

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การติดตามวัตถุหลายอันใน 3 มิติแบบเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว และพีซีคลัสเตอร์

Real-Time Multiple Objects Tracking in 3-D Space Using Multiple Cameras and a PC-Cluster

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ พงศกร บำรุงไทย

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889
E-Mail: Viboon.S@eng.chula.ac.th , reverserp@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอระบบติดตามวัตถุหลายอันแบบเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว วัตถุที่ใช้เป็นเป้าหมายได้แก่ทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน ซึ่งในการประยุกต์ของงานหลายประเภทได้ใช้เป็นเครื่องหมายสำหรับการติดตามเพื่อลดความซับซ้อนในขั้นตอนวิธีการตรวจหาวัตถุและช่วยให้กระบวนการติดตามวัตถุง่ายขึ้น ระบบที่พัฒนาขึ้นได้กระทำการพีซีคลัสเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลแบบเวลาจริงและให้มีความสามารถในการขยายระบบ พีซีคลัสเตอร์นี้ประกอบด้วยคอมพิวเตอร์สองเครื่องซึ่งข้อมูลจะถูกถ่ายโอนระหว่างเครื่องโดยใช้แผ่นวงจรเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอบีกับบัสพีซีไอ มอดูลการประมวลผลได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับควบคุมการทำงานของระบบที่ประกอบด้วย การจับภาพ การตรวจหาวัตถุ การจำแนกและติดตามวัตถุ การคำนวณพิกัด 3 มิติ การสื่อสารระหว่างพีซี และการสอบเทียบกล้อง พิกัด 3 มิติของแต่ละเป้าหมายจะถูกคำนวณในเครื่องคอมพิวเตอร์หลักภายหลังจากการจำแนกวัตถุที่สอดคล้องกันในแต่ละมุมมอง ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถติดตามวัตถุหลายอันที่เคลื่อนที่ใน 3 มิติได้แบบเวลาจริง โดยสามารถเพิ่มความถี่ในการติดตามได้เมื่อกระทำในสภาพแวดล้อมที่มีการจัดเตรียมไว้ล่วงหน้าอย่างเหมาะสม การเพิ่มความเข้มแสงในห้องที่ทำการวัดหรือการใช้เป้าหมายที่สามารถเปล่งแสงได้จะช่วยลดเวลาในการรับภาพ นอกจากนี้เมื่อทำการออกแบบและเพิ่มมอดูลเพิ่มเติมที่เหมาะสมให้แก่ระบบ ยังสามารถประยุกต์ใช้ในงานเฉพาะทาง เช่น การตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ การทำความเป็นจริงเสมือน หรือการวัดพิกัด 3 มิติเพื่อใช้ในการงานวิศวกรรมย้อนกลับ

คำหลัก: การติดตามวัตถุหลายอัน / ระบบกล้องหลายตัว / พีซีคลัสเตอร์

Abstract

This paper presents a real-time multiple objects tracking system using multiple cameras. The objects used as targets are in spherical shape with almost identical diameter. In many applications, such object has been used as marker to be tracked to reduce complexity of object detection algorithm and help to simplify tracking process. The developed system has been implemented on a PC-cluster to improve

real-time performance and provide system scalability. The cluster is constructed with two computers which data are transferred by using PCI-to-PCI data mover card. Processing modules have been developed to control system operations including image capturing, object detection, object identification and tracking, 3-D reconstruction, PC-to-PC communication, and camera calibration. After identifying corresponding objects in different views, 3-D coordinates of each target have been reconstructed in the main computer. Experimental results show that the system can track multiple objects moving in 3-D space in real-time. Tracking frequency can be increased with well prepared environment. Increasing light intensity in the measurement room or using active target, light inside spherical object, can be used to reduce camera exposure time. Furthermore, the system can be applied for specific tasks such as motion capture, virtual/augmented reality, or 3-D coordinate measuring for reverse engineering application when appropriate additional processing modules have been designed and added to the system.

Keywords: Multiple objects tracking / Multi-camera system / PC-cluster

1. บทนำ

การติดตามวัตถุด้วยภาพเป็นส่วนสำคัญในการประยุกต์ของงานหลายประเภท เช่น การตรวจจับการเคลื่อนไหวของมนุษย์ (motion capture) การติดตามเป้าหมายภาคพื้นดินจากอากาศยานไร้คนขับ และระบบระวังภัยอัตโนมัติ (automatic surveillance system) เป็นต้น การศึกษาและพัฒนาวิธีการรวมทั้งระบบเพื่อใช้ในการติดตามวัตถุจึงเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ทั้งนี้สิ่งที่เป็ปัจจัยสำคัญได้แก่ ลักษณะของวัตถุที่สนใจ ความซับซ้อนของวัตถุ จำนวนวัตถุ ลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุ ได้มีผลต่อลักษณะของระบบที่ใช้ในการติดตามวัตถุนั้นๆ

