

ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ถูกกำหนดใน 3 มิติหลายวัตถุ  
ในเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว

นายพงศกร บำรุงไทย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A REAL-TIME 3D TRACKING SYSTEM FOR MULTIPLE DEFINED OBJECTS  
USING MULTIPLE CAMERAS

Mr. Pongsakon Bamrungthai

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ถูกกำหนดใน 3 มิติหลายวัตถุในเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว
โดย	นายพงศกร บำรุงไทย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันท์เจริญ)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.กฤษณะ อุตมั่ง)

พงศกร บำรุงไทย : ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุที่ถูกกำหนดใน 3 มิติหลายวัตถุในเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว. (A REAL-TIME 3D TRACKING SYSTEM FOR MULTIPLE DEFINED OBJECTS USING MULTIPLE CAMERAS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 93 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการพัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุหลายวัตถุใน 3 มิติโดยใช้กล้องหลายตัว โดยได้พัฒนาสถาปัตยกรรมของระบบ มอดูลการประมวลผลโปรแกรมประยุกต์ และอัลกอริทึมในการติดตามวัตถุสำหรับการประมวลผลบนพีซีคลัสเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ผ่านเส้นใยนำแสงโดยใช้แผ่นวงจรสำหรับเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอ วัตถุเป้าหมายสำหรับการติดตามได้แก่ วัตถุทรงกลมเปล่งแสงหลายอันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน ระบบกระทำการติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่ใน 3 มิติโดยสามารถคำนวณตำแหน่งใน 3 มิติของแต่ละวัตถุเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิงที่กำหนดในแบบเวลาจริง ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถจำแนกและติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุแต่ละวัตถุที่เคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง โดยมีความถี่ในการติดตามสูงสุดอยู่ที่ 14 เฮิรตซ์ ความแม่นยำในการคำนวณพิกัด 3 มิติของระบบมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาต่อยอดเพื่อประยุกต์ในงานด้านต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้แสดงการประยุกต์ในการวัดพื้นผิวชิ้นงานสำหรับงานวิศวกรรมย้อนกลับ โดยได้พัฒนาหัวสัมผัสชิ้นงานเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวที่ต้องการวัด ซึ่งหัวสัมผัสชิ้นงานนี้จะมีทรงกลมเปล่งแสง 3 อันเป็นส่วนประกอบเพื่อใช้ในการติดตามโดยระบบ ผลการทดลองพบว่าสามารถนำตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายมาคำนวณตำแหน่งที่ปลายของหัวสัมผัสชิ้นงานได้อย่างถูกต้อง โดยสามารถเพิ่มความแม่นยำในการวัดได้หากปรับปรุงการสร้างหัวสัมผัสชิ้นงานให้ดียิ่งขึ้น

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
 ปีการศึกษา.....2553.....

# # 4971819321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : MULTI-CAMERA SYSTEM / REAL-TIME TRACKING / PC-CLUSTER /  
MULTIPLE OBJECTS TRACKING

PONGSAKON BAMRUNGTHAI : A REAL-TIME 3D TRACKING SYSTEM FOR  
MULTIPLE DEFINED OBJECTS USING MULTIPLE CAMERAS. ADVISOR :  
ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 93 pp.

A real-time 3D multiple objects tracking system using multiple cameras is developed in this dissertation. The system is implemented on a PC-cluster which is constructed by using PCI-to-PCI data mover card with fiber-optic connection. System architecture, processing modules, application software, and tracking algorithm have been developed to support system operations. Active spherical objects, objects with light inside, with almost identical diameter are used as targets. The developed system can track objects moving in 3D space and calculate 3D position of each target with reference to a specified coordinate system in real-time. Experimental results show that the system can identify and track multiple objects moving in many motion patterns correctly. The maximum frequency for tracking is 14 Hz. The accuracy for 3D reconstruction of the system is less than 1 mm. The system can be used as a base system to develop for many applications. In this dissertation, it has been applied for reverse engineering application for surface scanning. The touch probe has been developed with three active spherical objects which have been used as target to be tracked by the system. The results show the correctness of tip position of the touch probe calculated by using tracked positions. The accuracy will be better by improvement on touch probe construction.

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

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

Academic Year :.....2010.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลือของรศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้สละเวลาให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็น และความรู้ต่างๆ ในด้านวิชาการและได้สอนหลายสิ่งหลายอย่างตลอดระยะเวลาการศึกษา รวมทั้งได้ให้การสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์การวิจัยและทุนการศึกษาทำให้งานวิจัยสำเร็จผลได้ด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอขอบคุณดร.กฤษณะ อุตมั่ง สำหรับคำแนะนำต่างๆ ทางด้านการเขียนโปรแกรมและข้อแนะนำอื่นๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบคุณมารดา บิดา พี่สาว น้องสาว และน้องโบที่ส่งเสริมในการศึกษาและคอยสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างจนจบ การศึกษา ขอขอบคุณกฤษณันท์ มะลิทอง เพื่อนปริญญาเอกที่คอยช่วยเหลือทุกสิ่งทุกอย่างจนจบ การศึกษามาด้วยกัน ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ รุ่นน้อง ปริญญาเอกและปริญญาโทที่ห้องปฏิบัติการของอาจารย์วิบูลย์ทุกท่านที่คอยสนับสนุนในด้านต่างๆ ด้วยดีตลอดมา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2. ภาพรวมของระบบ.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 ระบบพีซีคลัสเตอร์.....	9
2.3 การทำงานของระบบ.....	10
2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	10
3. ทฤษฎี.....	16
3.1 แบบจำลองกล้อง (Camera Model).....	16
3.2 การบิดเบี้ยวของเลนส์ (Lens Distortion).....	20
3.3 การสอบเทียบกล้อง (Camera Calibration).....	22
3.4 การคำนวณพิกัด 3 มิติ.....	23
3.5 การคำนวณระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างรังสี 2 เส้นใน 3 มิติ.....	24
3.6 การแปลงฮัฟวงกลม.....	26

บทที่	หน้า
4. การทำงานของระบบ.....	29
4.1 บทนำ.....	29
4.2 การสอบเทียบกล้อง.....	29
4.3 การคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุหลายวัตถุ.....	30
4.4 การติดตามวัตถุใน 3 มิติ.....	31
4.5 การติดตามหัวสัมผัสชิ้นงานเพื่อใช้ในการวัดพื้นผิว.....	33
4.6 เทคนิคการเชื่อมโยงพิกัดที่ได้จากการวัดหลายครั้ง.....	35
5. การออกแบบซอฟต์แวร์.....	37
5.1 บทนำ.....	37
5.2 การออกแบบโปรแกรมประยุกต์.....	37
5.3 มอดูลการประมวลผล.....	38
6. การทดลอง.....	47
6.1 การติดตามวัตถุเมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง.....	47
6.2 การติดตามวัตถุเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ.....	61
6.3 การติดตามวัตถุเมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ.....	73
6.4 การทดสอบความแม่นยำของระบบ.....	76
6.5 การประยุกต์สำหรับการติดตามหัวสัมผัสชิ้นงาน.....	77
6.6 การเชื่อมโยงพิกัดจากการวัดหลายครั้ง.....	79
7. สรุปผลการวิจัย.....	81
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	81
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	84
ภาคผนวก.....	86
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	93



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 รายละเอียดของตัวเชื่อมต่อ 9 ขาสำหรับพอร์ตอนุกรมที่เชื่อมต่อสัญญาณจาก ตัวกล่อง.....	11
6.1 พารามิเตอร์ของกล่องที่ใช้ในการทดลองการติดตามการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง.....	48
6.2 พารามิเตอร์ของกล่องที่ใช้ในการทดลองการติดตามการเคลื่อนที่แบบอิสระใน 3 มิติ.....	73
6.3 พารามิเตอร์ของกล่องที่ใช้ในการทดสอบความแม่นยำของระบบ.....	76
6.4 ความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณระยะทางระหว่างทรงกลม 2 อัน โดยใช้ระบบที่พัฒนาขึ้น เทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัส.....	76
6.5 พารามิเตอร์ของกล่องที่ใช้ในการทดลองการติดตามหัวสัมผัสชิ้นงาน.....	77

## สารบัญญภาพ

ภาพประกอบที่	หน้า
2.1	แผนภาพโดยรวมของระบบและการประยุกต์.....8
2.2	โครงสร้างของพีซีคลัสเตอร์.....9
2.3	แผนภาพการเชื่อมต่อกล้องเพื่อประสานการถ่ายภาพทางฮาร์ดแวร์.....12
2.4	แผนวงจรสำหรับเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอที่เชื่อมต่อกันผ่านเส้นใยนำแสง.....12
2.5	วัตถุทรงกลมเปล่งแสงที่ใช้เป็นเป้าหมายในการติดตามเมื่อถ่ายภาพโดย (ก) ไม่ได้เปิดไฟ และ (ข) เปิดไฟ.....13
2.6	แขนกลมิติซูบิชิ PA10-7C.....14
2.7	กระดานสอบเทียบที่ใช้ในการวิจัย.....14
2.8	เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัสยี่ห้อ Brown & Sharpe รุ่น Microval 343.....15
3.1	เรขาคณิตของแบบจำลองกล้องรูเข็ม.....16
3.2	สามเหลี่ยมคล้ายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดใน 3 มิติกับพิกัด 2 มิติ บนระนาบภาพ.....17
3.3	ระบบพิกัดภาพและระบบพิกัดกล้อง.....17
3.4	การแปลงระหว่างกรอบพิกัดโลกและกรอบพิกัดกล้อง.....19
3.5	(ก) ภาพของตารางสี่เหลี่ยมเมื่อไม่มีการบิดเบี้ยวของเลนส์, (ข) และ (ค) เป็น ภาพของ (ก) เมื่อมีการบิดเบี้ยวจากเลนส์จริง.....20
3.6	การคำนวณพิกัด 3 มิติโดยใช้กล้องสองตัว.....25
3.7	การคำนวณหาจุดกึ่งกลางของรังสีจากจุดของภาพที่สอดคล้องกัน.....25
3.8	การตรวจหาวัตถุในภาพโดยใช้การแปลงฮัฟวงกลม (ก) ภาพต้นฉบับ และ (ข) ภาพที่ได้จากการตรวจหาวัตถุ.....28
4.1	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อสอบเทียบระบบกล้องด้วยกระดานสอบเทียบ.....30
4.2	ภาพกระดานสอบเทียบที่ถ่ายจากกล้องแต่ละตัวในระบบ.....30
4.3	แผนภาพการทำงานของระบบในการคำนวณพิกัด 3 มิติ.....31
4.4	แผนภาพการทำงานของระบบในการติดตามวัตถุใน 3 มิติ.....32
4.5	หัวสัมผัสชิ้นงานที่ได้ออกแบบสำหรับใช้วัดพื้นผิวชิ้นงาน.....33
4.6	ขนาดโดยประมาณและการกำหนดหมายเลขอ้างอิงของวัตถุเป้าหมายสำหรับการ ติดตามบนหัวสัมผัสชิ้นงาน.....33
4.7	การแปลงระหว่างระบบพิกัดโลกและระบบพิกัดของหัวสัมผัสชิ้นงาน.....34

ภาพประกอบที่	หน้า
5.1 โปรแกรมควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น.....	38
5.2 มอดูลการประมวลผลต่างๆ ภายในโปรแกรมประยุกต์.....	39
5.3 มอดูลกล้อง.....	40
5.4 แผนภาพการทำงานของระบบเมสเสจในพีซีคลัสเตอร์.....	41
5.5 มอดูลคลัสเตอร์.....	42
5.6 มอดูลการสอบเทียบกล้อง.....	42
5.7 ลำดับการทำงานของมอดูลการประมวลผลในการสอบเทียบกล้อง.....	43
5.8 มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติ.....	44
5.9 ลำดับการทำงานของมอดูลการประมวลผลในการคำนวณพิกัด 3 มิติ.....	45
5.10 มอดูลการควบคุม.....	46
6.1 แขนกล PA10-7C พร้อมด้วยวัตถุเป้าหมายสำหรับการติดตาม.....	47
6.2 การตั้งระบบพิกัดอ้างอิงของแขนกลและระบบกล้อง.....	48
6.3 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อันเมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน x ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่งและความหน่วง 20 มิลลิเมตรต่อวินาที <sup>2</sup> ความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาทีและระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร.....	49
6.4 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อันเมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน x ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่งและความหน่วง 25 มิลลิเมตรต่อวินาที <sup>2</sup> ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาทีและระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร.....	50
6.5 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อันเมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน x ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่งและความหน่วง 30 มิลลิเมตรต่อวินาที <sup>2</sup> ความเร็ว 60 มิลลิเมตรต่อวินาทีและระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร.....	51
6.6 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อันเมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน y ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่งและความหน่วง 20 มิลลิเมตรต่อวินาที <sup>2</sup> ความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาทีและระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร.....	52





ภาพประกอบที่	หน้า
6.23 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ $zx$ ของแกนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.4 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม.....	69
6.24 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ $xy$ ของแกนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.05 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม.....	70
6.25 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ $yz$ ของแกนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.05 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม.....	71
6.26 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ $zx$ ของแกนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.05 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม.....	72
6.27 การเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายอย่างอิสระใน 3 มิติ.....	73
6.28 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 1.....	74
6.29 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 2.....	74
6.30 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน เมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 1.....	75
6.31 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน เมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 2.....	75
6.32 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบและตำแหน่งปลายหัวสัมผัสชิ้นงานในการติดตามการเคลื่อนที่ของหัวสัมผัสชิ้นงานที่มีทรงกลมเปล่งแสง 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่หมุนรอบจุดคงที่จุดหนึ่ง.....	78
6.33 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบและตำแหน่งปลายหัวสัมผัสชิ้นงานในการติดตามการเคลื่อนที่ของหัวสัมผัสชิ้นงานที่มีทรงกลมเปล่งแสง 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่บนพื้นผิวเม้าส์.....	78
6.34 ตำแหน่งปลายหัวสัมผัสชิ้นงานในการติดตามการเคลื่อนที่ของหัวสัมผัสชิ้นงานที่มีทรงกลมเปล่งแสง 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่บริเวณขอบของเม้าส์.....	79

ภาพประกอบที่	หน้า
6.35 ชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ใช้ในการทดลองการเชื่อมโยงพิกัด.....	79
6.36 ผลการทดลองการเชื่อมโยงพิกัดจากการวัดชิ้นงานขนาดใหญ่จำนวน 3 ครั้ง (ก) มุมมองด้านบน และ (ข) มุมมอง 3 มิติ.....	80

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยาการหุ่นยนต์

การติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุใน 3 มิติโดยใช้กล้องเป็นประเด็นในงานวิจัยที่กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน เช่น การระวังภัยอัตโนมัติ (automatic surveillance) การตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ (motion capture) สำหรับการถ่ายภาพเคลื่อนไหว 3 มิติ และการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (human computer interaction) เป็นต้น แต่เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหาจึงได้มีการแตกประเด็นในการวิจัยออกไปหลายด้านด้วยกัน เช่น การพัฒนาให้มีความคงทน (robustness) ในการติดตามวัตถุ การติดตามวัตถุที่มีลักษณะซับซ้อน การแก้ปัญหาการบดบังวัตถุ และการพัฒนาระบบที่สามารถติดตามวัตถุในสิ่งแวดล้อมที่มีความซับซ้อน เป็นต้น

ในด้านการแก้ปัญหาการบดบังวัตถุ วิธีการหนึ่งคือการใช้กล้องหลายตัวในการถ่ายภาพวัตถุ เนื่องจากจะสามารถมองเห็นวัตถุจากมุมมองที่แตกต่างกันเพื่อหลีกเลี่ยงการบดบังได้ แต่จำนวนกล้องที่เพิ่มขึ้นได้ก่อให้เกิดปัญหาใหม่ เนื่องจากปริมาณข้อมูลที่เพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากทำให้ความเร็วของระบบลดลงซึ่งอาจทำให้ระยะเวลาในการประมวลผลไม่เพียงพอสำหรับการติดตามวัตถุ จึงได้มีการพัฒนาเทคนิคต่างๆ ทั้งในด้านวิธีการคำนวณเพื่อลดเวลาในการประมวลผล หรือการใช้อุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบพิเศษ เช่น กล้องอัจฉริยะที่มีระบบประมวลผลภาพทางฮาร์ดแวร์ในตัวเพื่อเพิ่มความเร็วในการประมวลผลให้สามารถติดตามวัตถุได้แบบเวลาจริง

การนำคอมพิวเตอร์มาเชื่อมต่อกันและทำงานประสานกันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลข้อมูล ระบบดังกล่าวเรียกว่า พีซีคลัสเตอร์ (PC-cluster) ในอดีตระบบพีซีคลัสเตอร์ได้รับการพัฒนาเพื่อใช้สำหรับการประมวลผลระดับสูงที่มีปริมาณข้อมูลมาก เช่นการพยากรณ์อากาศ และการคำนวณทางวิทยาศาสตร์ แต่ต่อมาได้มีการนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่น เช่นการให้แสงและเงา (rendering) สำหรับการถ่ายภาพเคลื่อนไหวในภาพยนตร์ รวมทั้งนำมาใช้ในระบบที่ต้องการการประมวลผลแบบเวลาจริง ทั้งนี้เนื่องจากราคาของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ลดลงเป็นอย่างมาก และคอมพิวเตอร์เป็นระบบประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงโดยมีราคาต่ำและสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายจึงเป็นตัวเลือกที่เหมาะสมในแง่ของความคุ้มค่าต่อการลงทุนเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการประมวลผลที่สูงขึ้น ในส่วนของการประมวลผล พีซีคลัสเตอร์เป็นการประมวลผลแบบขนานและแบบกระจาย (parallel and distributed computing) คือการประมวลผลจะกระทำพร้อมกันในคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องในขณะเวลาเดียวกัน โดยแบ่งงานในการ



ประมวลผลออกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อกระจายไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องต่างๆ ซึ่งจะต้องมีการประสานเวลา (synchronization) สำหรับการจัดการข้อมูลและการสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์ การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กระทำผ่านระบบเครือข่ายหรืออุปกรณ์ที่สามารถส่งข้อมูลระหว่างเครื่องได้ซึ่งจะต้องมีโพรโทคอลหรือรูปแบบการส่งผ่านข้อมูลตามที่กำหนด

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบติดตามวัตถุโดยใช้กล้องหลายตัว โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลมากกว่าหนึ่งเครื่องที่ทำงานร่วมกันเป็นพีซีคลัสเตอร์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความเร็วในการประมวลผลข้อมูลและให้มีความสามารถในการขยายระบบคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องเชื่อมต่อกันผ่านเส้นใยนำแสงโดยใช้แผ่นวงจรสำหรับเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอ วัตถุประสงค์สำหรับการติดตามได้แก่ ทรงกลมหลายอันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน โดยงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาต่อจากงานวิจัยของ กฤษณะ อุตมั่ง [1] ซึ่งเป็นการพัฒนาพีซีคลัสเตอร์สำหรับระบบกล้องหลายตัวที่สามารถติดตามวัตถุทรงกลม 1 อันได้แบบเวลาจริง โดยได้ทำการออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบ โดยปรับปรุงโครงสร้างภายในทางซอฟต์แวร์และมอดูลการประมวลผลต่างๆ ให้มีความเป็นอิสระต่อกันและมีเสถียรภาพในการทำงานมากขึ้น

นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ระบบที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานวัดพิกัต 3 มิติ โดยได้ออกแบบหัวสัมผัสชิ้นงาน (touch probe) ให้เหมาะสำหรับการวัดพื้นผิวชิ้นงาน รวมทั้งพัฒนาเทคนิคการเชื่อมโยงพิกัต 3 มิติของพื้นผิวที่ได้จากการวัดหลายครั้งเข้าด้วยกันสำหรับใช้กับชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถวัดได้ทั้งหมดในครั้งเดียว ในส่วนนี้นับเป็นการประยุกต์ระบบสำหรับงานวิศวกรรมย้อนกลับ โดยใช้ระบบเป็นเครื่องวัดพิกัต 3 มิติแบบใช้กล้องร่วมกับหัวสัมผัสชิ้นงาน ซึ่งสามารถประยุกต์ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สำหรับงานประเภทอื่นเมื่อทำการออกแบบส่วนเพิ่มเติมเข้าไปในระบบสำหรับงานประเภทนั้นๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1.2.1 เพื่อพัฒนาระบบติดตามวัตถุที่ถูกกำหนดใน 3 มิติหลายวัตถุโดยใช้กล้องหลายตัว และใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลมากกว่าหนึ่งเครื่องทำงานร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผล

1.2.2 พัฒนาวัตถุเป้าหมายที่ใช้ในการติดตามให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมย้อนกลับ

1.2.3 พัฒนาเทคนิคการเชื่อมโยงพิกัต 3 มิติที่ได้จากการติดตามวัตถุ เมื่อเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายไปบนพื้นผิวบริเวณต่างๆ ของชิ้นงานในหลายตำแหน่งเข้าด้วยกัน สำหรับเก็บข้อมูลพื้นผิวชิ้นงานมีขนาดใหญ่เกินกว่าจะสามารถวัดได้ในครั้งเดียว

1.2.4 สามารถนำพิกัด 3 มิติที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งของแต่ละวัตถุที่แต่ละช่วงเวลาไปใช้ในงานด้านอื่นต่อไป

### 1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.3.1 ระบบที่พัฒนาสามารถติดตามวัตถุที่ถูกกำหนดใน 3 มิติหลายวัตถุโดยใช้กล้องหลายตัว (ตั้งแต่ 3 ตัวขึ้นไป) ได้แบบเวลาจริง

1.3.2 ระบบที่พัฒนาใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลมากกว่าหนึ่งเครื่อง

1.3.3 ระบบที่พัฒนาสามารถคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุที่ถูกติดตามแต่ละวัตถุได้

1.3.4 พัฒนาวัตถุเป้าหมายที่ใช้ในการติดตาม สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมย้อนกลับ

1.3.5 พัฒนาเทคนิคการเชื่อมโยงพิกัด 3 มิติที่ได้จากการวัดพื้นผิวชิ้นงานในหลายตำแหน่งเข้าด้วยกัน

1.3.6 พัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของระบบติดตามวัตถุใน 3 มิติหลายวัตถุ ซึ่งมีส่วนติดต่อกับผู้ใช้ที่สามารถแสดงผลการติดตามวัตถุแบบกราฟิก

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีระบบการมองเห็นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาการเขียนโปรแกรมขั้นสูงและการใช้งานอุปกรณ์ในการวิจัย

1.4.3 ออกแบบระบบติดตามวัตถุหลายวัตถุ และสร้างวัตถุเป้าหมายสำหรับการติดตาม

1.4.4 ออกแบบและเขียนโปรแกรมสำหรับระบบติดตามวัตถุหลายวัตถุ

1.4.5 ทดสอบการทำงานของระบบติดตามวัตถุหลายวัตถุ

1.4.6 ออกแบบการเชื่อมโยงพิกัด 3 มิติที่ได้จากการวัดหลายครั้ง

1.4.7 เขียนโปรแกรมส่วนเชื่อมโยงพิกัด 3 มิติ และทดสอบการทำงาน

1.4.8 ทดลองผลและแก้ไขปรับปรุงโปรแกรม

#### 1.4.9 สรุปผลและเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ได้ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุใน 3 มิติหลายวัตถุโดยใช้กล้องหลายตัว

1.5.2 ได้เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบใช้กล้องร่วมกับหัวสัมผัสชิ้นงาน

1.5.3 สามารถนำไปประยุกต์เป็นส่วนประกอบของระบบอื่นๆ ที่ต้องใช้ระบบติดตามวัตถุใน 3 มิติ เช่น ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ของหุ่นยนต์

1.5.4 เมื่อทำการออกแบบเพิ่มเติม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ เช่น การตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ การปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ และการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ (motion analysis) เป็นต้น

### 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 1.6.1 ระบบประมวลผลสำหรับระบบกล้องหลายตัว

Arita, D. และคณะ [2-4] ได้พัฒนาระบบพีซีคลัสเตอร์เพื่อการประมวลผลภาพวีดีโอแบบกระจายในเวลาจริงเพื่อใช้ในระบบกล้องหลายตัว กล้องแต่ละตัวจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์สำหรับการรับข้อมูลภาพเพื่อนำภาพวีดีโอมาใช้ในการประมวลผลในพีซีคลัสเตอร์ คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องเชื่อมต่อกันผ่านเครือข่ายไมรีเน็ต (Myrinet) ซึ่งเป็นระบบเครือข่ายความเร็วสูง โดยได้พัฒนาการประสานข้อมูลภาพวีดีโอและกระบวนการประมวลผลข้อมูลด้วยการออกแบบมอดูลการประมวลผล ได้แก่ มอดูลการรับข้อมูล มอดูลการส่งข้อมูล มอดูลการประมวลผลข้อมูล และมอดูลการประสานข้อมูลภาพ เพื่อทำการประมวลผลแบบขนาน โดยได้แสดงการประยุกต์ใช้ในงานตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ [3] และการสร้างกลับวัตถุแบบปริมาตรในเวลาจริง (real-time volume reconstruction) [4, 5]

Svoboda, T. และคณะ [6] พัฒนาระบบกล้องหลายตัวต้นทุนต่ำที่ประสานการถ่ายภาพทางซอฟต์แวร์ โดยได้พัฒนาสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ [7] ซึ่งมีส่วนของโปรแกรมที่ทำหน้าที่ในการประมวลผลต่างๆ ได้แก่ การถ่ายภาพ การประมวลผลภาพ และการควบคุมระบบ การเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กระทำผ่านอีเทอร์เน็ตและสื่อสารโดยใช้โปรโตคอลที่ซีพีไอพี ผลการทดสอบพบว่ามีความผิดพลาดในการประสานการถ่ายภาพด้วย

ซอฟต์แวร์สูงกว่าวิธีทางฮาร์ดแวร์ แต่เพียงพอสำหรับงานบางประเภทโดยได้แสดงการประยุกต์ใช้ในการเลือกมุมมองที่ใกล้ที่สุดสำหรับการประชุมทางไกล

Velipasalar, S และคณะ [8] พัฒนาระบบกล้องหลายตัวโดยใช้การเชื่อมต่อแบบเพียร์ทูเพียร์ซึ่งไม่ต้องอาศัยการควบคุมจากเครื่องศูนย์กลาง (centralized server) กล้องหนึ่งตัวเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์หนึ่งเครื่องสำหรับถ่ายภาพและประมวลผลในการติดตามวัตถุและสามารถติดต่อกับกล้องตัวที่อยู่ใกล้เคียงเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลในกรณีที่เกิดการบดบังวัตถุ โดยได้พัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการติดตามวัตถุในแต่ละกล้องและพัฒนาโปรโตคอลสำหรับการสื่อสารแบบใหม่เพื่อแก้ปัญหาค่าการประวิงเวลา (time delay) ในการสื่อสารและการประมวลผล โดยได้ทดลองติดตามวัตถุทั้งในอาคารและนอกอาคารในรูปแบบต่างๆ รวมทั้งเมื่อมีสิ่งบดบังเพื่อทดสอบความถูกต้องของโปรโตคอลและทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการติดตามวัตถุ พบว่าระบบสามารถติดตามวัตถุได้อย่างถูกต้องแม้มีสิ่งบดบังในบางจังหวะโดยโปรโตคอลที่พัฒนาขึ้นยังสามารถลดปริมาณการสื่อสารระหว่างเครื่อง

Kurihara, K. และคณะ [9] พัฒนาระบบตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ที่ประมวลผลบนพีซีคลัสเตอร์ โดยได้แบ่งคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลออกเป็นกลุ่มต่างๆ ได้แก่ พีซีกล้องและการประมวลผลภาพ (Camera image processing PC) พีซีการควบคุมมอเตอร์ (Motor control PC) พีซีการคำนวณพิกัดเครื่องหมาย (Marker reconstruction PC) พีซีเครื่องบริการ (Server PC) และพีซีการกำหนดป้ายชื่อ (Labeling PC) โดยใช้กล้องหมุนซ้ายขวา-ก้มเงย (pan-tilt camera) จำนวน 6 ตัวที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เพื่อขยายมุมมองของกล้อง โดยติดตามเครื่องหมายสะท้อนกลับแสง (retro-reflective marker) บนชุดสีดำของผู้แสดง เมื่อคำนวณพิกัด 3 มิติของเครื่องหมายที่ตำแหน่งต่างๆ แล้ว จึงใช้พิกัด 3 มิติดังกล่าวเพื่อค้นหาทรงหลายหน้า (polyhedron) ที่แตกต่างกันซึ่งเป็นตัวแทนส่วนต่างๆ ของร่างกายในการสร้างแบบจำลองของผู้แสดงในการเคลื่อนไหวแบบต่างๆ ในเวลาจริง

### 1.6.2 ระบบติดตามวัตถุแบบเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว

Pintaric, T. และ Kaufmann, H. [10] พัฒนาระบบติดตามวัตถุซึ่งใช้ในการทำความเป็นจริงเสมือนและความเป็นจริงเสริม (virtual and augmented reality) เพื่อติดตามเป้าหมายทรงกลมหลายอันที่ติดอยู่กับก้านเชื่อมต่อเดียวกันชุดละ 4 อัน โดยติดไว้ที่ศีรษะของผู้ใช้และใช้จับในลักษณะปากกาเพื่อจำลองการโต้ตอบกับวัตถุในระบบเสมือนจริง การตรวจหาวัตถุใช้การปรับค่าขีดแบ่งของภาพแบบขาวดำ (binary thresholding) เพื่อหาบริเวณที่มีความสว่างเกินกว่าค่าที่กำหนด แล้วหาจุดเซนทรอยด์แบบถ่วงน้ำหนักของพื้นที่ในจุดดังกล่าวแบบสเกลสีเทา (weighted grayscale centroid) เพื่อใช้เป็นจุดที่แทนตำแหน่งของวงกลมใน

ภาพ ในกรณีที่ตั้งตำแหน่งของวงกลมในภาพเกยกัน ใช้การแปลงฮัฟวงกลม (circular Hough transform) เพื่อหาจุดศูนย์กลางของวงกลมที่อยู่บริเวณติดกัน การหาความสัมพันธ์ของจุดที่สอดคล้องกันในแต่ละกล้องเพื่อนำมาคำนวณพิกัด 3 มิติใช้เรขาคณิตเอพิโพลาร์ (epipolar geometry) ร่วมกับการหาค่าความผิดพลาดจากการฉายซ้ำ ส่วนการคำนวณพิกัด 3 มิติใช้วิธีบันเดิลแอดจัสต์เมนต์ [11]

Guerra-Filho, G. [12] พัฒนาระบบตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ โดยวัตถุสำหรับการติดตามเป็นเครื่องหมายรูปสี่เหลี่ยมสีขาวจำนวน 49 อันที่ติดอยู่บนชุดสีดำของผู้แสดงที่ตั้งตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกาย การค้นหาวัตถุเริ่มจากการลบภาพพื้นหลัง (background subtraction) และแยกส่วนของชุดผู้แสดงออกมาโดยใช้การแบ่งส่วน (segmentation) ร่วมกับการปรับค่าขีดแบ่ง (thresholding) เพื่อให้ได้ภาพขาวดำ จากนั้นจึงพิจารณาส่วนของเครื่องหมายจากส่วนประกอบที่อยู่ติดกัน (connected component) ของค่าพิกเซลสีขาวซึ่งมีขนาดพื้นที่อยู่ในช่วงที่กำหนด และใช้จุดกึ่งกลางเป็นตัวแทนของวัตถุ การคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุใช้วิธีไตรแองกูเลชันเชิงเส้น (linear triangulation method) [13] โดยใช้ตำแหน่งของเครื่องหมายที่พบในกล้อง 3 ตัวจากทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งวางตัวอยู่โดยรอบผู้แสดง

### 1.6.3 การติดตามวัตถุใน 3 มิติ

Dorfmueller-Ulhaas, K. [14] พัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนที่ของผู้ใช้ในระบบเสมือนจริงโดยติดตามวัตถุทรงกลมหลายอันบนอุปกรณ์สำหรับผู้ใช้ โดยการนำจุดศูนย์กลางถ่วงของวงกลมในภาพที่ผ่านการแบ่งส่วน มาทำการติดตามโดยใช้ตัวกรองคาร์ลมานแบบขยาย (extended Kalman filter) เพื่อให้ระบบมีความคงทนในการติดตาม (robustness) และลดความผิดพลาดในการจับคู่จุดที่สอดคล้องกันในภาพที่ได้จากกล้องแต่ละตัว

วันชัย [15, 16] พัฒนาระบบติดตามอนุภาคใน 3 มิติโดยใช้ระบบกล้องสเตอริโอที่ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์สองแกนซึ่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง โดยได้พัฒนาระบบการสอบเทียบกล้องร่วมกับหุ่นยนต์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องและหุ่นยนต์พร้อมกัน เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุเป้าหมายซึ่งเป็นแผ่นกระดาษที่มีวงกลมสีดำบนพื้นสีขาว การติดตามวัตถุกระทำบนระนาบภาพโดยใช้ตัวกรองคาร์ลมาน (Kalman filter) เป็นตัวทำนายตำแหน่งของวัตถุในจังหวะถัดไปเพื่อช่วยให้การติดตามมีเสถียรภาพมากขึ้น

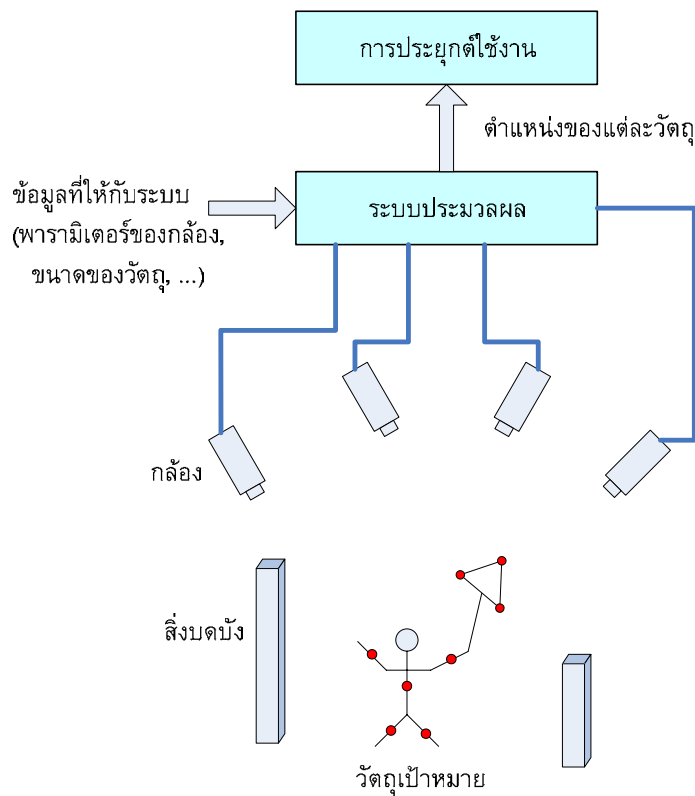
Santos, P.C. และคณะ [17] ได้พัฒนาระบบติดตามกระดานเป้าหมายที่มีวงกลมสะท้อนกลับแสงหลายอันที่มีรูปแบบและขนาดตามที่กำหนดซึ่งทำให้สามารถคำนวณพิกัด 3 มิติได้โดยใช้กล้องตัวเดียวเพื่อประยุกต์ใช้ในงานความเป็นจริงเสมือน โดยได้พัฒนาโมดูลการประมวลผลต่างๆ สำหรับการติดตามวัตถุโดยใช้กล้องตัวเดียว และสามารถขยายเป็นระบบกล้องหลายตัวโดยการพัฒนามอดูลสำหรับการรวมข้อมูลที่ได้จากกล้องหลายตัวเพื่อให้มีความแม่นยำในการประมาณตำแหน่งสูงขึ้น

