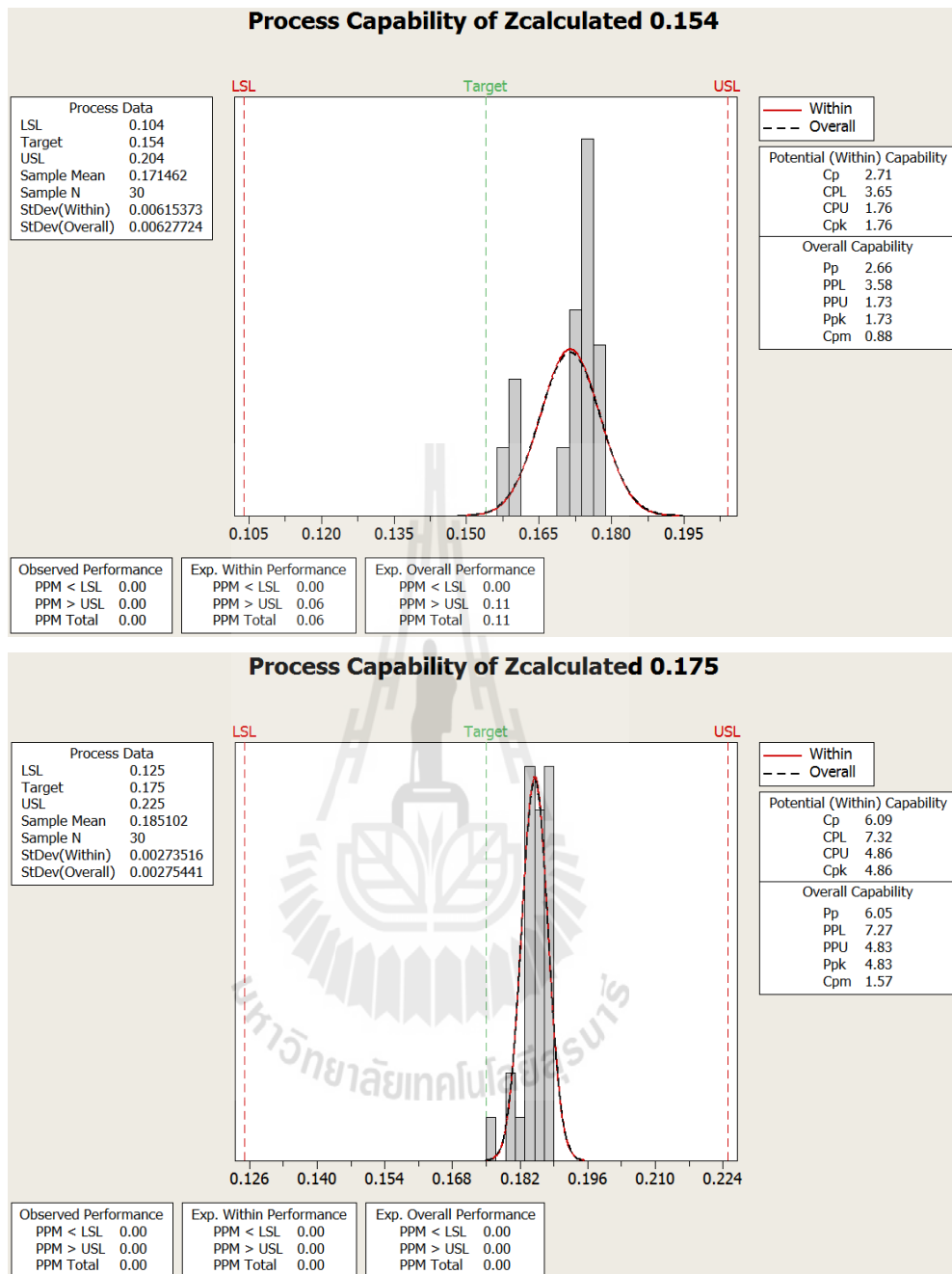


รูปที่ 4.3 การระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายด้วยค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร

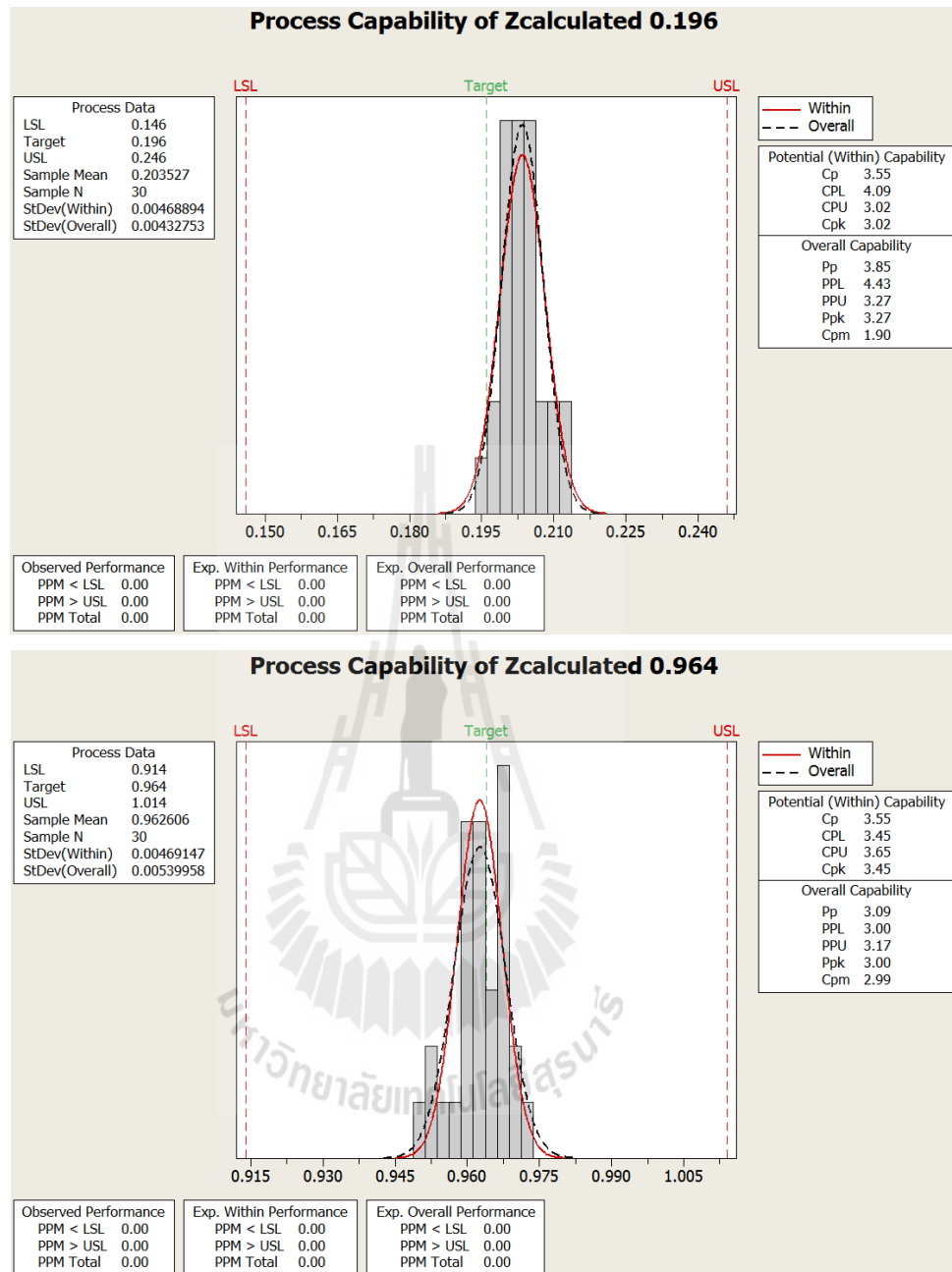




รูปที่ 4.4a ความสามารถในการระบุค่าความสูงที่ระดับ 0.046 มิลลิเมตรและ 0.091 มิลลิเมตรของระบบเตอริโอวิชั่นสามมิติ