ในกรณีที่ต้องการติดตามวัตถุใน 3 มิติโดยทั่วไปจะใช้กล้อง 2 ตัวที่เรียกว่า สเตอริโอวิชั่น [1, 2] เพื่อให้สามารถคำนวณพิกัดใน 3 มิติของวัตถุในขณะที่เคลื่อนที่ได้ แต่มีข้อจำกัดคือ หากไม่ทราบตำแหน่งของวัตถุในภาพเนื่องจากวัตถุถูกบดบังหรือมีความผิดพลาดในการตรวจหาวัตถุในกล้องตัวใดตัวหนึ่งก็จะไม่สามารถคำนวณพิกัด 3 มิติได้ซึ่งอาจทำให้การติดตามวัตถุในจังหวะต่อไปล้มเหลวได้ ในการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการใช้กล้องหลายตัวเพื่อเพิ่มมุมมองไปยังวัตถุและลดโอกาสการถูกบดบัง

เนื่องจากการใช้กล้องหลายตัวจะทำให้ปริมาณข้อมูลเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะต้อง

ได้รับการประมวลผลจากหน่วยประมวลผลของระบบทำให้เกิดข้อจำกัดในการติดตามวัตถุแบบเวลาจริง ต่อมาจึงได้มีการใช้ การประมวลผลบนพีซีคลัสเตอร์ เช่นใน [3, 4] ซึ่งเป็นการนำคอมพิวเตอร์หลายเครื่องมาเชื่อมต่อและทำงานร่วมกัน ทำให้มีประสิทธิภาพในการประมวลผลสูงขึ้น โดยมีการแบ่งงานในการประมวลผลออกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อกระจายภาระไปยังแต่ละเครื่อง ซึ่งส่วนประสานการทำงานของระบบจะทำหน้าที่กำหนดจังหวะในการทำงานร่วมกันระหว่างเครื่อง

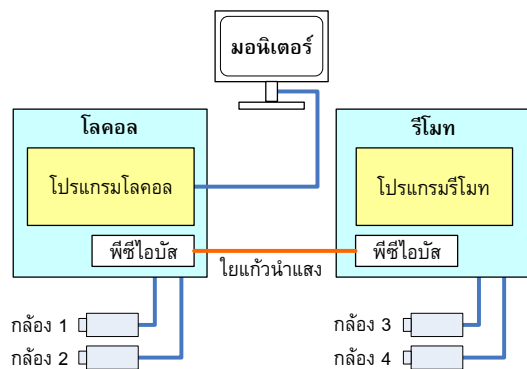
ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบติดตามวัตถุหลายอันโดยใช้กล้องหลายตัวซึ่งทำงานบนพีซีคลัสเตอร์ที่เชื่อมต่อกันโดยใช้แผ่นวงจรเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอกับบัสพีซีไอ โดยได้ออกแบบมอดูลการประมวลผลสำหรับทำหน้าที่ต่างๆ เพื่อใช้ในการติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่ใน 3 มิติ วัตถุที่ใช้เป็นเป้าหมายในการติดตามเป็นทรงกลมหลายอันที่มีขนาดใกล้เคียงกัน การใช้วัตถุทรงกลมช่วยให้การตรวจหาวัตถุง่ายขึ้น โดยจะต้องจำแนกวัตถุที่มีหลายอันเพื่อให้สามารถติดตามและคำนวณพิกัดใน 3 มิติแต่ละวัตถุได้อย่างถูกต้อง

2. ภาพรวมของระบบ

ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนฮาร์ดแวร์ และส่วนซอฟต์แวร์ ซึ่งส่วน

ฮาร์ดแวร์ประกอบด้วยระบบคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกันเพื่อใช้ในการประมวลผล รวมทั้งกล้องและอุปกรณ์ประกอบ เช่นสายเคเบิล ส่วนซอฟต์แวร์ประกอบด้วยโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของระบบในแต่ละเครื่อง ภายในโปรแกรมประกอบด้วยมอดูลการประมวลผลต่างๆ ที่ได้รับการออกแบบสำหรับงานแต่ละประเภทซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 3