## บทที่ 2

### ภาพรวมของระบบ

#### 2.1 บทนำ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุหลายวัตถุโดยใช้กล้องหลายตัว โดยได้พัฒนาสถาปัตยกรรมของระบบประมวลผล โปรแกรมประยุกต์ มอดูลการประมวลผล และอัลกอริทึมในการติดตามวัตถุ สำหรับการประมวลผลบนพีซีคลัสเตอร์ที่พัฒนาขึ้นโดยใช้แผนวงจรสำหรับเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอเป็นอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ วัตถุเป้าหมายสำหรับการติดตามได้แก่ วัตถุทรงกลมหลายอันที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน โดยสามารถติดตามวัตถุเป้าหมายที่เคลื่อนที่ใน 3 มิติและคำนวณพิกัด 3 มิติของแต่ละวัตถุที่แต่ละช่วงเวลาเมื่อเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิงที่กำหนดได้ โดยระบบนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการเพิ่มจำนวนกล้องในระบบกล้องหลายตัวและเพื่อให้มีความเร็วในการประมวลผลเพียงพอสำหรับการติดตามวัตถุแบบเวลาจริง ซึ่งสามารถใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาต่อยอดเพื่อประยุกต์ในงานด้านต่างๆ โดยการนำตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายแต่ละวัตถุไปใช้งาน แผนภาพโดยรวมและการประยุกต์ของระบบแสดงดังรูปที่ 2.1 โดยในงานวิจัยนี้ได้แสดงการประยุกต์สำหรับการวัดพิกัด 3 มิติของพื้นผิวชิ้นงานที่ต้องการเพื่อนำพิกัดของพื้นผิวนั้นเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์

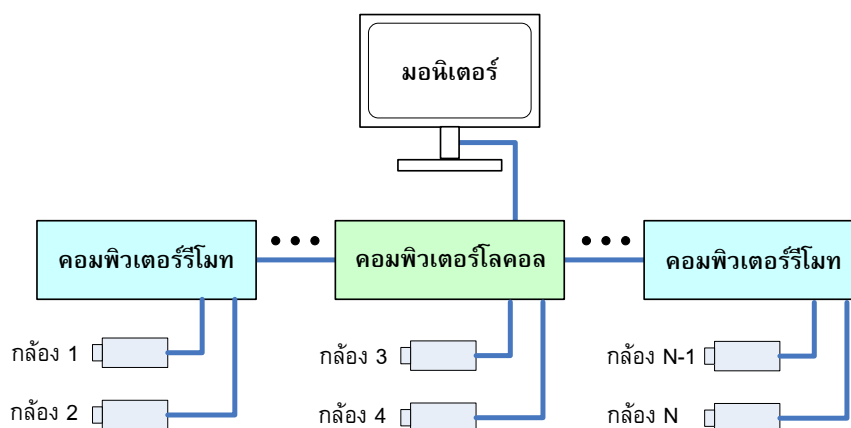


รูปที่ 2.1 แผนภาพโดยรวมของระบบและการประยุกต์

## 2.2 ระบบพีซีคลัสเตอร์

เนื่องจากการใช้กล้องหลายตัวจะทำให้ข้อมูลที่ต้องการการประมวลผลเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ทำให้ต้องการระบบประมวลผลที่มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการทำงานเพื่อการประมวลผลในการติดตามวัตถุแบบเวลาจริง ในงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบพีซีคลัสเตอร์ (PC-cluster) ซึ่งเป็นการนำคอมพิวเตอร์หลายเครื่องมาเชื่อมต่อกันและทำงานประสานกัน เปรียบเสมือนคอมพิวเตอร์เครื่องเดียวที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น พีซีคลัสเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้มีส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนฮาร์ดแวร์และส่วนซอฟต์แวร์ ส่วนฮาร์ดแวร์ได้แก่ เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลหรือพีซีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างเครื่องซึ่งได้แก่ แผ่นวงจรสำหรับเคลื่อนย้ายข้อมูลที่มีการส่งข้อมูลผ่านเส้นใยนำแสง ส่วนซอฟต์แวร์ได้แก่ โปรแกรมประยุกต์ที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับควบคุมการทำงานของระบบในแต่ละเครื่อง ซึ่งภายในโปรแกรมประยุกต์จะมีมอดูลการประมวลผลสำหรับทำหน้าที่ต่างๆ เช่น การถ่ายภาพ การส่งข้อมูลระหว่างเครื่อง การสอบเทียบกล้อง เป็นต้น ซึ่งมอดูลที่ใช้ขึ้นอยู่กับประเภทของโปรแกรมและเครื่องที่อยู่ในระบบซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 5

พีซีคลัสเตอร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์สองประเภท ประเภทที่หนึ่งได้แก่คอมพิวเตอร์โลคอล ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมคอมพิวเตอร์ทั้งหมดในระบบ ควบคุมกระบวนการติดตามวัตถุ และปรับตั้งค่าของกล้องและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดและการทำงานในกระบวนการต่างๆ ของคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องที่อยู่ภายในระบบ ประเภทที่สองได้แก่คอมพิวเตอร์รีโมท มีหน้าที่ในการควบคุมกล้องที่เชื่อมต่อกับเครื่องนั้น ถ่ายภาพ ตรวจสอบวัตถุ และติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์โลคอลเพื่อส่งข้อมูลที่จำเป็นต่อการประมวลผลในขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการติดตามวัตถุ แผนภาพโครงสร้างของพีซีคลัสเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของพีซีคลัสเตอร์

ในออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบได้กำหนดให้สามารถมีคอมพิวเตอร์โลคอลได้เพียงเครื่องเดียวในระบบเนื่องจากทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของระบบ ส่วนเครื่องรีโมทสามารถมีได้หลายเครื่องเพื่อให้สามารถขยายระบบต่อไปได้ โดยเมื่อมีกล้องที่ต้องการจะ



เชื่อมต่อเข้ากับระบบก็สามารถเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องรีโมทได้ โดยในคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องสามารถเชื่อมต่อกล้องได้มากกว่าหนึ่งตัวขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์เครื่องนั้นๆ ในการรองรับการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากกล้องทั้งหมดที่กำลังเชื่อมต่ออยู่ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ในการสร้างพีซีคลัสเตอร์จำนวน 2 เครื่องซึ่งเป็นคอมพิวเตอร์โลคอลหนึ่งเครื่อง และคอมพิวเตอร์รีโมทหนึ่งเครื่อง โดยแต่ละเครื่องเชื่อมต่อกับกล้องสองตัว

## 2.3 การทำงานของระบบ

การทำงานของระบบประกอบด้วยหลายส่วน ทั้งที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการติดตามวัตถุโดยตรงและส่วนอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการประมวลผลของระบบ รวมทั้งส่วนที่ช่วยเสริมการทำงานเพื่อให้มีความสะดวกในการใช้งาน เช่น การปรับตั้งค่าของกล้อง การทำงานของระบบได้ถูกจำแนกออกเป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

- 1) การปรับตั้งค่าของกล้อง
- 2) การถ่ายภาพ
- 3) การประสานการถ่ายภาพ
- 4) การตรวจหาวัตถุในภาพ
- 5) การติดต่อสื่อสารระหว่างพีซี
- 6) การสอบเทียบกล้อง
- 7) การคำนวณพิกัด 3 มิติ
- 8) การติดตามวัตถุใน 3 มิติ
- 9) การบันทึกผล

เมื่อได้แบ่งการทำงานของระบบออกเป็นประเภทต่างๆ ทำให้สามารถนำไปออกแบบส่วนการประมวลผลของระบบซึ่งได้แก่ มอดูลการประมวลผล เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของระบบในส่วนต่างๆ โดยมอดูลการประมวลผลจะทำงานอยู่ในโปรแกรมประยุกต์ตามสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ของระบบพีซีคลัสเตอร์ดังแสดงในหัวข้อ 5.3 ของบทที่ 5

## 2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

### 2.4.1 กล้อง

ในการถ่ายภาพ กล้องแต่ละตัวจะถูกปรับความละเอียดของภาพไว้ที่ 640x480 พิกเซล โดยกล้องที่ใช้เป็นกล้องสีเดียว (monochrome) ชนิดซีมอส ยี่ห้อพิกเซลลิงก์ (PixeLINK) รุ่น PL-A741-BL มีความละเอียดในการถ่ายภาพสูงสุดที่ 1.3 ล้านพิกเซล การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์กระทำผ่านพอร์ตมาตรฐาน IEEE-1394a โดยใช้ร่วมกับเลนส์สำหรับ

กล้องความละเอียดสูง (Mega pixel) ความยาวโฟกัส 8 มิลลิเมตร สำหรับเซ็นเซอร์ขนาดไม่เกิน 2/3" มีการใส่แบบ C-mount ยี่ห้อ VS Technology รุ่น SV-0814H

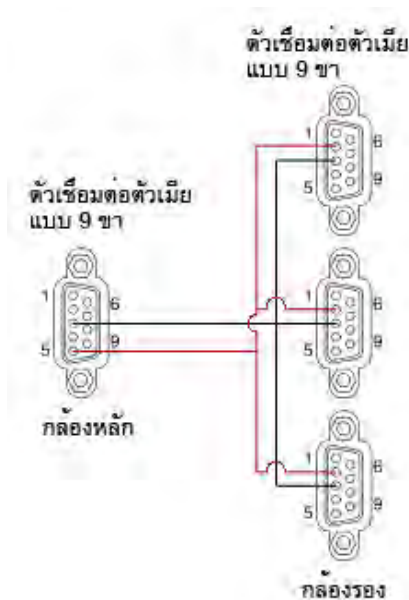
ในการถ่ายภาพโดยใช้กล้องหลายตัวเพื่อให้ได้ภาพของวัตถุที่ขณะเวลาเดียวกันหรือมีความเหลื่อมของเวลาน้อยที่สุดต้องอาศัยการประสานการถ่ายภาพ (synchronization) ซึ่งการส่งถ่ายภาพทางซอฟต์แวร์ไปยังกล้องแต่ละตัวโดยตรงจะมีการประวิงเวลา (time delay) เนื่องจากความไม่แน่นอนในการจัดสรรเวลาให้กับงานต่างๆ ของระบบปฏิบัติการที่ใช้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การประสานการถ่ายภาพทางฮาร์ดแวร์โดยการเชื่อมต่อสายเข้ากับกล้องซึ่งสามารถส่งสัญญาณออก (output) และรับสัญญาณทริกเกอร์ (trigger) หรือสัญญาณการถ่ายภาพทางฮาร์ดแวร์ในถ่ายภาพได้ โดยกล้องที่ใช้ในการวิจัยสามารถรับสัญญาณทริกเกอร์ที่เป็นสัญญาณระดับที่ทีแอล 3.3 โวลต์จำนวนหนึ่งช่องและมีสัญญาณขาออกเพื่อใช้งานทั่วไป (General Purpose Output) จำนวน 4 ช่องผ่านตัวเชื่อมต่อ Molex 51021-0800 ซึ่งได้รับการแปลงให้เป็นตัวเชื่อมต่อ 9 ขาสำหรับพอร์ตอนุกรมซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 รายละเอียดของตัวเชื่อมต่อ 9 ขาสำหรับพอร์ตอนุกรมที่เชื่อมต่อสัญญาณจากตัวกล้อง

ขา	ชื่อ	หน้าที่
1	3.3V	ไฟเลี้ยง +3.3 โวลต์
2	TRIGGER	รับสัญญาณทริกเกอร์
3	GROUND	สายดินของลอจิกและแชสซี
4	GP1	สัญญาณขาออกเพื่อใช้งานทั่วไป 1
5	GP2	สัญญาณขาออกเพื่อใช้งานทั่วไป 2
6	GP3	สัญญาณขาออกเพื่อใช้งานทั่วไป 3
7	GP4	สัญญาณขาออกเพื่อใช้งานทั่วไป 4
8	n/c	ไม่ได้เชื่อมต่อ
9	n/c	ไม่ได้เชื่อมต่อ

กล้องหนึ่งตัวในระบบจะถูกเลือกให้เป็นกล้องหลัก ส่วนกล้องที่เหลือจะถูกกำหนดให้เป็นกล้องรอง โหมดของทริกเกอร์ในกล้องหลักจะถูกตั้งให้เป็นแบบซอฟต์แวร์เพื่อรับคำสั่งการถ่ายภาพจากโปรแกรมควบคุม เมื่อกล้องหลักได้รับคำสั่งในการถ่ายภาพจะส่งสัญญาณการถ่ายภาพทางฮาร์ดแวร์ออกไปทางขาสัญญาณขาออกทันที กล้องรองที่เหลือซึ่งถูกตั้งค่าของทริกเกอร์ไว้ที่โหมดฮาร์ดแวร์ล่วงหน้าเมื่อได้รับสัญญาณการถ่ายภาพทางฮาร์ดแวร์แล้วจึงทำการถ่ายภาพ บริษัทผู้ผลิตกล้องรับประกันการประวิงเวลาในการถ่ายภาพระหว่างกล้องหลักและกล้องรองไว้ที่ประมาณ 9 ไมโครวินาที ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ GP2 หรือ

สัญญาณจากขา 5 ของกล่องหลักในการส่งสัญญาณแบบสโตรปโทรมดและเนกาทีฟโพลาริตี ในการถ่ายภาพ แผนภาพการเชื่อมต่อกล่องเพื่อประสานการถ่ายภาพทางฮาร์ดแวร์แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพการเชื่อมต่อกล่องเพื่อประสานการถ่ายภาพทางฮาร์ดแวร์

#### 2.4.2 อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างพีซี

อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมต่อระหว่างพีซีมีความจำเป็นสำหรับการสร้างพีซีคลัสเตอร์เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลต่างๆ ระหว่างเครื่อง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แผงวงจรสำหรับเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอ dataBLIZZARD รุ่น DB0-PCI-PCI ซึ่งใช้ในการส่งข้อมูลแบบจุดต่อจุดด้วยความเร็วสูง โดยมีความเร็วสูงสุดในการส่งผ่านข้อมูล 1.0625 กิกะบิตต่อวินาที แผงวงจรสองอันเชื่อมต่อกันผ่านสายเส้นใยนำแสง ดังรูปที่ 2.4

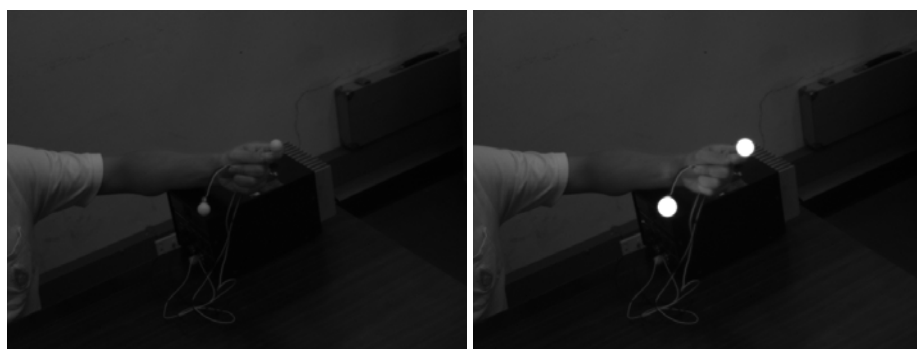


รูปที่ 2.4 แผงวงจรสำหรับเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอที่เชื่อมต่อกันผ่านสายใยนำแสง

แผ่นวงจรนี้สามารถส่งข้อมูลระหว่างกันโดยทำการเชื่อมโยงหน่วยความจำ (memory mapping) เพื่อเป็นการกำหนดให้หน่วยความจำของเครื่องปลายทางเปรียบเสมือนหน่วยความจำของเครื่องต้นทาง เมื่อได้ทำการเชื่อมโยงหน่วยความจำทั้งสองเข้าด้วยกันแล้วทำให้เครื่องต้นทางสามารถเข้าถึงข้อมูลในเครื่องปลายทางได้ โดยแต่ละเครื่องสามารถเป็นได้ทั้งเครื่องต้นทางและเครื่องปลายทาง นอกจากนี้แผ่นวงจรยังสามารถส่งสัญญาณขัดจังหวะทางโปรแกรม (programmed interrupt) ถึงกัน ซึ่งมีสองประเภทได้แก่ สัญญาณขัดจังหวะทางโปรแกรมไปยังตัวส่งหรือพีที (programmed interrupt to transmitter, PT) และสัญญาณขัดจังหวะทางโปรแกรมไปยังตัวรับหรือพีอาร์ (programmed interrupt to receiver, PR) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้การส่งสัญญาณขัดจังหวะทางโปรแกรมเป็นสัญญาณควบคุมในการประสานการทำงานสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างเครื่อง สำหรับรายละเอียดของกระบวนการในการสื่อสารระหว่างเครื่องได้กล่าวถึงในบทที่ 5

### 2.4.3 วัตถุประสงค์เป้าหมายสำหรับการติดตาม

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัตถุประสงค์เป้าหมายสำหรับการติดตามเป็นวัตถุทรงกลมเนื่องจากเมื่อถูกฉายลงบนระนาบภาพแล้วจะทำให้ได้รูปร่างเป็นวงกลมซึ่งง่ายต่อการตรวจหาจุดเซนทรอยด์ในภาพซึ่งได้แก่ จุดศูนย์กลางของวงกลม โดยการทดลองต่าง ๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 มิลลิเมตรซึ่งเป็นเป้าหมายเปล่งแสง (active target) โดยได้ใส่หลอดไฟไว้ภายในเพื่อให้มีความเข้มแสงสูงกว่าวัตถุอื่นในภาพ ซึ่งง่ายต่อการตรวจหาวัตถุและทำให้มีความคงทนในการติดตามวัตถุ ลักษณะของวัตถุประสงค์เป้าหมายที่ใช้แสดงดังรูปที่ 2.5 นอกจากนี้การใช้วัตถุประสงค์เป้าหมายดังกล่าวยังช่วยลดเวลาในการรับภาพของกล้องซึ่งเป็นการเพิ่มความถี่ในการติดตามวัตถุได้ทางอ้อมอีกด้วย



(ก)

(ข)

รูปที่ 2.5 วัตถุทรงกลมเปล่งแสงที่ใช้เป็นเป้าหมายในการติดตามเมื่อถ่ายภาพโดย (ก) ไม่ได้เปิดไฟ และ (ข) เปิดไฟ

#### 2.4.4 แขนกลมิตซูบิชิ PA10-7C

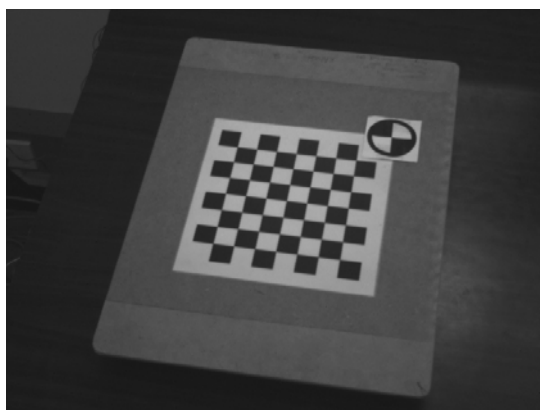
แขนกลมิตซูบิชิ PA10-7C เป็นหุ่นยนต์เพื่อใช้ในงานทั่วไปซึ่งมี 7 องศาอิสระ โดยมีความสามารถในการทำซ้ำ (repeatability) ในการเคลื่อนที่ประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ลักษณะของแขนกลแสดงดังรูปที่ 2.6 ในการทดลองได้ใช้แขนกลในการสร้างเส้นทาง การเคลื่อนที่ของวัตถุเป้าหมายที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายของแขนกลให้เคลื่อนที่ในรูปแบบที่กำหนด



รูปที่ 2.6 แขนกลมิตซูบิชิ PA10-7C

#### 2.4.5 วัตถุสอบเทียบ

งานวิจัยนี้ได้ใช้วัตถุสอบเทียบเป็นแผ่นกระดานที่มีลายตารางหมากรุกสีขาวดำซึ่งเป็นวัตถุสอบเทียบ 2 มิติ [18] โดยมีจำนวน 8x8 ช่อง ความกว้างและความสูงของสี่เหลี่ยมแต่ละช่องเท่ากับ 20 มิลลิเมตร ภาพของวัตถุสอบเทียบที่ใช้ในการวิจัยแสดงดังรูปที่ 2.7 โดยตำแหน่งที่ใช้ในการสอบเทียบได้แก่ มุมที่จุดตัดภายในของลายตารางหมากรุกซึ่งในกรณีนี้มีทั้งหมด 49 จุด โดยมีวงกลมหนึ่งวงสำหรับใช้ในการระบุทิศทางของกระดานแบบอัตโนมัติ กระดานสอบเทียบนี้ใช้สำหรับการสอบเทียบที่ระยะห่างจากกล้องไม่เกิน 2.5 เมตร



รูปที่ 2.7 กระดานสอบเทียบที่ใช้ในการวิจัย

#### 2.4.6 คอมพิวเตอร์

พีซีคลัสเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง โดยหนึ่งเครื่องกำหนดให้เป็นคอมพิวเตอร์โลคอล และอีกหนึ่งเครื่องเป็นคอมพิวเตอร์รีโมท เครื่องคอมพิวเตอร์โลคอลใช้หน่วยประมวลผลกลางอินเทลคอร์ทูควอต ความเร็ว 2.83 กิกะเฮิร์ตซ์ หน่วยความจำ 4 กิกะไบต์ และเครื่องคอมพิวเตอร์รีโมทใช้หน่วยประมวลผลกลางอินเทลเพนเทียมโฟร์ ความเร็ว 3.4 กิกะเฮิร์ตซ์ หน่วยความจำ 2 กิกะไบต์ โดยทั้งสองเครื่องทำงานบนระบบปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดวส์เอ็กซ์พี

#### 2.4.7 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัส

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัสที่ควบคุมด้วยมือของบริษัท Brown & Sharpe รุ่น Microval 343 ดังรูปที่ 2.8 มีช่วงการวัดในแนวแกนต่างๆ เป็นดังนี้ แกน X-14" แกน Y-16" และแกน Z-12" ใช้โปรแกรมควบคุม MicroMeasure III ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เป็นอุปกรณ์วัดเพื่อใช้ในการอ้างอิง ในการวัดระยะห่างระหว่างทรงกลมสองลูกในการทดสอบความแม่นยำของระบบ



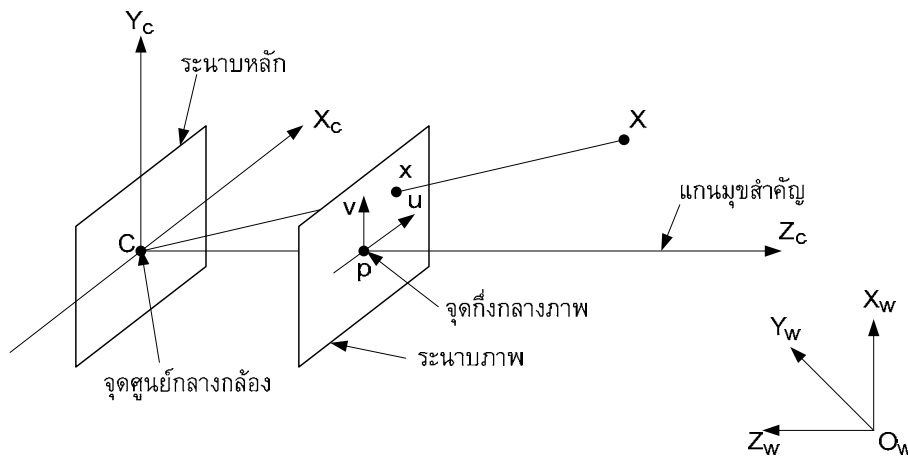
รูปที่ 2.8 เครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัสยี่ห้อ Brown & Sharpe รุ่น Microval 343

### บทที่ 3

### ทฤษฎี

#### 3.1 แบบจำลองกล้อง (Camera Model)

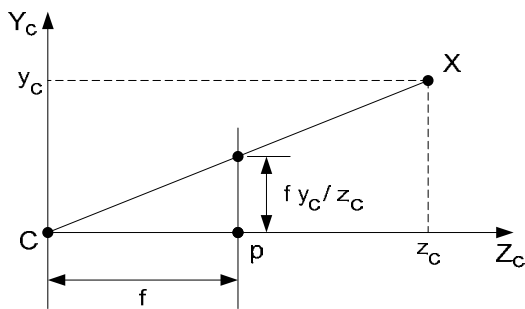
แบบจำลองกล้องเป็นแบบจำลองการเกิดภาพของกล้องที่ใช้ในการถ่ายภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองกล้องรูเข็ม (pinhole camera model) ซึ่งประกอบด้วยจุดศูนย์กลางการฉาย (center of projection) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่าจุดศูนย์กลางกล้อง (camera center) และระนาบภาพ (image plane) จากรูปที่ 3.1 พิจารณาการฉายเชิงศูนย์กลาง (central projection) โดยกำหนดให้จุดศูนย์กลางการฉายเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัดแบบยูคลิด (Euclidean coordinate system) และกำหนดให้ระนาบ  $z_c = f$  เป็นระนาบภาพ เมื่อใช้แบบจำลองกล้องรูเข็ม จุดที่มีพิกัดเป็น  $\mathbf{X} = (x_c, y_c, z_c)^T$  ในระบบพิกัดกล้องจะถูกส่ง (mapped) ไปเป็นจุดบนระนาบภาพที่เกิดจากการตัดกันของเส้นที่เชื่อมระหว่างจุด  $\mathbf{X}$  ไปยังจุดศูนย์กลางกล้องกับระนาบภาพ โดยเส้นที่ลากตั้งฉากจากจุดศูนย์กลางกล้องไปยังระนาบภาพเรียกว่า แกนमुखสำคัญ (principal axis) จุดที่แกนमुखสำคัญตัดกับระนาบภาพเรียกว่า จุดกึ่งกลางภาพ (principal point) ระนาบที่ผ่านจุดศูนย์กลางกล้องและขนานกับระนาบภาพเรียกว่า ระนาบหลัก (principal plane) ของกล้อง



รูปที่ 3.1 เรขาคณิตของแบบจำลองกล้องรูเข็ม

เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยมคล้ายในรูปที่ 3.2 สามารถแสดงได้ว่าจุด  $(x_c, y_c, z_c)$  ถูกส่งไปยังจุด  $(fx_c/z_c, fy_c/z_c, f)$  บนระนาบภาพ ดังนั้นจุดของภาพใน 2 มิติเมื่อไม่ใช้ค่าพิกัดตัวสุดท้ายจะได้  $\mathbf{x}_c = (fx_c/z_c, fy_c/z_c)$  ซึ่งเป็นการส่ง (mapping) จากปริภูมิแบบยูคลิด 3 มิติ (Euclidean 3-space)  $\mathbb{R}^3$  ไปยังปริภูมิแบบยูคลิด 2 มิติ (Euclidean 2-space)  $\mathbb{R}^2$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \mapsto \begin{bmatrix} fx_c/z_c \\ fy_c/z_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$



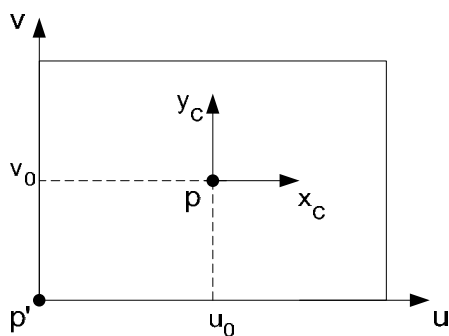
รูปที่ 3.2 สามเหลี่ยมคล้ายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดใน 3 มิติกับ พิกัด 2 มิติบนระนาบภาพ

เมื่อเขียนจุดต่างๆ ในระบบพิกัดเอกพันธ์ (ดูภาคผนวก) สามารถแสดงการฉายเชิงศูนย์กลางได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้น ซึ่งอยู่ในรูปของการคูณเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$z_c \begin{bmatrix} fx_c / z_c \\ fy_c / z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

ในสมการ (3.2) ได้สมมติให้จุดกำเนิดของระบบพิกัดบนระนาบภาพอยู่ที่จุดหลัก  $\mathbf{p}$  แต่ในทางปฏิบัติจุดกำเนิดของระบบพิกัดบนระนาบภาพจะอยู่ที่  $\mathbf{p}' = (u_0, v_0)$  ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ทำให้สมการ (3.2) สามารถเขียนได้เป็น

$$z_c \begin{bmatrix} (fx_c / z_c) + u_0 \\ (fy_c / z_c) + v_0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.3}$$



รูปที่ 3.3 ระบบพิกัดภาพและระบบพิกัดกล้อง

ซึ่งสามารถเขียน



$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 \\ 0 & f & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

ทำให้สมการ (3.3) สามารถเขียนอยู่ในรูปย่อได้เป็น

$$\mathbf{x} = \mathbf{K}[\mathbf{I} \mid \mathbf{0}] \mathbf{X}_c \quad (3.5)$$

เมทริกซ์  $\mathbf{K}$  เรียกว่าเมทริกซ์การสอบเทียบกล้อง (camera calibration matrix) ในแบบจำลองกล้องรูเข็มที่ได้แสดงมานั้นมีสมมติฐานว่า พิกัดภาพอยู่ในระบบพิกัดแบบยูคลิด ซึ่งมีสเกลเท่ากันทั้งสองแนวแกน ในกรณีของกล้องซีซีดี มีความเป็นไปได้ที่จะมีพิกเซลแบบไม่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งถ้าพิกัดภาพถูกวัดในพิกัดพิกเซลจะต้องมีค่าแฟกเตอร์เพื่อชดเชยความไม่เท่ากันของสเกลในแต่ละทิศทาง โดยกำหนดให้จำนวนพิกเซลต่อหนึ่งหน่วยระยะทางในพิกัดภาพเป็น  $m_x$  และ  $m_y$  ในทิศทาง  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ ดังนั้นเมทริกซ์การสอบเทียบกล้องสามารถเขียนได้เป็น

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

โดยที่

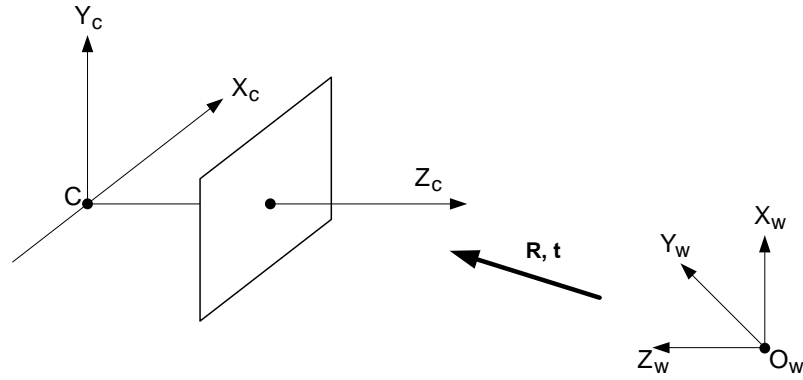
$$\alpha_x = fm_x \quad (3.7)$$

$$\alpha_y = fm_y \quad (3.8)$$

สำหรับ  $s$  แทนค่าพารามิเตอร์ความเบ้ (skew parameter) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับศูนย์สำหรับกล้องทั่วไป ยกเว้นในกรณีที่แกนของเลนส์ไม่ตั้งฉากกับระนาบภาพพอดี

โดยทั่วไปจุดใน 3 มิติจะเขียนอยู่ในระบบพิกัดแบบยูคลิดอีกอันหนึ่งที่เรียกว่า กรอบพิกัดโลก (world coordinate frame) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับกรอบพิกัดกล้อง (camera coordinate frame) ด้วยการแปลงพิกัดแบบการหมุนและการเลื่อนขนานดังแสดงในรูปที่ 3.4 ถ้า  $\mathbf{X}_w$  เป็นเวกเตอร์ที่มี 4 ส่วนประกอบซึ่งแทนพิกัดของจุดในกรอบพิกัดโลก และ  $\mathbf{X}_c$  แทนจุดเดียวกันเมื่ออ้างอิงในกรอบพิกัดกล้อง จะได้

$$\mathbf{X}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{R}\mathbf{C} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}_w \quad (3.9)$$



รูปที่ 3.4 การแปลงระหว่างกรอบพิกัดโลกและกรอบพิกัดกล้อง

เมื่อ  $\tilde{\mathbf{C}}$  แทนพิกัดไม่เอกพันธ์ (nonhomogeneous coordinate) ของจุดศูนย์กลางกล้องในกรอบพิกัดโลก และ  $\mathbf{R}$  เป็นเมทริกซ์ขนาด  $3 \times 3$  ที่แทนทิศทางของกรอบพิกัดกล้อง

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

และเวกเตอร์การเลื่อนขนาน  $\mathbf{t}$  ขนาด  $3 \times 1$

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

โดยที่สมการ (3.9) สามารถเขียนอยู่ในรูปของเวกเตอร์การเลื่อนขนาน  $\mathbf{t}$  ได้ดังนี้

$$\mathbf{X}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}_w \quad (3.12)$$

โดยที่

$$\mathbf{t} = -\mathbf{R}\tilde{\mathbf{C}} \quad (3.13)$$

เมื่อแทนสมการ (3.9) ลงใน (3.5) จะได้

$$\mathbf{x} = \mathbf{KR}[\mathbf{I} \mid -\tilde{\mathbf{C}}] \mathbf{X}_w \quad (3.14)$$

หรือแทนด้วย (3.12) จะได้

$$\mathbf{x} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \mid \mathbf{t}] \mathbf{X}_w \quad (3.15)$$

ทำให้ได้สมการสำหรับกล้องซีซีดีโดยใช้แบบจำลองกล้องรูเข็ม โดยกำหนดให้

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \mid \mathbf{t}] = \mathbf{KR}[\mathbf{I} \mid -\tilde{\mathbf{C}}] \quad (3.16)$$

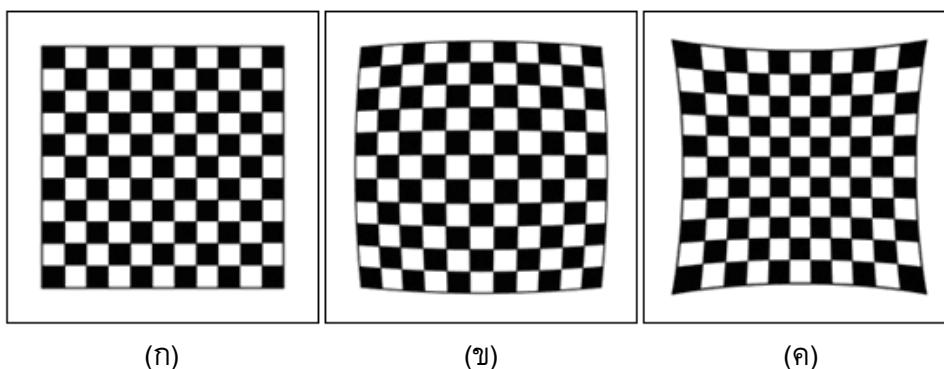
ดังนั้น

$$\mathbf{x} = \mathbf{PX}_w \quad (3.17)$$

เมทริกซ์  $\mathbf{P}$  เรียกว่า เมทริกซ์กล้อง (camera matrix) ซึ่งมี 11 องศาอิสระ โดยมี 5 องศาอิสระสำหรับเมทริกซ์  $\mathbf{K}$  ได้แก่ค่าของ  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $s$ ,  $u_0$  และ  $v_0$ , 3 องศาอิสระของ  $\mathbf{R}$  และอีก 3 องศาอิสระสำหรับ  $\tilde{\mathbf{C}}$  (หรือ  $\mathbf{t}$ ) โดยที่พารามิเตอร์ที่อยู่ในเมทริกซ์  $\mathbf{K}$  เรียกว่า พารามิเตอร์ภายในของกล้อง และพารามิเตอร์ของ  $\mathbf{R}$  และ  $\tilde{\mathbf{C}}$  ซึ่งเชื่อมโยงการหมุนและตำแหน่งของกล้องกับระบบพิกัดโลกเรียกว่า พารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง ค่าของพารามิเตอร์ทั้งหลายเหล่านี้จะถูกหาค่าในการสอบเทียบกล้อง

### 3.2 การบิดเบี้ยวของเลนส์ (Lens Distortion)

สมมติฐานที่ใช้ในหัวข้อก่อนหน้านี้นี้คือ ความเป็นเชิงเส้นของกระบวนการเกิดภาพ โดยที่จุดในโลก จุดในภาพ และจุดศูนย์กลางกล้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า การฉายเชิงเส้น (linear projection) ซึ่งในระบบเลนส์จริงจะมีความเบี่ยงเบนเกิดขึ้นเนื่องจากการบิดเบี้ยวของเลนส์ โดยค่าความผิดพลาดนี้จะมีค่ามากขึ้นเมื่อเลนส์มีความยาวโฟกัสน้อยลง ผลของการบิดเบี้ยวของเลนส์แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 (ก) ภาพของตารางสี่เหลี่ยมเมื่อไม่มีการบิดเบี้ยวของเลนส์, (ข) และ (ค) เป็นภาพของ (ก) เมื่อมีการบิดเบี้ยวจากเลนส์จริง