รูปที่ 4.4b ความสามารถในการระบุค่าความสูงที่ระดับ 0.154 มิลลิเมตรและ 0.175 มิลลิเมตรของระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ



รูปที่ 4.4c ความสามารถในการระบุค่าความสูงที่ระดับ 0.196 มิลลิเมตรและ 0.964 มิลลิเมตรของระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ

4.3.1 ปัจจัยที่อาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดในการระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมาย

จากการทดลองพบว่า ข้อผิดพลาดในการระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายนั้นที่อาจเกิดขึ้นได้จากปัจจัยหลัก 2 ปัจจัยคือ

4.3.1.1 ค่าพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ที่ระบุได้จากกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวเป็นค่าที่

ผิดพลาดซึ่งอาจเกิดจากสาเหตุต่างๆเช่น

1.) ระบบแสงที่ส่องสว่างได้ไม่ดีพอสำหรับกล้องสเตอริโอตัวใดตัวหนึ่งหรือทั้ง 2 ตัว โดยหากแสงมีความสว่างที่น้อยเกินไปจนทำให้ภาพที่ได้มานั้นมีข้อมูลไม่เพียงพอซึ่งอาจจะทำให้การระบุค่าพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 เกิดความผิดพลาดได้ หรือหากแสงมีความสว่างที่มากเกินไปจนทำให้ภาพที่ได้มานั้นเป็นภาพที่มีลักษณะผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง (เช่น ภาพที่มีแสงสว่างจ้าเกินไปจะทำให้มองไม่เห็นตำแหน่งสำหรับระบุพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 แต่ไปจับเอาตำแหน่งอื่นซึ่งมีรูปร่างลักษณะใกล้เคียงแทน) ซึ่งก็อาจจะทำให้การระบุค่าพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 เกิดความผิดพลาดได้เช่นกัน

2.) ระยะโฟกัสของกล้องสเตอริโอตัวใดตัวหนึ่ง หรือ ทั้ง 2 ตัวไม่ชัดเจนจนทำให้โปรแกรมส่วนระบุพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ของวัตถุเป้าหมายทำการระบุพิกัดผิดพลาด

4.3.1.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของการสอบเทียบไม่ถูกต้องโดยอาจเกิดจากสาเหตุดังต่อไปนี้

1.) ความผิดพลาดจากการใส่สูตรการคำนวณเมทริกซ์ในสมการ Multiple regression ที่ไม่ถูกต้อง

2.) เกิดจากความผิดพลาดขณะทำการสอบเทียบเช่นกล้องถูกทำให้เคลื่อนที่ไปจากตำแหน่งเดิมขณะทำการสอบเทียบ

3.) วัตถุเป้าหมายวางอยู่บนระนาบที่ไม่คงที่ มีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงได้ ในขณะที่ทำการสอบเทียบ

4.3.1.3 วัตถุเป้าหมายวางอยู่บนระนาบที่ไม่คงที่ มีการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงได้ ในขณะที่ระบบทำการระบุค่าความสูง

4.3.2 ข้อผิดพลาดและการปรับปรุงแก้ไขระบบ

จากการทดลองในขั้นต้นจะเห็นว่า หากทำการสอบเทียบโดยให้วัตถุเป้าหมายอยู่ในตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่ง (ตำแหน่งพิกัด x, y ใน field of view) โดยไม่ครอบคลุมพื้นที่โดยรวมของ field of view ระบบจะสามารถระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายได้ถูกต้องที่เฉพาะตำแหน่งดังกล่าวเพียงตำแหน่งเดียวเท่านั้น แต่จะระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายผิดพลาด หากวางวัตถุเป้าหมายไว้ที่ตำแหน่งอื่นใน field of view ซึ่งไม่ได้อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ใช้ทำการสอบเทียบ ซึ่งผู้วิจัยได้พบปัญหานี้ขณะทำการทดลอง โดยที่ผู้วิจัยได้ทดลองให้ระบบทำการระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายโดยการทำซ้ำหลายๆครั้งในหลายๆตำแหน่งโดยผู้วิจัยทำการควบคุมสภาพแวดล้อมในการทดลองจนมั่นใจว่าความผิดพลาดในการระบุค่าความสูงในตำแหน่งต่างๆใน

field of view ไม่ได้เกิดจากสถานะแสงที่ผิดปกติ ระยะโฟกัสที่ไม่ชัดเจน สูตรในการคำนวณที่ผิดพลาด หรือสถานะแวดล้อมอื่นที่ผิดปกติทั้งในขณะที่ทำการสอบเทียบและขณะทำการทดลอง หลังจากสอบเทียบแล้ว ปรากฏว่าก็ยังพบปัญหาเช่นเดิม จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ปัญหา แล้วพบว่าการระบุความสูงที่ผิดพลาดในลักษณะนี้น่าจะเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์ของการสอบเทียบที่ไม่สามารถใช้ได้กับทุกตำแหน่ง x, y ใน field of view แต่จะใช้ได้กับเฉพาะตำแหน่ง x, y ที่ใช้ในการสอบเทียบเท่านั้น

เมื่อทราบดังนี้แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขปัญหาโดยการปรับปรุงวิธีการสอบเทียบ โดยให้เพิ่มตำแหน่ง x, y ของวัตถุเป้าหมายในการสอบเทียบให้ครอบคลุมพื้นที่ของ field of view กล่าวคือในการสอบเทียบนั้นในแต่ละระดับความสูงจะต้องมีการระบุพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ของวัตถุเป้าหมายที่ตำแหน่ง กึ่งกลาง บนซ้าย ล่างซ้าย บนขวา และล่างขวา ดังแสดงในรูปที่ 3.30 ในบทที่แล้ว และหลังจากที่ได้ทำการสอบเทียบด้วยวิธีการสอบเทียบที่ปรับปรุงแล้วนั้น ผลปรากฏว่าระบบสามารถระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายได้ถูกต้องและแม่นยำที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรเช่นเดิมในทุกๆตำแหน่งของ field of view ดังแสดงในรูปที่ 3.31 และเมื่อทดลองให้ระบบระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายในความสูงระดับต่างๆ ปรากฏว่าระบบสามารถระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายได้ถูกต้องและแม่นยำที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรเช่นเดิมในทุกๆตำแหน่งของ field of view เช่นกันโดยที่ความถูกต้องแม่นยำในการอ่านคงเดิมไม่พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าการสอบเทียบแบบเดิมแต่อย่างใด

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ

หลังจากที่ทราบแล้วว่าระบบสามารถระบุค่าความสูงของ HGA และ calibration gauge ได้อย่างแม่นยำแล้ว เพื่อให้เกิดความมั่นใจในประสิทธิภาพของระบบในระยะยาวและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการระบุความสูงของระบบด้วยวิธี GR&R เพื่อทดสอบว่าระบบมีประสิทธิภาพในส่วนของการระบุซ้ำ (Repeat) และ การทำใหม่ (การเปลี่ยนตำแหน่ง เปลี่ยนผู้ทดสอบระบบ หรือที่เรียกว่า Reproduce) โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.4.1 การเตรียมความพร้อมสำหรับการทำ GR&R