พีซีคลัสเตอร์ในงานวิจัยนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผล 2 เครื่อง เครื่องหนึ่งเรียกว่าคอมพิวเตอร์โลคอล มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบทั้งหมด รวมทั้งเป็นส่วนติดต่อกับผู้ใช้ เพื่อปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ สังงาน และแสดงผลการติดตามวัตถุแบบกราฟิก ส่วนอีกเครื่องหนึ่งเรียกว่าคอมพิวเตอร์รีโมท มีหน้าที่จับภาพและติดตามวัตถุจากกล้องที่ต่ออยู่กับเครื่อง ทั้งสองเครื่องจะมีโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานตามประเภทของเครื่องซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 1 โครงสร้างของระบบพีซีคลัสเตอร์

ลักษณะโครงสร้างของระบบแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งคอมพิวเตอร์ทั้งสองเชื่อมต่อกันโดยใช้แผ่นวงจรเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอบัสกับบัสพีซีไอบัสที่มีการส่งสัญญาณผ่านใยแก้วนำแสง ส่วนกล้องซีซีดี 4 ตัวเชื่อมต่อเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ผ่านมาตรฐานการเชื่อมต่อ IEEE-1394a จำนวนเครื่องละ 2 ตัว

3. สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์

ในการออกแบบสถาปัตยกรรมของระบบ [4] ได้กำหนดให้ระบบมีคอมพิวเตอร์ 2 ประเภท ประเภทแรกคือ เครื่องหลักหรือเครื่องโลคอลซึ่งจะมีได้เพียงเครื่องเดียวในระบบ มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของทั้ง

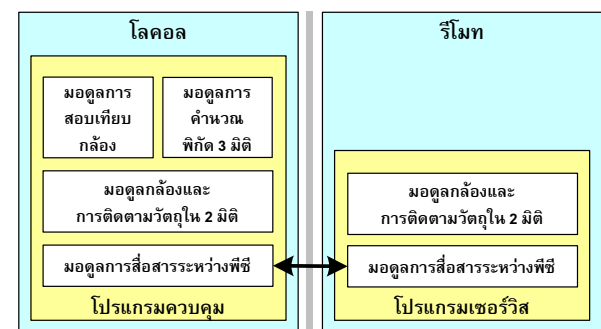
ระบบ ทั้งที่อยู่ภายในเครื่องโลคอลและเครื่องรีโมททั้งหมด ส่วนประเภทที่สองคือ เครื่องรีโมท สามารถมีได้หลายเครื่อง มีหน้าที่เชื่อมต่อกับกล้อง เพื่อรับภาพมาประมวลผล ตรวจหาตำแหน่งของวัตถุในภาพ รวมทั้งจำแนกวัตถุ ก่อนจะส่งข้อมูลไปประมวลผลยังเครื่องหลักต่อไป

โปรแกรมในเครื่องโลคอลได้รับการออกแบบให้เป็นโปรแกรมควบคุม (control application) ซึ่งมีหน้าต่างสำหรับติดต่อกับผู้ใช้และสามารถแสดงผลการติดตามวัตถุแบบกราฟิก 3 มิติขณะทำการติดตามวัตถุ ส่วนโปรแกรมที่อยู่ในเครื่องรีโมทเป็นโปรแกรมเซอร์วิส (service application) ที่ไม่มีส่วนติดต่อกับผู้ใช้เพื่อลดภาระการประมวลผลในเครื่องรีโมท

จากการออกแบบโปรแกรมสามารถแบ่งการทำงานออกเป็นมอดูลต่างๆ ประกอบด้วย

- 1) มอดูลการสอบเทียบกล้อง
- 2) มอดูลกล้องและการติดตามวัตถุใน 2 มิติ
- 3) มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติ และ
- 4) มอดูลการสื่อสารระหว่างพีซี

โครงสร้างการจัดเรียงระบบประมวลผลภายในโปรแกรมของเครื่องโลคอลและเครื่องรีโมทแสดงดังรูปที่ 2



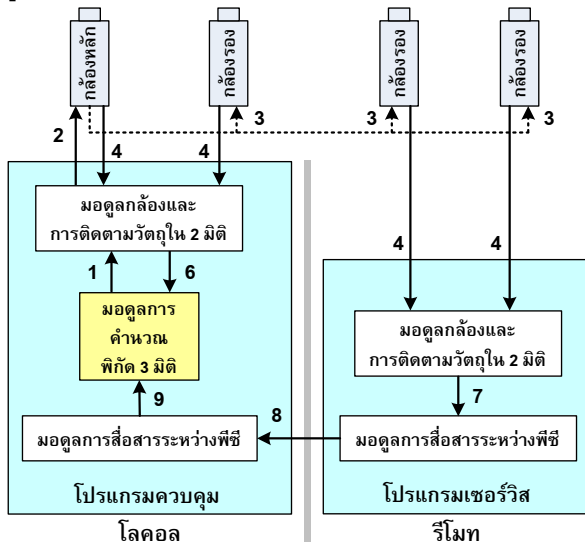
รูปที่ 2 มอดูลการประมวลผลภายในโปรแกรมแต่ละประเภทของพีซีคลัสเตอร์