การบิดเบี้ยวของเลนส์แบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่ การบิดเบี้ยวเชิงสัมผัส และการบิดเบี้ยวเชิงรัศมี โดยที่ Tsai [19] ได้แสดงว่าสามารถพิจารณาเฉพาะการบิดเบี้ยวเชิงรัศมี เนื่องจากการบิดเบี้ยวเชิงสัมผัสมีผลน้อยมากและสามารถละทิ้งได้

ในการแก้การบิดเบี้ยวของเลนส์สามารถทำได้ดังนี้ กำหนดให้  $\mathbf{x}_u = [x_u \ y_u \ 1]^T$  เป็นเวกเตอร์เอกพจน์ที่มี 3 ส่วนประกอบที่แทนตำแหน่งภาพอุดมคติซึ่งเป็นไปตามการฉาย เชิงเส้นของจุดซึ่งมีพิกัดเป็น  $\mathbf{X}_c$  เมื่อวัดในระบบพิกัดกล้อง จะได้

$$\mathbf{x}_u = [\mathbf{I} \ | \ \mathbf{0}] \mathbf{X}_c \quad (3.18)$$

ตำแหน่งภาพจริงหลังจากเกิดการบิดเบี้ยวเชิงรัศมีเป็น  $\mathbf{x}_d = [x_d \ y_d \ 1]^T$  สัมพันธ์กับตำแหน่งภาพอุดมคติโดยระยะกระจัดเชิงรัศมีเป็น

$$\mathbf{x}_u = F(r_d) \mathbf{x}_d \quad (3.19)$$

หรือ

$$\mathbf{x}_d = G(r_u) \mathbf{x}_u \quad (3.20)$$

เมื่อ

$$r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2} \quad (3.21)$$

$$r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2} \quad (3.22)$$

โดยที่

$F(r_d)$  เป็นค่าแฟกเตอร์การบิดเบี้ยวเชิงรัศมี ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $r_d$

$G(r_u)$  เป็นค่าแฟกเตอร์การบิดเบี้ยวเชิงรัศมี ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $r_u$

ในขั้นตอนการหาค่าพิกัด 3 มิติของวัตถุจะทราบตำแหน่งภาพจริงของวัตถุซึ่งได้จากการตรวจหาวัตถุในภาพ โดยจะต้องนำไปคำนวณหาตำแหน่งภาพอุดมคติ ซึ่งหากใช้สมการ (3.20) ในการคำนวณจะทำได้ยากและใช้เวลามากเนื่องจากต้องแก้สมการพหุนามดีกรี 5 ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สมการ (3.19) ในการคำนวณตำแหน่งภาพอุดมคติเพื่อกำจัดผลของการบิดเบี้ยวเชิงรัศมีของเลนส์

การประมาณค่าของฟังก์ชัน  $F(r_d)$  สามารถทำได้โดยใช้การกระจายเทย์เลอร์ (Taylor expansion) ดังนี้

$$F(r_d) = 1 + k_1 r_d + k_2 r_d^2 + k_3 r_d^3 + \dots \quad (3.23)$$

โดยฟังก์ชัน  $F(r_d)$  นิยามเฉพาะเมื่อ  $r_d$  มีค่าเป็นบวกและ  $F(0) = 1$  สำหรับสัมประสิทธิ์  $(k_1, k_2, k_3, \dots)$  ที่ใช้ในการแก้การบิดเบี้ยวเชิงรัศมีจะถูกรวมไว้ในพารามิเตอร์ภายในของกล้อง ซึ่งสามารถหาค่าได้จากกระบวนการสอบเทียบกล้อง

### 3.3 การสอบเทียบกล้อง (Camera Calibration)

วิธีการที่ใช้ในการสอบเทียบกล้องในงานวิจัยนี้ได้แก่ วิธีการสอบเทียบของ Tsai [19] สำหรับการสอบเทียบด้วยชุดของจุดที่อยู่ในระนาบจากมุมมองเดียวโดยสรุปมีดังนี้ เริ่มต้นโดยการประมาณค่าตอบบางส่วนโดยใช้วิธีที่ให้ผลเฉลยแบบปิดด้วยการแก้ระบบสมการเชิงเส้นที่เป็นโอเวอร์ดีเทอร์มีนซิสเต็ม (over-determined system) จากนั้นจึงนำผลเฉลยที่ได้มาผ่านกระบวนการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้วิธีมาตรฐานได้แก่ เลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดอัลกอริทึม (Levenberg-Marquardt algorithm) ซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดตกค้างน้อยที่สุดของพิกัดพิกเซลที่ไม่มีการบิดเบี้ยว

การคำนวณการสอบเทียบมีรายละเอียดดังนี้ เริ่มจากการสมมติให้จุดศูนย์กลางกล้อง  $(c_x, c_y)$  เป็นจุดศูนย์กลางของระบบพิกัดพิกเซลของภาพ สามารถเขียนสมการเชิงเส้นที่สร้างขึ้นจากเงื่อนไขบังคับการเรียงตัวเชิงรัศมี (radial alignment constraint, RAC) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} y_{di}X_{wi} & y_{di}Y_{wi} & y_{di} & -x_{di}X_{wi} & -x_{di}Y_{wi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_y^{-1}r_1 \\ t_y^{-1}r_2 \\ t_y^{-1}t_x \\ t_y^{-1}r_4 \\ t_y^{-1}r_5 \end{bmatrix} = x_{di} \quad (3.24)$$

โดยที่  $i = 1, 2, \dots, n$  แทนจุดที่ใช้ในการสอบเทียบ

เมื่อใช้ตำแหน่งของวัตถุสอบเทียบใน 3 มิติที่สอดคล้องกับตำแหน่งของวัตถุในภาพจำนวน  $n$  จุดโดยที่  $n \gg 5$  สามารถสร้างระบบสมการเชิงเส้นแบบโอเวอร์ดีเทอร์มีนซิสเต็มเพื่อคำนวณหาตัวไม่รู้ค่า  $t_y^{-1}r_1, t_y^{-1}r_2, t_y^{-1}t_x, t_y^{-1}r_4$ , และ  $t_y^{-1}r_5$  ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดเชิงเส้น (linear least square method) จากนั้นจึงคำนวณค่าตัวแปร  $(r_1, \dots, r_5, t_x, t_y)$  จากค่าที่คำนวณได้ดังกล่าว โดยใช้สมการต่างๆ ดังแสดงรายละเอียดใน [19]

ขั้นตอนต่อไปคำนวณค่าระยะโฟกัส สัมประสิทธิ์การบิดเบี้ยวเชิงรัศมีของเลนส์ และตำแหน่ง  $Z$  ของกล้อง  $(f, \kappa_1, t_z)$  โดยในขั้นแรกทำการประมาณค่า  $f$  และ  $t_z$  โดยไม่คิดการบิดเบี้ยวของเลนส์โดยใช้สมการเชิงเส้น

$$\begin{bmatrix} Y_i & -d_y y_{di} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f \\ t_z \end{bmatrix} = w_i d_y y_{di} \quad (3.25)$$

โดยที่

$$Y_i = r_4 X_{wi} + r_5 Y_{wi} + r_6 \cdot 0 + t_y \quad (3.26)$$

$$w_i = r_7 X_{wi} + r_8 Y_{wi} + r_9 \cdot 0 \quad (3.27)$$

และ  $d_y$  แทนระยะทางจากจุดศูนย์กลางถึงจุดศูนย์กลางระหว่างชั้นซีซีดี สองอันที่อยู่ติดกันในทิศทางแกน  $y$

เมื่อใช้จุดของวัตถุสอบเทียบใน 3 มิติและจุดที่ตรวจพบในภาพมาสร้างสมการเชิงเส้นแบบโอเวอร์ดีเทอร์มีนซิสเต็ม จะสามารถแก้สมการเพื่อหาค่า  $f$  และ  $t_z$  ได้ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาเป็นค่าเริ่มต้นในการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นโดยใช้เลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดอัลกอริทึม โดยกำหนดค่าเริ่มต้นของ  $\kappa_1$  เป็นศูนย์ จะได้ค่า  $f$ ,  $\kappa_1$  และ  $t_z$  ที่แท้จริง

จากนั้นจึงนำค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดที่คำนวณได้จากขั้นตอนต่างๆ ที่กล่าวมานี้เป็นค่าเริ่มต้นในการหาค่าเหมาะที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยเลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดอัลกอริทึมอีกครั้งหนึ่งเพื่อปรับปรุงผลเฉลยให้ดีขึ้น โดยรวมเอาค่า  $(c_x, c_y)$  เข้าไปด้วย จะทำให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของกล้องทั้งหมดเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนการคำนวณพิกัด 3 มิติ โดยค่าที่ใช้ในการทำให้เหมาะที่สุด (optimize) ได้แก่ ค่าความผิดพลาดในพิกัดพิกเซลที่ไม่มีการบิดเบี้ยว

$$E_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(\hat{x}_{upi} - x_{upi})^2 + (\hat{y}_{upi} - y_{upi})^2} \quad (3.28)$$

โดยที่

$n$  เป็นจำนวนตำแหน่งวัตถุที่ใช้ในการสอบเทียบ

$(\hat{x}_{upi}, \hat{y}_{upi})$  เป็นค่าพิกัดพิกเซลที่ประมาณจากการฉายตำแหน่งของวัตถุ  $i$  ใน 3 มิติลงบนระนาบภาพโดยไม่คิดการบิดเบี้ยวของเลนส์

$(x_{upi}, y_{upi})$  เป็นค่าพิกัดพิกเซลที่ได้จากการตรวจหาวัตถุสอบเทียบที่ตำแหน่ง  $i$  ในภาพโดยคำนวณเอาการบิดเบี้ยวของเลนส์ออก

### 3.4 การคำนวณพิกัด 3 มิติ

จากสมการ (3.17) เมทริกซ์  $\mathbf{P}$  เป็นเมทริกซ์กล้องที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุใน 3 มิติซึ่งอยู่ในระบบพิกัดโลก 3 มิติกับตำแหน่งของวัตถุบนระนาบภาพที่เกิดจากการฉายจุดใน 3 มิตินั้นบนระนาบภาพของกล้องซึ่งอยู่ในพิกัดภาพในคอมพิวเตอร์หรือพิกัดพิกเซล เมื่อเขียนในพิกัดเอกพันธ์

การคำนวณพิกัด 3 มิติสำหรับวัตถุหนึ่งวัตถุโดยใช้วิธีไทรแองกูเลชันเชิงเส้น (linear triangulation) โดยใช้กล้อง  $n$  ตัว เมื่อทราบตำแหน่งของวัตถุในภาพที่ได้จากกล้องแต่ละตัวมีดังนี้ กำหนดให้  $\mathbf{P}_i$  แทนเมทริกซ์กล้องของกล้องที่  $i$  และ  $\mathbf{x}_i = [u_i \ v_i \ 1]^T$  เป็นเวกเตอร์เอกพันธ์ที่แทนพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดพิกเซลที่วัดจากกล้องที่  $i$  จากสมการ (3.17) สามารถเขียนเป็น

$$\mathbf{x}_i \times (\mathbf{P}_i \mathbf{X}_w) = 0 \quad (3.29)$$

ซึ่งจะได้

$$\left. \begin{aligned} u_i(\mathbf{p}_i^{3T} \mathbf{X}_w) - (\mathbf{p}_i^{1T} \mathbf{X}_w) &= 0 \\ v_i(\mathbf{p}_i^{3T} \mathbf{X}_w) - (\mathbf{p}_i^{2T} \mathbf{X}_w) &= 0 \\ u_i(\mathbf{p}_i^{2T} \mathbf{X}_w) - v_i(\mathbf{p}_i^{1T} \mathbf{X}_w) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

โดยที่  $\mathbf{p}_i^{jT}$  เป็นเวกเตอร์ของแถวที่  $j$  ของเมทริกซ์กอลัง  $\mathbf{P}_i$

จากสมการ (3.30) คู่จุดหนึ่งคู่จะก่อให้เกิดสมการ 3 สมการ แต่มีเพียง 2 สมการเท่านั้นที่เป็นอิสระเชิงเส้นแก่กัน ในที่นี้เลือกที่จะใช้สองสมการแรก เมื่อจัดสมการสำหรับ  $n$  กล้อง ( $n \geq 2$ ) เพื่อแก้สมการเชิงเอกพันธ์จะได้

$$\mathbf{A} \mathbf{X}_w = \mathbf{0} \quad (3.31)$$

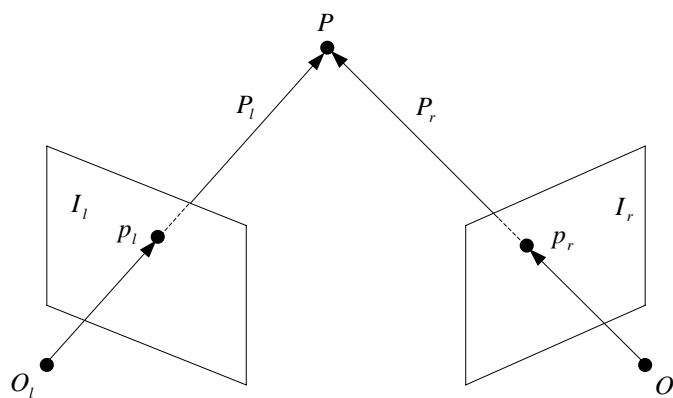
โดยที่

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} u_1 \mathbf{p}_1^{3T} - \mathbf{p}_1^{1T} \\ v_1 \mathbf{p}_1^{3T} - \mathbf{p}_1^{2T} \\ u_2 \mathbf{p}_2^{3T} - \mathbf{p}_2^{1T} \\ v_2 \mathbf{p}_2^{3T} - \mathbf{p}_2^{2T} \\ \vdots \\ u_n \mathbf{p}_n^{3T} - \mathbf{p}_n^{1T} \\ v_n \mathbf{p}_n^{3T} - \mathbf{p}_n^{2T} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

ระบบสมการ (3.31) สามารถแก้ได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดโดยการหาเวกเตอร์ซิงกูลาร์ ค่าตอบของระบบสมการตรงกับค่าซิงกูลาร์ที่มีค่าน้อยที่สุดของเมทริกซ์  $\mathbf{A}$  (ดูภาคผนวก)

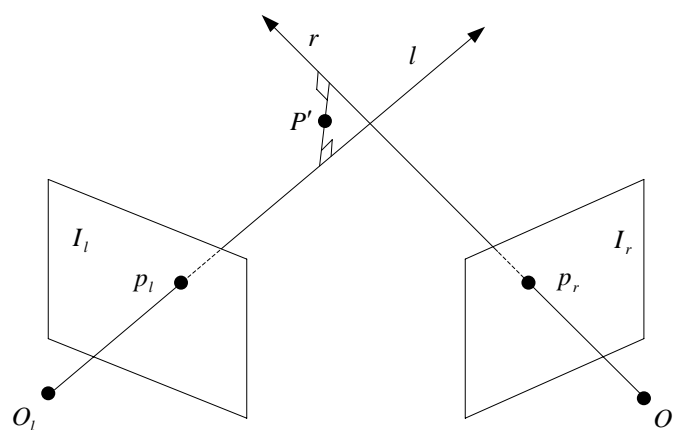
### 3.5 การคำนวณระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างรังสี 2 เส้นใน 3 มิติ

พิจารณากรณีกล้อง 2 ตัว ในทางทฤษฎีเมื่อได้ตำแหน่งของวัตถุในภาพที่สอดคล้องกัน 2 กล้องจะสามารถคำนวณพิกัดใน 3 มิติของวัตถุได้จากจุดตัดของรังสีที่ฉายจากจุดศูนย์กลางกล้องไปยังตำแหน่งของวัตถุในภาพดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การคำนวณพิกัด 3 มิติโดยใช้กล้องสองตัว

แต่ในทางปฏิบัติรังสีที่เกิดขึ้นไม่ตัดกันจริงเนื่องจากความผิดพลาดในค่าพารามิเตอร์ของกล้องที่ได้จากการสอบเทียบ และความผิดพลาดจากตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบในภาพ จึงต้องคำนวณหาจุดกึ่งกลาง ณ จุดที่ใกล้กันมากที่สุดของรังสีทั้งสอง เพื่อประมาณตำแหน่งใน 3 มิติของวัตถุดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การคำนวณหาจุดกึ่งกลางของรังสีจากจุดของภาพที่สอดคล้องกัน

จากสมการ (3.17) สามารถเขียนเมทริกซ์  $\mathbf{P}$  โดยการแยกเมทริกซ์ได้เป็น

$$\mathbf{P} = [M | \mathbf{p}_4] \quad (3.33)$$

โดยที่

$M$  เป็นเมทริกซ์ย่อยขนาด  $3 \times 3$  ที่อยู่ทางด้านซ้ายมือของ  $\mathbf{P}$   
 $\mathbf{p}_4$  เป็นเมทริกซ์สโตมภ์ที่ 4 ของเมทริกซ์  $\mathbf{P}$

และเมทริกซ์  $\mathbf{p}_4$  สามารถเขียนได้เป็น

$$\mathbf{p}_4 = -Mc \quad (3.34)$$

โดยที่  $c$  เป็นจุดศูนย์กลางกล้อง



สำหรับกล้องสองตัว กำหนดให้จุดศูนย์กลางกล้องของกล้องตัวหนึ่งในพิกัดเอกพจน์เป็น  $(c \ 1)^T$  และจุดที่อนันต์ของตำแหน่งของวัตถุในภาพ  $u$  เป็น  $(M^{-1}u, 0)^T$  ดังนั้นจุดใดๆ บนรังสีที่จะทำการส่งไปยังจุด  $u$  สามารถเขียนอยู่ในรูป  $(c + \alpha M^{-1}u, 1)^T$  หรือเขียนในพิกัดไม่เอกพจน์เป็น  $c + \alpha M^{-1}u$  สำหรับค่า  $\alpha$  ใดๆ เมื่อใช้กล้องสองตัวสามารถเขียนสมการการตัดกันของรังสีทั้งสองใน 3 มิติได้เป็น

$$\alpha M^{-1}u - \alpha' M'^{-1}u' = c' - c \quad (3.35)$$

โดยที่  $\alpha', M', u'$  และ  $c'$  เป็นค่าของกล้องตัวที่สอง

จากสมการ (3.35) จะทำให้ได้ 3 สมการสำหรับ 2 ตัวแปร ( $\alpha$  และ  $\alpha'$ ) ซึ่งสามารถแก้โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งเป็นการหาค่าระยะทางยกกำลังสองที่น้อยที่สุดระหว่างรังสีทั้งสอง จุดกึ่งกลางระหว่างสองรังสีดังกล่าวสามารถคำนวณได้จาก  $(c + \alpha M^{-1}u + c' + \alpha' M'^{-1}u')/2$  สำหรับระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างรังสี 2 เส้นใน 3 มิติซึ่งใช้ในอัลกอริทึมการคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุหลายวัตถุ (หัวข้อ 4.3 ในบทที่ 4) หาได้จาก

$$d(c + \alpha M^{-1}u, c' + \alpha' M'^{-1}u') \quad (3.36)$$

โดยที่  $d(x, y)$  ได้แก่ระยะทางระหว่างจุด  $x$  และจุด  $y$

### 3.6 การแปลงฮัฟวงกลม

การแปลงฮัฟเป็นเทคนิคการหาตำแหน่งและทิศทางของรูปร่างต่างๆ ในภาพซึ่งพัฒนาโดย Hough, P.V.C. [20] ซึ่งการแปลงประกอบด้วยการเปลี่ยนพารามิเตอร์ของรูปร่างที่ต้องการให้อยู่ในพารามิเตอร์อีกรูปแบบหนึ่ง และสร้างตาข่าย (mesh) จากพารามิเตอร์ดังกล่าว ค่าที่แต่ละตำแหน่งของตาข่ายจะถูกสะสมเพื่อแสดงค่าของวัตถุที่ตรวจหาได้ที่ตำแหน่งนั้นๆ ในภาพ ตาข่ายในตำแหน่งที่มีค่าสะสมสูงเกินกว่าค่าที่กำหนดแสดงถึงตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบ การแปลงฮัฟวงกลม (circular Hough transform) เป็นการประยุกต์การแปลงฮัฟเพื่อหาวงกลมในภาพ [21] จากสมการของวงกลม

$$(x - a)^2 + (x - b)^2 = r^2 \quad (3.37)$$

สมการนี้ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 3 ตัวได้แก่ พารามิเตอร์ 2 ตัวสำหรับตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลม  $(a, b)$  และอีก 1 ตัวสำหรับรัศมีของวงกลม  $(r)$  แต่หากทราบมุมของความชันของขอบในรูปภาพสามารถลดจำนวนของพารามิเตอร์ได้ โดยเมื่อเขียนสมการวงกลม (3.37) ให้อยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้วจะได้

$$x = a + r \cos \theta \quad (3.38)$$

$$y = b + r \sin \theta \quad (3.39)$$

จัดสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลมจะได้

$$a = x - r \cos \theta \quad (3.40)$$

$$b = y - r \sin \theta \quad (3.41)$$

เมื่อทราบมุมของความชัน  $\theta$  ที่จุดขอบ  $(x, y)$  ใดๆ สามารถคำนวณค่า  $\cos \theta$  และ  $\sin \theta$  ได้ ซึ่งค่าเหล่านี้ได้จากการตรวจหาขอบในภาพ เมื่อกำจัดตัวแปร  $r$  ในสมการข้างต้นจะได้

$$b = a \tan \theta - x \tan \theta + y \quad (3.42)$$

กำหนดให้

$M(a, b)$  แทนแถวลำดับตัวสะสม (accumulator array) ที่ตำแหน่ง  $(a, b)$

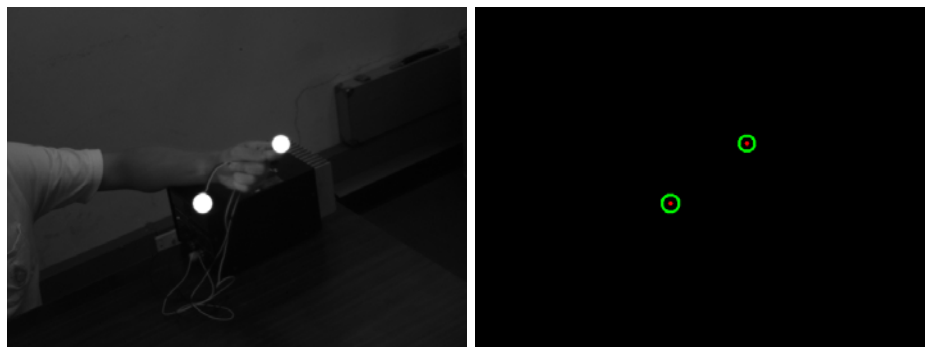
$G(x, y)$  แทนขนาดของความชันที่จุดขอบ  $(x, y)$

$\theta(x, y)$  แทนมุม  $\theta$  ที่จุดขอบ  $(x, y)$

อัลกอริทึมการแปลงฮัฟวงกลมสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) แบ่งปริภูมิพารามิเตอร์ออกเป็นส่วนๆ สำหรับพารามิเตอร์  $a$  และ  $b$
- 2) กำหนดให้แถวลำดับตัวสะสม  $M(a, b)$  เป็นศูนย์
- 3) คำนวณขนาดความชัน  $G(x, y)$  และมุม  $\theta(x, y)$
- 4) ที่แต่ละจุดขอบในภาพใน  $G(x, y)$  เพิ่มค่าของทุกๆ จุดในแถวลำดับตัวสะสม  $M(a, b)$  ที่อยู่ตามแนวเส้นที่สอดคล้องกับสมการ (3.42)
- 5) ค่าที่มากที่สุดแถวลำดับตัวสะสมเป็นจุดศูนย์กลางของวงกลมในรูปภาพ

ภาพของวัตถุที่ถ่ายจากกล้องและผลการตรวจหาวัตถุโดยใช้การแปลงฮัฟวงกลมแสดงดังรูปที่ 3.8 โดยผลลัพธ์ได้แก่ พิกัดของจุดศูนย์กลางและรัศมีของวงกลมในภาพ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เพียงตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวงกลมแต่ละวงในภาพเท่านั้น ในการคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุในขั้นตอนต่อไป



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.8 การตรวจหาวัตถุในภาพโดยใช้การแปลงฮัฟวงกลม

(ก) ภาพต้นฉบับ และ (ข) ภาพที่ได้จากการตรวจหาวัตถุ

## บทที่ 4

### การทำงานของระบบ

#### 4.1 บทนำ

การติดตามวัตถุหลายวัตถุใน 3 มิติโดยใช้ระบบกล้องหลายตัวที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- 1) สอบเทียบระบบกล้อง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัวเพื่อใช้ในการคำนวณพิกัด 3 มิติ
- 2) เลือกกล้องหนึ่งตัวในระบบเพื่อกำหนดให้เป็นกล้องหลักในการถ่ายภาพแบบประสานการถ่ายภาพ
- 3) เริ่มกระบวนการติดตามวัตถุใน 3 มิติ โดยเริ่มจากการถ่ายภาพ ตรวจสอบวัตถุในภาพ นำพิกัดของวัตถุในภาพที่ตรวจพบมาจำแนกวัตถุที่สอดคล้องกันในแต่ละกล้องและคำนวณพิกัด 3 มิติของแต่ละวัตถุ และติดตามวัตถุแต่ละวัตถุใน 3 มิติ

อัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณต่างๆ รวมทั้งการทำงานของระบบ และการประยุกต์ระบบในการวัดพิกัดพื้นผิวสำหรับงานวิศวกรรมย้อนกลับ จะถูกกล่าวถึงในบทนี้

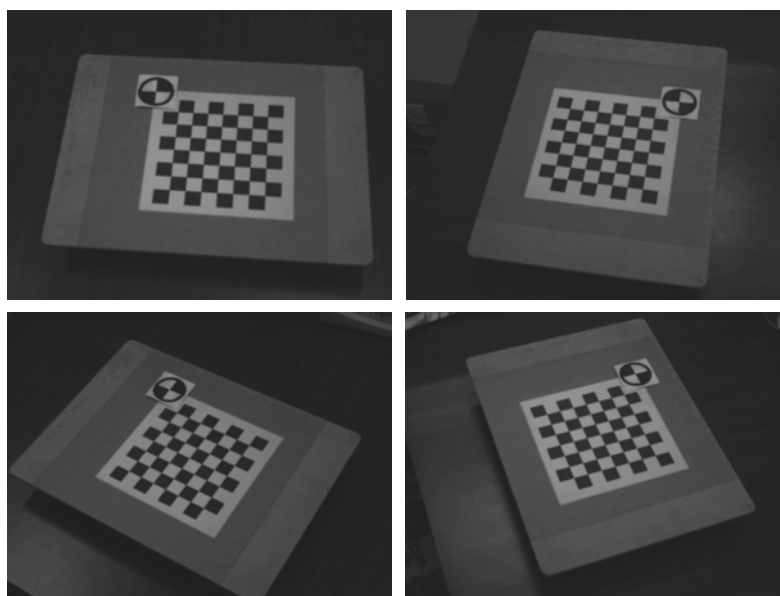
#### 4.2 การสอบเทียบกล้อง

ในขั้นตอนการสอบเทียบ กล้องทุกตัวจะถ่ายภาพกระดานสอบเทียบที่วางอยู่กับที่ แล้วนำภาพที่ได้มาตรวจหาจุดตัดภายในของลายตารางหมากรุกเพื่อใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังที่ได้แสดงไว้ในหัวข้อ 3.3 ในบทที่ 3 เมื่อระบบได้ทำการสอบเทียบแล้วจะต้องไม่เคลื่อนกล้องออกจากตำแหน่งที่ได้สอบเทียบไว้ เนื่องจากจะทำให้ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งของกล้องเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้การคำนวณพิกัด 3 มิติมีความผิดพลาดโดยหากมีการเปลี่ยนตำแหน่งของกล้อง ปรับระยะโฟกัส หรือปรับรูรับแสงของกล้องจะต้องสอบเทียบกล้องใหม่ทุกครั้ง การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการสอบเทียบกล้องด้วยกระดานสอบเทียบแสดงดังรูปที่ 4.1 สำหรับภาพกระดานสอบเทียบที่ถ่ายจากกล้องแต่ละตัวในระบบแสดงดังรูปที่

#### 4.2



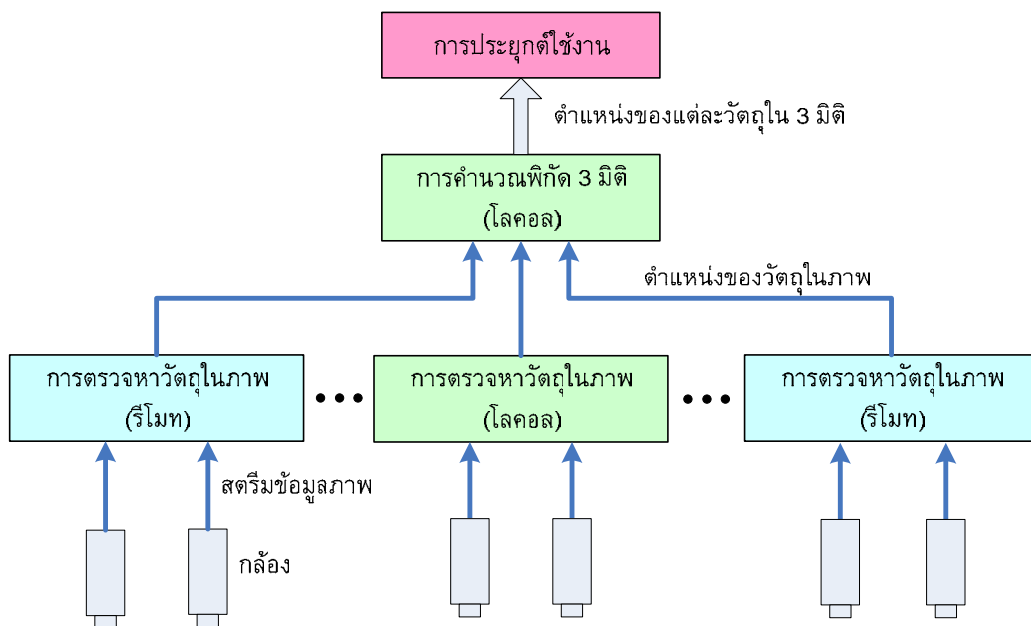
รูปที่ 4.1 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อสอบเทียบระบบกล้องด้วยกระดานสอบเทียบ



รูปที่ 4.2 ภาพกระดานสอบเทียบที่ถ่ายจากกล้องแต่ละตัวในระบบ

#### 4.3 การคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุหลายวัตถุ

การคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุหลายวัตถุโดยใช้กล้องหลายตัวในระบบพีซีคลัสเตอร์ที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยหลายขั้นตอน โดยเริ่มจากการถ่ายภาพวัตถุ แล้วนำภาพที่ได้มาตรวจหาวัตถุในภาพซึ่งจะได้ตำแหน่งของวัตถุในภาพที่มีพิกัด 2 มิติในพิกัดพิกเซล จากนั้นจึงนำตำแหน่งดังกล่าวที่ได้จากกล้องทุกตัวมาทำการจำแนกวัตถุ ซึ่งเป็นการค้นหาวัตถุในภาพที่ได้จากกล้องแต่ละตัวซึ่งเกิดจากวัตถุเดียวกันใน 3 มิติ โดยสร้างดัชนี (indexing) ของวัตถุที่สอดคล้องกันซึ่งเป็นหมายเลขลำดับที่ของวัตถุที่ตรวจพบในภาพในกล้องแต่ละตัว แล้วจึงนำดัชนีของวัตถุที่สอดคล้องกันมาคำนวณพิกัด 3 มิติที่ละวัตถุ ในกรณีที่ข้อมูลอยู่ในเครื่องรีโมทจะต้องส่งข้อมูลไปยังเครื่องโฮสต์เพื่อนำข้อมูลไปประมวลผลรวมกันในเครื่องโฮสต์ แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ของส่วนต่างๆ ในระบบในการคำนวณพิกัด 3 มิติแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แผนภาพการทำงานของระบบในการคำนวณพิกัด 3 มิติ

อัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุหลายวัตถุ เมื่อทราบข้อมูลตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบในภาพแล้ว มีดังนี้

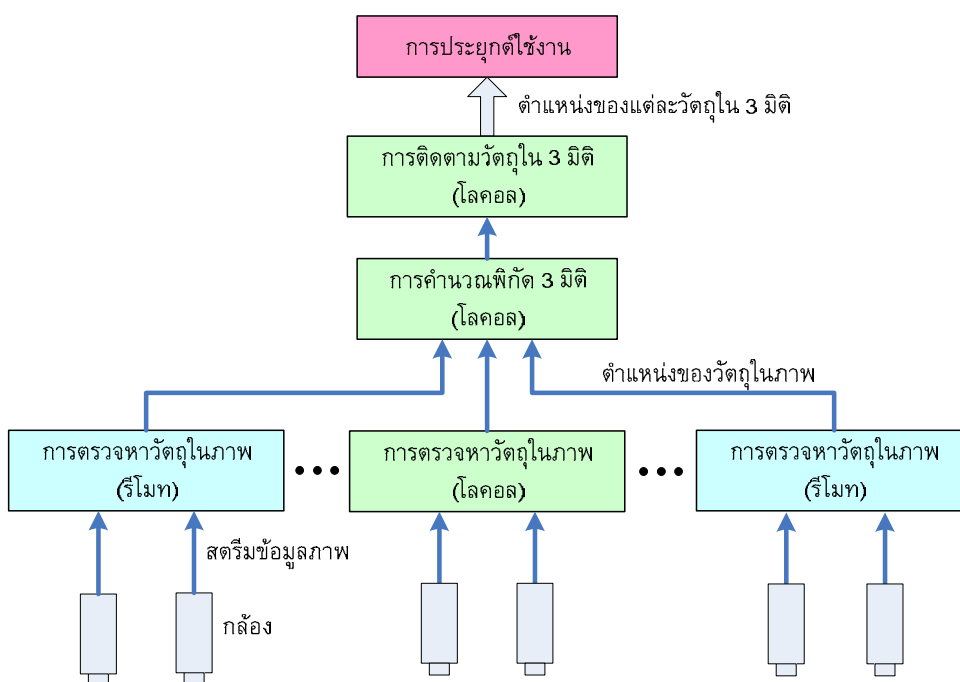
- 1) ค้นหาตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบที่ยังไม่ได้ถูกใช้
- 2) นำตำแหน่งจากข้อ 1) มาคำนวณระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างสองรังสี (หัวข้อ 3.5) กับตำแหน่งที่ได้จากกล้องตัวอื่นๆ โดยการแก้สมการ (3.35) และคำนวณค่าระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างสองรังสี โดยใช้สมการ (3.36) และกำหนดจุดตั้งต้นให้เป็นจุดที่ใช้แล้ว
- 3) ถ้ามีตำแหน่งของวัตถุในกล้องใดซึ่งมีค่าระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างสองรังสีที่ได้จากข้อ 1) น้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้ตรวจสอบซ้ำ โดยทำซ้ำขั้นตอนที่ 2) กับกล้องตัวอื่นที่ไม่ซ้ำเดิมอีก 1 กล้อง ถ้าระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างสองรังสีที่ได้มีค่าต่ำกว่าที่กำหนดให้ระบุว่าจุดทั้งสามเป็นจุดที่สอดคล้องกัน และกำหนดให้จุดที่สอดคล้องกันนี้เป็นจุดที่ใช้แล้ว
- 4) ทำซ้ำข้อ 1) ถึงข้อ 3) จนครบจำนวนจุดที่ตรวจพบ
- 5) นำจุดที่ผ่านการระบุว่าจุดที่สอดคล้องกันในข้อ 4) มาคำนวณพิกัด 3 มิติด้วยวิธีไตรแองกูเลชันเชิงเส้น (หัวข้อ 3.4) ทีละชุด

#### 4.4 การติดตามวัตถุใน 3 มิติ

การติดตามวัตถุได้แก่ การกำหนดป้ายชื่อ (labeling) ให้แก่วัตถุแต่ละวัตถุเพื่อใช้อ้างอิงในการจำแนกวัตถุและใช้ในการติดตามสถานะของแต่ละวัตถุ โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้

กำหนดให้ใช้ตัวเลขจำนวนเต็มบวกเป็นป้ายชื่อของแต่ละวัตถุซึ่งจะไม่ซ้ำกัน โดยใช้สมมติฐานว่าวัตถุแต่ละวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ในแต่ละช่วงเวลาสุ่มเพื่อใช้ประมาณตำแหน่งถัดไป