- 1.) เตรียม HGA เพื่อสำหรับให้ระบบระบุความสูงทั้งหมด 12 ตัว
- 2.) เตรียม Height gauge เพื่อสำหรับปรับระดับความสูงของ HGA ให้ครอบคลุมความลึกในการใช้งานของระบบที่ 1.5 มิลลิเมตร
- 3.) เตรียมผู้ทดสอบระบบให้มีทั้งหมด 3 คน

4.4.2 การออกแบบวิธีการทำ GR&R

ผู้วิจัยออกแบบที่จะให้ผู้ทดสอบระบบทั้ง 3 คนใช้งานระบบเพื่อระบุค่าความสูงของ HGA ทั้ง 12 ตัวโดยทำการวัดตัวละ 10 ครั้ง จากนั้นจะใช้ Height gauge ทำการปรับระดับความสูงของ HGA แบบสุ่มระดับ โดยแต่ละระดับต้องครอบคลุมและอยู่ภายในค่าความลึกที่ 0-1.5 มิลลิเมตร แล้วให้ผู้ทดสอบทั้ง 3 คนทำการส่งการระบบเพื่อระบุค่าความสูงของ HGA คนละ 10 ครั้งเช่นเดิมต่อไป การออกแบบเช่นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ผู้วิจัยทราบถึงประสิทธิภาพของการทำซ้ำและการทำใหม่ของระบบ (โดยการเปลี่ยนผู้ทดสอบระบบในการวัดค่าความสูงของ HGA ตัวเดียวกัน) ว่ามีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด

4.4.3 ขั้นตอนการทำ GR&R

4.4.3.1 ปรับหาระยะความสูงที่เหมาะสมของถาดรอง HGA ให้ระบบสามารถมองเห็นภาพ HGA ที่ชัดเจนที่ระยะ 1.5 มิลลิเมตรจากนั้นกำหนดระยะต่ำสุดและสูงสุดของ Height gauge ไว้

4.4.3.2 ผู้ทดสอบคนที่ 1 หยิบ HGA ตัวที่ 1 มาวางลงบนถาดรอง HGA ในตำแหน่งที่อยู่ใน field of view

4.4.3.3 ผู้ทดสอบคนที่ 1 สั่งงานให้ระบบระบุค่าความสูงและบันทึกข้อมูล 10 ครั้งโดยที่ไม่มีการเคลื่อนย้าย HGA ในระหว่างระบุค่าทั้ง 10 ครั้ง แล้วหยิบ HGA ตัวที่ 1 ออกจากถาดรอง HGA แล้ววางไว้ที่ถาดพัก HGA ซึ่งอยู่ข้างนอกระบบ โดยเตรียมไว้สำหรับพัก HGA ระหว่างเปลี่ยนผู้ทดสอบเท่านั้น

4.4.3.4 ผู้ทดสอบคนที่ 2 หยิบ HGA ตัวที่ 1 จากถาดพักกลับมาวางไว้ที่ถาดรอง HGA แล้วทำตามขั้นตอนที่ 4.4.3.3

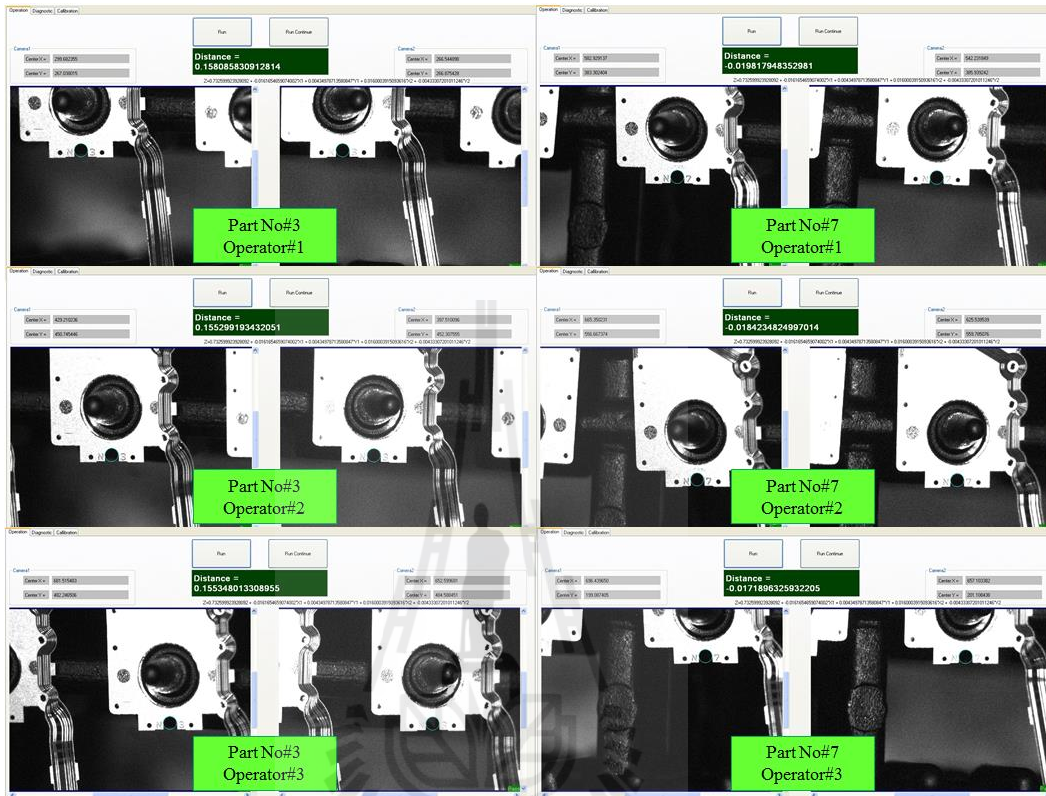
4.4.3.5 ผู้ทดสอบคนที่ 3 หยิบ HGA ตัวที่ 1 จากถาดพักกลับมาวางไว้ที่ถาดรอง HGA แล้วทำตามขั้นตอนที่ 4.4.3.3

4.4.3.6 เมื่อผู้ทดสอบทำการระบุค่าความสูงของ HGA ครบ 3 คนแล้วผู้วิจัย ทำการปรับระดับความสูงของถาดรอง HGA แบบสุ่ม แต่ให้อยู่ในความลึกที่ 1.5 มิลลิเมตร

4.4.3.7 จากนั้นให้ผู้ทดสอบทั้ง 3 คนทำการทดลองซ้ำขั้นตอนที่ 4.4.3.2- 4.4.3.6 ด้วย HGA ตัวที่ 2 และทำซ้ำต่อไปจนครบ 12 ตัว ที่ความสูงที่ครอบคลุมอยู่ใน 1.5 มิลลิเมตร โดยที่ตัวอย่างการทำใหม่ของผู้ทดสอบทั้ง 3 คนนั้นแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.5