4. กระบวนการติดตามวัตถุ

ก่อนเริ่มการติดตามวัตถุใน 3 มิติ กล้องทุกตัวในระบบจะต้องได้รับการสอบเทียบเพื่อนำค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มาใช้ในการคำนวณพิกัด 3 มิติของแต่ละวัตถุ วิธีการสอบเทียบกล้องของ Tsai [6] และ Zhang [7] ได้ถูกนำมาใช้ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกวิธีที่ต้องการ

เรียกใช้ได้จากโปรแกรมควบคุมในเครื่องโลคอลสำหรับรายละเอียดในการสอบเทียบกล้องของระบบสามารถดูได้จาก [4, 5] ส่วนการประสานการจับภาพจากกล้องหลายตัวได้ใช้การประสานทางฮาร์ดแวร์ (hardware synchronization) โดยได้กำหนดให้กล้องตัวหนึ่งในระบบทำหน้าที่เป็นกล้องหลัก ซึ่งจะรับสัญญาณการจับภาพทางซอฟต์แวร์จากโปรแกรมควบคุม ก่อนจะส่งสัญญาณทางฮาร์ดแวร์ไปยังกล้องตัวที่เหลือ ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า กล้องรอง เพื่อให้ได้ภาพที่มีความเหลื่อมเวลาน้อยที่สุด

ภายหลังจากที่ได้สอบเทียบกล้องแล้ว ขั้นตอนการประมวลผลในการติดตามวัตถุของระบบแสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการประมวลผลในการติดตามวัตถุ

จากแผนภาพในรูปที่ 3 สามารถแบ่งเป็นลำดับการทำงานได้ดังนี้

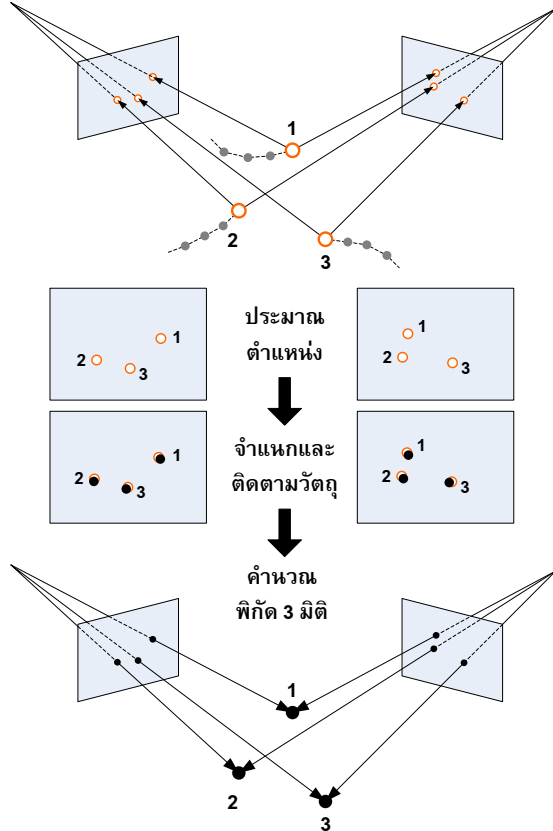
- 1) มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติส่งสัญญาณการจับภาพไปยังมอดูลกล้องและการติดตามวัตถุใน 2 มิติที่อยู่ในเครื่องโลคอล
- 2) มอดูลกล้องและการติดตามวัตถุใน 2 มิติส่งสัญญาณการจับภาพไปยังกล้องหลักเพียงตัวเดียว
- 3) กล้องหลักส่งสัญญาณการจับภาพทางฮาร์ดแวร์ไปยังกล้องรองทั้งหมด