ในงานวิจัยนี้ได้แยกอัลกอริทึมในส่วนของการคำนวณพิกัด 3 มิติออกจากการติดตามวัตถุเพื่อให้ระบบมีความยืดหยุ่นในการทำงานมากขึ้น โดยระบบสามารถนำไปใช้ในคำนวณหาพิกัด 3 มิติของวัตถุหลายวัตถุในตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการโดยไม่ต้องทำการติดตามวัตถุหรือหากต้องการติดตามวัตถุก็สามารถนำพิกัด 3 มิติที่คำนวณได้ไปใช้ในการติดตามดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แผนภาพการทำงานของระบบในการติดตามวัตถุใน 3 มิติ

อัลกอริทึมในการติดตามวัตถุหลายวัตถุใน 3 มิติที่ได้พัฒนาขึ้นมีดังนี้

- 1) ทำนายตำแหน่งถัดไปของแต่ละวัตถุโดยใช้ข้อมูลจากการเคลื่อนที่ครั้งก่อนในการประมาณตำแหน่ง
  - 2) ทำการเชื่อมโยงข้อมูล (data association) โดยการคำนวณระยะทางใน 3 มิติระหว่างข้อมูลที่ได้จากการคำนวณพิกัด 3 มิติของแต่ละวัตถุในจังหวะปัจจุบันกับตำแหน่งของวัตถุที่ได้จากการประมาณตำแหน่งในข้อ 1)
  - 3) หากผลลัพธ์ที่ได้จากการข้อ 2) น้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้ปรับค่าตำแหน่งในปัจจุบันของวัตถุนั้นเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณพิกัด 3 มิติ
- หากผลลัพธ์ที่ได้จากข้อ 2) มากกว่าค่าที่กำหนดอาจเป็นวัตถุที่ถูกบดบังชั่วคราว ให้ตรวจสอบว่าเกินจำนวนครั้งที่กำหนดหรือไม่ ถ้าไม่เกินถือว่าวัตถุยังถูกติดตามอยู่ ให้นำค่าที่ได้จากการประมาณตำแหน่งเป็นตำแหน่ง

ปัจจุบันของวัตถุ แต่ถ้าเกินจำนวนครั้งที่กำหนดให้ลวัตถุนั้นนอกจากการติดตาม

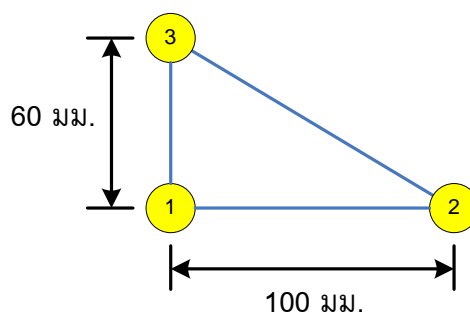
- 4) ในกรณีที่มีตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณพิกัด 3 มิติเหลือจากการเชื่อมโยงข้อมูลในข้อ 2) และ 3) ให้เพิ่มเป็นวัตถุอันใหม่เพื่อทำการติดตามในวงรอบถัดไป

#### 4.5 การติดตามหัวสัมผัสชิ้นงานเพื่อใช้ในการวัดพื้นผิว

ในการประยุกต์ระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวัดพื้นผิวชิ้นงานเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ ได้ออกแบบหัวสัมผัสชิ้นงานที่ประกอบด้วยด้ามจับและทรงกลมเปล่งแสง 3 อันสำหรับการใช้ในการติดตามโดยระบบเพื่อให้สามารถคำนวณตำแหน่งและทิศทางของหัวสัมผัสชิ้นงานได้ ลักษณะของหัวสัมผัสชิ้นงานที่ได้ออกแบบและสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 โดยปลายหัวสัมผัสชิ้นงานอยู่ห่างจากระนาบของทรงกลมที่ใช้เป็นเป้าหมายเป็นระยะประมาณ 130 มิลลิเมตร



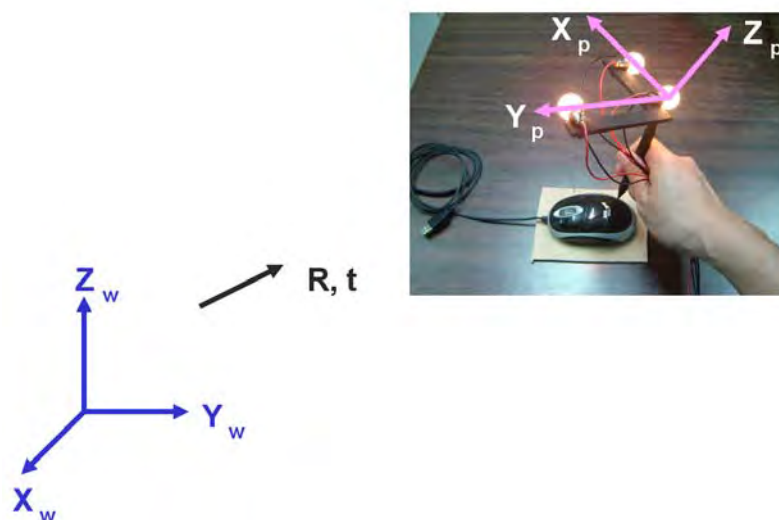
รูปที่ 4.5 หัวสัมผัสชิ้นงานที่ได้ออกแบบสำหรับใช้วัดพื้นผิวชิ้นงาน



รูปที่ 4.6 ขนาดโดยประมาณและการกำหนดหมายเลขอ้างอิงของวัตถุเป้าหมายสำหรับการติดตามบนหัวสัมผัสชิ้นงาน



การคำนวณพิกัดที่ปลายของหัวสัมผัสซึ่งงานสามารถทำได้โดยการประมาณค่าเมทริกซ์การหมุน (rotation matrix)  $R$  และเมทริกซ์การเลื่อนขนาน (translation matrix)  $t$  ระหว่างระบบพิกัดโลก 3 มิติและระบบพิกัดของหัวสัมผัสซึ่งงานดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยได้ใช้อัลกอริทึมของ Arun, K.S. และคณะ [22] ในการประมาณค่าเมทริกซ์  $R$  และ  $t$  เมื่อมีการเคลื่อนที่แต่ละจังหวะ เพื่อคำนวณพิกัดที่ปลายของหัวสัมผัสซึ่งงานเทียบกับระบบพิกัดโลก 3 มิติ



รูปที่ 4.7 การแปลงระหว่างระบบพิกัดโลกและระบบพิกัดของหัวสัมผัสซึ่งงาน

อัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) กำหนดให้ชุดข้อมูลจุดใน 3 มิติ 2 กลุ่มที่สอดคล้องกันเป็น  $p_i$  และ  $p'_i$  โดยที่  $i = 1, 2, \dots, N$  โดยข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$p'_i = Rp_i + t + N_i \quad (4.1)$$

โดยที่

$R$  เป็นเมทริกซ์การหมุนขนาด  $3 \times 3$

$t$  เป็นเวกเตอร์การเลื่อนขนานขนาด  $3 \times 1$

$N_i$  เป็นเวกเตอร์สัญญาณรบกวน

สำหรับวิธานิพจน์นี้  $p_i$  แทนจุดที่เทียบจากระบบพิกัดโลก 3 มิติและ  $p'_i$  แทนจุดที่เทียบจากระบบพิกัดของหัวสัมผัสซึ่งงาน จากนั้นจึงคำนวณค่า  $p$ ,  $p'$  และ  $q_i$ ,  $q'_i$  โดยใช้สมการ (4.2) ถึง (4.5)

$$p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (4.2)$$

$$p' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p'_i \quad (4.3)$$

$$q_i = p_i - p \quad (4.4)$$

$$q'_i = p'_i - p' \quad (4.5)$$

- 2) สร้างเมทริกซ์  $H$  ที่มีขนาด  $3 \times 3$  โดยใช้สมการ

$$H = \sum_{i=1}^N q_i q'_i \quad (4.6)$$

- 3) คำนวณการแยกค่าซิงกูลาร์ของเมทริกซ์  $H$  จะได้

$$H = U \Lambda V' \quad (4.7)$$

- 4) คำนวณค่าเมทริกซ์การหมุนและเมทริกซ์การเลื่อนขนานโดยใช้สมการ

$$\hat{R} = VU' \quad (4.8)$$

$$\hat{t} = p' - \hat{R}p \quad (4.9)$$

#### 4.6 เทคนิคการเชื่อมโยงพิกัดที่ได้จากการวัดหลายครั้ง

เมื่อทำการประยุกต์ระบบที่พัฒนาขึ้นโดยการใช้หัวสัมผัสชิ้นงานวัดพิกัดพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการ ในกรณีที่ชิ้นงานมีขนาดใหญ่หรือมีความซับซ้อนซึ่งไม่สามารถวัดพื้นผิวทั้งหมดได้ในครั้งเดียว จำเป็นต้องมีการเชื่อมโยงข้อมูลพิกัดที่ได้จากการวัดหลายครั้งเข้าด้วยกัน ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พัฒนาเทคนิคการเชื่อมโยงพิกัดโดยการใช้หัวสัมผัสชิ้นงานในการกำหนดจุดอ้างอิงเพื่อใช้ในการเชื่อมโยงข้อมูลพิกัดเข้าด้วยกัน โดยมีขั้นตอนดังนี้

- 1) พิจารณาชิ้นงานเพื่อกำหนดจำนวนครั้งในการวัดและทำเครื่องหมายบนชิ้นงานเพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการเชื่อมโยงพิกัด โดยจะต้องมีเครื่องหมายจำนวน 3 จุดเพื่อใช้เชื่อมโยงพิกัดในการวัดระหว่าง 2 ตำแหน่งเข้าด้วยกัน
- 2) เคลื่อนหัวสัมผัสชิ้นงานไปยังตำแหน่งอ้างอิงในข้อ 1) ที่ยังไม่ได้ใช้จำนวน 3 จุด
- 3) วัดพิกัดพื้นผิวโดยเคลื่อนหัวสัมผัสชิ้นงานในบริเวณที่ยังไม่ได้เก็บข้อมูล
- 4) เคลื่อนหัวสัมผัสชิ้นงานไปยังตำแหน่งอ้างอิงในข้อ 2)
- 5) วัดพิกัดพื้นผิวโดยเคลื่อนหัวสัมผัสชิ้นงานในบริเวณที่ยังไม่ได้เก็บข้อมูลซึ่งมีพื้นที่เชื่อมต่อกับพื้นผิวในข้อ 3)

- 6) ทำซ้ำข้อ 2) – 5) กับพื้นที่บริเวณต่างๆ ของชั้นงานจนครบพื้นที่ทั้งหมดที่ต้องการวัด

## บทที่ 5

### การออกแบบซอฟต์แวร์

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้กล่าวถึงรายละเอียดของซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น ซึ่งประกอบด้วยสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์ การออกแบบโปรแกรมประยุกต์ มอดูลการประมวลผล และกระบวนการทำงานของระบบในทางซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุหลายวัตถุใน 3 มิติ

#### 5.2 การออกแบบโปรแกรมประยุกต์

ในการทำงานของพีซีคลัสเตอร์ที่ประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์หลายเครื่องที่ทำงานร่วมกันจำเป็นต้องมีโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของแต่ละเครื่อง โดยการออกแบบโปรแกรมประยุกต์สำหรับการทำงานในแต่ละเครื่องขึ้นอยู่กับโครงสร้างของระบบเนื่องจากสถาปัตยกรรมของระบบที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบรวมศูนย์ (centralized system) ซึ่งมีคอมพิวเตอร์หนึ่งเครื่องทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมดในภาพรวมและมีการกระจายภาระการประมวลผลบางส่วนไปประมวลผลยังเครื่องต่างๆ อย่างเป็นอิสระ ในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบให้มีโปรแกรมประยุกต์สองประเภท ได้แก่ โปรแกรมเซอร์วิสและโปรแกรมควบคุม

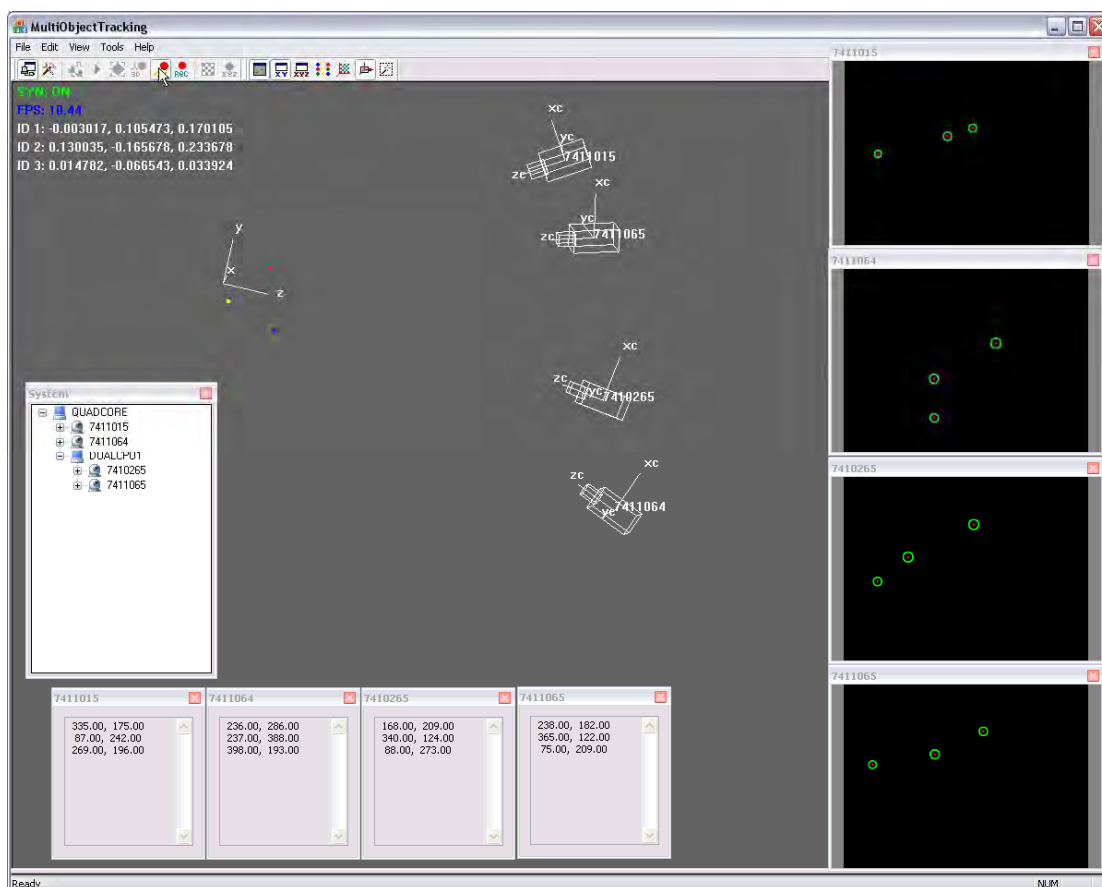
##### 5.2.1 โปรแกรมเซอร์วิส

โปรแกรมเซอร์วิสเป็นโปรแกรมประยุกต์ที่ทำงานในเบื้องหลังของระบบปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดวส์ ซึ่งจะใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์รีโมททั้งหมดเนื่องจากใช้ทรัพยากรของระบบน้อยกว่าโปรแกรมประยุกต์ทั่วไปและไม่มีส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (user interface) โดยภายในโปรแกรมเซอร์วิสจะมีมอดูลการประมวลผลสำหรับการควบคุมกล้องและการตรวจหาวัตถุ และมอดูลสำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างพีซีเท่านั้น

##### 5.2.2 โปรแกรมควบคุม

โปรแกรมควบคุมใช้สำหรับคอมพิวเตอร์โลคอล ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด รวมทั้งโปรแกรมเซอร์วิสที่อยู่ในเครื่องรีโมททุกเครื่องเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกันได้ สามารถส่งคำสั่งในการถ่ายภาพ ตรวจหาวัตถุ และปรับตั้งค่าของกล้องและพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณในกระบวนการต่างๆ โดยใช้ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ (graphical user interface) เพื่อให้สะดวกในการทำงาน หน้าจอแสดงผลของโปรแกรมสามารถแสดงภาพที่ถ่ายได้จากกล้อง ตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบในภาพ และสามารถแสดงผล

การติดตามวัตถุเป็นแบบกราฟิก 3 มิติได้ โปรแกรมควบคุมที่พัฒนาขึ้นแสดงดังรูปที่ 5.1 โดยทั้งโปรแกรมควบคุมและโปรแกรมเซอร์วิสเขียนด้วยภาษาซีพลัสพลัส โดยใช้ไมโครซอฟท์วิซวลสตูดิโอ 2005 ทำงานบนระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์วินโดวส์เอ็กซ์พี



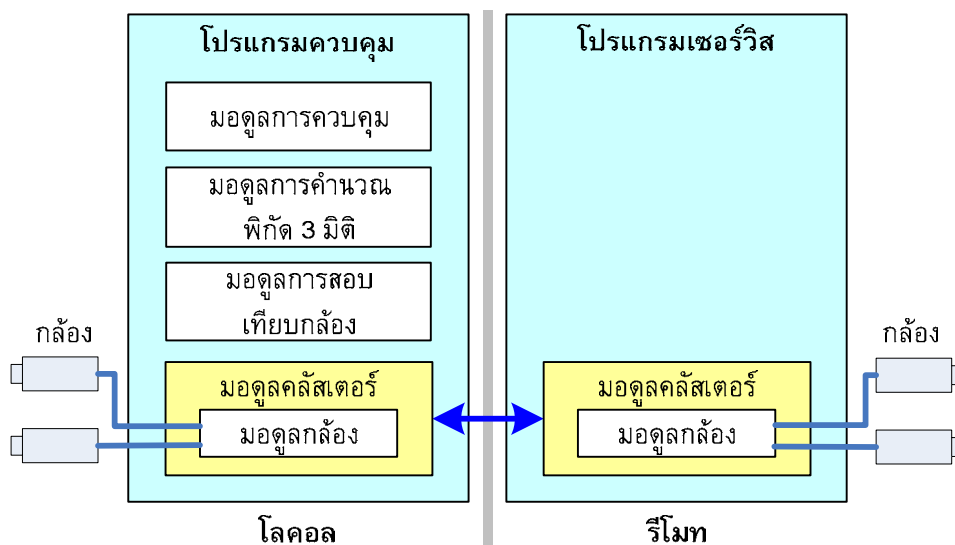
รูปที่ 5.1 โปรแกรมควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น

### 5.3 มอดูลการประมวลผล

ภายในโปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยมอดูลการประมวลผลเพื่อใช้ในการประมวลผลส่วนต่างๆ ซึ่งจากการจำแนกการทำงานของระบบออกเป็นประเภทต่างๆ ดังที่กล่าวถึงในหัวข้อ 2.3 สามารถนำมาออกแบบมอดูลการประมวลผลของระบบซึ่งแบ่งออกเป็น 5 มอดูลได้แก่

- 1) มอดูลกล้อง
- 2) มอดูลคลัสเตอร์
- 3) มอดูลการสอบเทียบกล้อง
- 4) มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติ
- 5) มอดูลการควบคุม

มอดูลการประมวลผลต่างๆ ที่อยู่ภายในโปรแกรมประยุกต์สำหรับพีซีคลัสเตอร์ ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ซึ่งประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์สองเครื่องแสดงดังรูปที่ 5.2



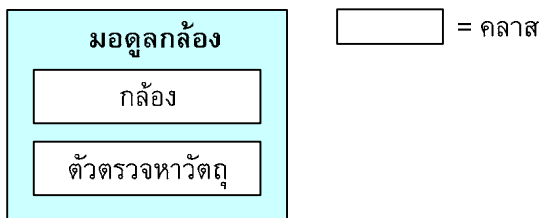
รูปที่ 5.2 มอดูลการประมวลผลต่างๆ ภายในโปรแกรมประยุกต์

มอดูลการประมวลผลนี้ได้รับการออกแบบให้เป็นไลบรารีแบบซีพลัสพลัสดีแอลแอล (C++ DLL) ภายในมอดูลการประมวลผลประกอบด้วยคลาส (class) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (object-oriented programming) [23] แต่ละคลาสจะมีหน้าที่เฉพาะตามที่ได้กำหนดในการออกแบบทางซอฟต์แวร์โดยมีฟังก์ชันในแต่ละคลาสเพื่อใช้ในการทำงานต่างๆ ของคลาส เช่น คลาสกล้องมีฟังก์ชันถ่ายภาพ (CaptureImage) เพื่อใช้ในการถ่ายภาพวัตถุ คลาสซ็อกเก็ตมีฟังก์ชันเชื่อมต่อ (Connect) เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณติดต่อกับเครื่องอื่น เป็นต้น รายละเอียดของมอดูลการประมวลผลแต่ละมอดูลมีดังต่อไปนี้

### 5.3.1 มอดูลกล้อง

คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องในระบบจะมีมอดูลกล้องเพื่อใช้ในการถ่ายภาพ ปรับตั้งค่าของกล้อง และตรวจหาวัตถุในภาพ สำหรับในขั้นตอนการสอบเทียบกล้องแต่ละตัวจะถูกปรับตั้งค่าไว้ที่โหมดการถ่ายภาพโดยใช้สัญญาณการถ่ายภาพทางซอฟต์แวร์ เนื่องจากสามารถยอมรับความเหลื่อมเวลาของการถ่ายภาพได้เนื่องจากวัตถุสอบเทียบไม่ได้เคลื่อนที่ แต่ในการติดตามวัตถุ มอดูลการถ่ายภาพจะตั้งค่าการถ่ายภาพของกล้องแต่ละตัวไว้ในโหมดการประสานการถ่ายภาพดังแสดงรายละเอียดไว้หัวข้อ 2.4.1 ในบทที่ 2 โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกกล้องที่ใช้เป็นกล้องหลักได้จากโปรแกรมควบคุม ส่วนการปรับตั้งค่าต่างๆ ของกล้อง ตัวเลือกที่สามารถปรับได้ขึ้นอยู่กับกล้องที่ใช้ ตัวอย่างค่าการปรับตั้งของกล้องที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ การอัตราการถ่ายภาพต่อวินาที ระยะเวลาเวลาการเปิดหน้ากล้อง และขนาดของภาพ เป็นต้น

สำหรับคลาสที่อยู่ภายในมอดูลกล็องประกอบด้วย คลาสกล็อง ทำหน้าที่ในการควบคุมกล็อง ถ่ายภาพ และปรับตั้งค่าต่างๆ ของกล็อง และคลาสตัวตรวจหาวัตถุ ซึ่งใช้ในการประมวลผลภาพเพื่อตรวจหาวัตถุในภาพซึ่งจะให้ข้อมูลส่งออกเป็นตำแหน่งของวัตถุในภาพที่มีพิกัด 2 มิติในระบบพิกัดพิกเซล แผนผังของมอดูลกล็องแสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 มอดูลกล็อง

### 5.3.2 มอดูลคลัสเตอร์

การควบคุมการสื่อสารระหว่างพีซีกระทำผ่านมอดูลคลัสเตอร์โดยใช้แผนวงจร dataBLIZZARD เป็นอุปกรณ์สำหรับการส่งผ่านข้อมูล ซึ่งข้อมูลจะถูกจัดเตรียมให้เป็นโครงสร้างข้อมูลทางโปรแกรมที่เรียกว่า เมสเสจ (message) โดยก่อนการส่งจะถูกนำไปยังเมสเสจคิว (message queue) เพื่อรอการประมวลผล

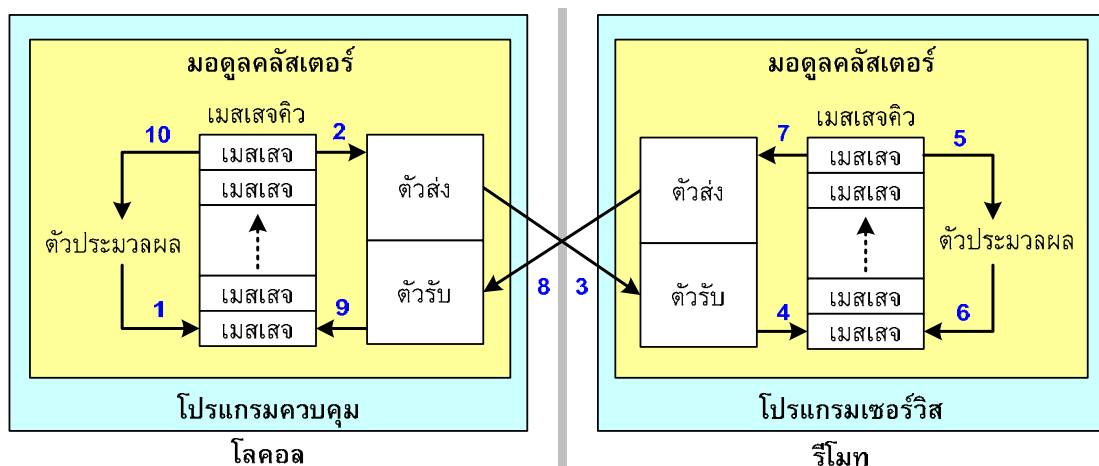
เมสเสจเป็นรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลซึ่งประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนคือ ส่วนหัวและส่วนข้อมูล ส่วนหัวของเมสเสจระบุรายละเอียดของเมสเสจซึ่งประกอบด้วยผู้ส่ง ผู้รับ รหัสประจำตัวของเมสเสจ ทิศทาง ขนาดของข้อมูล และประเภทของเมสเสจ ส่วนข้อมูลของเมสเสจได้แก่ข้อมูลดิบที่ต้องการส่งไปยังผู้รับซึ่งขนาดของข้อมูลจริงในส่วนข้อมูลของเมสเสจจะต้องตรงกับที่ระบุไว้ในส่วนหัวของเมสเสจ ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งเมสเสจออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เมสเสจคำสั่ง เมสเสจตอบกลับ และเมสเสจเหตุการณ์

เมสเสจคำสั่งจะถูกส่งโดยเครื่องส่ง (transmitter) ไปยังเครื่องรับ (receiver) เพื่อสั่งการทำงาน ร้องขอค่าที่ต้องการเพื่อใช้ในการประมวลผล หรือตรวจสอบสถานะของอุปกรณ์หรือสถานะของกระบวนการภายในเครื่องรับ เมื่อเครื่องรับได้รับเมสเสจคำสั่งจะตรวจสอบรหัสประจำตัวผู้รับจากส่วนหัวของเมสเสจว่าตรงกับของเครื่องรับหรือไม่ ถ้าตรงจึงทำงานตามคำสั่ง โดยหากมีค่าที่เครื่องส่งร้องขอจากคำสั่งหรือมีค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลที่ต้องการส่งกลับไปยังเครื่องส่ง เครื่องรับจะสร้างเมสเสจตอบกลับและส่งกลับไปยังเครื่องส่ง สำหรับเมสเสจเหตุการณ์จะถูกส่งเพื่อแจ้งไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นในระบบเกี่ยวกับเหตุการณ์ในเครื่องส่งโดยไม่จำเป็นต้องมีการส่งคำสั่งร้องขอมาก่อน

จากทิศทางของเมสเสจสามารถจำแนกออกเป็นสองประเภท ได้แก่ การส่งออกและการรับเข้า เมสเสจที่มีทิศทางส่งออกจะถูกสร้างโดยเครื่องส่งและถูกนำไปยังเมสเสจคิวของเครื่องส่งเพื่อรอการประมวลผล สำหรับเมสเสจที่มีทิศทางรับเข้าจะถูกสร้าง

โดยเครื่องรับเพื่อห่อหุ้มข้อมูลที่รับมา แล้วจึงนำเข้าสู่เมสเสจคิวของเครื่องรับเพื่อรอการประมวลผลต่อไป

เมสเสจคิวใช้ในการเก็บเมสเสจสำหรับการประมวลผล ซึ่งดำเนินการตามหลักเข้าก่อนออกก่อน (First In, First Out, FIFO) โดยที่เมสเสจคิวจะตรวจสอบทิศทางของเมสเสจก่อนการประมวลผล หากทิศทางของเมสเสจเป็นการนำเข้า เมสเสจจะถูกส่งเข้าสู่หน่วยประมวลผลภายในเครื่องเพื่อประมวลผล แต่หากทิศทางของเมสเสจเป็นการส่งออก เมสเสจนั้นจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ปลายทางตามที่ระบุไว้ในส่วนหัวของเมสเสจ ลักษณะการทำงานของระบบเมสเสจในพีซีคลัสเตอร์ที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.4



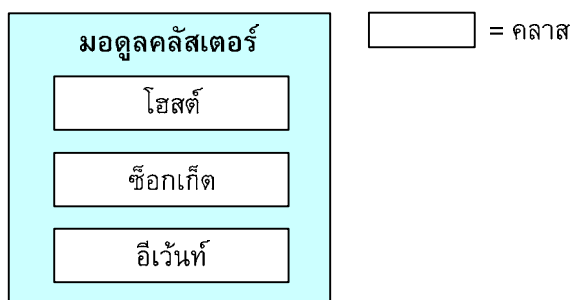
รูปที่ 5.4 แผนภาพการทำงานของระบบเมสเสจในพีซีคลัสเตอร์

ในเครื่องส่ง เมื่อเมสเสจที่มีทิศทางส่งออกถูกเรียกขึ้นมาจากเมสเสจคิว ข้อมูลทั้งหมดทั้งในส่วนหัวและส่วนข้อมูลของเมสเสจจะถูกเขียนลงบนหน่วยความจำของแผ่นวงจรในเครื่องและทำการป้องกันการเปลี่ยนแปลงแก้ไขข้อมูลในหน่วยความจำส่วนนี้ หลังจากนั้นแผ่นวงจรในเครื่องส่งจะส่งสัญญาณขัดจังหวะทางโปรแกรม (programmed interrupt) ไปยังเครื่องรีโมทโดยใช้รหัสเวกเตอร์ (vector ID) ซึ่งเป็นตัวเลขจำนวนเต็มแบบไม่คิดเครื่องหมายที่ถูกสร้างโดยการดำเนินการทางบิตระหว่างรหัสประจำตัวของเมสเสจกับรหัสประจำตัวของประเภทของเมสเสจ

ในเครื่องรับ เมื่อได้รับสัญญาณขัดจังหวะทางโปรแกรมจากเครื่องส่ง จะตรวจสอบรหัสเวกเตอร์และอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำของแผ่นวงจรในเครื่องส่งที่มีขนาดของข้อมูลตรงกัน จากนั้นเครื่องรับจะสร้างเมสเสจใหม่ที่มีทิศทางการนำเข้าโดยมีส่วนหัวและส่วนข้อมูลของเมสเสจเหมือนกันกับข้อมูลที่ส่งมา แต่ให้มีทิศทางกลับกันคือมีทิศทางนำเข้า แล้วจึงนำเข้าสู่เมสเสจคิวของเครื่องรับเพื่อรอการประมวลผลในฝั่งผู้รับ



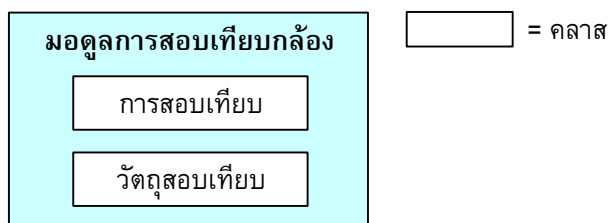
คลาสในมอดูลคลัสเตอร์ประกอบด้วยคลาสหลัก 3 คลาส ได้แก่ คลาส โฮสต์ คลาสช็อกเก็ต และคลาสอีเว้นท์ คลาสโฮสต์ใช้สำหรับการประมวลผลเมื่อมีการร้องขอข้อมูลภายในเครื่องจากคอมพิวเตอร์เครื่องอื่น โดยในกรณีที่ต้องการข้อมูลหรือสั่งงานเกี่ยวกับ กล้อง คลาสโฮสต์จะส่งคำสั่งต่อไปยังคลาสกล้องที่อยู่ภายในมอดูลกล้องที่รับผิดชอบในส่วนของ กล้องโดยตรง คลาสช็อกเก็ตทำหน้าที่ในการจัดเตรียมเมสเสจและส่งเมสเสจไปยังเครื่องรับ คลาสอีเว้นท์ทำหน้าที่ส่งการแจ้งเตือนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายในมอดูลคลัสเตอร์เพื่อส่งข้อมูล ให้กับมอดูลอื่นในระบบที่ได้ลงทะเบียนการแจ้งเตือนเหตุการณ์ไว้ แผนภาพของมอดูลคลัสเตอร์ แสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 มอดูลคลัสเตอร์

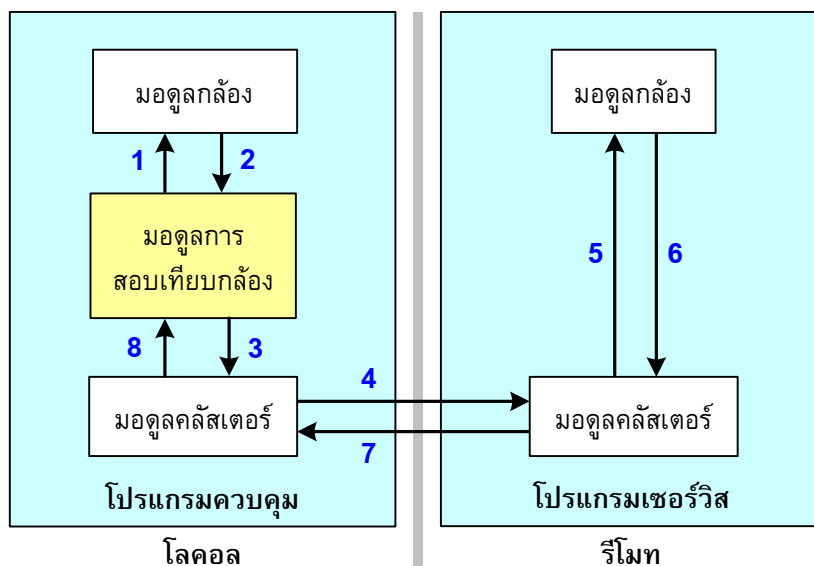
### 5.3.3 มอดูลการสอบเทียบกล้อง

มอดูลการสอบเทียบกล้องใช้ในการสอบเทียบกล้องในระบบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัวเพื่อใช้ในการคำนวณพิกัด 3 มิติของแต่ละวัตถุ ซึ่งมอดูลนี้จะมีอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์โลคอลเท่านั้น ส่วนประกอบของมอดูลแสดงดังรูปที่ 5.6 ประกอบด้วย คลาสการสอบเทียบ และคลาสวัตถุสอบเทียบ คลาสการสอบเทียบทำหน้าที่ในการสอบเทียบ กล้องด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการของ Tsai [19] ซึ่งให้ผลการสอบเทียบที่มีความแม่นยำสูง สำหรับคลาสวัตถุสอบเทียบใช้ในการกำหนดรูปแบบของวัตถุสอบเทียบซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กระดาษสอบเทียบที่เป็นลายตารางหมากรุกในการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงใน 3 มิติของวัตถุสอบเทียบ สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ในการสอบเทียบได้แสดงไว้ในบทที่ 4



รูปที่ 5.6 มอดูลการสอบเทียบกล้อง

ขั้นตอนการทำงานของมอดูลการประมวลผลต่างๆ ในการสอบเทียบ กล้องแสดงดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ลำดับการทำงานของมอดูลการประมวลผลในการสอบเทียบกล้อง

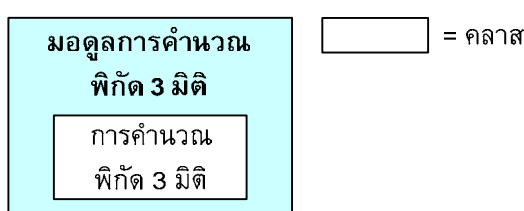
จากแผนภาพในรูปที่ 5.7 สามารถแสดงลำดับการทำงานได้ดังนี้