4.4.3.8 นำข้อมูลค่าความสูงที่ระบุได้มาประมวลผลหาค่า GR&R ด้วยโปรแกรม

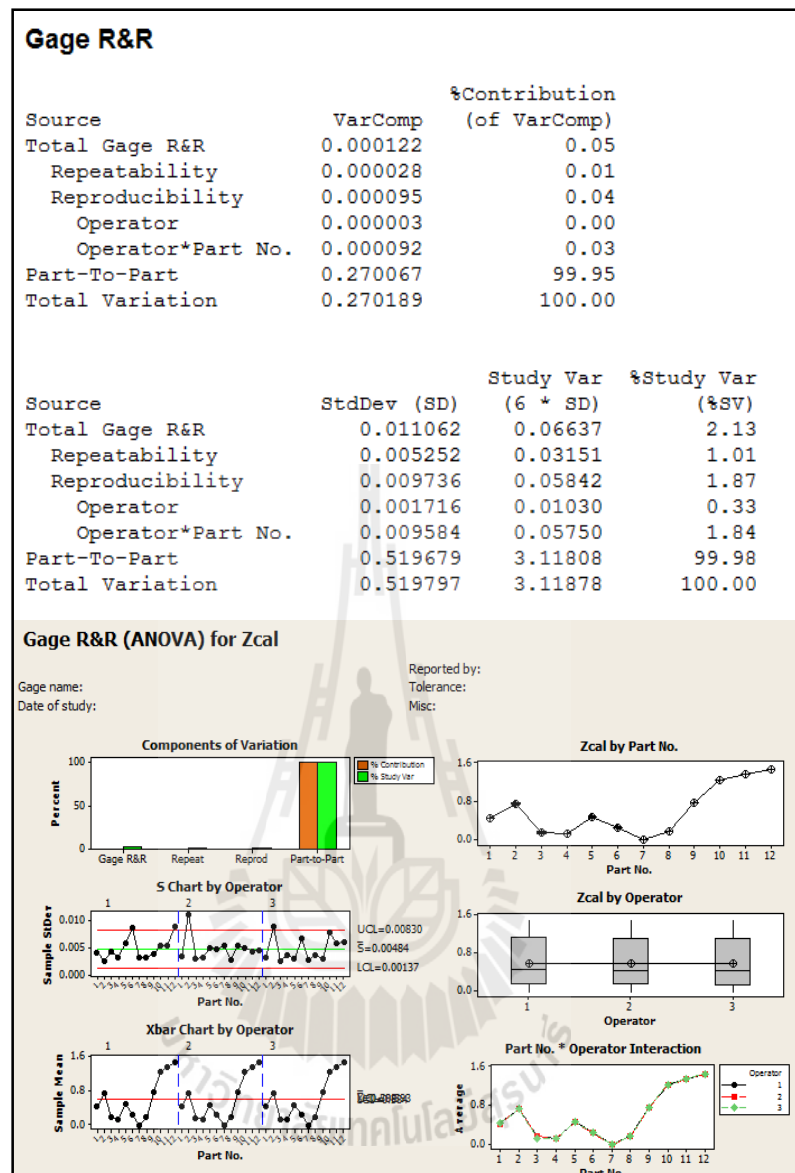
Minitab



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างการทำให้ใหม่ของผู้ทดสอบทั้ง 3 คนขณะทำ GR&R

4.4.4 วิเคราะห์ผล GR&R

เมื่อผู้ทดสอบทั้ง 3 คนทำการทดสอบตามขั้นตอนข้างต้นครบทุกขั้นตอนแล้ว จากนั้นนำข้อมูลค่าความสูงที่ได้ มาประมวลผล GR&R ด้วยโปรแกรม Minitab ซึ่งจากผลวิเคราะห์ แสดงให้เห็นว่าระบบมีประสิทธิภาพในการทำซ้ำและทำใหม่ (Repeat and Reproduce) ค่อนข้างมากโดยสังเกตได้จากค่า %contribution จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นนั้น มีส่วนมาจากความคลาดเคลื่อนจากการวัดเพียงแค่ 0.05% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความสูงที่ระบุด้วย ระบบสแตริโอวิชันสามมิตินี้สามารถเชื่อถือได้และสามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยผลของการประมวลผลด้วยโปรแกรม Minitab แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การประมวลผล GR&R ด้วยโปรแกรม Minitab

4.5 การนำระบบไปทดสอบใช้งานจริง

หลังจากที่ได้ทราบผลการทดสอบประสิทธิภาพการระบุค่าความสูงของ HGA ของระบบสเตอร์โอวีชันสามมิติแล้วว่าสามารถเชื่อถือได้และสามารถนำไปใช้งานได้จริง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้จัดทำชุดทดสอบการหยิบ - จับ HGA จากถาดรอง HGA ซึ่งเป็นถาดรองจริงที่ใช้ในสายการผลิตเพื่อทดสอบให้เห็นถึงความสามารถของระบบสเตอร์โอวีชันสามมิติว่าสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานหยิบ - จับ HGA ได้จริง กล่าวคือระบบสามารถระบุค่าความสูงของ HGA แต่ละตัวและควบคุม

ให้หัวดูด HGA เคลื่อนที่ไปหยิบ – จับ HGA แต่ละตัวที่ความสูงที่ถูกต้องและแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการหยิบ – จับ HGA ที่สูงกว่าการหยิบจับ HGA โดยปราศจากการใช้งานระบบสแตอริโอวิชันสามมิติ

4.5.1 ภาพรวมของการนำระบบสแตอริโอวิชันสามมิติมาติดตั้งกับชุดหัวดูด HGA

การนำระบบสแตอริโอวิชันสามมิติมาติดตั้งเข้ากับชุดหัวดูด HGA เพื่อให้สามารถทำการทดลองให้ระบบระบุค่าความสูงของ HGA แล้วนำไปควบคุมความสูงของหัวดูด HGA ในการหยิบ-จับ HGA แต่ละตัวนั้นจะต้องมีอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้งเพิ่มเติมคือ:

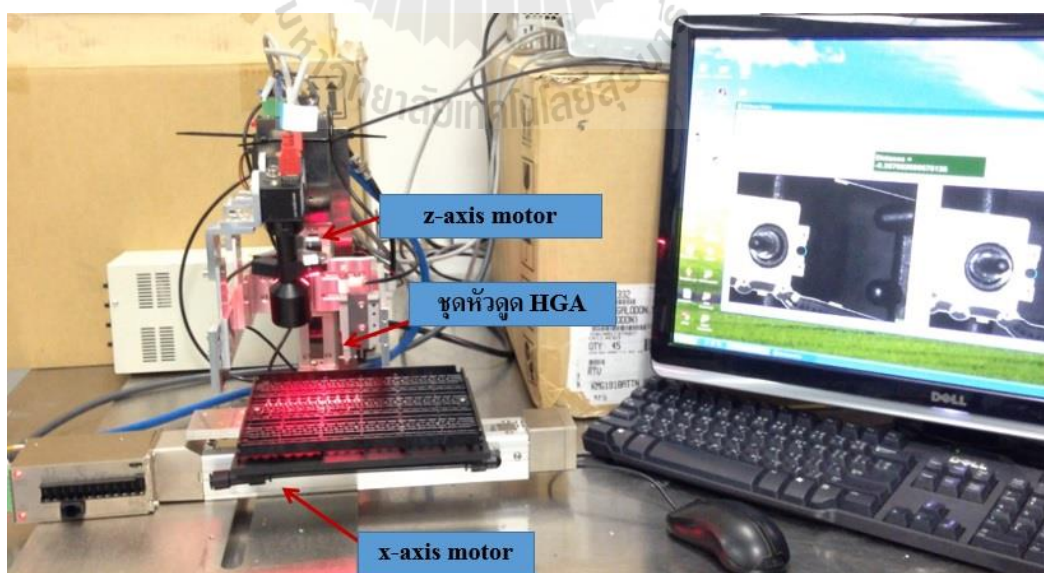
4.5.1.1 ชุดมอเตอร์แกน z 1ชุด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการพาชุดกล้องสแตอริโอและชุดหัวดูด HGA ให้เคลื่อนที่ในแนวแกน z (เคลื่อนที่ ขึ้น – ลง)