- 4) ทั้งกล้องหลักและกล้องรอง จับภาพและส่งภาพกลับมาไปยังมอดูลกล้องและการติดตามวัตถุใน 2 มิติในเครื่องที่กล้องนั้นๆ เชื่อมต่ออยู่
- 5) ในแต่ละเครื่อง มอดูลกล้องและการติดตามวัตถุใน 2 มิติ ตรวจสอบวัตถุในภาพ จำแนกและติดตามวัตถุแต่ละอัน
- 6) ในเครื่องโลคอล มอดูลกล้องและการติดตามวัตถุใน 2 มิติส่งพิกัดของวัตถุไปยังมอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติ
- 7) ในเครื่องรีโมท มอดูลกล้องและการติดตามวัตถุใน 2 มิติส่งพิกัดของวัตถุไปยังมอดูลการสื่อสารระหว่างพีซี
- 8) มอดูลการสื่อสารระหว่างพีซีในเครื่องรีโมทแปลงพิกัด 2 มิติของวัตถุให้เป็นแมสเสจและส่งไปยังมอดูลการสื่อสารระหว่างพีซีในเครื่องโลคอล
- 9) มอดูลการสื่อสารระหว่างพีซีในเครื่องโลคอลได้รับแมสเสจและแปลงกลับเป็นพิกัด 2 มิติของวัตถุและส่งต่อไปยังมอดูลการคำนวณ 3 มิติ
- 10) มอดูลการคำนวณพิกัด 3 มิติ จับคู่ตำแหน่งของวัตถุที่สอดคล้องกันในแต่ละกล้อง และคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุแต่ละอัน
- 11) ทำซ้ำข้อ 1-10 ทุกๆ วงรอบของการติดตาม

5. การจำแนกและติดตามวัตถุ

ในการติดตามวัตถุหลายอัน ตำแหน่งของวัตถุในภาพจะได้รับการประมาณเพื่อใช้ในการติดตามวัตถุ ซึ่งในที่นี้จะเรียกว่า วัตถุประมาณ (estimated objects) วัตถุประมาณจะถูกเชื่อมโยงกับตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบในภาพ สมมติฐานที่ใช้ในการประมาณตำแหน่งวัตถุคือ สมมติให้แต่ละวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ในแต่ละการสุ่มเวลา (sampling time) ของวงรอบการติดตาม กระบวนการในการติดตามวัตถุและคำนวณพิกัด 3 มิติแสดงดังรูปที่ 4 ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการจำแนกและติดตามวัตถุ [8] ซึ่งเป็นการหาการจัดหมู่ของวัตถุประมาณ $(E_1, E_2, \dots, E_{n_d})$ ที่มีค่ารีวาร์ด (reward) $J = \sum_{i=1}^{n_d} \rho(D_i, E_i)$ สูงสุด โดยที่ n_d แทนจำนวนวัตถุที่ตรวจพบทั้งหมด, D_i แทนวัตถุ i ที่ตรวจพบ,

$E_i \in \{\phi, \varepsilon\}$ แทนวัตถุประมาณที่เชื่อมโยงกับวัตถุ D_i , ε แทนเซตของวัตถุที่ได้รับการประมาณทั้งหมด และ ϕ แทนวัตถุที่ไม่มีการประมาณไว้ (null object)



รูปที่ 4 กระบวนการติดตามวัตถุและการคำนวณ
พิกัด 3 มิติ

กำหนดให้โหนดเชื่อมโยงระหว่างวัตถุที่ตรวจพบ D_i กับวัตถุประมาณ $E_j \in \{\phi, \varepsilon\}$ เขียนแทนด้วย (D_i, E_j) ขั้นตอนวิธีของการจำแนกและติดตามวัตถุสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) สร้างโหนดเริ่มต้น (ϕ, ϕ) มีค่าฟังก์ชัน $\bar{\rho}(\phi, \phi) = 0$
- 2) หาโหนดที่ยังไม่ได้เปิด (D_i, E_j) ที่มีค่ารีเวิร์ดรวมสูงสุด
- 3) สำหรับทุกๆ $E_m \in \{\phi, \varepsilon\}$ สร้างโหนดใหม่ (D_{i+1}, E_m) ให้เป็นลูกของ (D_i, E_j) และกำหนดให้โหนด (D_i, E_j) เป็นโหนดที่เปิดแล้ว ถ้า $E_m \in \{\varepsilon\}$ และมี E_m อยู่ในแนวเส้นเชื่อมต่อของโหนด (D_i, E_j) อยู่แล้ว ให้ข้ามวัตถุนั้น

- 4) สำหรับโหนดใหม่แต่ละโหนด คำนวณค่ารีเวิร์ดรวม $\bar{\rho}$ โดย

$$\bar{\rho}(D_{i+1}, E_m) = \bar{\rho}(D_i, E_j) + \rho(D_{i+1}, E_m)$$

โดยที่ $\rho(D_i, E_j)$ แทนค่ารีเวิร์ดของ (D_i, E_j) และ $\bar{\rho}(D_i, E_j)$ แทนค่ารีเวิร์ดรวมของโหนด (D_i, E_j)