- 1) มอดูลการสอบเทียบกล้องส่งสัญญาณการถ่ายภาพทางซอฟต์แวร์ไปยังมอดูลกล้องที่อยู่ในเครื่องโลคอล
- 2) มอดูลกล้องส่งถ่ายภาพและส่งภาพกลับมายังมอดูลการสอบเทียบกล้อง
- 3) มอดูลการสอบเทียบกล้องส่งคำสั่งถ่ายภาพไปยังกล้องในเครื่องรีโมทผ่านทางมอดูลคลัสเตอร์
- 4) มอดูลคลัสเตอร์ในเครื่องโลคอลแปลงคำสั่งการถ่ายภาพให้เป็นเมสเสจและส่งไปยังเครื่องรีโมท
- 5) มอดูลคลัสเตอร์ในเครื่องรีโมทแปลงเมสเสจที่ได้รับให้เป็นคำสั่งการถ่ายภาพทางซอฟต์แวร์และส่งคำสั่งการถ่ายภาพไปยังมอดูลกล้องในเครื่องรีโมท
- 6) มอดูลกล้องในเครื่องรีโมทถ่ายภาพและส่งภาพกลับมายังมอดูลคลัสเตอร์ในเครื่องรีโมท
- 7) มอดูลคลัสเตอร์ในเครื่องรีโมทแปลงภาพให้เป็นเมสเสจและส่งไปยังเครื่องโลคอล
- 8) มอดูลคลัสเตอร์ในเครื่องโลคอลรับเมสเสจและแปลงกลับให้เป็นภาพและส่งไปยังมอดูลการสอบเทียบกล้อง

โดยการถ่ายภาพในเครื่องโลคอล (ขั้นตอนที่ 1-2) และเครื่องรีโมท (ขั้นตอนที่ 3-8) ให้ทำงานครบทั้งครบทุกกล่องที่อยู่ในเครื่องนั้นๆ เมื่อได้ภาพครบตามจำนวนกล่องแล้วมอดูลการสอบเทียบกล่องจึงนำภาพไปตรวจหาตำแหน่งของวัตถุสอบเทียบในภาพและคำนวณการสอบเทียบด้วยวิธีที่กำหนดเพื่อให้ได้แบบจำลองกล่องของกล่องแต่ละตัว

#### 5.3.4 มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติ

มอดูลการคำนวณพิกัดทำหน้าที่ในคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุแต่ละวัตถุจากตำแหน่งที่ตรวจพบในภาพ ภายในมอดูลนี้มีคลาสการคำนวณพิกัด 3 มิติซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการคำนวณซึ่งได้กล่าวถึงในหัวข้อ 3.4 แผนภาพของมอดูลแสดงดังรูปที่ 5.8

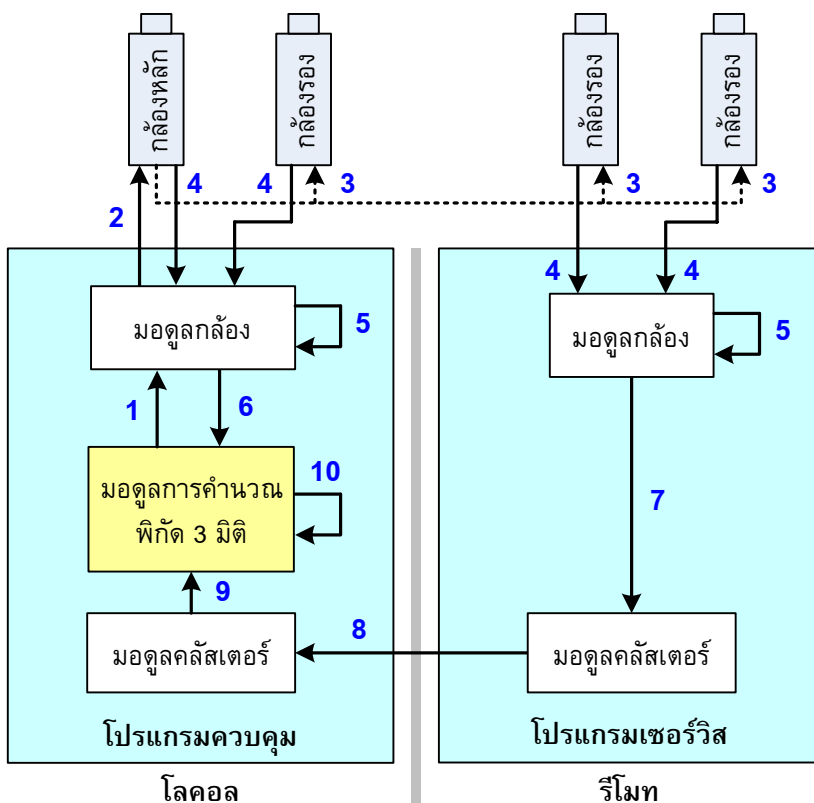


รูปที่ 5.8 มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติ

ขั้นตอนการทำงานในการคำนวณพิกัด 3 มิติของมอดูลการประมวลผลสามารถแสดงดังรูปที่ 5.9 ซึ่งมีลำดับการทำงานดังนี้

- 1) มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติส่งสัญญาณการถ่ายภาพไปยังมอดูลกล่องที่อยู่ในเครื่องโลคอล
- 2) มอดูลกล่องส่งสัญญาณการถ่ายภาพไปยังกล่องหลักเพียงตัวเดียว
- 3) กล่องหลักส่งสัญญาณการถ่ายภาพทางฮาร์ดแวร์ไปยังกล่องรองทั้งหมด
- 4) ทั้งกล่องหลักและกล่องรองถ่ายภาพและส่งภาพกลับมายังมอดูลกล่องในเครื่องที่กล่องนั้นๆ เชื่อมต่ออยู่
- 5) ในแต่ละเครื่อง มอดูลกล่องนำภาพที่ถ่ายได้มาตรวจหาวัตถุในภาพ
- 6) ในเครื่องโลคอล มอดูลกล่องส่งพิกัดของวัตถุไปยังมอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติโดยตรง
- 7) ในเครื่องรีโมท มอดูลกล่องส่งพิกัดของวัตถุไปยังมอดูลคลัสเตอร์เพื่อเตรียมการส่งข้อมูลข้ามเครื่อง
- 8) มอดูลคลัสเตอร์ในเครื่องรีโมทแปลงพิกัด 2 มิติของวัตถุให้เป็นเมสเสจและส่งไปยังมอดูลคลัสเตอร์ในเครื่องโลคอล
- 9) มอดูลคลัสเตอร์ในเครื่องโลคอลได้รับเมสเสจและแปลงกลับเป็นพิกัด 2 มิติของวัตถุและส่งต่อไปยังมอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติ

- 10) มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติ จับคู่ตำแหน่งของวัตถุที่สอดคล้องกันในแต่ละกล้องและคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุแต่ละวัตถุ
- 11) ทำซ้ำข้อ 1-10 ในทุกกรอบของการถ่ายภาพจนกว่าผู้ใช้จะส่งคำสั่งหยุดการทำงาน

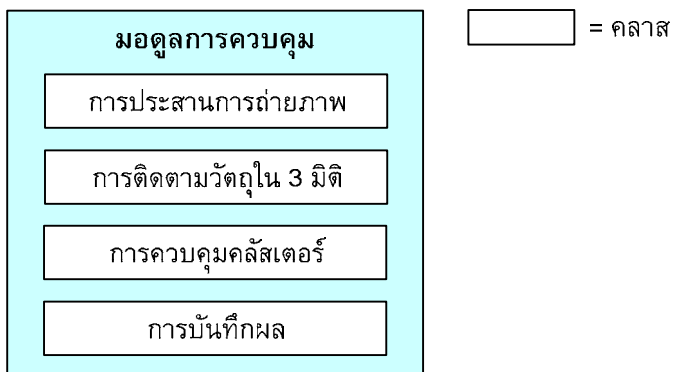


รูปที่ 5.9 ลำดับการทำงานของมอดูลการประมวลผลในการคำนวณพิกัด 3 มิติ

### 5.3.5 มอดูลการควบคุม

มอดูลการควบคุมทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงาน รวมทั้งกระบวนการต่างๆ ที่อยู่ภายในระบบ โดยจะมีอยู่ในเครื่องคอมพิวเตอร์โลคอลเท่านั้น ส่วนประกอบภายในมอดูลได้แก่ คลาสการประสานการถ่ายภาพ คลาสการติดตามวัตถุใน 3 มิติ คลาสการควบคุมคลัสเตอร์ และคลาสการบันทึกผล โดยคลาสการประสานการถ่ายภาพทำหน้าที่ควบคุมการถ่ายภาพโดยการกำหนดจังหวะการถ่ายภาพเมื่อต้องการถ่ายภาพโดยใช้กล้องหลายตัวพร้อมกัน คลาสการติดตามวัตถุใน 3 มิติทำหน้าที่กำหนดป้ายชื่อ (labeling) ให้กับแต่ละวัตถุเพื่อใช้อ้างอิงในการติดตามวัตถุ และทำการเชื่อมโยงข้อมูลที่ได้จากการคำนวณพิกัด 3 มิติกับตำแหน่งที่ได้จากการทำนายการเคลื่อนที่เพื่อติดตามวัตถุแต่ละวัตถุ คลาสการควบคุมคลัสเตอร์ทำหน้าที่จัดการระบบพีซีคลัสเตอร์ โดยจัดเก็บข้อมูลของคอมพิวเตอร์และกล้องทั้งหมดที่อยู่ภายในระบบ และใช้ในการเข้าถึงข้อมูลและสั่งการทำงานไปยังคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องที่อยู่ในพีซีคลัสเตอร์ ส่วนคลาสการบันทึกผลทำหน้าที่ในการบันทึกผลการคำนวณพิกัด 3 มิติ หรือผลการติดตามวัตถุเป็นไฟล์คอมพิวเตอร์เพื่อสามารถนำไปใช้งานต่างๆ

ภายหลัง เช่น การวิเคราะห์ผล การพล็อตกราฟ เป็นต้น ส่วนประกอบของมอดูลการควบคุมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.10



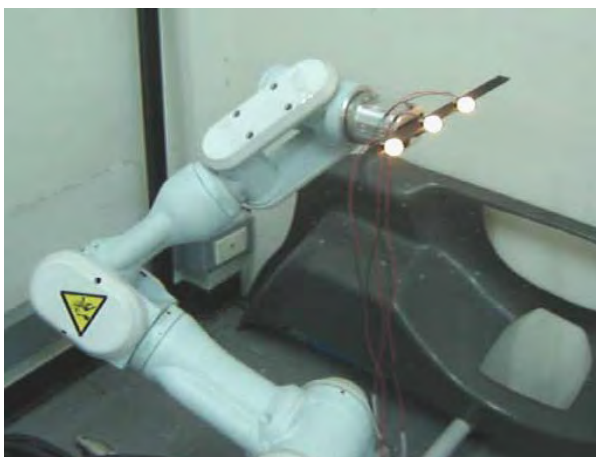
รูปที่ 5.10 มอดูลการควบคุม

## บทที่ 6

### การทดลอง

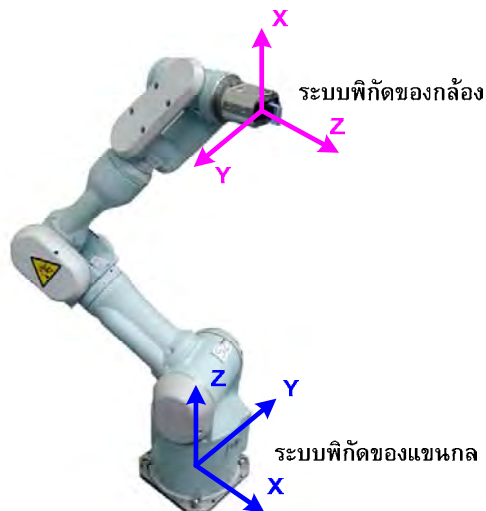
#### 6.1 การติดตามวัตถุเมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง

ในส่วนนี้เป็นการทดลองโดยให้ระบบติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลม เปล่งแสง 3 และ 4 อันที่เคลื่อนที่โดยใช้แขนกลมิตซูบิชิ PA10-7C โดยแขนกลจะสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่มีโพรไฟล์ความเร็วแบบเส้นโค้งรูปตัวเอส (s-curve velocity profile) ในทิศทางแกน x แกน y และแกน z ตามลำดับเมื่อเทียบกับระบบพิกัดของหุ่นยนต์ วัตถุทรงกลมที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 มิลลิเมตร โดยจัดเรียงให้วัตถุทั้งหมดอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันโดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลมสองอันที่ติดกันประมาณ 100 มิลลิเมตร ทั้งนี้เพื่อเป็นการทดสอบการทำงานของระบบในการคำนวณพิกัด 3 มิติของแต่ละวัตถุที่ช่วงเวลาต่างๆ รวมทั้งทดสอบการจำแนกและติดตามวัตถุแต่ละวัตถุ แขนกล PA10-7C พร้อมด้วยวัตถุเป้าหมายที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แขนกล PA10-7C พร้อมด้วยวัตถุเป้าหมายสำหรับการติดตาม

แขนกลและระบบกลิ้งมีการตั้งระบบพิกัดอ้างอิงที่แตกต่างกันดังรูปที่ 6.2 โดยผลการทดลองทั้งหมดใช้การอ้างอิงเทียบกับระบบพิกัดของกลิ้ง



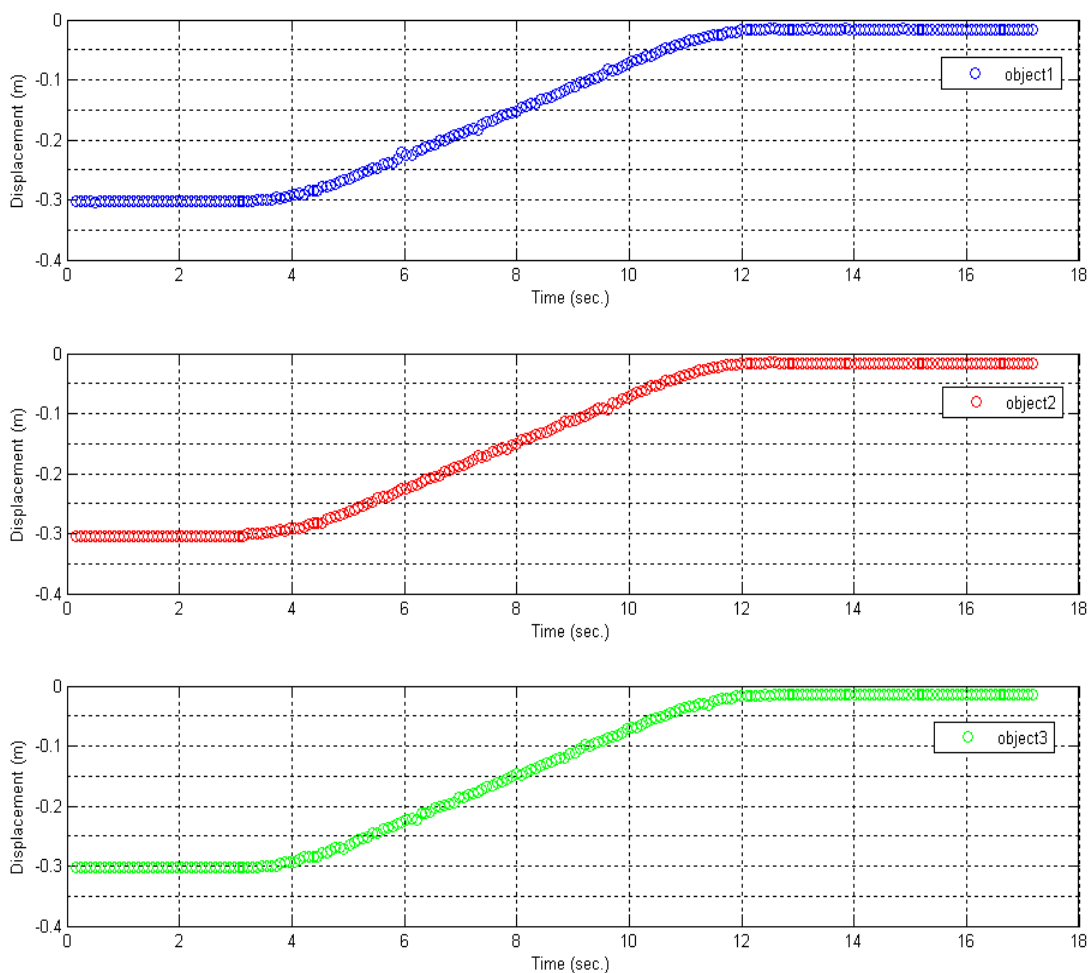
รูปที่ 6.2 การตั้งระบบพิกัดอ้างอิงของแขนกลและระบบกลิ้ง

พารามิเตอร์ของกลิ้งแต่ละตัวที่ใช้ในการทดลองการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบเส้นตรงแสดงดังตารางที่ 6.1

ตาราง 6.1 พารามิเตอร์ของกลิ้งที่ใช้ในการทดลองการติดตามการเคลื่อนที่แบบเส้นตรง

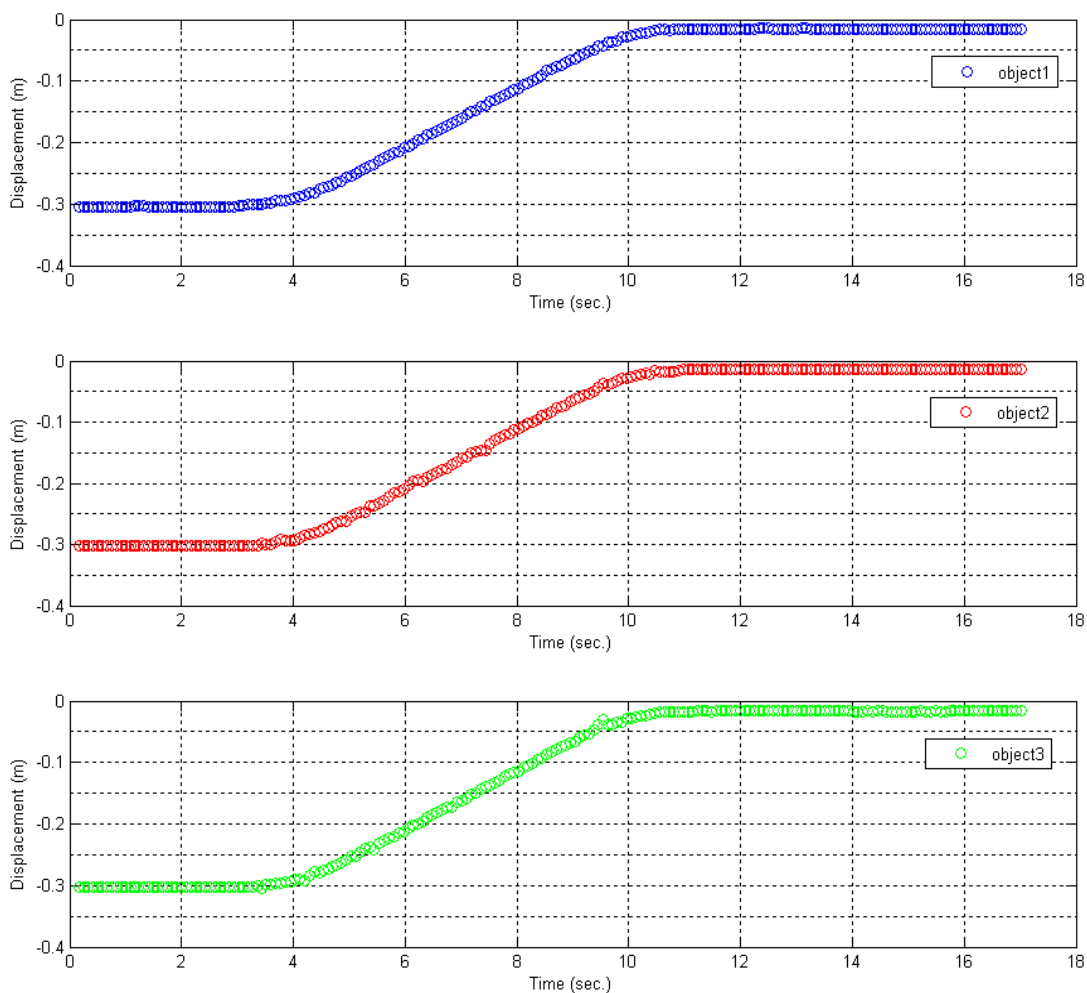
พารามิเตอร์	กลิ้งหมายเลข 7410265	กลิ้งหมายเลข 7411015	กลิ้งหมายเลข 7411064	กลิ้งหมายเลข 7411065
$\alpha_x$	1347.5295	1287.9372	1304.1528	1374.1112
$\alpha_y$	1347.5295	1287.9372	1304.1528	1374.1112
$s$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$u_0$	654.0145	637.4701	639.2010	616.1227
$v_0$	506.3425	536.0295	532.3032	540.6106
$k_1$	0.1902	0.3284	0.2386	0.1386
$k_2$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$R_x$	-1.9061	-2.1519	-1.6949	-2.0490
$R_y$	1.8988	2.0461	1.8198	2.1082
$R_z$	-0.1544	0.6983	-0.1880	0.1780
$t_x$	0.0533	0.1250	0.1185	0.1247
$t_y$	0.0619	0.0488	-0.0012	0.0043
$t_z$	2.0869	1.7280	2.0544	1.9104

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.3–6.14

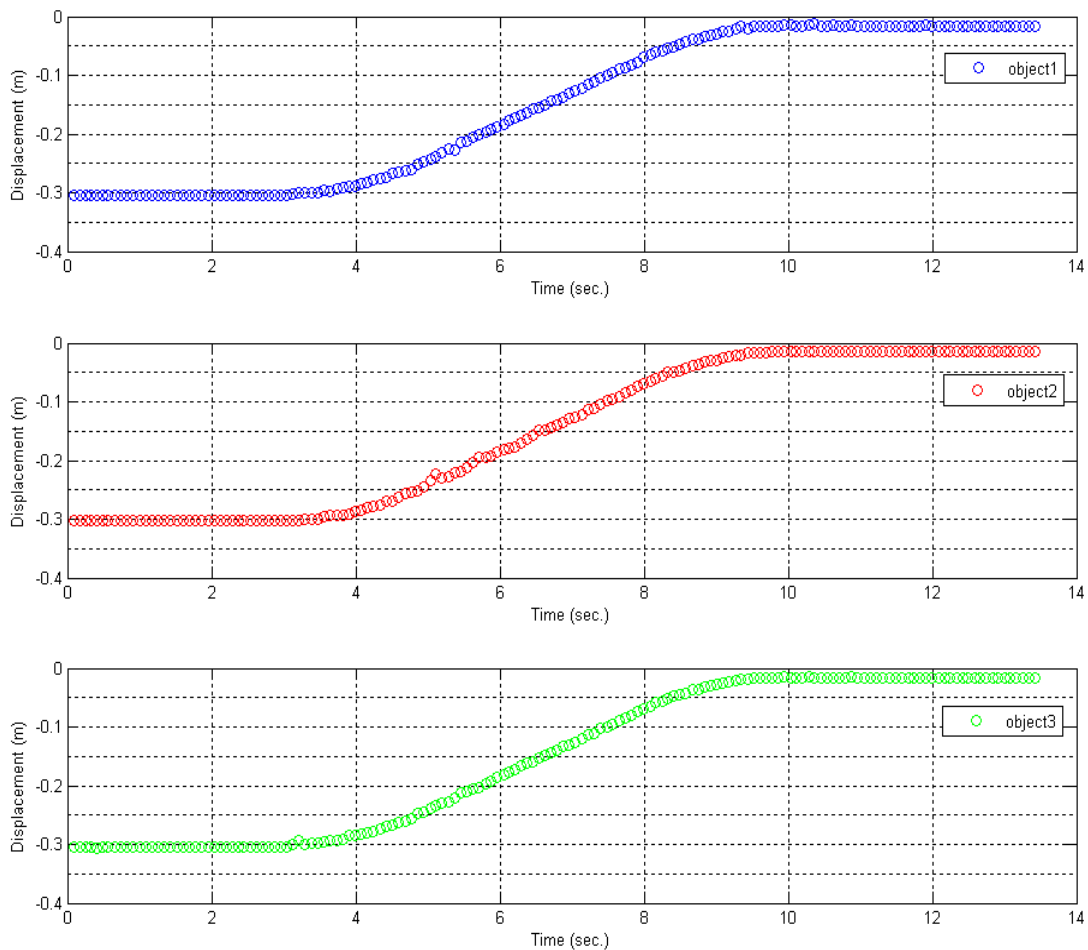


รูปที่ 6.3 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน x ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่ง  
และความหน่วง 20 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาที  
และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร

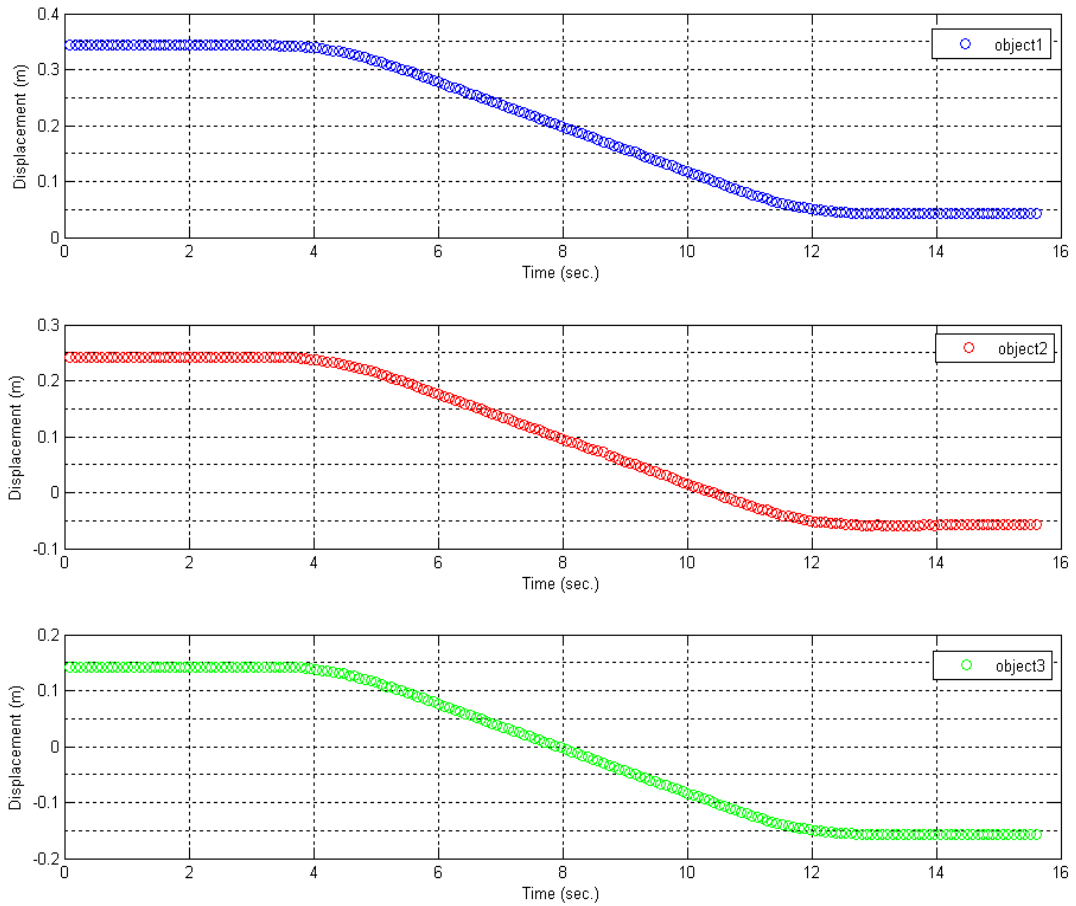




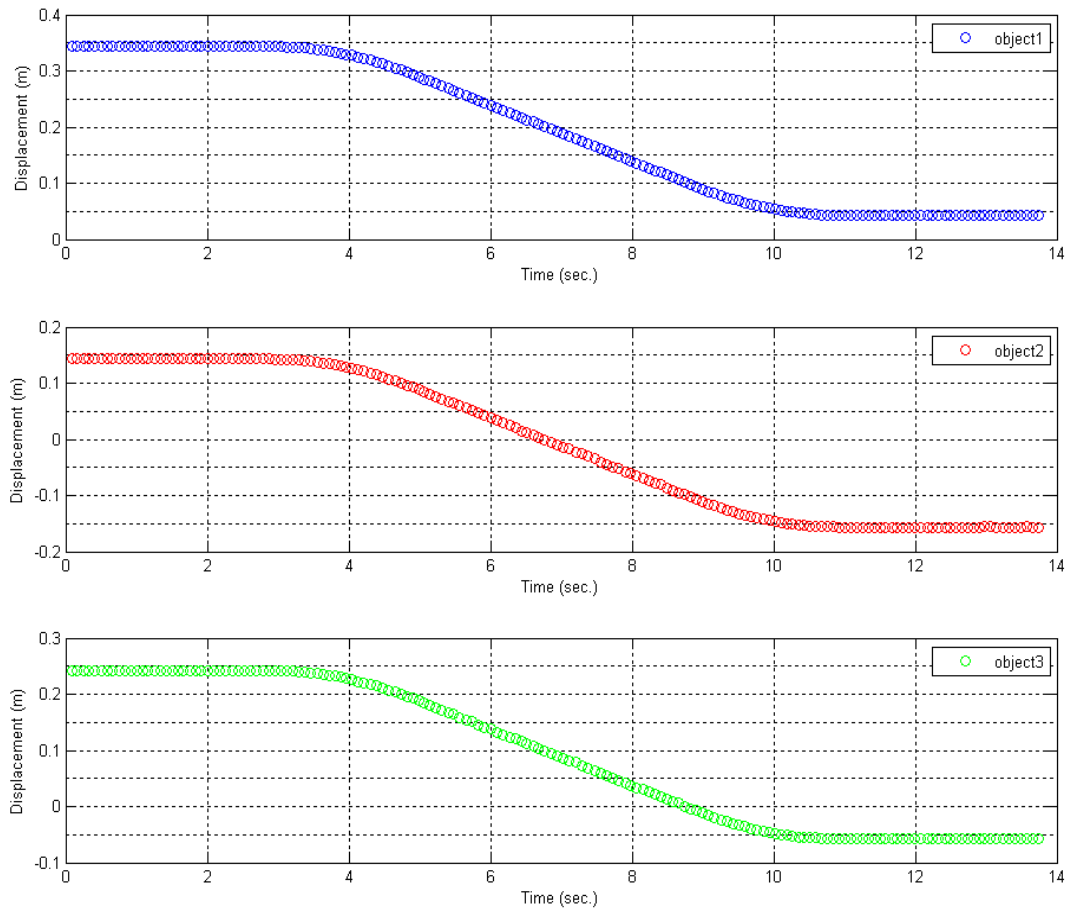
รูปที่ 6.4 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน x ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่งและความหน่วง 25 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร



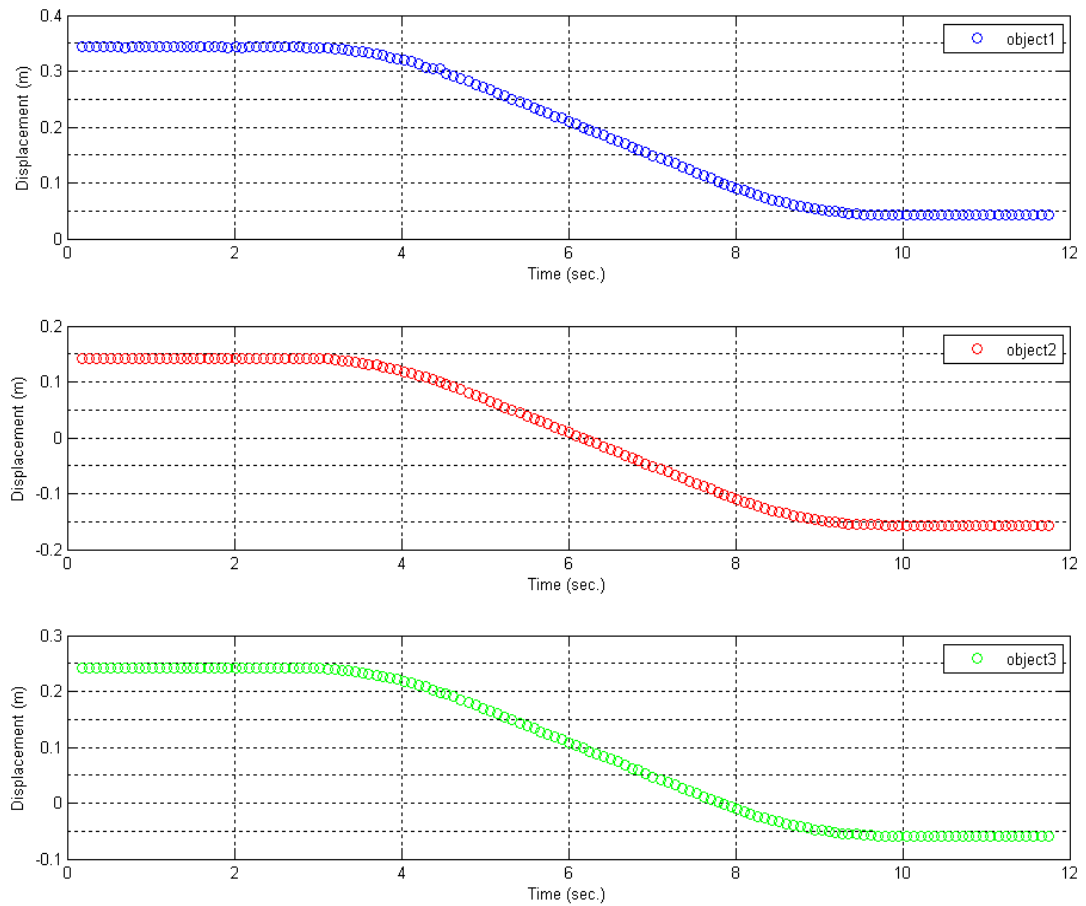
รูปที่ 6.5 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน x ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่ง  
และความหน่วง 30 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 60 มิลลิเมตรต่อวินาที  
และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร



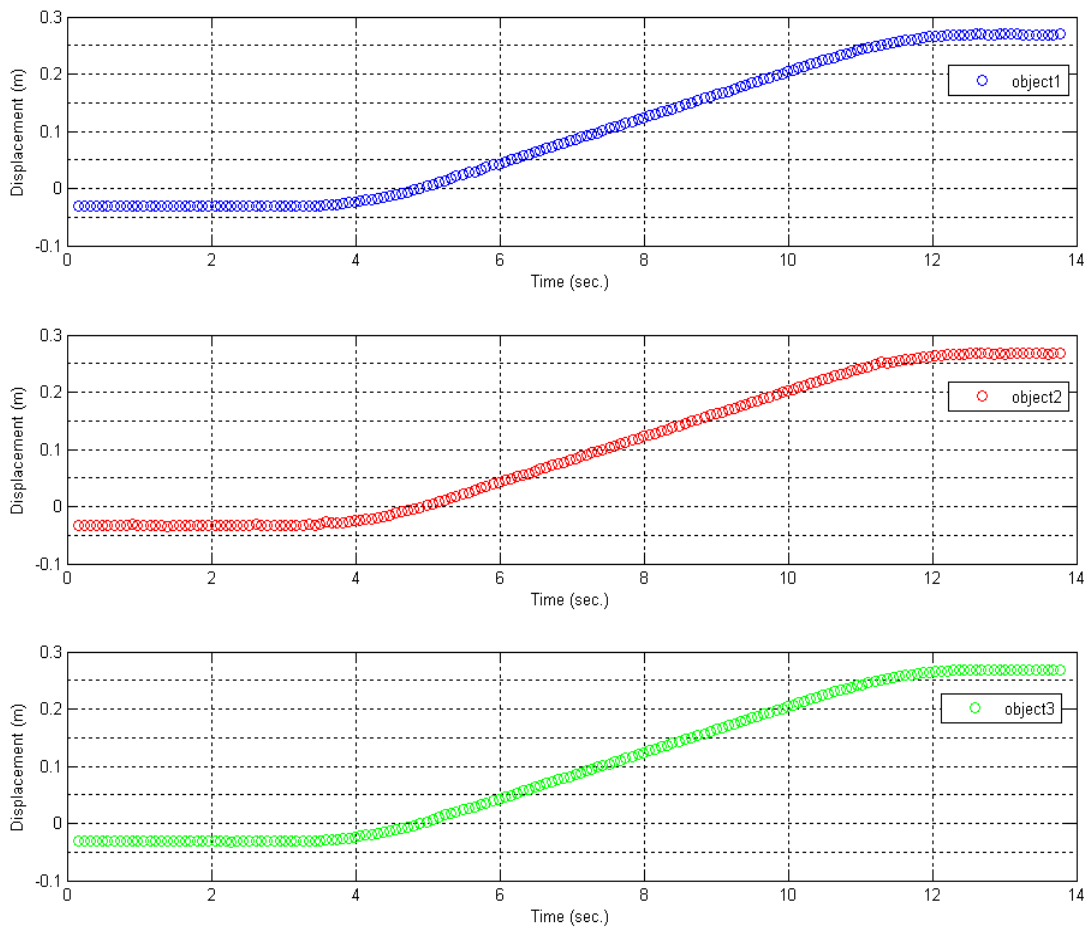
รูปที่ 6.6 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน y ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็ว  
และความหน่วง 20 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาที  
และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร



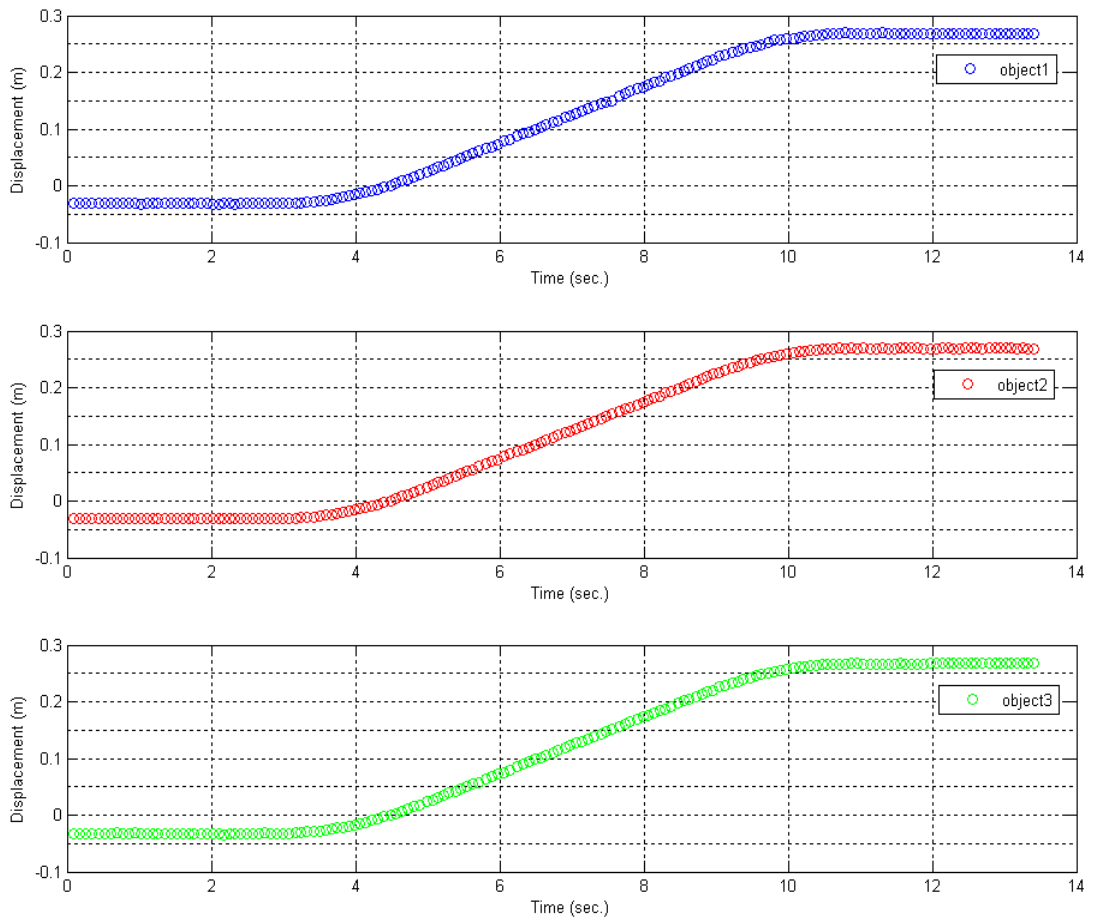
รูปที่ 6.7 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน y ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่ง  
และความหน่วง 25 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที  
และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร



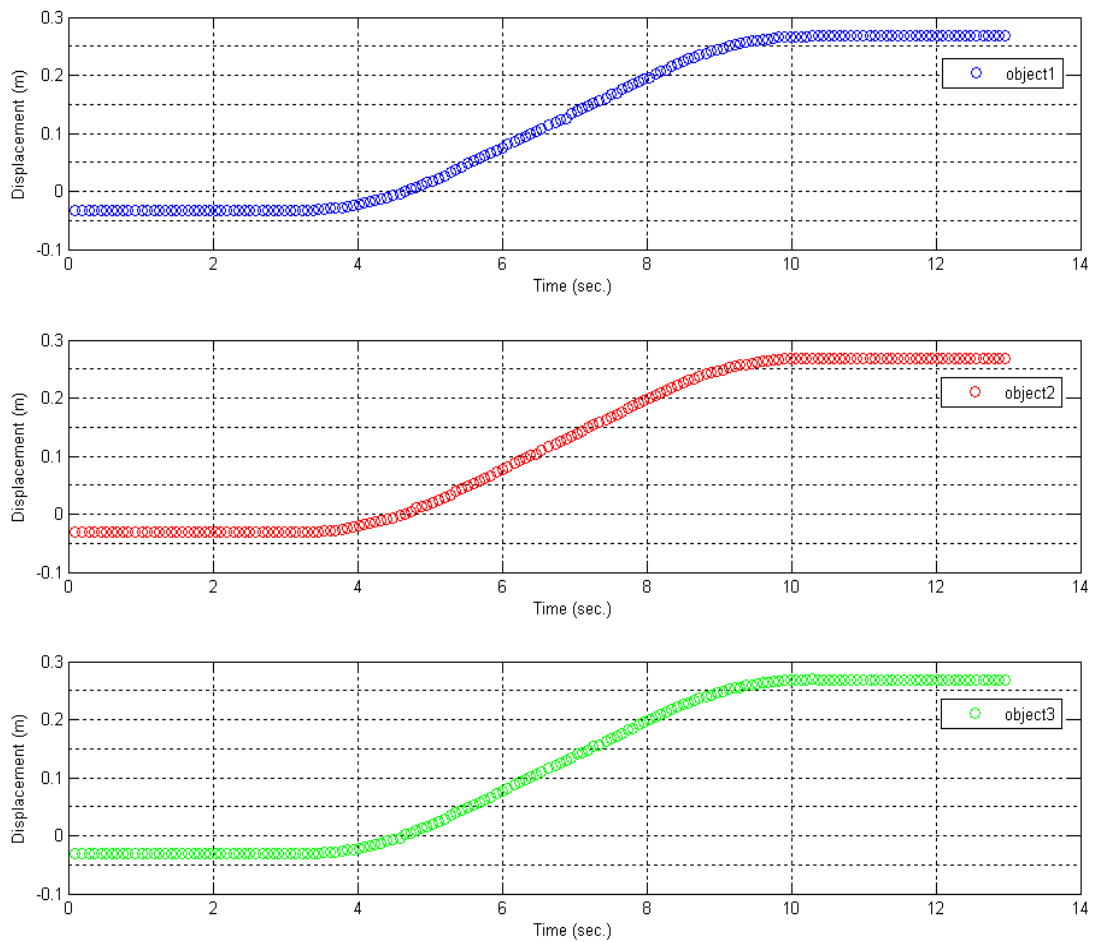
รูปที่ 6.8 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน y ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่ง  
และความหน่วง 30 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 60 มิลลิเมตรต่อวินาที  
และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร



รูปที่ 6.9 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน z ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่ง  
และความหน่วง 20 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาที  
และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร

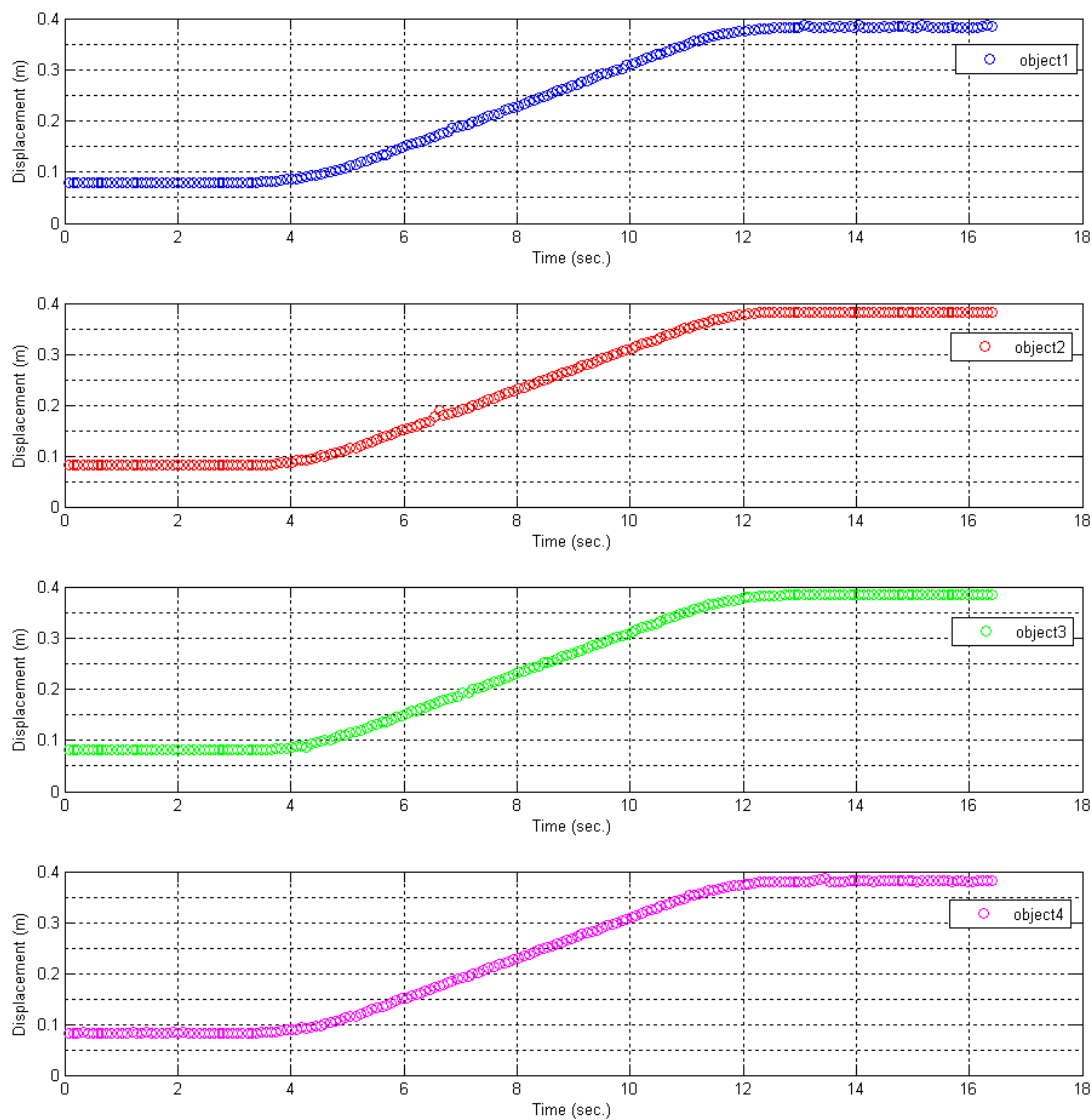


รูปที่ 6.10 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน z ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่งและความหน่วง 25 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 50 มิลลิเมตรต่อวินาที และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร

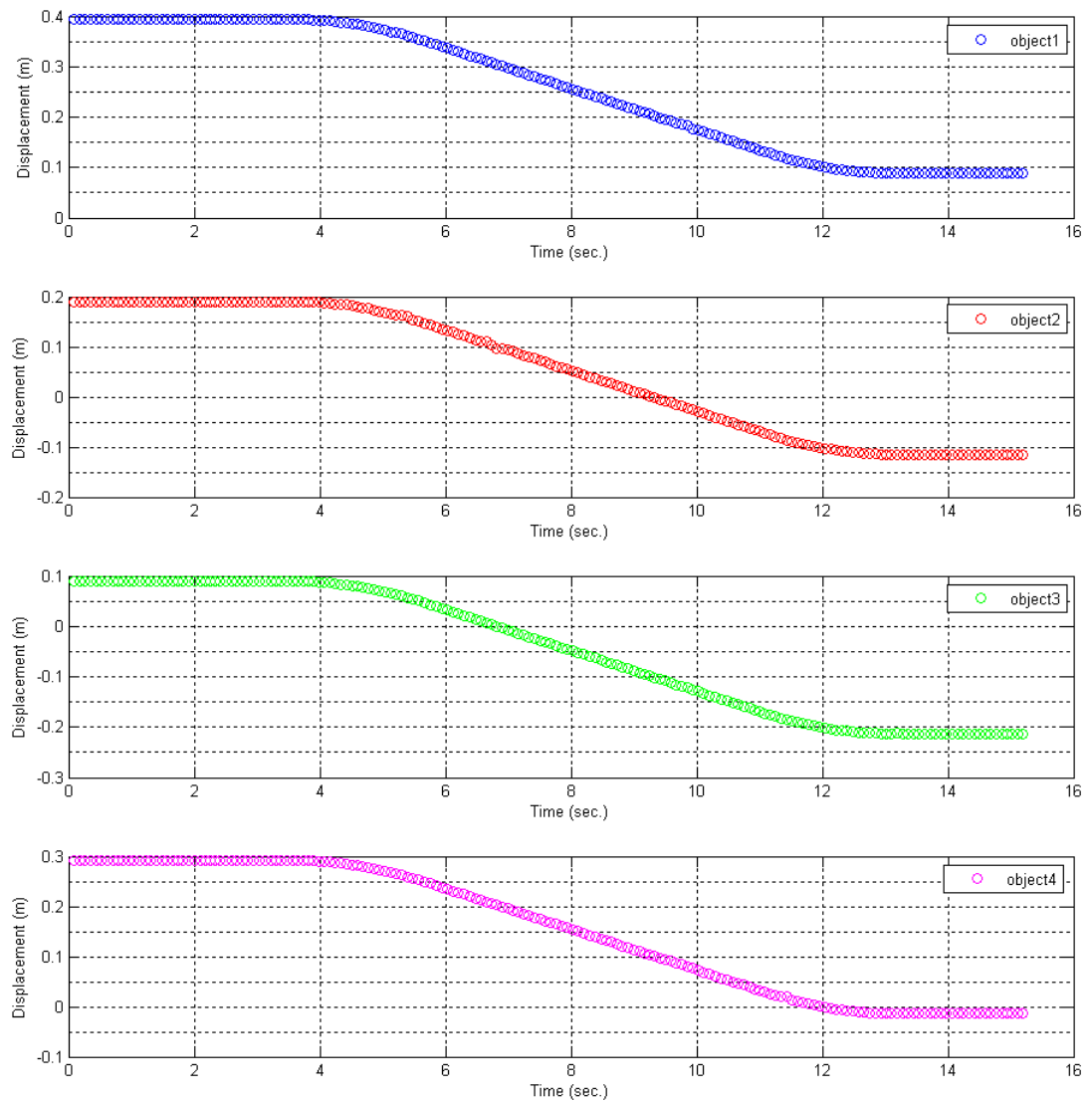


รูปที่ 6.11 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน z ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่ง และความหน่วง 30 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 60 มิลลิเมตรต่อวินาที และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร

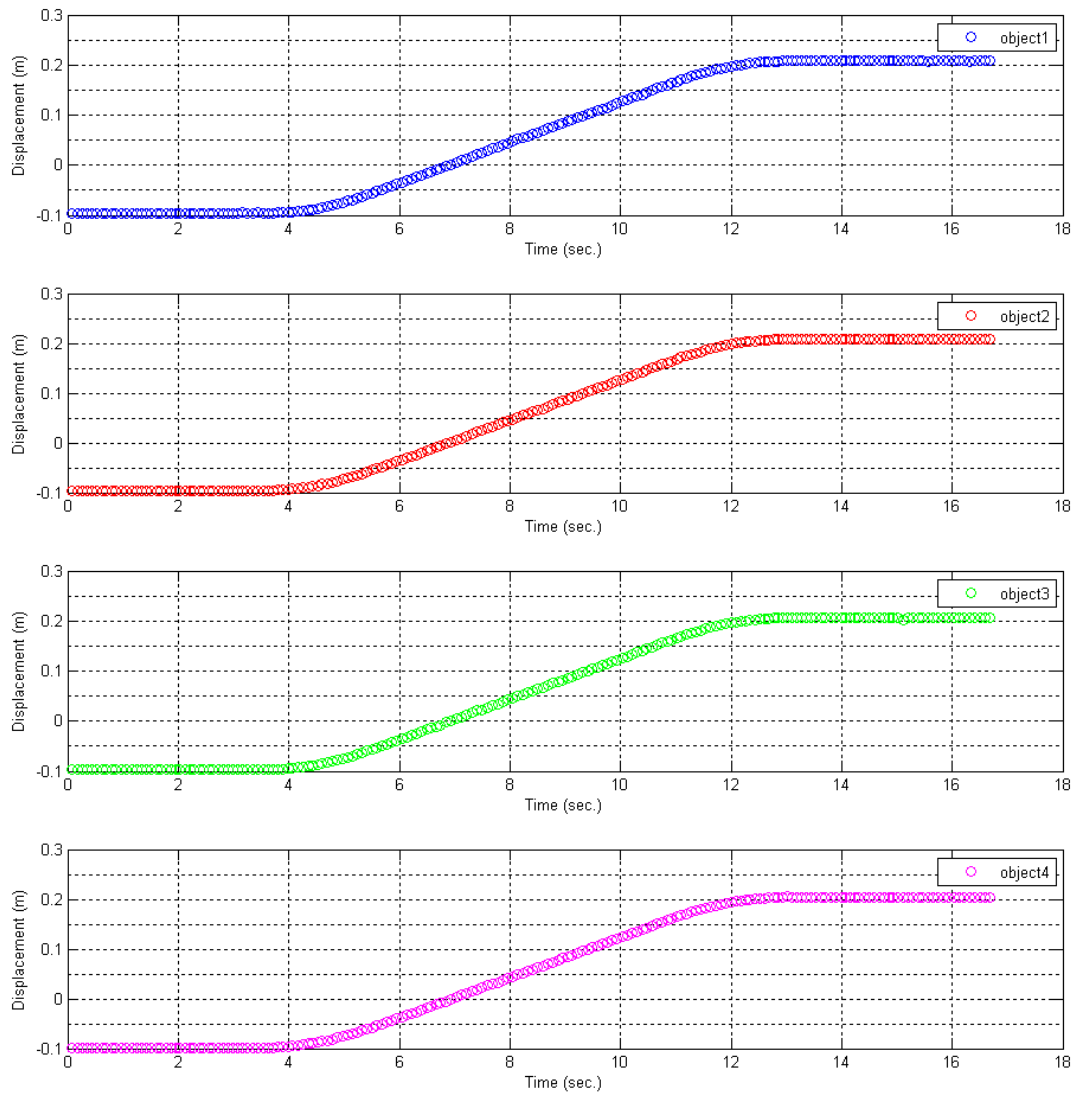




รูปที่ 6.12 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน x ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็ว  
และความหน่วง 20 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาที  
และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร



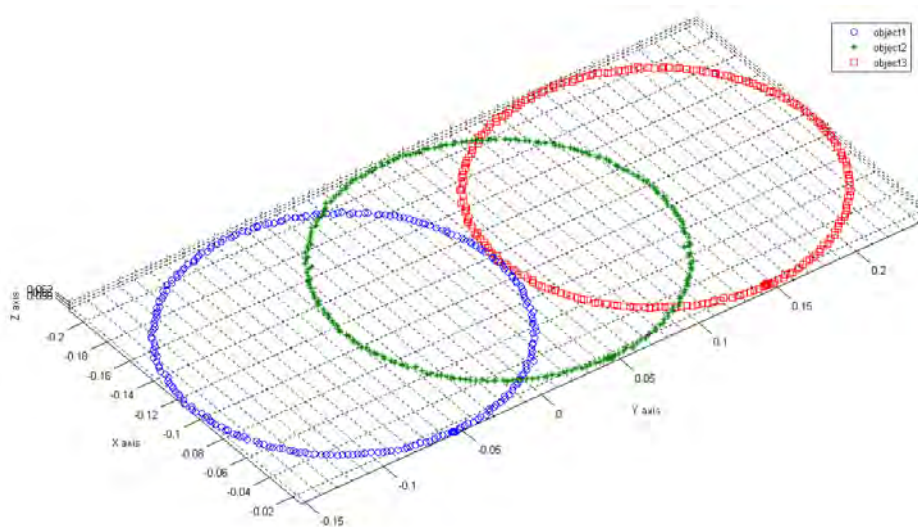
รูปที่ 6.13 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน y ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วและความหน่วง 20 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาที และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร



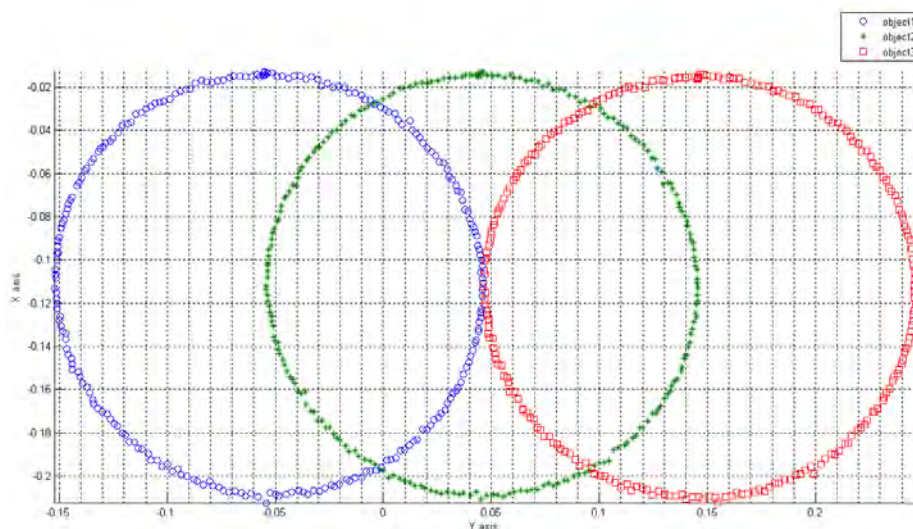
รูปที่ 6.14 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในทิศทางแกน z ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร่ง  
และความหน่วง 20 มิลลิเมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ความเร็ว 40 มิลลิเมตรต่อวินาที  
และระยะกระจัด 300 มิลลิเมตร

## 6.2 การติดตามวัตถุเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ

การทดลองนี้เป็นการติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบโดยใช้แขนกล PA10-7C ในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีรัศมี 100 มิลลิเมตร ในระนาบต่างๆ ได้แก่ ระนาบ xy ระนาบ yz และระนาบ zx ตามลำดับเมื่อเทียบกับระบบพิกัดของหุ่นยนต์ ด้วยความเร็วเชิงมุมต่างๆ เพื่อทดสอบความสามารถในการติดตามวัตถุ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของ กล้องและใช้วัตถุเป้าหมายเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 6.1 สำหรับผลการทดลองแสดงดัง รูปที่ 6.15-6.26

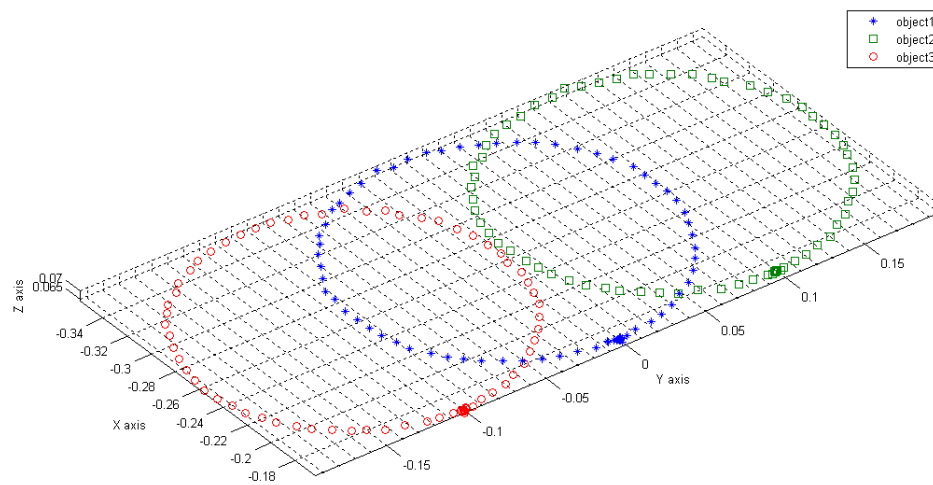


(ก)

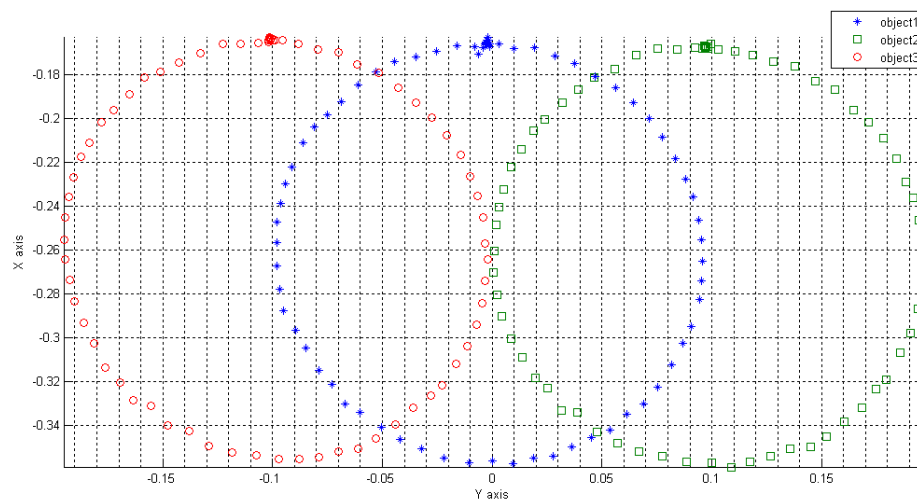


(ข)

รูปที่ 6.15 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ xy ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.05 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม

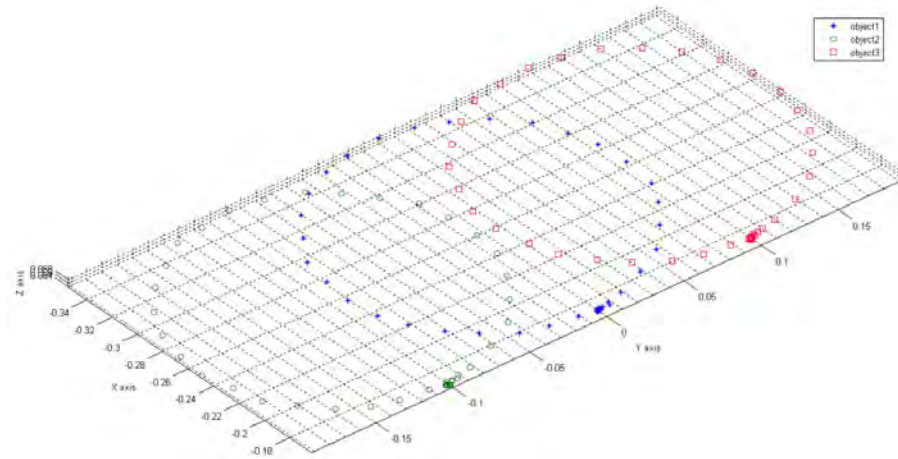


(ก)

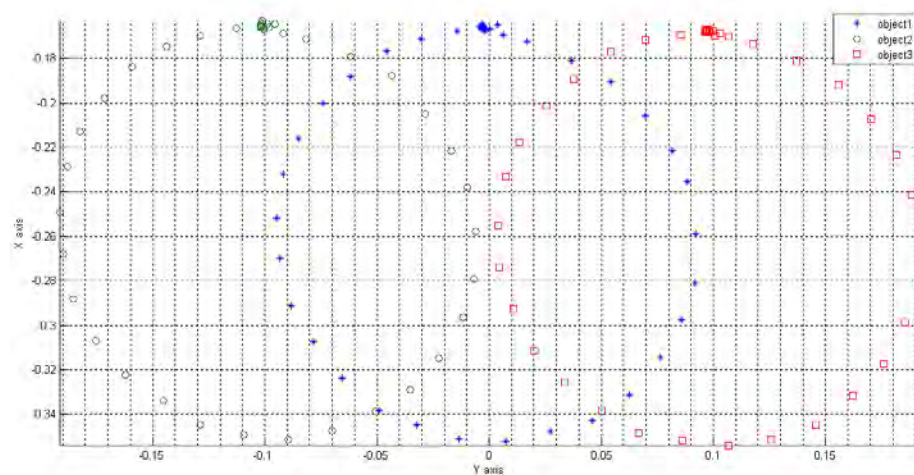


(ข)

รูปที่ 6.16 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ xy ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม  
0.2 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม

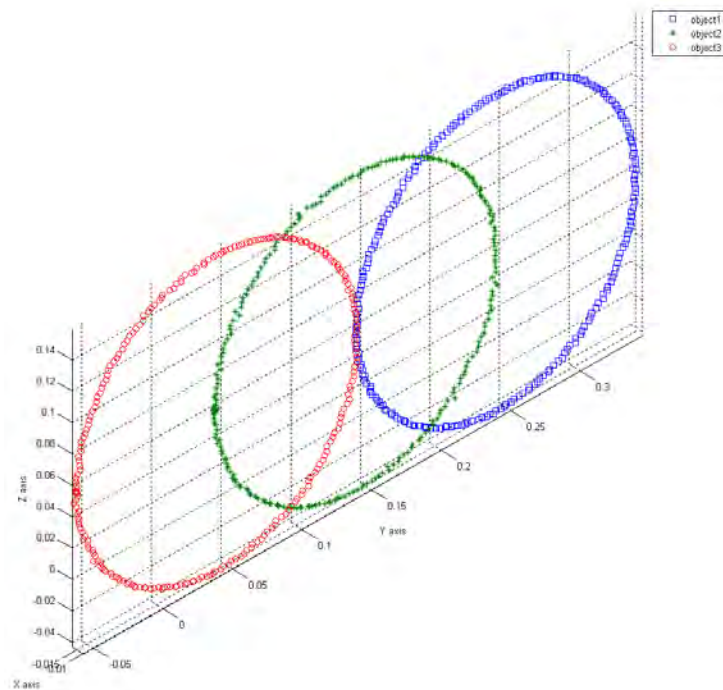


(ก)

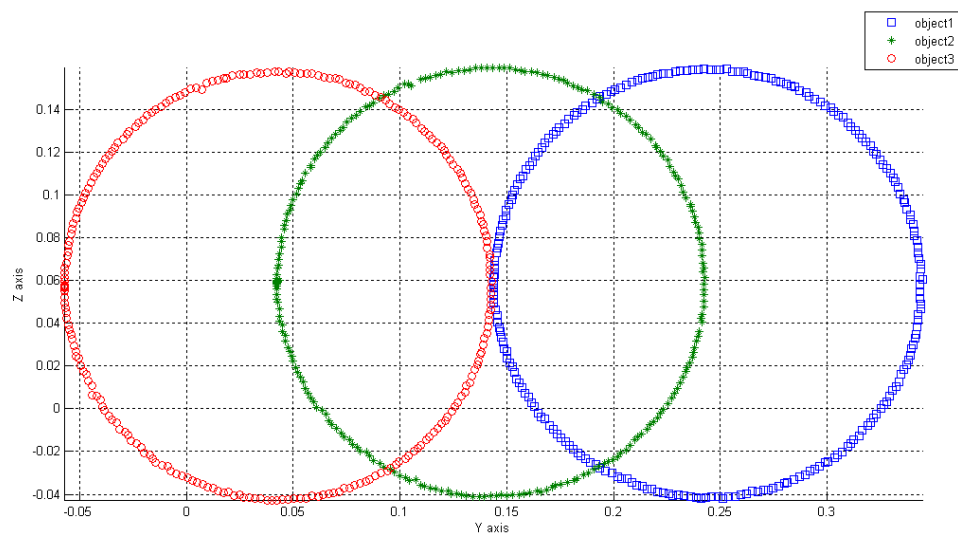


(ข)

รูปที่ 6.17 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ xy ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.4 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม

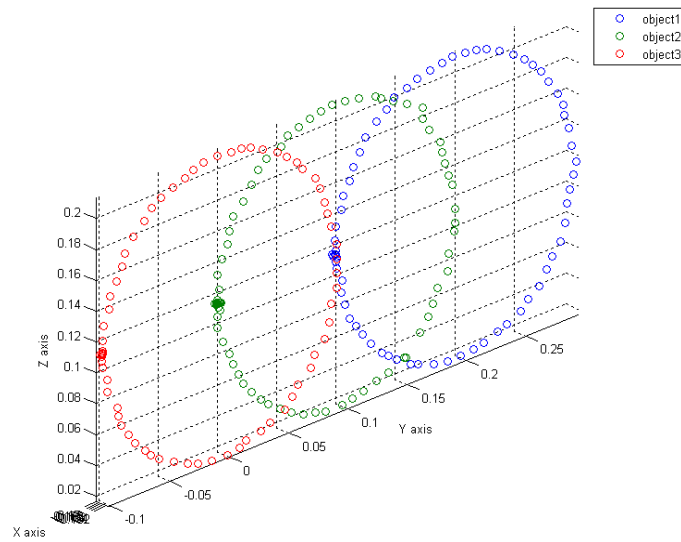


(ก)

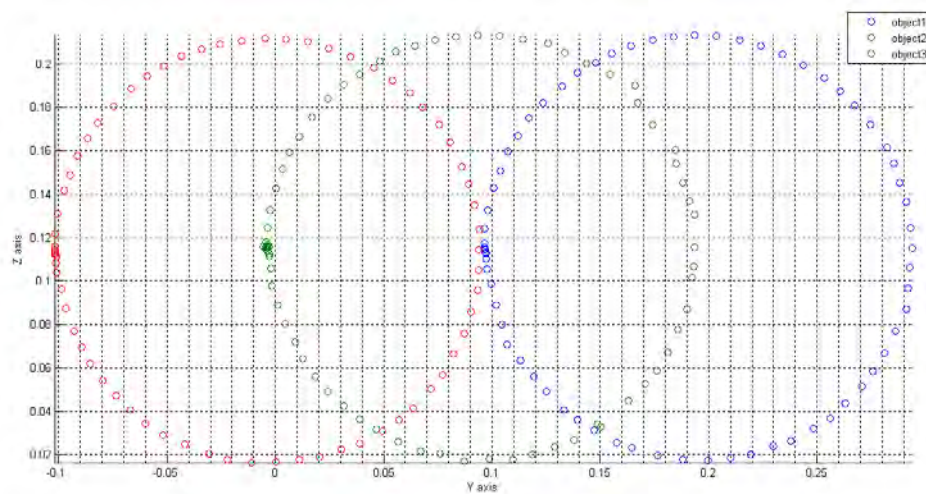


(ข)

รูปที่ 6.18 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ yz ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม  
0.05 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม



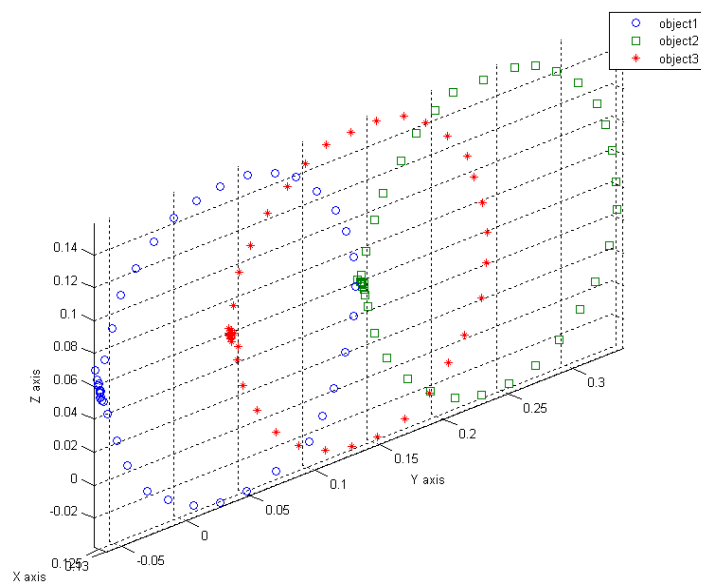
(ก)