4.5.1.2 ชุดมอเตอร์แกน x 1ชุด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการพาถาดรอง HGA ให้เคลื่อนที่ในแนวแกน x (เคลื่อนที่ ซ้าย – ขวา)

4.5.1.3 หัวดูด HGA 1หัวพร้อมชุดจับยึด ใช้ในการหยิบ – จับ HGA

4.5.1.4 Solenoid valve 1ชุด เป็นตัวควบคุมการเปิด – ปิดลมดูด (vacuum) ของหัวดูด HGA ในการหยิบ – จับ HGA

4.5.1.5 แผ่นฐานรองใหญ่ เป็นฐานหลักสำหรับยึดอุปกรณ์ทุกอย่างของระบบเข้าด้วยกันโดยภาพรวมของชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ภาพรวมของชุดทดสอบการหยิบ – จับ HGA โดยใช้ระบบสแตอริโอวิชันสามมิติเป็นตัวควบคุมความสูงของหัวดูด HGA

4.5.2 ทดสอบการหีบ – จับ HGA โดยอาศัยการควบคุมความสูงของหัวดูด HGA ด้วยระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ

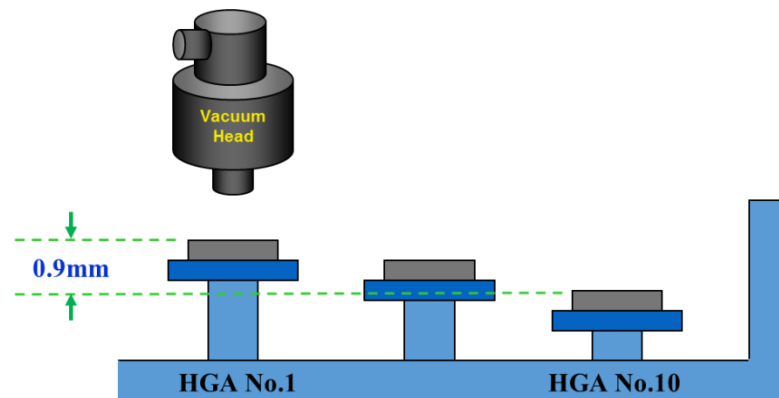
4.5.2.1 ปรับความแรงลมดูดของหัวดูด HGA ในการหีบ – จับ HGA ของหัวดูดให้สามารถดูด HGA ได้ที่ความสูง 0.00 – 0.40 มิลลิเมตรเหนือ HGA โดย

- i ที่ค่าความสูงของหัวดูด HGA ที่ 0.00 – 0.40 มิลลิเมตร จะสามารถดูด HGA ได้
- ii ที่ค่าความสูงของหัวดูด HGA ที่ 0.40 ขึ้นไป จะไม่สามารถดูด HGA ได้
- iii จากที่ระบบสเตอริโอวิชันสามมิติมีความสามารถในการระบุค่าความสูงของ HGA ที่ ความถูกต้องแม่นยำไม่เกิน ± 0.05 มิลลิเมตร (± 50 ไมโครเมตร) ดังนั้นความสูงที่แท้จริงที่ระบบกำหนดให้หัวดูดคือ 0.35 มิลลิเมตร เนื่องจากต้องเผื่อค่าความผิดพลาดของระบบที่ 0.05 มิลลิเมตรด้วย
- iv การปรับตั้งค่าความสูงของหัวดูด HGA แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.8

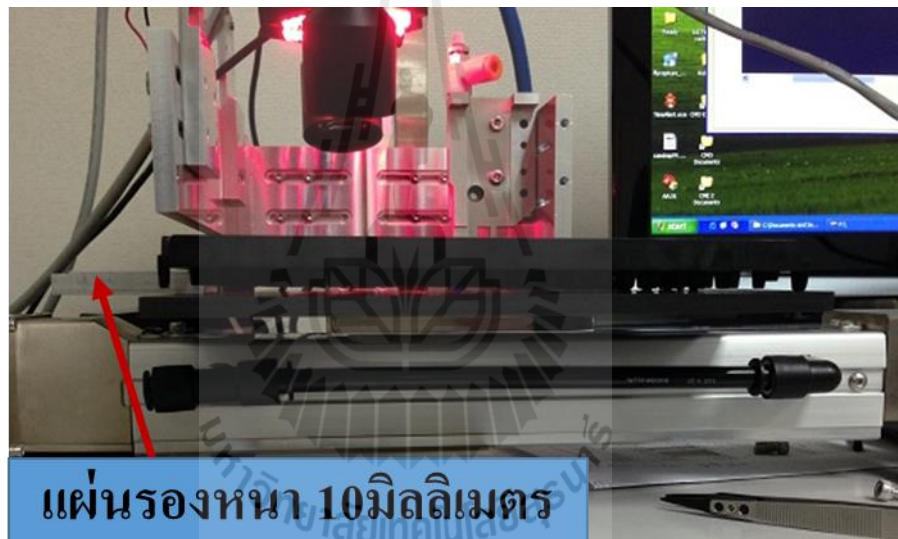


รูปที่ 4.8 กำหนดความสูงของหัวดูด HGA ในการหีบ – จับ HGA ที่ 0.35 มิลลิเมตรเหนือ HGA

4.5.2.2 ทดสอบการหีบ – จับ HGA โดยจำลองความลาดเอียงของถาดรอง HGA ให้มีความสูงต่างกันที่ 0.9 มิลลิเมตร โดยการใช้แผ่นอลูมิเนียมหนา 10 มิลลิเมตรวางรองไว้ที่ฐานของถาดรอง HGA ด้านหนึ่งดังรูปที่ 4.9 และ รูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 จำลองความลาดเอียงของ HGA ที่มีความสูงต่างกันว่า 0.9 มิลลิเมตร



แผ่นรองหนา 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.10 ใช้แผ่นรองหนา 10 มิลลิเมตรรองที่ฐานด้านหนึ่งของถาดรอง HGA เพื่อให้เกิดความลาดเอียงของถาดรอง HGA และเกิดความแตกต่างกันของความสูงของ HGA ตัวที่ 1 และ 10 อยู่ที่ 0.9 มิลลิเมตร

หลังจากทำให้ถาดรอง HGA เอียงแล้วผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความสามารถในการหีบ-จับ HGA ของระบบ โดยเปรียบเทียบวิธีการหีบจับ 2 วิธีการ คือ

1) หีบ - จับ HGA 50 ตัวโดยไม่ใช้ค่าความสูงที่ระบุได้จากระบบสเตอริโอวิชันสามมิติมาควบคุมความสูงของหัวดูด HGA ในการหีบ-จับ HGA แต่ละตัว (ใช้ค่าความสูงที่ปรับตั้งไว้เพียงค่าเดียวในการหีบ - จับ HGA ทุกตัว)

2) หยิบ – จับ HGA 50 ตัวโดยใช้ค่าความสูงที่ระบุได้จากระบบสเตอร์โอวิชันสามมิติมาควบคุมความสูงของหัวดูด HGA ในการหยิบ – จับ HGA แต่ละตัว

ผลการทดสอบ วิธีที่ 2. สามารถหยิบ – จับ HGA ได้ดีกว่าวิธีที่ 1. อย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบหยิบจับ HGA ที่มีความสูงต่างกัน 0.9 มิลลิเมตร