- 5) ถ้า $i+1 = n_d$ กำหนดให้โหนดใหม่เป็นโหนดปลายและเป็นโหนดที่เปิดแล้ว
- 6) ถ้าครบทุกโหนดแล้ว หรือจำนวนโหนดปลายเกินค่าที่กำหนด ให้ไปยัง 7) มิฉะนั้นกลับไป 2)
- 7) หาโหนดปลายที่มีค่ารีเวิร์ดรวมสูงสุด และผลการจำแนกคือ ค่าที่อยู่ตามแนวเส้นที่เชื่อมต่อโหนดปลายนั้น

ถ้า $E_j \neq \phi$ นิยามค่ารีเวิร์ด $\rho(D_i, E_j)$ เป็นฟังก์ชันของระยะทางระหว่างวัตถุที่ตรวจพบกับวัตถุประมาณ

$$\rho(D_i, E_j) = \frac{C}{d(D_i, E_j) + C} \quad (1)$$

โดยที่ $d(D_i, E_j)$ แทนระยะทางระหว่างวัตถุที่ตรวจพบ D_i กับวัตถุประมาณ E_j และค่า C เป็นค่าคงที่บวก สำหรับค่ารีเวิร์ดเมื่อ $E_j = \phi$ กำหนดให้เป็น

$$\rho(D_i, E_j) = \frac{C}{d_{\max} + C} \quad (2)$$

โดยที่ $d_{\max}$ แทนระยะทางสูงสุดที่กำหนดไว้ระหว่างวัตถุที่ตรวจพบกับวัตถุประมาณ ในการใช้งานจริงจะไม่เพิ่มโหนดที่มีค่าระยะทางมากกว่า $d_{\max}$ เพื่อประหยัดหน่วยความจำและลดเวลาในการค้นหา

6. การคำนวณพิกัด 3 มิติ

ภายหลังจากการจำแนกและติดตามวัตถุใน 2 มิติ ขั้นตอนต่อไปคือ การคำนวณพิกัด 3 มิติของแต่ละวัตถุ ซึ่งจะต้องใช้ตำแหน่งของภาพที่สอดคล้องกันในแต่ละกล้องเพื่อหาจุดตัดใน 3 มิติดังแสดงในรูปที่ 4 ปัญหาการคำนวณพิกัด 3 มิติสำหรับหลายวัตถุในที่นี้กำหนดให้เป็นการจับคู่ระหว่างวัตถุที่ตรวจพบและวัตถุประมาณ $(M_{i_0}^0, M_{i_1}^1, M_{i_2}^2, \dots, M_{i_{n_c}}^{n_c})$ ที่มีค่ารีเวิร์ดรวมสูง $J = \rho(M_{i_0}^0, M_{i_1}^1, M_{i_2}^2, \dots, M_{i_{n_c}}^{n_c})$ โดย

ที่ n_c แทนจำนวนกล้อง, $M_i^0 \in \{\phi, \varepsilon\}$, $M_i^j \in \{\phi, D^j\}$ ($j > 0$) เมื่อ D^j แทนเซตของวัตถุที่ตรวจพบในกล้อง j , $M_i^0 = \phi$ แสดงถึงวัตถุใหม่ที่ถูกตรวจพบและยังไม่ได้เชื่อมโยงกับวัตถุประมาณ และ $M_i^j = \phi$ ($j > 0$) แสดงถึงวัตถุที่ไม่สามารถมองเห็นได้จากกล้อง j

ขั้นตอนวิธีการคำนวณพิกัด 3 มิติสำหรับวัตถุหลายอันสามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) สร้างโหนดเริ่มต้น $M_i^0 \in \{\phi, \varepsilon\}$ กำหนดให้ค่ารีเวิร์ตเป็นศูนย์
- 2) หาโหนดที่ยังไม่ได้เปิด M_i^j ที่มีค่ารีเวิร์ตสูงสุดแล้วกำหนดให้โหนด M_i^j เป็นโหนดที่เปิดแล้ว
- 3) สร้างโหนดลูกของ M_i^j ดังนี้
 - a) ถ้าโหนดเริ่มต้น M_i^0 ของ M_i^j อยู่ใน ε และวัตถุ $M_k^{j+1} \in D^{j+1}$ มีค่า ID เหมือนกับ M_i^0 ให้เพิ่มโหนดลูก M_k^{j+1} แต่ถ้าไม่มีวัตถุใดใน D^{j+1} มี ID เหมือน M_i^0 ให้เพิ่มโหนดลูกเป็น ϕ
 - b) นอกเหนือจากข้อ a) ให้เพิ่มโหนดลูกทั้งหมดที่เป็น $M_k^{j+1} \in \{\phi, D^{j+1}\}$
- 4) สำหรับโหนดลูกแต่ละโหนด คำนวณค่ารีเวิร์ตดังนี้
 - a) คำนวณระยะทางระหว่างเวกเตอร์ที่สร้างจากตำแหน่งของวัตถุ M_k^{j+1} กับจุดตัดปัจจุบัน $p(M_i^j)$ ซึ่งการคำนวณค่า $p(M_i^j)$ จะกล่าวถึงต่อไป ถ้า $M_k^{j+1} = \phi$ ให้ใช้ค่าระยะทางสูงสุด $d_{\max}$ ที่กำหนดไว้
 - b) คำนวณค่าโลคอลรีเวิร์ต $\rho(M_k^{j+1})$ โดยใช้ระยะทางที่ได้จาก a) และคำนวณค่ารีเวิร์ตรวม $\bar{\rho}(M_k^{j+1}) = \rho(M_k^{j+1}) + \bar{\rho}(M_i^j)$
- 5) ถ้า $i+1 = n_c$ กำหนดให้โหนดใหม่เป็นโหนดปลายและเป็นโหนดที่เปิดแล้ว
- 6) ถ้าครบทุกโหนดแล้ว หรือจำนวนโหนดปลายเกินค่าที่กำหนด ให้ไปยัง 7) มิฉะนั้นกลับไป 2)
- 7) หาโหนดปลายที่มีค่าระยะทางเฉลี่ยจากตำแหน่งประมาณน้อยกว่าค่าที่กำหนดและมีจำนวนวัตถุ