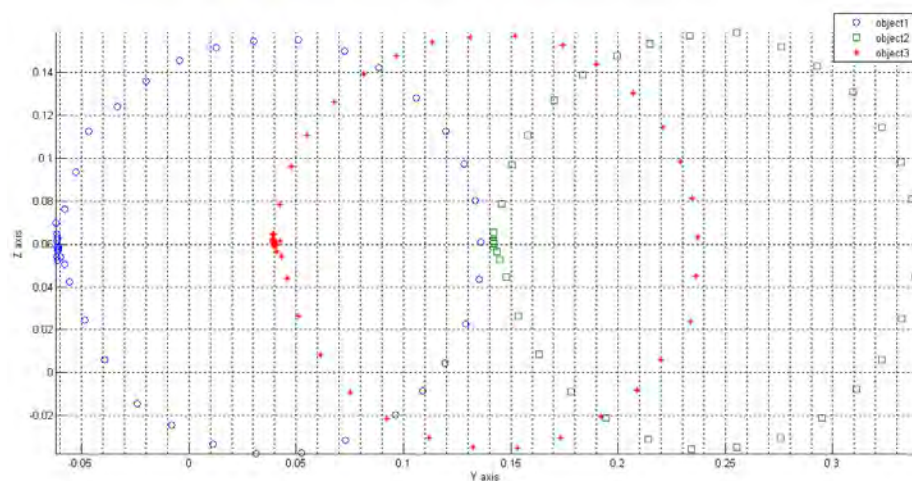
(ข)

รูปที่ 6.19 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ yz ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.2 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม



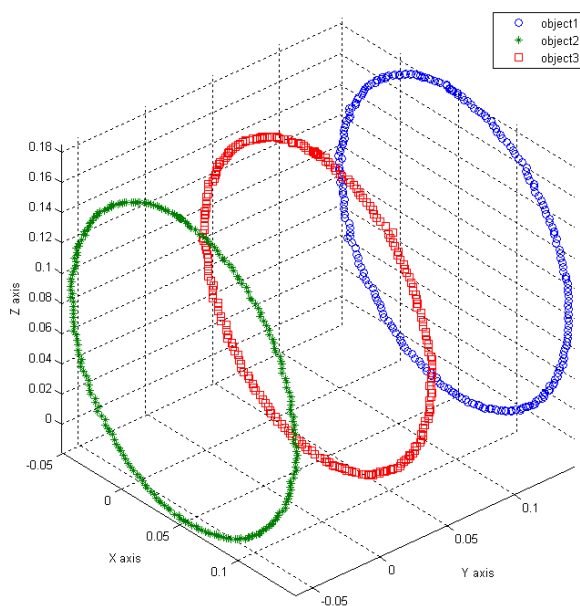


(ก)

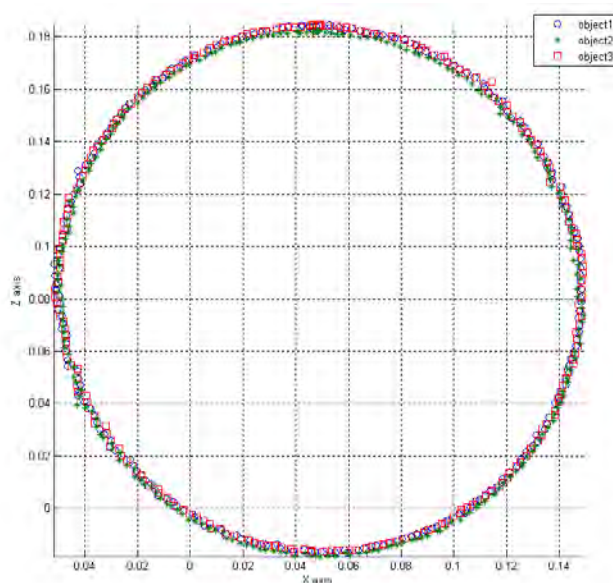


(ข)

รูปที่ 6.20 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ yz ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.4 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม

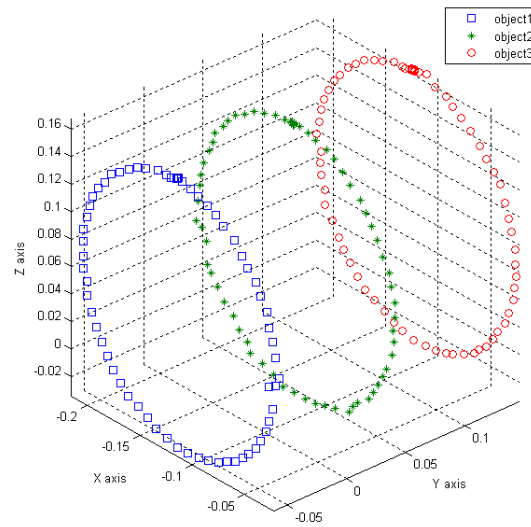


(ก)

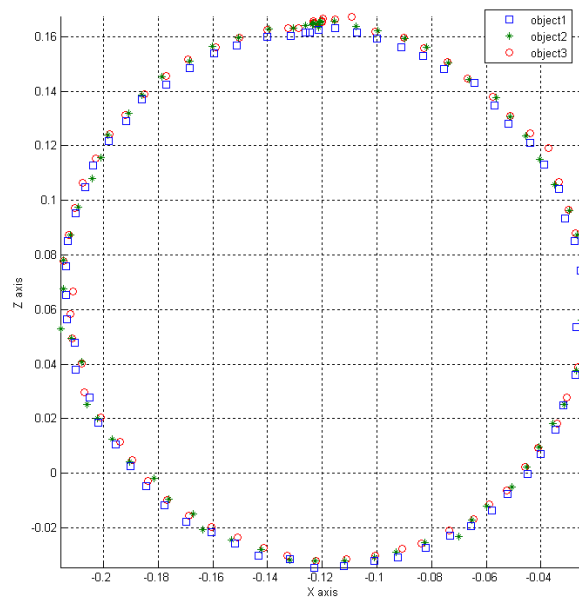


(ข)

รูปที่ 6.21 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ  $zx$  ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.05 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม

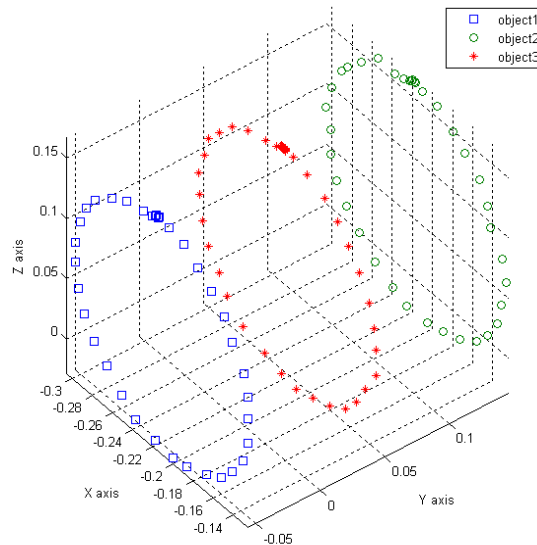


(ก)

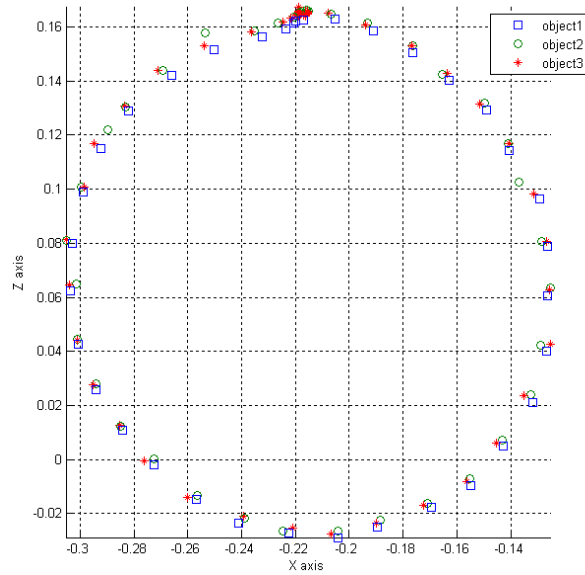


(ข)

รูปที่ 6.22 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ  $zx$  ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.2 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม

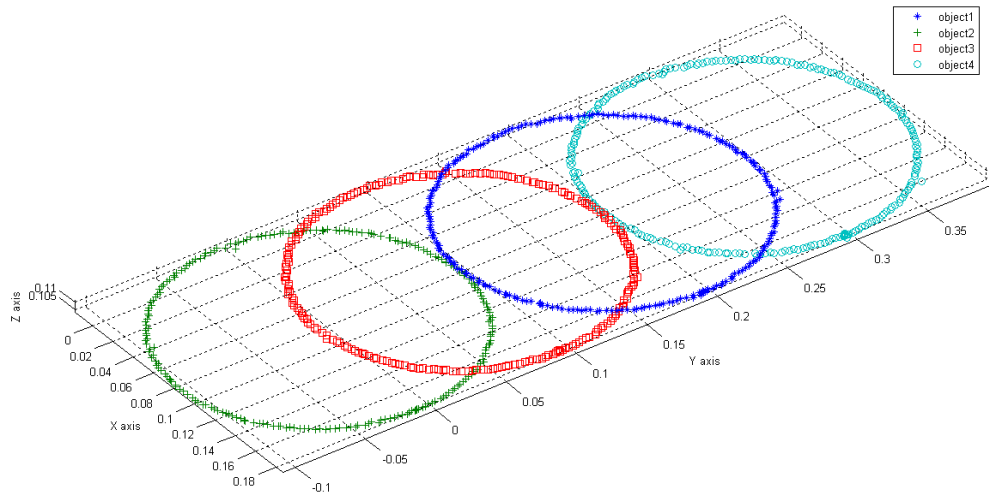


(ก)

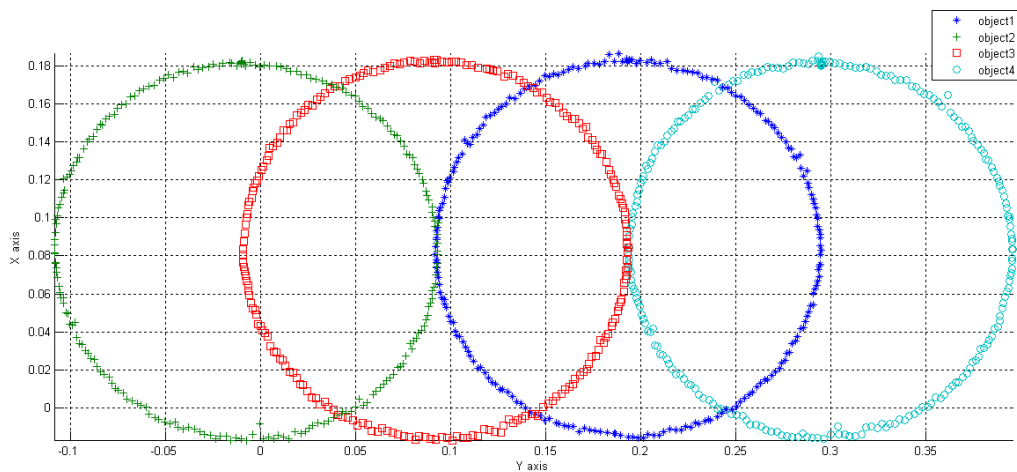


(ข)

รูปที่ 6.23 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ  $zx$  ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม  
0.4 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม

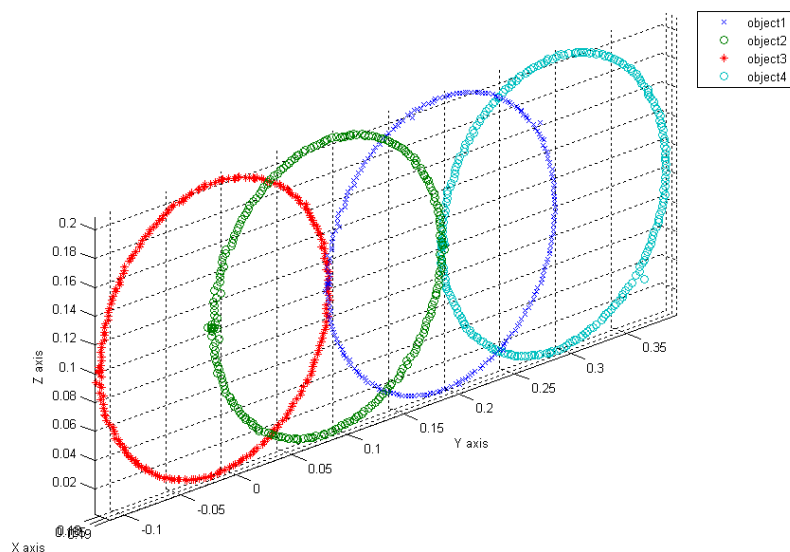


(ก)

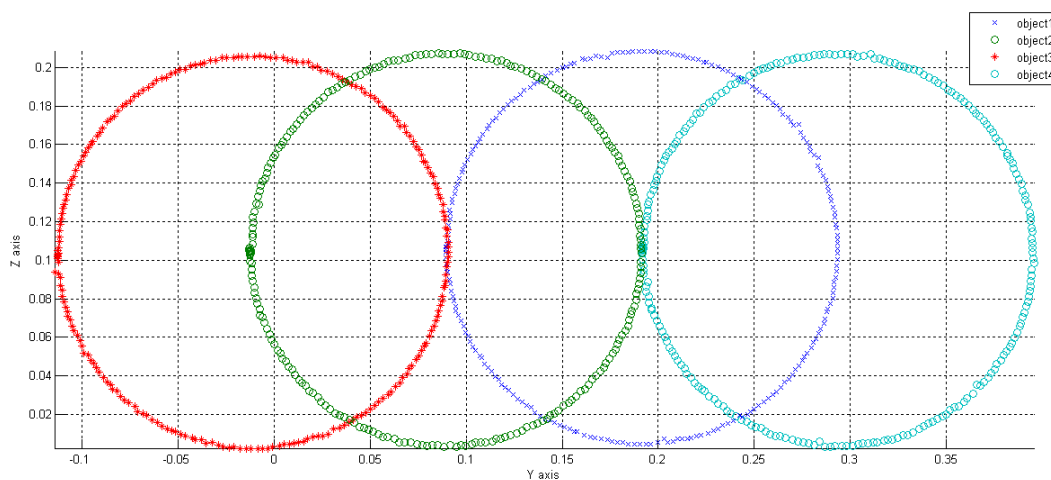


(ข)

รูปที่ 6.24 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ xy ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม  
0.05 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม

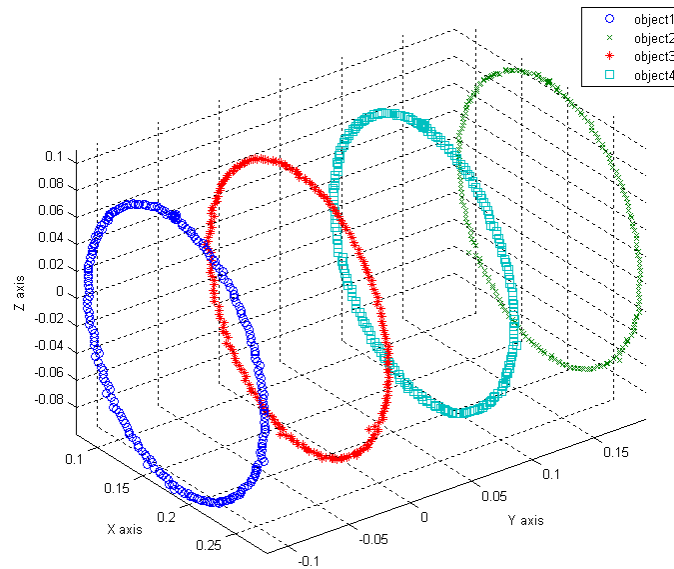


(ก)

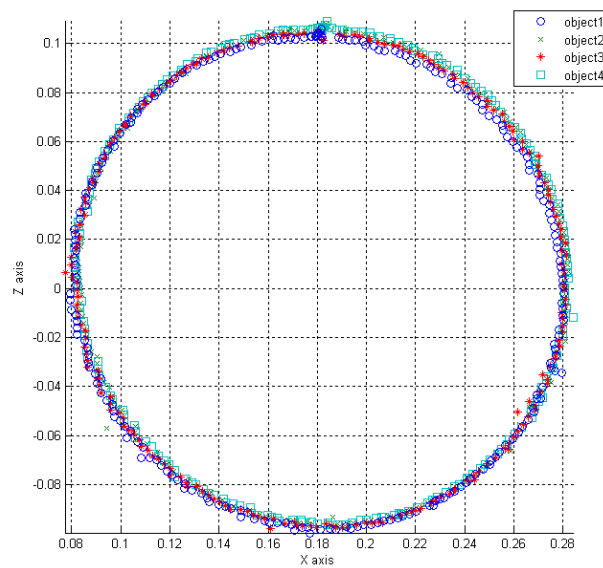


(ข)

รูปที่ 6.25 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ  $yz$  ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม  
0.05 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.26 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน เมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ  $zx$  ของแขนกล PA10-7C ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.05 เรเดียนต่อวินาที (ก) ภาพใน 3 มิติ และ (ข) ภาพตั้งฉากกับระนาบของวงกลม

### 6.3 การติดตามวัตถุเมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ

การทดลองนี้เป็นการติดตามวัตถุเมื่อเคลื่อนที่อย่างอิสระใน 3 มิติโดยใช้ทรงกลมเปล่งแสง 3 และ 4 อันเป็นวัตถุเป้าหมายตามลำดับ โดยทดลองจำนวน 2 ครั้งซึ่งมีรูปแบบการเคลื่อนที่แตกต่างกัน ลักษณะของการเคลื่อนที่ที่วัตถุเป้าหมายในการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.27 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.28-6.31 โดยใช้พารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัวที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.2

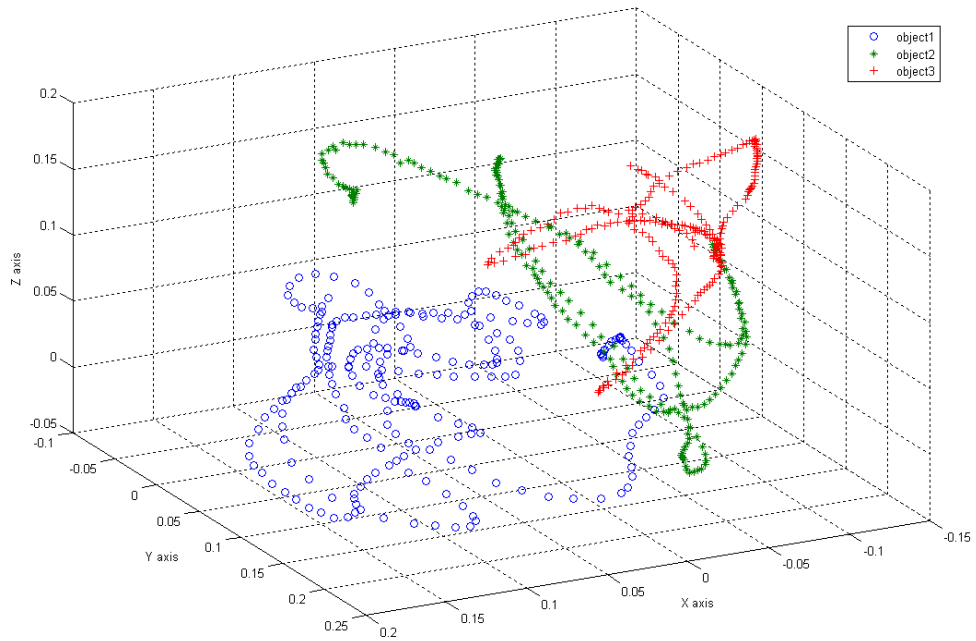
ตาราง 6.2 พารามิเตอร์ของกล้องที่ใช้ในการทดลองการติดตามการเคลื่อนที่แบบอิสระใน 3 มิติ

พารามิเตอร์	กล้องหมายเลข 7410265	กล้องหมายเลข 7411015	กล้องหมายเลข 7411064	กล้องหมายเลข 7411065
$\alpha_x$	1164.1080	1258.5271	1114.2163	1281.0413
$\alpha_y$	1164.1080	1258.5271	1114.2163	1281.0413
$s$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$u_0$	648.5891	640.9390	614.7711	618.2582
$v_0$	454.2242	480.7562	495.7852	484.7876
$k_1$	0.04545	0.2301	0.0984	0.0534
$k_2$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$R_x$	2.0183	2.1251	1.9572	-1.5703
$R_y$	-2.1103	-1.6616	-2.2983	2.4160
$R_z$	0.0873	-0.2758	0.4521	-0.6918
$t_x$	0.0300	0.0784	0.1145	0.0648
$t_y$	0.0691	0.0553	0.0394	0.0524
$t_z$	1.2307	1.4386	1.2336	1.4714

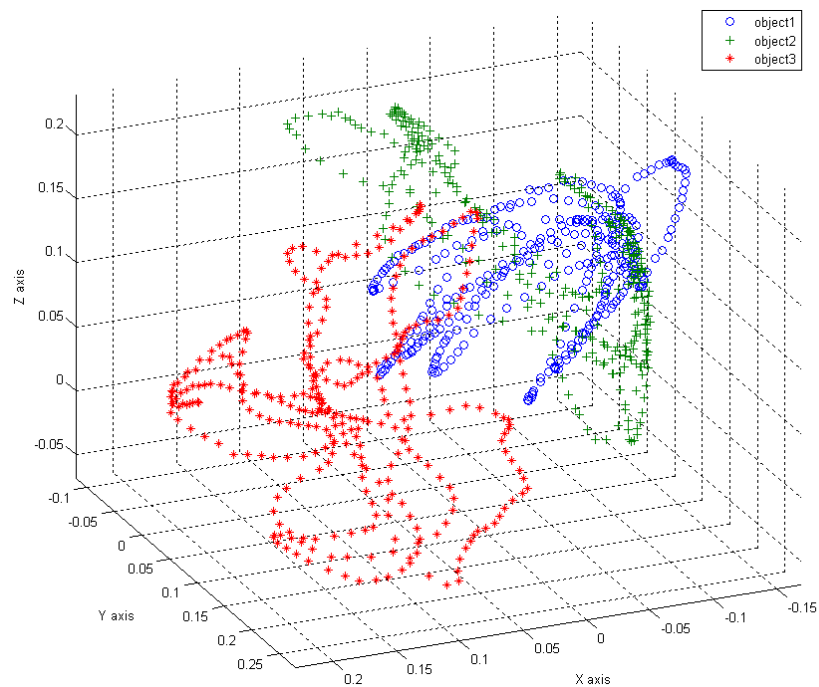


รูปที่ 6.27 การเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายอย่างอิสระใน 3 มิติ



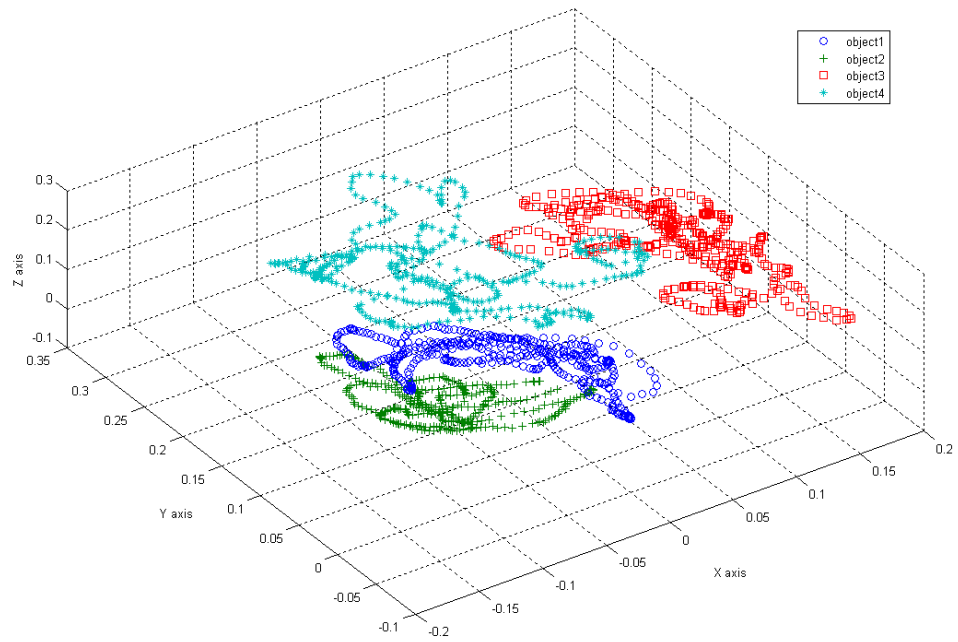


รูปที่ 6.28 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 1

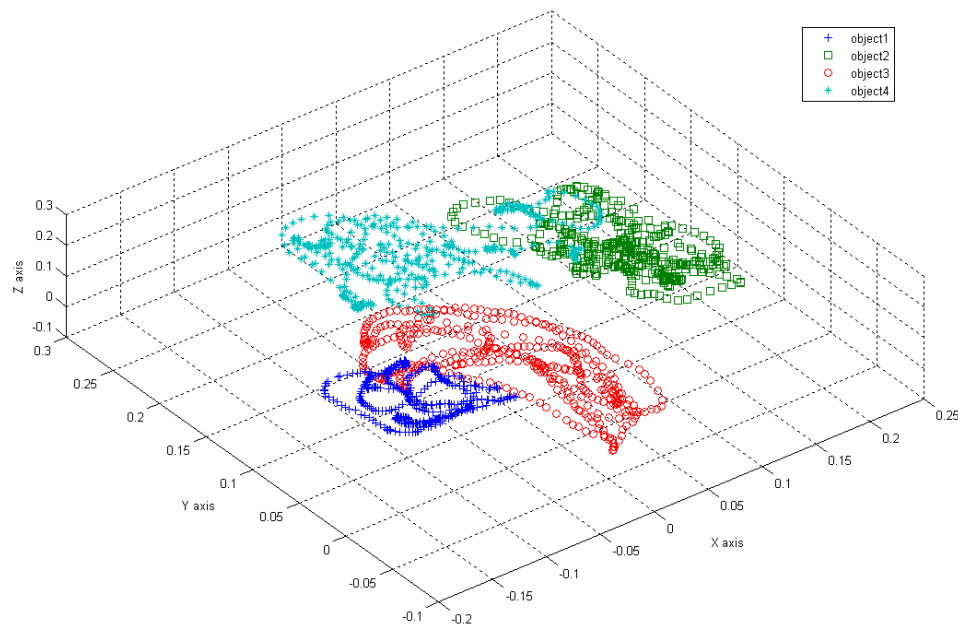


(ข)

รูปที่ 6.29 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 3 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 2



รูปที่ 6.30 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 1



รูปที่ 6.31 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบในการติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุ 4 อัน  
เมื่อเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 2

#### 6.4 การทดสอบความแม่นยำของระบบ

ในการทดสอบความแม่นยำของระบบได้ใช้ทรงกลมเปล่งแสง 2 อันที่ถูกเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็งเข้ากับก้านไม้อัด โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลมทั้งสองที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัสที่มีความแม่นยำสูง (หัวข้อ 2.4.7) เท่ากับ 99.95 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการอ้างอิง เมื่อทดสอบโดยเคลื่อนที่ก้านของวัตถุภายในปริมาตรทำงานของระบบซึ่งผ่านการสอบเทียบและได้ค่าพารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัวแสดงในตารางที่ 6.3 และให้ระบบที่พัฒนาขึ้นติดตามการเคลื่อนที่และบันทึกตำแหน่งของวัตถุทั้งสองแบบต่อเนื่องกันจำนวน 100 จังหวะ พิกัดของวัตถุที่ได้นำมาคำนวณระยะทางระหว่างทรงกลมและสามารถคำนวณความผิดพลาดเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัสทั้ง 100 ค่า ความผิดพลาดที่ได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 6.4 พบว่ามีความผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

ตาราง 6.3 พารามิเตอร์ของกล้องที่ใช้ในการทดสอบความแม่นยำของระบบ

พารามิเตอร์	กล้องหมายเลข 7410265	กล้องหมายเลข 7411015	กล้องหมายเลข 7411064	กล้องหมายเลข 7411065
$\alpha_x$	1031.5291	1075.5127	1148.1029	1281.0413
$\alpha_y$	1031.5291	1075.5127	1148.1029	1281.0413
$s$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$u_0$	643.2082	666.7797	682.5910	618.2582
$v_0$	518.1759	517.2433	461.6578	484.7876
$k_1$	0.2115	0.4195	0.5129	0.0534
$k_2$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$R_x$	2.0497	2.0272	1.9541	-1.5703
$R_y$	-1.8989	-1.6771	-2.0817	2.4160
$R_z$	0.2217	-0.1166	0.6135	-0.6918
$t_x$	0.0382	0.0192	0.0245	0.0648
$t_y$	0.0345	0.0360	0.0806	0.0524
$t_z$	1.0725	1.2354	1.2393	1.4714

ตาราง 6.4 ความผิดพลาดระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณระยะทางระหว่างทรงกลม 2 อันโดยใช้ระบบที่พัฒนาขึ้น เทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัส

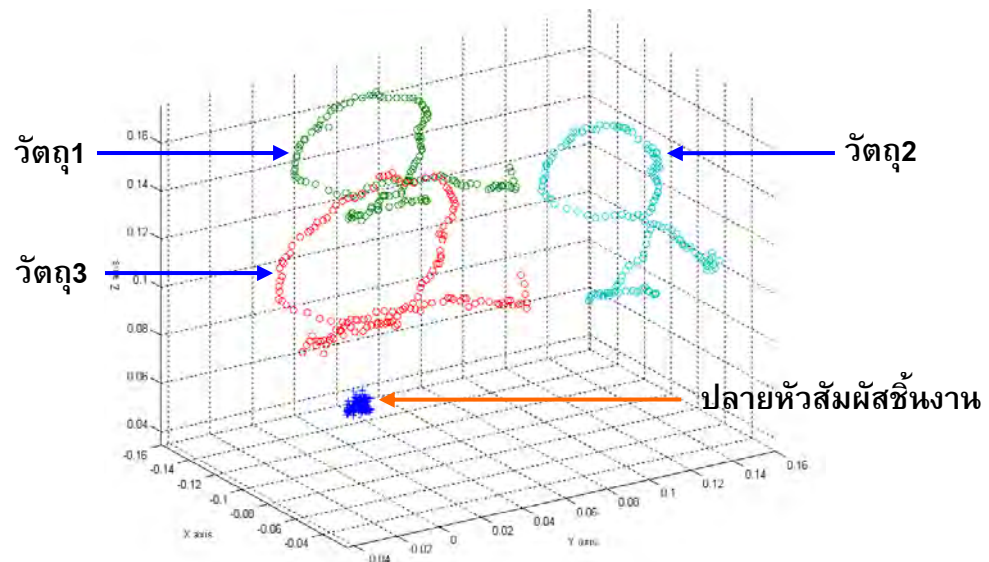
ค่าทางสถิติ	ความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
ค่าเฉลี่ย	0.247245
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.184489
ค่าสูงสุด	0.768799

## 6.5 การประยุกต์สำหรับการติดตามหัวสัมผัสชิ้นงาน

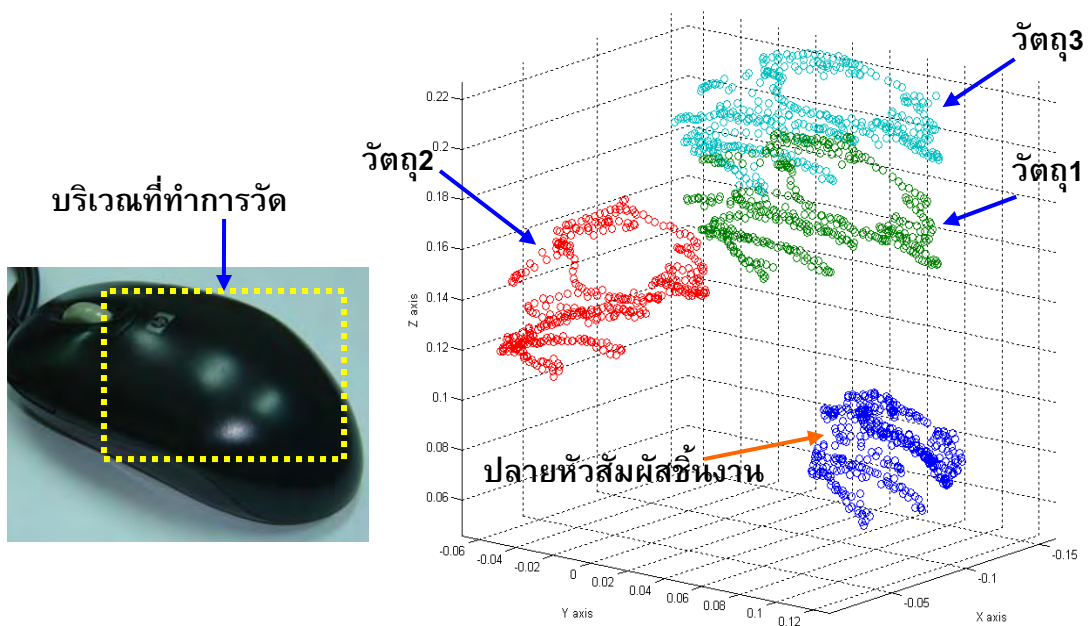
การทดลองนี้เป็นการติดตามหัวสัมผัสชิ้นงานเมื่อเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆ เพื่อทดสอบความสามารถในการนำพิกัดที่ได้จากการติดตามของระบบมาคำนวณพิกัดที่ปลายของหัวสัมผัสชิ้นงาน สำหรับพารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัวที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 6.5 ส่วนผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6.32-6.34

ตาราง 6.5 พารามิเตอร์ของกล้องที่ใช้ในการทดลองการติดตามหัวสัมผัสชิ้นงาน

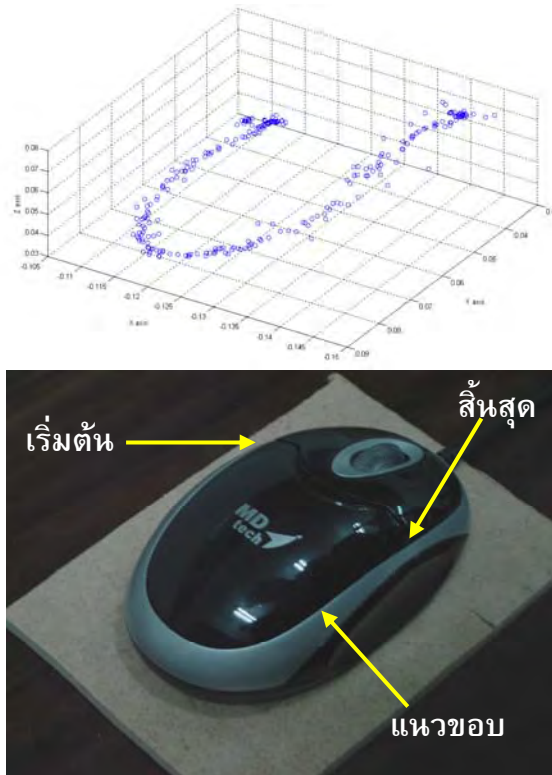
พารามิเตอร์	กล้องหมายเลข 7410265	กล้องหมายเลข 7411015	กล้องหมายเลข 7411064	กล้องหมายเลข 7411065
$\alpha_x$	1027.5212	1204.0759	1166.9662	1383.6277
$\alpha_y$	1027.5212	1204.0759	1166.9662	1383.6277
$s$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$u_0$	646.4901	663.7469	680.3404	662.2290
$v_0$	496.1582	492.8951	464.0525	413.4950
$k_1$	0.3336	0.2387	0.5105	0.0465
$k_2$	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
$R_x$	1.9758	2.1097	1.8619	-1.5994
$R_y$	-2.0057	-1.5621	-2.1945	2.4956
$R_z$	0.1708	-0.1332	0.6205	-0.8980
$t_x$	0.0347	0.0607	0.0399	0.0074
$t_y$	0.0263	0.0437	0.0782	0.1380
$t_z$	1.1014	1.3948	1.3082	1.6081



รูปที่ 6.32 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบและตำแหน่งปลายหัวสัมผัสชี้หน้าจอในการติดตามการเคลื่อนที่ของหัวสัมผัสชี้หน้าจอที่มีทรงกลมแปลงแสง 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่หมุนรอบจุดคงที่จุดหนึ่ง