	จำนวน HGA ที่ใช้ในการทดลอง	จำนวนที่ดูด HGA ได้	จำนวนที่ดูด HGA ไม่ได้	%การหยิบจับ HGA ได้
ไม่ใช้งานระบบสเตอร์โอวิชันสามมิติ	50	21	29	42%
ใช้งานระบบสเตอร์โอวิชันสามมิติ	50	50	0	100%

4.5.2.3 นำฐานรองอลูมิเนียมออกแล้วทดสอบการหยิบ – จับ HGA บนถาดรอง HGA แล้วทดสอบความสามารถในการหยิบ – จับ HGA ของระบบ โดยเปรียบเทียบวิธีการหยิบจับ 2 วิธี (ใช้งานกับไม่ใช้งานระบบสเตอร์โอวิชันสามมิติ)

ผลการทดสอบ

i วิธีที่ 1 (ไม่ใช้งานระบบสเตอร์โอวิชัน) ระบบสามารถหยิบ – จับ HGA ทั้ง 50 ตัวได้ แต่จะพบว่ามีกชนกันของหัวดูด HGA กับ HGA จนทำให้ถาดรอง HGA เสียรูปและมีโอกาสสูงที่จะทำให้ HGA เสียหายได้

ii วิธีที่ 2 (ใช้งานระบบสเตอร์โอวิชัน) ระบบสามารถหยิบ – จับ HGA ได้ทั้ง 50 ตัว และไม่พบว่ามีกชนกันของหัวดูด HGA

4.5.2.4 ทดสอบด้วยการตั้งค่าศูนย์ (set zero) ที่ตำแหน่ง HGA ที่มีค่าความสูงมากที่สุด จากการทดลองระบุค่าความสูงของ HGA จะทราบว่าตำแหน่งของ HGA ตัวที่มีค่าความสูงมากที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ 8 มีค่าความสูงอยู่ที่ 0.889 มิลลิเมตร เทียบกับค่าความสูงของ HGA ตัวที่มีค่าต่ำที่สุด

ผลการทดสอบ

i วิธีที่ 1 (ไม่ใช้งานระบบสเตอร์โอวิชัน) ระบบสามารถหยิบ – จับ HGA ได้ 35 ตัวจากทั้งหมด 50 ตัว

ii วิธีที่ 2 (ใช้งานระบบสเตอร์โอวิชัน) ระบบสามารถหยิบ – จับ HGA ได้ทั้งหมด 50 ตัว

4.5.2.5 ทดสอบด้วยการตั้งค่าศูนย์ (set zero) ที่ตำแหน่ง HGA ที่มีค่าความสูงอยู่ที่กึ่งกลางของความสูงที่มากที่สุด โดยเป็นตำแหน่งของ HGA ตำแหน่งที่ 2 ที่มีค่าความสูงที่ 0.555 มิลลิเมตรเทียบกับค่าความสูงของ HGA ตัวที่มีค่าต่ำที่สุด และการทดลองนี้จะทำการทดลองหยิบ-จับ HGA ซ้ำ 50 ครั้ง ครั้งละ 10 ตัว เพื่อที่จะทดสอบความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) ของการหยิบ – จับ HGA ของระบบ

ผลการทดลอง วิธีที่ 2. สามารถหยิบ – จับ HGA ได้ดีกว่าวิธีที่ 1. ously ด้เห็นได้ชัด ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหยิบ – จับ HGA เพื่อทดสอบความสามารถในการทำซ้ำของระบบ

	จำนวน HGA ที่ ใหม่ในการทดลอง	จำนวนที่ดูด HGA ได้	จำนวนที่ดูด HGA ไม่ได้	%การหยิบจับ HGA ได้
ไม่ใช้งานระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ	500	392	108	78.40%
ใช้งานระบบสเตอริโอวิชันสามมิติ	500	498	2	99.60%

4.5.3 สรุปผลการทดลองประยุกต์ใช้งานระบบสเตอริโอวิชันสามมิติเพื่อนำไปใช้กับงานหยิบ – จับ HGA

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าระบบสเตอริโอวิชันสามมิติสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการระบุค่าความสูงของ HGA เพื่อเป็นตัวกำหนดค่าความสูงของหัวดูด HGA ในการหยิบ-จับ HGA ได้จริง และให้ผลเป็นที่น่าพอใจโดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการหยิบจับ HGA จาก 78.4% เป็น 99.6%

4.6 สรุปผล

จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบว่าขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูงในการวิจัยนี้ก็คือขั้นตอนของการสอบเทียบซึ่งหากการสอบเทียบไม่เป็นไปตามขั้นตอนปกติดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ระบบจะทำการระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายผิดพลาดได้ ความครอบคลุมของตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ใช้ในการสอบเทียบนั้นเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่จะช่วยทำให้ระบบสามารถระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายได้อย่างถูกต้องแม่นยำโดยที่ผู้ใช้งานสามารถวางวัตถุเป้าหมายไว้ในตำแหน่งใดก็ได้ กล่าวคือไม่ว่าผู้ใช้งานจะวางวัตถุเป้าหมายไว้ ณ ตำแหน่งใดๆ ใน field of view ระบบก็จะสามารถระบุค่าความสูงออกมาได้อย่างถูกต้องแม่นยำเท่ากัน ที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร

จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบด้วย GR&R แสดงให้เห็นว่าระบบสเตอริโอวิชัณสามมิติความแม่นยำสูงที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพเชื่อถือได้

เมื่อนำระบบมาประยุกต์ใช้งานจริงในการทดสอบการหยิบ-จับ HGA จะเห็นว่าระบบสามารถระบุค่าความสูงของ HGA แต่ละตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำโดยสามารถหยิบ-จับ HGA ที่มี ความสูงต่างกันได้ถึง 99.60% โดยความสามารถในการหยิบ-จับ HGA มีเพิ่มขึ้นถึง 21.2% เมื่อเทียบกับ การหยิบ-จับโดยไม่ใช้ระบบ สเตอริโอวิชัณสามมิติ ดังนั้นจากผลการทดสอบจะชี้ให้เห็นว่า ระบบสเตอริโอวิชัณสามมิติความแม่นยำสูงนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริง



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาและพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติความแม่นยำสูงในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการเลือกใช้วิธีการสอบเทียบเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงที่แท้จริงของวัตถุเป้าหมายที่ถูกระบุค่าด้วยเครื่องมือวัดที่มีมาตรฐานและเชื่อถือได้ กับ ค่าพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ของวัตถุเป้าหมายที่ถูกระบุด้วยกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวของระบบ (x_1, y_1 คือค่าพิกัดของวัตถุเป้าหมายที่ถูกระบุด้วยกล้องตัวที่ 1 และ x_2, y_2 คือค่าพิกัดของวัตถุเป้าหมายที่ถูกระบุด้วยกล้องตัวที่ 2) ด้วยวิธีการถดถอยพหุคูณ (multiple regression) ซึ่งระบบสเตอริโอวิชันสามมิติที่พัฒนาขึ้นจะนำค่าสัมประสิทธิ์พหุคูณนี้ มาใช้ในการประมวลผลเพื่อหาค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายต่อไป