มากกว่า $n_{\min}$ ซึ่งเป็นจำนวนกล้องที่น้อยที่สุดที่ยอมให้สามารถคำนวณพิกัด 3 มิติได้

- 8) นำตำแหน่งในภาพทั้งหมดที่ได้จากข้อ 7) มาคำนวณหาพิกัด 3 มิติของแต่ละวัตถุด้วยวิธีไลเนียร์ไตรแองกูเลชัน (linear triangulation method) [9] อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้ความถูกต้องมากขึ้น

จุดตัดของสองเวกเตอร์ใดๆ สามารถหาได้โดยใช้จุดกึ่งกลางของตำแหน่งที่เวกเตอร์ทั้งสองใกล้กันมากที่สุด และนิยามให้ตำแหน่งจุดตัดปัจจุบัน $p(M_i^j)$ ของโหนด M_i^j เป็นค่าเฉลี่ยของจุดตัดของเวกเตอร์ทุกคู่

7. การทดลอง

7.1 อุปกรณ์ที่ใช้

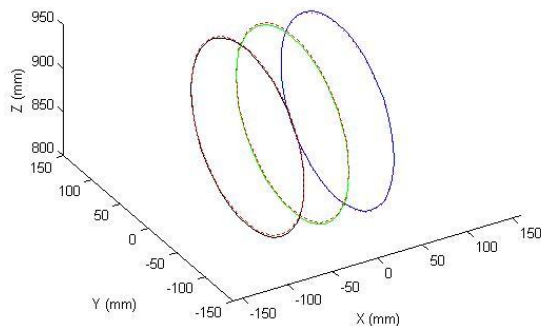
อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับเครื่องโลคอลที่มีหน่วยประมวลผล Intel Core 2 Quad ความเร็ว 2.83 GHz ส่วนเครื่องรีโมทใช้หน่วยประมวลผล Intel Pentium 4 ความเร็ว 3.40 GHz ภาพที่ใช้ในการติดตามวัตถุมีขนาด 640x480 พิกเซล แขนกล Mitsubishi PA10-7C ดังรูปที่ 5 ได้ถูกใช้ในการพาว์วัตถุเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ เพื่อการทดสอบการติดตามวัตถุของระบบวัตถุที่ใช้เป็นเป้าหมายเป็นทรงกลมสีขาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร จำนวน 3 อัน ที่ถูกนำมายึดกับก้านโดยเรียงตัวกันในแนวเส้นตรง มีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของวงกลมที่อยู่ติดกัน 50 มิลลิเมตร