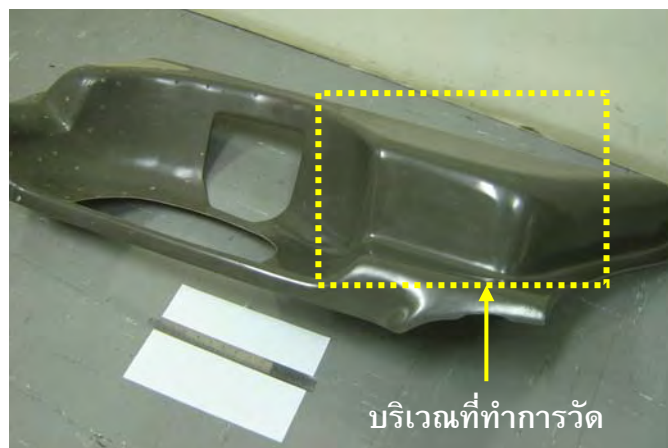
รูปที่ 6.33 ชิ้นงานต้นแบบและตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบและตำแหน่งปลายหัวสัมผัสชี้หน้าจอในการติดตามการเคลื่อนที่ของหัวสัมผัสชี้หน้าจอที่มีทรงกลมแปลงแสง 3 อันเมื่อเคลื่อนที่บนพื้นผิวเมาส์



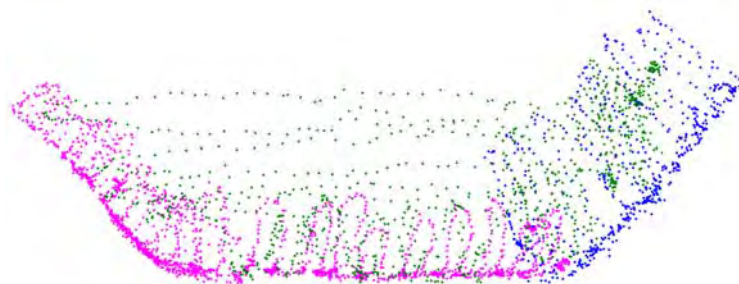
รูปที่ 6.34 ตำแหน่งปลายหัวสัมผัสชิ้นงานในการติดตามการเคลื่อนที่ของหัวสัมผัสชิ้นงานที่มีทรงกลมเปล่งแสง 3 อัน เมื่อเคลื่อนที่บริเวณขอบของเมาส์

## 6.6 การเชื่อมโยงพิกัดจากการวัดหลายครั้ง

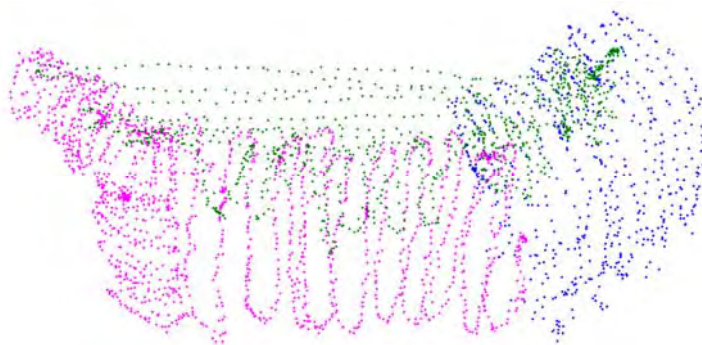
การทดลองนี้เป็นการทดลองเชื่อมโยงผลการวัดพิกัดจากการวัดพิกัดพื้นผิวหลายตำแหน่งเข้าด้วยกัน โดยชิ้นงานที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 6.35



รูปที่ 6.35 ชิ้นงานขนาดใหญ่ที่ใช้ในการทดลองการเชื่อมโยงพิกัด



(ก)



(ข)

รูปที่ 6.36 ผลการทดลองการเชื่อมโยงพิกัดจากการวัดชิ้นงานขนาดใหญ่จำนวน 3 ครั้ง  
(ก) มุมมองด้านบน และ (ข) มุมมอง 3 มิติ

จากผลการทดลองในรูปที่ 6.36 พบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นสามารถเชื่อมโยงพิกัดจากการวัดหลายครั้งได้โดยการใช้หัวสัมผัสชิ้นงานในการอ้างอิงตำแหน่งบนชิ้นงานเพื่อใช้ในการเชื่อมโยงพิกัด โดยมีความผิดพลาดของผลที่ได้อยู่เล็กน้อย เนื่องจากความผิดพลาดในการสร้างหัวสัมผัสชิ้นงาน ซึ่งสามารถปรับปรุงได้โดยการสร้างหัวสัมผัสชิ้นงานให้มีความถูกต้องตามแบบมากขึ้น

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบติดตามวัตถุหลายวัตถุในเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัวบนระบบพีซีคลัสเตอร์ ซึ่งสถาปัตยกรรมของพีซีคลัสเตอร์ โปรแกรมประยุกต์ มอดูลการประมวลผล และอัลกอริทึมในการติดตามวัตถุได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนการทำงานของระบบ ในการทดลองได้ใช้พีซีคลัสเตอร์ที่ประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์สองเครื่องที่เชื่อมต่อกันผ่านเส้นใยนำแสงโดยใช้แผ่นวงจรเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอ ในการประมวลผลภาพที่ได้จากกล้อง 4 ตัวที่มีการประสานการถ่ายภาพทางฮาร์ดแวร์ วัตถุเป้าหมายสำหรับการติดตามเป็นวัตถุทรงกลมเปล่งแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 20 มิลลิเมตร จำนวน 3 อัน และ 4 อันที่เคลื่อนที่ใน 3 มิติในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ เส้นตรง วงกลมในระนาบ และการเคลื่อนที่อิสระใน 3 มิติ ผลที่ได้พบว่า ระบบสามารถจำแนกวัตถุ คำนวณพิกัด 3 มิติ และติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุแต่ละวัตถุได้อย่างถูกต้อง โดยมีความถี่ในการติดตามอยู่ในช่วง 10-14 เฮิร์ตซ์ ซึ่งขึ้นอยู่กับภาระการทำงานของคอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องในขณะนั้น สำหรับความแม่นยำในการคำนวณพิกัด 3 มิติของระบบพบที่มีความผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

ในการประยุกต์ระบบสำหรับงานวัดพื้นผิว ได้ออกแบบหัวสัมผัสซึ่งงานสำหรับเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวซึ่งงานที่ต้องการ โดยหัวสัมผัสซึ่งงานจะมีทรงกลม 3 อันเป็นส่วนประกอบเพื่อใช้เป็นวัตถุเป้าหมายสำหรับการติดตามของระบบ เมื่อนำมาคำนวณหาเมทริกซ์การแปลงระหว่างระบบพิกัดของระบบกล้องกับระบบพิกัดของหัวสัมผัสซึ่งงานสามารถคำนวณหาพิกัดที่ปลายของหัวสัมผัสซึ่งงานได้อย่างถูกต้อง ซึ่งแสดงได้จากผลการทดลองในการวัดซึ่งงานในรูปแบบต่างๆ โดยหากปรับปรุงคุณภาพการผลิตหัวสัมผัสซึ่งงานให้ได้ค่าพารามิเตอร์ของความยาวตามที่ได้ออกแบบไว้และมีความแข็งเกร็งมากขึ้น จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวัดพิกัดพื้นผิวที่ต้องการได้

ในการเชื่อมโยงพิกัดที่ได้จากการวัดหลายครั้งเข้าด้วยกัน ได้ใช้หัวสัมผัสซึ่งงานในการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงจำนวน 3 จุด ต่อการเชื่อมโยงพิกัดใน 2 ตำแหน่งเข้าด้วยกัน ผลการทดลองพบว่าสามารถเชื่อมโยงพิกัดได้อย่างถูกต้อง โดยมีความผิดพลาดในการเชื่อมโยงเล็กน้อยเนื่องจากความแม่นยำในการสร้างหัวสัมผัสซึ่งงานดังที่กล่าวมาแล้ว และการกำหนดตำแหน่งอ้างอิงอาจมีความคลาดเคลื่อนได้เนื่องจากการกำหนดด้วยมือ



### 7.1.1 ข้อดีของระบบที่พัฒนาขึ้น

สามารถรองรับการเพิ่มจำนวนกล้องเข้าไปในระบบซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในระบบกล้องหลายตัว เนื่องจากจะได้มุมมองของวัตถุมากขึ้น ทำให้สามารถรองรับการใช้งานที่หลากหลาย และสามารถใช้งานในสิ่งแวดล้อมที่มีความซับซ้อนหรือในงานที่มีการบดบังวัตถุมาก โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถเพิ่มกล้องในระบบด้วยการเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์รีโมท ซึ่งจากการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ คอมพิวเตอร์หนึ่งเครื่องสามารถเชื่อมต่อกับกล้องได้มากกว่าหนึ่งตัว ซึ่งขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์เครื่องนั้นในการรองรับการประมวลผลภาพที่ได้จากกล้องที่เชื่อมต่ออยู่ ซึ่งต่างจากระบบพีซีคลัสเตอร์อื่นๆ ที่มีผลการวิจัยมาก่อนหน้านี้ส่วนใหญ่ที่คอมพิวเตอร์หนึ่งเครื่องจะถูกจับคู่เพื่อรองรับการประมวลผลสำหรับกล้องเพียงหนึ่งตัวเท่านั้น

การออกแบบส่วนประมวลผลเป็นมอดูล ทำให้ง่ายต่อการปรับปรุงและพัฒนาาระบบ โดยได้แบ่งประเภทการทำงานของระบบเพื่อทำหน้าที่ต่างๆ กัน เช่น มอดูลกล้องทำหน้าที่เกี่ยวกับกล้องและการถ่ายภาพ มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติทำหน้าที่คำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุแต่ละวัตถุ เป็นต้น โดยแต่ละส่วนจะทำหน้าที่เป็นอิสระต่อกัน รวมทั้งในการออกแบบระบบได้ลดการประสานข้อมูลในระดับต่ำซึ่งจะมีในระบบพีซีคลัสเตอร์อื่นๆ ที่มุ่งเน้นการสร้างพีซีคลัสเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีเครื่องคอมพิวเตอร์ในระดับสิบเครื่องและทำการประมวลผลแบบขนานซึ่งทำให้มีความซับซ้อนในการออกแบบระบบประสานข้อมูลมาก

### 7.1.2 ข้อจำกัดของระบบที่พัฒนาขึ้น

เนื่องจากโครงสร้างของระบบเป็นแบบรวมศูนย์โดยมีคอมพิวเตอร์หนึ่งเครื่องทำหน้าที่ในการควบคุมกระบวนการทั้งหมดอาจทำให้เกิดปัญหาคอขวดในประมวลผลและการสื่อสารระหว่างเครื่องได้เมื่อเพิ่มจำนวนกล้องหรือคอมพิวเตอร์เข้าไปในระบบเป็นจำนวนมาก ซึ่งข้อจำกัดนี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับปรุงให้เครื่องรีโมทรับผิดชอบการประมวลผลมากขึ้นเพื่อแบ่งเบาภาระในเครื่องโลคอล โดยอาศัยประสิทธิภาพที่สูงขึ้นของคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน หรือการกระจายภาระการประมวลผลในเครื่องโลคอลบางส่วนไปยังคอมพิวเตอร์เครื่องอื่นโดยเฉพาะ

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการติดตามวัตถุ หากวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงหรือวัตถุอยู่ในจังหวะที่ไม่สามารถคำนวณพิกัด 3 มิติได้จะทำให้การติดตามวัตถุมีความผิดพลาดได้ ซึ่งหากปรับปรุงระบบทำนายการเคลื่อนที่ของวัตถุให้มีเสถียรภาพมากขึ้นจะช่วยให้การติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่ในแบบต่างๆ มีความคงทนมากขึ้นและสามารถทำงานในสภาวะการติดตามที่มีความซับซ้อนได้ดีขึ้น

สำหรับความแม่นยำในการวัดสามารถปรับปรุงโดยการใช้กล้องที่มีความละเอียดของภาพสูงขึ้น และการปรับปรุงวิธีการตรวจหาวัตถุในภาพ เนื่องจากวิธีการที่ใช้อยู่คือการแปลงฮัฟวงกลมมีความละเอียดในการตรวจหาวัตถุในระดับพิกเซล หากใช้วิธีการตรวจหาวัตถุที่มีความละเอียดในระดับต่ำกว่าพิกเซลจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการตรวจหาวัตถุซึ่งมีผลโดยตรงต่อการคำนวณพิกัด 3 มิติของระบบ

ในทางซอฟต์แวร์ หากมีการปรับปรุงโค้ดในส่วนต่างๆ ของโปรแกรมให้มีประสิทธิภาพและความเร็วในการทำงานสูงขึ้น จะช่วยเพิ่มความเร็วในการทำงานของระบบได้มาก รวมทั้งการพัฒนาเทคนิคต่างๆ เพื่อลดการสื่อสารระหว่างเครื่อง โดยอาจรวมการติดต่อสื่อสารที่ต้องทำหลายครั้ง ให้เป็นการส่งข้อมูลเพียงครั้งเดียวเพื่อช่วยให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

## รายการอ้างอิง

- [1] Uttamang, K. A Real-time 3D Tracking System using Multiple Cameras. Doctoral dissertation, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, 2006.
- [2] Arita, D., Hamada, Y., and Taniguchi, R. A Real-Time Distributed Video Image Processing System on PC-Cluster. in Proceedings of International Conference of the Austrian Center for Parallel Computation, pp. 296-305, 1999.
- [3] Arita, D., Yonemoto, S., and Taniguchi, R. Real-time Computer Vision on PC-cluster and Its Application to Real-time Motion Capture. in Proceedings of IEEE Workshop on Computer Architectures for Machine Perception, pp. 205-214, 2000.
- [4] Arita, D., and Taniguchi, R. RPV-II: A stream-based real-time parallel vision system and its application to real-time volume reconstruction. in Proceedings of Second International Workshop on Computer Vision System, pp. 174-189, 2001.
- [5] Ueda, M., Arita, D., and Taniguchi, R. Implementing a Real-time Free-viewpoint Video System on a PC-cluster. in Proceedings of Seventh International Workshop on Computer Architecture for Machine Perception, pp. 167-171, 2005.
- [6] Svoboda, T., Hug, H., and Van Gool, L. ViRoom – low cost synchronized multicamera system and its self-calibration. Pattern Recognition, 24th DAGM Symposium, number 2449 in LNCS, pp. 515-522. Springer, September 2002.
- [7] Doubek, P., Svoboda, T., and Van Gool, L. Monkeys – A Software Architecture for ViRoom – Low-Cost Multicamera System. 3<sup>rd</sup> International Conference on Computer Vision Systems, number 2626 in LNCS, pp. 386-395. Springer, April 2003.
- [8] Velipasalar, S., Schlessman, J., Chen, C.Y., Wolf, W., and Singh, J. A Scalable Clustered Camera System for Multiple Object Tracking. EURASIP Journal on Image and Video Processing, Vol. 2008, Article ID 542808, 22 pages, 2008.
- [9] Kurihara, K., Hoshino, S., Yamane, K. and Nakamura, Y. Optical Motion Capture System with Pan-Tilt Camera Tracking and Realtime Data Processing. in Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol.2, pp.1241-1248, 2002.
- [10] Pintaric, T., and Kaufmann, H. Affordable infrared-optical pose-tracking for virtual and augmented reality. in Proceedings of Trends and Issues in Tracking for Virtual Environments Workshop, IEEE VR 2007, Charlotte, NC, USA, 2007.

- [11] Triggs, B., McLauchlan, P., Hartley, R., and Fitzgibbon, A. Bundle Adjustment – A Modern Synthesis. Vision Algorithms'99, LNCS 1883, 298-372. Berlin : Springer-Verlag, 2000.
- [12] Guerra-Filho, G. Optical motion capture: Theory and implementation. Journal of Theoretical and Applied Informatics (RITA), Brazilian Computing Society, 12(2), 2005: 61-89.
- [13] Hartley, R., and Zisserman, A. Multiple view geometry in computer vision. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [14] Dorfmueller-Ulhaas, K. Robust optical user motion tracking using a Kalman filter. Technical Report 2003-6, University of Augsburg, 2003.
- [15] วันชัย ล่องธารทอง. ระบบติดตามอนุภาคใน 3 มิติโดยใช้ภาพสเตอริโอ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [16] Sangveraphunsiri, V. and Longtantong, W., A 3D Particle Tracking System Using Stereo Vision, Thai Robot Society Conference on Robotics and Industrial Technology, pp 55-66, 2006.
- [17] Santos, P.C., Stork, A., Buaes, A., Pereira, C.E., and Jorge, J. A real-time marker-based multiple camera tracking solution for virtual reality applications. Journal of Real-Time Image Processing, 5, 2(2010): 121-128.
- [18] Zhang, Z. Camera Calibration. In Medioni, G. and Kang, S.B., editors., Emerging Topics in Computer Vision, Chapter 2, pp. 4-43, Prentice Hall, 2004.
- [19] Tsai, R. A. Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology using Off-The-Shelf TV Cameras and Lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation, 3, 4(1987): 323-344.
- [20] Hough, P.V.C. Method and means for recognizing complex patterns. U.S. Patent 3,069,654, December 18, 1962.
- [21] Jain, R., Kasturi, R., and Schunck, B.G. Machine Vision. Singapore: McGraw-Hill, 1995.
- [22] Arun, K.S., Huang, T.S., and Blostein, S.D. Least-squares fitting of two 3-D point sets. IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 9:699-700, 1987.
- [23] Larman, C. Applying UML and Patterns: An Introduction to Object-Oriented Analysis and Design and Iterative Development. 3rd ed. Prentice Hall, 2004.

ภาคผนวก

## คณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

### 1 พิกัดเอกพจน์ (Homogeneous Coordinate)

โดยปกติ จุดพิกัด 2 มิติในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนสามารถแสดงได้ด้วยคู่อันดับในลักษณะ  $(x, y)$  หรือเวกเตอร์สดมภ์ขนาด  $2 \times 1$  ในลักษณะ  $[x \ y]^T$  โดยที่  $x$  และ  $y$  เป็นจำนวนจริง ในกรณีของระบบพิกัดเอกพจน์จะทำการเพิ่มมิติขึ้นอีก 1 มิติต่อท้ายเข้าไป โดยให้  $(x, y, 1)$  ในระบบพิกัดเอกพจน์เป็นจุดเดียวกับ  $(x, y)$  ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน และในกรณีที่มิติที่เพิ่มขึ้นมาใหม่นี้มีค่าไม่เท่ากับ 1 จะกำหนดให้  $(x, y, 1)$  และ  $(kx, ky, k), k \neq 0$  ในระบบพิกัดเอกพจน์แทนจุดเดียวกันกับ  $(x, y)$  ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน สำหรับในกรณีของจุดพิกัดใน 3 มิติก็เช่นเดียวกันโดยทำการเพิ่มพิกัดขึ้นอีก 1 มิติเข้าไปที่ด้านท้าย นั่นคือพิกัด  $(x, y, z)$  ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนเขียนแทนด้วย  $(x, y, z, 1)$  ในระบบพิกัดเอกพจน์ ข้อดีของการใช้พิกัดเอกพจน์ คือ ทำให้สามารถเขียนแสดงสมการและคำนวณได้ง่ายกว่าการเขียนด้วยระบบพิกัดคาร์ทีเซียน เช่น สมการการฉาย (projection equation) เมื่อเขียนในพิกัดเอกพจน์จะสามารถแสดงได้ด้วยการคูณกันของเมทริกซ์เท่านั้น

### 2 การหาค่าต่ำสุดแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Minimization)

กำหนดให้มีสมการความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชันระหว่างค่าที่วัดกับค่าพารามิเตอร์

$$\mathbf{X} = \mathbf{f}(\mathbf{P}) \quad (1)$$

โดย  $\mathbf{X}$  คือเวกเตอร์ของค่าวัด (measurement vector) ใน  $\mathbb{R}^n$

$\mathbf{P}$  คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ใน  $\mathbb{R}^m$

ต้องการหาเวกเตอร์ของพารามิเตอร์  $\hat{\mathbf{P}}$  ที่สามารถประมาณค่า  $\mathbf{X}$  ได้ใกล้เคียงที่สุดหรือกล่าวอีกอย่างว่าต้องการหา  $\hat{\mathbf{P}}$  ที่ทำให้  $\mathbf{X} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{P}}) - \boldsymbol{\varepsilon}$  โดย  $\|\boldsymbol{\varepsilon}\|$  มีค่าน้อยที่สุด

แต่ก่อนอื่นขอกล่าวถึงการหาค่าเหมาะที่สุด (optimization) ของฟังก์ชันหลายตัวแปร โดยที่ต้องการหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชันค่าจริง  $g(\mathbf{P})$  และสมมติว่าทราบค่าเริ่มต้นของเวกเตอร์พารามิเตอร์เป็น  $\mathbf{P}_0$  เนื่องจากฟังก์ชัน  $g(\mathbf{P})$  สามารถเขียนการกระจายอนุกรมของเทย์เลอร์รอบจุด  $\mathbf{P}_0$

$$g(\mathbf{P}_0 + \boldsymbol{\Delta}) = g + g_p \boldsymbol{\Delta} + \boldsymbol{\Delta}^T g_{pp} \boldsymbol{\Delta} / 2 + \dots \quad (2)$$

สัญลักษณ์ตัวห้อย  $p$  แทนการหาอนุพันธ์และแทนค่าที่จุด  $\mathbf{P}_0$

เพื่อหาค่าเหมาะที่สุดของฟังก์ชัน  $g(\mathbf{P})$  จะทำการหาอนุพันธ์ของสมการ (2) เทียบกับ  $\boldsymbol{\Delta}$

$$0 = g_{\mathbf{P}} + g_{\mathbf{PP}}\Delta$$

ทำให้ได้สมการอัปเดตค่าพารามิเตอร์ในแต่ละรอบทำซ้ำเป็น

$$g_{\mathbf{PP}}\Delta = -g_{\mathbf{P}} \quad (3)$$

โดยที่  $g_{\mathbf{PP}}$  คือ เมทริกซ์ของอนุพันธ์อันดับสองของ  $g$  หรือเรียกว่าเฮสเซียน (Hessian) ของ  $g$

เมื่อทำการคำนวณหาค่าตอบ  $\Delta$  แล้ว ทำการปรับค่าเวกเตอร์พารามิเตอร์  $\mathbf{P}$

$$\mathbf{P}_{i+1} = \mathbf{P}_i + \Delta_i \quad (4)$$

จากค่าพารามิเตอร์ใหม่นี้จะถูกใช้เป็นค่าเริ่มต้นในรอบทำซ้ำต่อไป กระทำซ้ำจนกระทั่งค่า  $\Delta$  มีค่าน้อยกว่าค่าขีดแบ่งค่าหนึ่งซึ่งถือว่า  $\mathbf{P}$  ในรอบทำซ้ำสุดท้ายเป็นพารามิเตอร์ที่ทำให้  $g(\mathbf{P})$  มีค่าเหมาะที่สุด ผลลัพธ์จากกระบวนการทำซ้ำอาจเป็นไปได้ทั้งการลู่เข้าและลู่ออก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้น  $\mathbf{P}_0$  โดยที่ถ้าค่าเริ่มต้น  $\mathbf{P}_0$  มีค่าใกล้เคียง  $\hat{\mathbf{P}}$  จะมีแนวโน้มที่จะลู่เข้ามาก

ต่อไปพิจารณาฟังก์ชันต้นทุนอีกแบบที่พบบ่อยในปัญหาการหาค่าต่ำสุดแบบไม่เชิงเส้น

$$g(\mathbf{P}) = \frac{1}{2} \|\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{P})\|^2 = \frac{1}{2} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{P})^T \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{P}) \quad (5)$$

$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{P})$  เป็นฟังก์ชันค่าเวกเตอร์ของตัวแปรพารามิเตอร์  $\mathbf{P}$  โดยเฉพาะกรณีที่  $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{P}) = \mathbf{f}(\mathbf{P}) - \mathbf{X}$

ดังนั้นสามารถคำนวณหาเวกเตอร์เกรเดียนต์ของฟังก์ชัน  $g$  ได้เป็น

$$g_{\mathbf{P}} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{P}}^T \boldsymbol{\varepsilon} \quad (6)$$

แต่  $\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathbf{P}} = \mathbf{f}_{\mathbf{P}} = \mathbf{J}$  โดยที่  $\mathbf{J}$  เป็นเมทริกซ์จาโคเบียนนิยามดังนี้

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial P_1} & \frac{\partial f_1}{\partial P_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial P_m} \\ \frac{\partial f_2}{\partial P_1} & \frac{\partial f_2}{\partial P_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial P_m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial P_1} & \frac{\partial f_n}{\partial P_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial P_m} \end{bmatrix} \quad (7)$$

จะได้

$$g_P = J^T \varepsilon \quad (8)$$

และสามารถคำนวณเฮสเซียนได้โดยการหาอนุพันธ์ของสมการ (6) อีกครั้ง

$$\begin{aligned} g_{PP} &= \varepsilon_P^T \varepsilon_P + \varepsilon_{PP}^T \varepsilon \\ &= J^T J + \varepsilon_{PP}^T \varepsilon \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } g_{PP} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g}{\partial p_1^2} & \frac{\partial^2 g}{\partial p_1 \partial p_2} & \cdots & \frac{\partial^2 g}{\partial p_1 \partial p_m} \\ \frac{\partial^2 g}{\partial p_2 \partial p_1} & \frac{\partial^2 g}{\partial p_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 g}{\partial p_2 \partial p_m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial^2 g}{\partial p_m \partial p_1} & \frac{\partial^2 g}{\partial p_m \partial p_2} & \cdots & \frac{\partial^2 g}{\partial p_m^2} \end{bmatrix}$$

วิธีการคำนวณเฮสเซียนตามสมการ (9) แล้วแก้สมการ (3) เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์คือวิธีของนิวตัน สิ่งที่ยากในการคำนวณนี้คือการคำนวณเฮสเซียน  $\varepsilon_{PP}$  และภายใต้สมมติฐาน  $\mathbf{f}(\mathbf{P})$  ฟังก์ชันเชิงเส้นอันเนื่องมาจากเมื่อพารามิเตอร์เข้าใกล้ค่าต่ำสุดแล้วเวกเตอร์  $\varepsilon$  จะเกือบมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับเวกเตอร์พารามิเตอร์  $\mathbf{P}$  ซึ่งทำให้เทอม  $\varepsilon_{PP}$  มีค่าประมาณเป็นเมทริกซ์ศูนย์ได้ ดังนั้นจะได้ค่า

$$g_{PP} = \varepsilon_P^T \varepsilon_P = J^T J \quad (10)$$

วิธีนี้คือวิธีของเกาส์-นิวตันซึ่งเป็นการประมาณเฮสเซียนด้วยค่า  $J^T J$

สำหรับวิธีการลดลงตามวิถีที่ชันที่สุด จะทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไปในทิศทางข้ามกับทิศทางของเกรเดียนต์ซึ่งเป็นทิศทางที่มีการเปลี่ยนแปลงค่าฟังก์ชันที่เร็วที่สุด ซึ่งจะได้

$$\lambda \Delta = -g_P$$

หรือเขียนอีกแบบได้เป็น

$$\lambda \Delta = -J^T \varepsilon \quad (11)$$

$\lambda$  เป็นค่าที่บ่งบอกถึงขนาดของแต่ละรอบทำซ้ำว่าจะให้มีการปรับค่าไปมากหรือน้อยเพียงใด

โดยสรุปแล้วสามารถสรุป 3 วิธีในการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันค่าจริงได้ดังนี้



วิธีของนิวตัน : สมการการอัปเดต

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \epsilon_{pp}^T \epsilon) \Delta = -\mathbf{J}^T \epsilon$$

วิธีของเกาส์-นิวตัน : สมการการอัปเดต

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J}) \Delta = -\mathbf{J}^T \epsilon$$

วิธีการลดลงตามวิถีที่ชันที่สุด : สมการการอัปเดต

$$\lambda \Delta = -\mathbf{J}^T \epsilon$$

### 3 เลเวนเบิร์ก-มาร์ควอดต์อัลกอริทึม (Levenberg-Marquardt algorithm)

เป็นเทคนิคการคำนวณแบบทำซ้ำที่ใช้สำหรับหาค่าต่ำสุดเฉพาะที่ของฟังก์ชันที่สามารถเขียนในรูปของผลรวมของฟังก์ชันไม่เชิงเส้น และอาจมองว่าเป็นวิธีผสมระหว่างวิธีการลดลงตามวิถีที่ชันที่สุด (steepest descent) และวิธีของเกาส์-นิวตัน (Gauss-Newton method) เมื่อคำตอบที่ได้ขณะนั้นอยู่ห่างจากคำตอบจริงแล้วขั้นตอนวิธีจะมีพฤติกรรมเหมือนวิธีการลดลงตามวิถีที่ชันที่สุด และเมื่อคำตอบที่ได้ขณะนั้นอยู่ใกล้คำตอบจริงขั้นตอนวิธีจะเปลี่ยนพฤติกรรมเป็นวิธีของเกาส์-นิวตัน สมการการอัปเดตจะเป็น

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \Delta = -\mathbf{J}^T \epsilon \quad (12)$$

โดยที่ค่า  $\lambda$  มีค่าเปลี่ยนแปลงไปแต่ละรอบทำซ้ำ โดยทั่วไปค่าเริ่มต้นจะมีค่า 0.001 เท่าของค่าเฉลี่ยของ  $\mathbf{N} = \mathbf{J}^T \mathbf{J}$  ค่า  $\Delta$  ที่คำนวณได้จะถูกนำไปปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่

$$\mathbf{P}_{i+1} = \mathbf{P}_i + \Delta_i \quad (13)$$

ถ้าค่าของ  $\Delta$  ที่คำนวณได้นำไปสู่การลดค่าผิดพลาด  $\Delta$  ที่คำนวณได้จะนำไปปรับค่าพารามิเตอร์ดังสมการที่ (13) แล้วทำการหาร  $\lambda$  ด้วยค่าคงตัวค่าหนึ่งเช่น 10 เพื่อใช้ในการคำนวณรอบถัดไป แต่ถ้าค่าของ  $\Delta$  นำไปสู่การเพิ่มค่าผิดพลาด จะทำการคูณ  $\lambda$  ด้วย 10 แล้วจึงทำการแก้สมการ (3) อีกครั้ง การที่  $\lambda$  มีค่าน้อยๆ สมการ (3) จะมีพฤติกรรมคล้ายวิธีของเกาส์-นิวตัน แต่เมื่อ  $\lambda$  มีค่ามาก สมการ (3) จะมีพฤติกรรมคล้ายวิธีการลดลงตามวิถีที่ชันที่สุด

### 4 การแยกค่าซิงกูลาร์ (Singular Value Decomposition)

เมทริกซ์  $\mathbf{A}$  ขนาด  $m \times n$  ที่มีสมาชิกเป็นจำนวนจริง สามารถทำการแยกค่าซิงกูลาร์เป็น

$$\mathbf{A} = \mathbf{UDV}^T \quad (14)$$

โดย  $\mathbf{U}$  เป็นเมทริกซ์ขนาด  $m \times m$

$\mathbf{D}$  เป็นเมทริกซ์ทแยงมุมขนาด  $m \times n$  ซึ่งสมาชิกในแนวทแยงมุมเป็นค่าซิงกูลาร์ต่างๆ  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$  ค่าลำดับชั้นของเมทริกซ์

$\mathbf{A}$  คือจำนวนค่าซิงกูลาร์ที่ไม่เป็นศูนย์

$\mathbf{V}$  เป็นเมทริกซ์ขนาด  $n \times n$

#### 4.1 การกำหนดเงื่อนไขบังคับเกี่ยวกับค่าลำดับชั้น

ตัวอย่างเช่น กำหนดให้  $A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{bmatrix}$  เมื่อทำการแยกค่าซิงกูลาร์

จะได้เป็น

$$A = \begin{bmatrix} -0.2148 & 0.8872 & 0.4082 \\ -0.5206 & 0.2496 & -0.8165 \\ -0.8263 & -0.3879 & 0.4082 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 16.8481 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0684 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.4797 & -0.7767 & -0.4082 \\ -0.5724 & -0.0757 & 0.8165 \\ -0.665 & 0.6253 & -0.4082 \end{bmatrix}^T$$

หมายความว่าเมทริกซ์  $\mathbf{A}$  มีค่าลำดับชั้นเป็น 2 เพราะค่าซิงกูลาร์ที่ไม่เป็นศูนย์มีจำนวน 2 ตัว คือ 16.8481 และ 1.0684 ในทางกลับกันก็สามารถปรับเมทริกซ์ให้สอดคล้องกับเงื่อนไขของค่าลำดับชั้น ตัวอย่างเช่นเมทริกซ์มูลฐานจะต้องมีค่าลำดับชั้นน้อยกว่า 3 แต่จากความผิดพลาดเชิงตัวเลขในการคำนวณ จะทำให้เมทริกซ์มูลฐานที่ได้มีแนวโน้มจะมีค่าลำดับชั้นเท่ากับ 3 ซึ่งเมื่อทำการแยกค่าซิงกูลาร์ของเมทริกซ์นี้จะพบว่าค่าซิงกูลาร์ตัวสุดท้ายจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์มาก ซึ่งจะสามารถทำการปรับให้เมทริกซ์นี้มีค่าลำดับชั้นเท่ากับ 2 ตามที่ควรจะเป็น ก็ให้ทำการแทนค่าซิงกูลาร์ตัวสุดท้ายด้วยศูนย์ แล้วทำการคูณกลับเพื่อให้ได้เมทริกซ์ที่มีความเหมาะสม

#### 4.2 แก่ระบบสมการเอกพันธ์เชิงเส้น

สมมติว่าต้องการแก้ปัญหาาระบบสมการเอกพันธ์เชิงเส้น จำนวน  $m$  สมการซึ่งประกอบด้วยตัวแปรไม่รู้ค่าจำนวน  $n$  ตัว

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{0} \quad (15)$$

โดยที่  $m \geq n - 1$  เมื่อไม่สนใจคำตอบ  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$  แล้ว ค่าลำดับชั้นของเมทริกซ์  $\mathbf{A}$  จะต้องมีค่าน้อยกว่าหรือ  $n - 1$  ซึ่งคำตอบที่ได้จะมีค่าขึ้นอยู่กับสเกล และเมื่อค่าลำดับชั้นเท่ากับ  $n - 1$  จึงจะมีคำตอบ  $\mathbf{x}$  เพียงคำตอบเดียว (ยังคงมีค่าขึ้นอยู่กับสเกล) แต่เนื่องจากผลของสัญญาณรบกวนและความผิดพลาดในการคำนวณเชิงตัวเลขและจากการวัดทำให้ในทางปฏิบัติเมทริกซ์  $\mathbf{A}$  มีแนวโน้มที่จะมีค่าลำดับชั้นเท่ากับ  $n$  ในกรณีนี้จะเป็นการแก้หาคำตอบที่

ให้ค่าผิดพลาดกำลังสองน้อยสุด ซึ่งคำตอบของปัญหานี้จะมีค่าเป็นสัดส่วนกับเวกเตอร์เงาของเมทริกซ์  $A^T A$  ที่สอดคล้องกับค่าเงาที่มีค่าเท่ากับน้อยที่สุด การหาคำตอบด้วยวิธีนี้จะมี ความผิดพลาดจากการปัดเศษ เนื่องจากจะต้องคำนวณ  $A^T A$  ก่อนแล้วทำการแยกค่าเงาเงา อีกครั้ง อีกวิธีที่เทียบเท่ากันคือ คำตอบที่ได้จากการแยกค่าซิงกูลาร์ ซึ่งคำตอบจะตรงกับเวกเตอร์สดมภ์สุดท้ายของเมทริกซ์  $V$  ที่ได้จากการแยกค่าซิงกูลาร์ของเมทริกซ์  $A = UDV^T$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่สอดคล้องกับค่าซิงกูลาร์ตัวที่มีค่าน้อยที่สุด คำตอบที่ได้ตามวิธีนี้จะเป็นคำตอบของการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน  $\|Ax\|$  ภายใต้ข้อบังคับ  $\|x\|=1$  และเป็นคำตอบจากเมทริกซ์  $A$  โดยตรงทำให้ลดปัญหาการปัดเศษนี้ได้

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงศกร บำรุงไทยเกิดเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ.2522 เป็นชาว กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือเมื่อปีพ.ศ.2543 จากนั้นได้ศึกษาต่อจนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีพ.ศ.2548 และทำงานเป็นนักวิจัยประจำ Regional Center of Robotics Technology ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นระยะเวลา 1 ปี และได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีพ.ศ. 2549