หลังจากที่ได้ศึกษาค้นคว้าแนวทางและวิธีการที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันสามมิติเพื่อให้สามารถระบุความสูงของวัตถุเป้าหมายแล้ว ความคลาดเคลื่อนของค่าความสูงที่ระบุได้ เป็นอีกหนึ่งข้อสำคัญที่ต้องถูกพิจารณา เนื่องจากการวิจัยนี้มีเป้าหมายคือสามารถพัฒนาระบบสเตอริโอวิชันให้สามารถระบุค่าความสูงของ HGA ให้มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ ± 50 ไมโครเมตรดังนั้นอุปกรณ์ที่จะถูกนำมาใช้ในการทดลองต้องเป็นอุปกรณ์ที่มีความละเอียดค่อนข้างสูงยกตัวอย่างเช่นอุปกรณ์ที่จะถูกนำมาใช้วัดค่าความสูงที่แท้จริงของ HGA ต้องมีความละเอียดสูงในระดับไมโครเมตร เพื่อให้มั่นใจว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลองมีผลมาจากเครื่องมือวัดน้อยที่สุด ในส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการใช้ในการสอบเทียบและระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายนั้น ส่วนสำคัญที่สุดคือการป้อนอัลกอริทึมและสูตรการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในการประมวลผล ส่วนนี้ต้องตรวจสอบอย่างเคร่งครัดไม่ให้เกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการป้อนอัลกอริทึมหรือสูตรทางคณิตศาสตร์ที่ผิดพลาดซึ่งหากมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจทำให้ค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายที่คำนวณได้ ผิดไปจากค่าที่ควรจะเป็นได้

หลังจากที่ระบบสเตอริโอวิชันสามมิติถูกพัฒนาขึ้นแล้วผู้วิจัยได้นำระบบมาทดลองสอบเทียบและทดลองให้ระบบระบุค่าความสูงของ HGA บนถาดรอง HGA เทียบกับค่าความสูงที่วัดได้จากเครื่องมือวัดที่เชื่อถือได้ (ในการทดลอง ผู้วิจัยเลือกใช้ laser displacement sensor) เพื่อ

ทดสอบว่าระบบสามารถประมวลผลหาความสูงของ HGA ได้ใกล้เคียงกับที่เครื่องมือวัดระบุได้หรือไม่ ผลคือระบบสามารถระบุค่าความสูงของ HGA ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ระบุได้จากเครื่องมือวัด และหลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการลองเปลี่ยนวัตถุเป้าหมายจาก HGA ไปเป็น calibration gauge เพื่อทดสอบว่าระบบ สามารถระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายชนิดอื่นนอกเหนือจาก HGA ได้ถูกต้องแม่นยำเช่นกันหรือไม่ ผลคือระบบสามารถระบุค่าความสูงของ calibration gauge ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ใกล้เคียงกับค่าความสูงจริงของ calibration gauge (ค่าความสูงจริงในแต่ละระดับของ calibration gauge ถูกระบุด้วยเครื่องมือวัดชนิด CMM) ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าทฤษฎีการถดถอยพหุคูณ (multiple regression) สามารถถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบสเตอริโอวิชันสามมิติในการสอบเทียบของระบบเพื่อคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ของการสอบเทียบและนำไปคำนวณกลับเพื่อระบุค่าความสูงของ HGA ซึ่งได้ผลเป็นที่น่าพอใจ โดยที่ระบบสามารถระบุความสูงของ HGA และ calibration gauge ได้อย่างถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับค่าความสูงที่แท้จริง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรตามเป้าหมายที่วางไว้ของงานวิจัยนี้

5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัยและการแก้ไขปรับปรุง

5.2.1 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

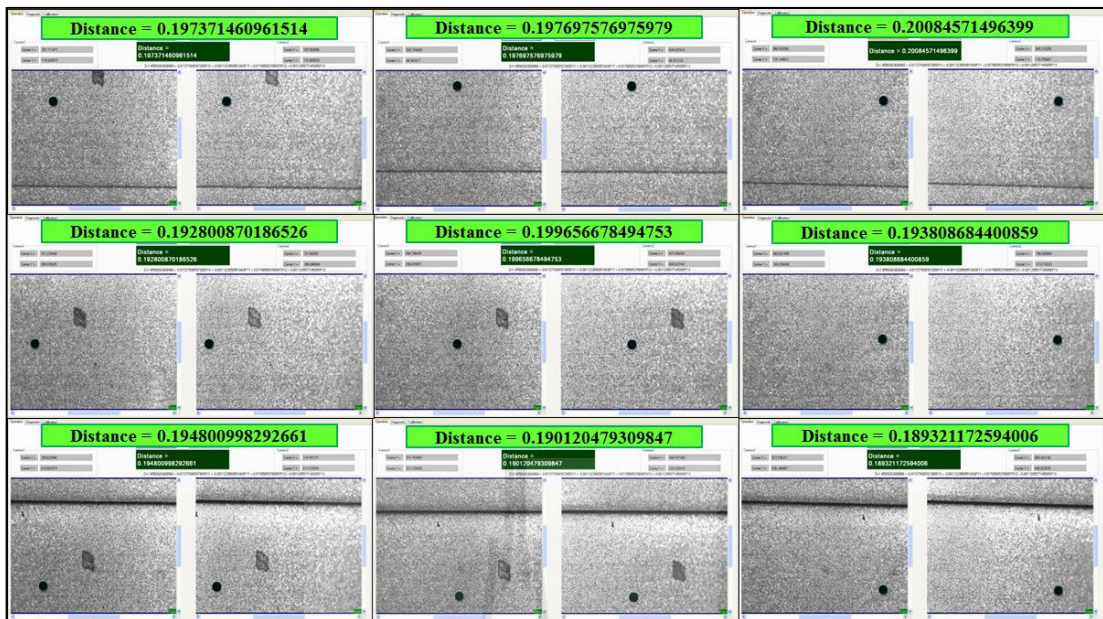
จากการทดลองเบื้องต้นทราบว่าระบบสามารถระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมาย ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตรแล้วนั้น หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพิ่มเติม โดยเพิ่มความหลากหลายของตำแหน่งในการวางของวัตถุเป้าหมายให้มากขึ้น โดยการเคลื่อนตำแหน่งของ วัตถุเป้าหมายให้อยู่ในตำแหน่งต่างๆของ field of view โดยไม่ให้ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ใช้ในการสอบเทียบและหลังจากทำการทดลองระบุความสูงที่ตำแหน่งต่างๆดังกล่าวแล้ว ผู้วิจัยพบว่าระบบทำการระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายผิดพลาด แต่จะระบุค่าความสูงได้ถูกต้องเฉพาะตำแหน่ง x, y ที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ใช้ในการสอบเทียบเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 3.29 ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทำให้ทราบว่า การระบุความสูงที่ผิดพลาดในลักษณะเช่นนี้เกิดจากตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่ใช้ในการสอบเทียบไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ใน field of view ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการสอบเทียบที่ได้จึงไม่ครอบคลุมและไม่สามารถใช้ได้กับทุกตำแหน่ง x, y ใน field of view

5.2.2 การแก้ไขและปรับปรุง

ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไขปัญหาการระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายผิดพลาดดังกล่าวมาในหัวข้อที่ 5.2.1 โดยการเพิ่มตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในการสอบเทียบให้ครอบคลุมพื้นที่ของ field of view กล่าวคือในการสอบเทียบในแต่ละระดับความสูงนั้นจะต้องมีการระบุพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ของวัตถุเป้าหมายที่ตำแหน่ง กึ่งกลาง บนซ้าย ล่างซ้าย บนขวา และล่างขวา ของ field of view จึงจะถือว่าเป็นการสอบเทียบที่ครอบคลุมทุกตำแหน่งซึ่งหลังจากทำการสอบเทียบด้วยวิธีนี้แล้วผู้วิจัยได้ทำการทดลองให้ระบบทำการระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายที่ตำแหน่งต่างๆใน field of view ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายได้อย่างถูกต้องแม่นยำในทุกๆตำแหน่งของ field of view ที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร และไม่พบค่าความคลาดเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้นกว่าการสอบเทียบแบบเดิมแต่อย่างใด โดยการทดลองให้ระบบระบุค่าความสูงของ HGA และ calibration gauge แสดงให้เห็นในรูปที่ 5.1 และ รูปที่ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 การระบุค่าความสูงของ HGA หลังจากทำการสอบเทียบด้วยวิธีที่ปรับปรุงแล้ว