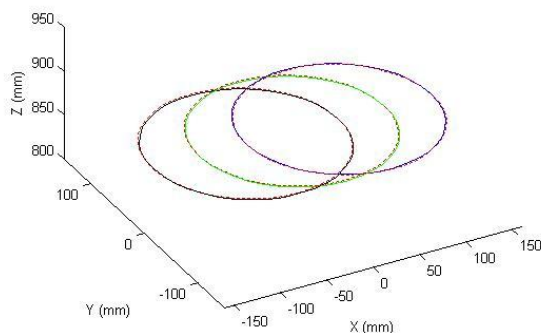
รูปที่ 5 แขนกล Mitsubishi PA10-7C

7.2 ผลการทดลอง

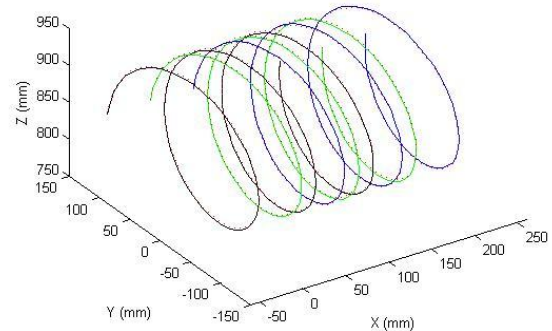
ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6-9 โดยในรูปที่ 6 และ 7 เป็นการทดลองโดยสั่งให้แขนกล PA10-7C เคลื่อนที่เป็นวงกลมในระนาบ YZ และระนาบ XY ตามลำดับ หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี 100 มิลลิเมตร บนระนาบที่กำหนด ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.05 เรเดียนต่อวินาที ส่วนในรูปที่ 8 และ 9 แสดงผลการติดตามวัตถุเมื่อเคลื่อนที่แบบเกลียวในทิศทางแกน X และแกน Z ตามลำดับ โดยสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบเกลียวรัศมี 100 มิลลิเมตร และระยะทางตามแนวแกน 200 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วเชิงมุม 0.05 เรเดียนต่อวินาที และความเร็วเชิงเส้นตามแนวแกน 2.5 มิลลิเมตรต่อวินาที



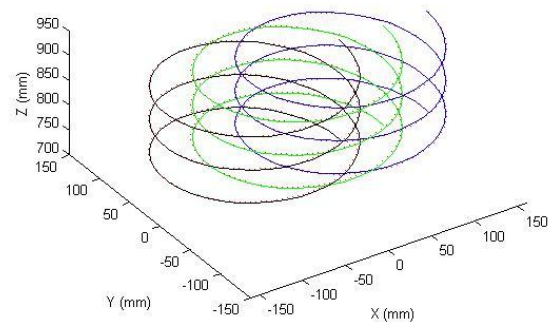
รูปที่ 6 การเคลื่อนที่แบบวงกลมบนระนาบ YZ



รูปที่ 7 การเคลื่อนที่แบบวงกลมบนระนาบ XY



รูปที่ 8 การเคลื่อนที่แบบเกลียวในทิศทางแกน X



รูปที่ 9 การเคลื่อนที่แบบเกลียวในทิศทางแกน Z

8. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบติดตามวัตถุหลายอันโดยใช้กล้องหลายตัวทำงานบนพีซีคลัสเตอร์ที่ใช้แผนผังจรเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอกับบัสพีซีไอ การออกแบบมอดูลการประมวลผลช่วยให้ระบบมีความยืดหยุ่นต่อการใช้งาน ในการทดลองติดตามวัตถุทรงกลมหลายอันที่เคลื่อนที่ใน 3 มิติ พบว่าระบบสามารถติดตามวัตถุได้แบบเวลาจริง ซึ่งในอนาคตสามารถพัฒนามอดูลการประมวลผลเพิ่มเติมเพื่อนำไปประยุกต์ในงานด้านต่างๆต่อไป

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] Trucco, E. and Verri, A. (1998). *Introductory techniques for 3-D computer vision*. New Jersey, USA: Prentice-Hall.
- [2] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ กรรรมันต์ ชูประเสริฐ (2552). ระบบติดตามอนุภาคใน 3 มิติโดยใช้ภาพสเตอริโอ การประชุมวิชาการเครือข่าย

วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, จังหวัด
เชียงใหม่,

[3] Arita, D., Yonemoto, S., and Taniguchi, R. (2000). Real-time computer vision on PC-cluster and its application to real-time motion capture. *5th IEEE International Workshop on Computer Architectures for Machine Perception*: 205-214.

[4] Uttamang, K., and Sangveraphunsiri, V. (2007). Multi-camera system using PC-cluster for real-time 3-D pose estimation. *Thammasat Int. J. Sc. Tech.* 12 (April-June 2007): 52-63.

[5] Sangveraphunsiri, V., Uttamang, K. and Pedpunsri, P. (2009). A Multi-Camera System on PC-Cluster for Real-time 3-D Tracking. *The 23rd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand*, Chiang Mai.

[6] Tsai, R. (1987). 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*, vol. 3. no.4, pp.323-344.

[7] Zhang, Z. (2000). A Flexible New Technique for Camera Calibration, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22.

[8] Yamane, K., Kuroda, T, and Nakamura, Y. (2004). High-Precision and High-Speed Motion Capture by Combining Heterogeneous Cameras, *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Japan.

[9] Hartley, R., and Zisserman, A. (2003). *Multiple view geometry in computer vision*. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press.