รูปที่ 5.2 การระบุค่าความสูงของ Calibration gauge หลังจากทำการสอบเทียบด้วยวิธีที่ปรับปรุงแล้ว

หลังจากที่มีการพัฒนา แก้ไข ปรับปรุงระบบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ระบบสามารถถูกนำมาระบุค่าความสูงของ HGA ที่อยู่บนถาดรอง HGA ที่มีความแตกต่างกันของตำแหน่งของ HGA ที่ปรากฏบน field of view ได้อย่างถูกต้องแม่นยำที่ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร ตามเป้าหมายของงานวิจัยนี้ และสามารถนำผลงานการวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในการระบุค่าความสูงของ HGA แต่ละตัวในระบบหยิบ-จับ HGA แบบอัตโนมัติในงานอุตสาหกรรมประกอบฮาร์ดดิสก์ต่อไปได้ ซึ่งนอกเหนือไปจากงานอุตสาหกรรมการประกอบฮาร์ดดิสก์แล้วยังรวมไปถึงงานอุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วนขนาดเล็กด้านอื่นๆที่ต้องการความละเอียดสูง (ค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร) ในการระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายได้ด้วยเช่นกัน

5.3 การนำระบบไปทดลองใช้งานจริง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าระบบสเตอริโอวิชันสามมิติสามารถนำมาประยุกต์ใช้ระบุค่าความสูงของ HGA เพื่อเป็นตัวกำหนดค่าความสูงของหัวชุด HGA ในการหยิบ-จับ HGA ได้จริง และให้ผลเป็นที่น่าพอใจโดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการหยิบจับ HGA จาก 78.4% เป็น 99.6%

5.4 ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองจะทราบว่าระบบสามารถระบุค่าความสูงของ HGA และ calibration gauge ได้อย่างถูกต้องแม่นยำด้วยค่าความละเอียดที่ไม่เกิน ± 50 ไมโครเมตร ได้ตามเป้าหมายที่วางไว้ของงานวิจัยนี้ และจากข้อมูลที่ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์นั้นจะเห็นว่าระบบ ยังมีความสามารถที่จะพัฒนาให้มีความสามารถในการระบุค่าความสูงให้มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ไม่เกิน ± 25 ไมโครเมตรหรือละเอียดมากกว่าได้ โดยการเพิ่มความละเอียดของกล้องสเตอริโอทั้งสองตัวให้มีความละเอียดมากขึ้น เพราะหากความละเอียดของกล้องสเตอริโอทั้ง 2 ตัวสูงขึ้น ความคลาดเคลื่อนในการระบุพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ในการสอบเทียบจะลดน้อยลง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของการสอบเทียบที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น และในการระบุค่าความสูงจากค่าพิกัด x_1, y_1, x_2, y_2 ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยลงนั้นก็จะสามารถระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายได้ถูกต้องแม่นยำและมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยลงด้วยเช่นกัน

เมื่อระบบสเตอริโอวิชันสามมิตินี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานจริง การที่ผู้ใช้งานจะมีความเชื่อมั่นได้ว่าระบบยังคงประสิทธิภาพของการระบุค่าความสูงได้ถูกต้องแม่นยำอยู่เสมอ นั้น ผู้ใช้งานจำเป็นต้องกำหนดให้การทำ GR&R เป็นหนึ่งในขั้นตอนที่ต้องทำอยู่เสมอในทุกกรอบของการบำรุงรักษาระบบ เพื่อให้ระบบยังคงประสิทธิภาพในการระบุค่าความสูงของวัตถุเป้าหมายอย่างสม่ำเสมอต่อไปได้

รายการอ้างอิง

- Hyowon M., Song, Y.W., Kang, S. and Kim, J. (2013). Calibration method for 3-dimensional tip position tracking sensor. In **13th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)**. Gwangju, Korea. (pp. 641 – 644).
- Oh, J.K. and Lee, C.H. (2007). Development of a Stereo Vision System for Industrial Robots. In **International Conference on Control, Automation and Systems**. Seoul, Korea. (pp. 659 – 663).
- Neter, J., Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J. and Wasserman, W. (1996). **Applied Linear Statistical Models**. 4th Ed. USA: WCB McGraw Hill.
- Nedevschi, S., Danescu, R., Frentiu, D., Marita, T., Oniga, F., Pocol, C., Schmidt, R. and Graf, T. (2004). In **Intelligent Vehicles Symposium, IEEE**. Parma, Italy. (pp. 292 – 297).
- Sarkis, M., Senft, C.T. and Diepold, K. (2009). Calibrating an Automatic Zoom Camera With Moving Least Squares. **IEEE Trans. on Automation Science and Engineering**. 6 (3): 492 – 503.
- Vilaca, J.L., Fonseca, J. and Pinho, A.C. (2006). Stereo Vision Calibration Procedure for 3D Surface measurements. In **32nd Annual Conference on IEEE IECON**. Paris. (pp. 3508 – 3513).
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ พงศกร เพชรพันธุ์ศิริ (พ.ศ.2548). เครื่องวัดพิกัด 3 มิติโดยใช้ภาพสเตอริโอ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19. จังหวัดสงขลา ประเทศไทย.

ประวัติผู้เขียน

นายศิวนท์ ลมซิด เกิดเมื่อวันที่ 25 กันยายน พุทธศักราช 2525 ที่อำเภอสหพันธ์ จังหวัดกาฬสินธุ์ ปัจจุบันอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 333/39 หมู่บ้านเดอะเฮาส์เรสиденซ์ ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อปีพุทธศักราช 2546

ในปี พุทธศักราช 2546 ได้เข้าทำงานที่บริษัทชินนิอิเล็กทริก (ประเทศไทย) จำกัด ในตำแหน่งวิศวกรออกแบบไฟฟ้า ฝ่ายวิศวกรรมพัฒนา ปีพุทธศักราช 2548 ได้เข้าทำงานที่บริษัทซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ตำแหน่งวิศวกร ระดับ 2 ฝ่ายวิศวกรรมการผลิตขั้นสูง (Advanced Manufacturing Engineering) ปีพุทธศักราช 2550 ได้เลื่อนตำแหน่งเป็นวิศวกร ระดับ 3 ในแผนกเดียวกัน ปีพุทธศักราช 2553 ได้เลื่อนตำแหน่งเป็นวิศวกร ระดับ 4 ฝ่ายวิศวกรรมควบคุมกระบวนการการผลิต (Process Engineer) และได้เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาแมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีพุทธศักราช 2552-2557 โดยได้รับเงินทุนการศึกษาจาก บริษัทซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ร่วมกับสวทช. และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีพุทธศักราช 2554-ปัจจุบัน ดำรงตำแหน่งวิศวกรอาวุโส ฝ่ายวิศวกรรมพัฒนากระบวนการการผลิต (HSA Process Development) ที่บริษัทซีเกทเทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด จังหวัดนครราชสีมา