ระบบติดตามวัตถุหลายอันใน 3 มิติแบบเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว และการประยุกต์สำหรับงานวิศวกรรมย้อนกลับ

A Real-Time 3-D Multiple Objects Tracking System using Multiple Cameras and Its Application for Reverse Engineering

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ พงศกร บำรุงไทย*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
* ติดต่อ: โทรศัพท์ 0 2218 6585, โทรสาร 0 2218 6583
E-mail: Viboon.S@eng.chula.ac.th, pedpunsri@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอระบบติดตามวัตถุหลายอันแบบเวลาจริงโดยใช้กล้องหลายตัว โดยได้พัฒนาอัลกอริทึมการคำนวณพิกัด 3 มิติและอัลกอริทึมการติดตามวัตถุสำหรับติดตามทรงกลมเปล่งแสงหลายอันที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ข้อมูลที่ได้จากระบบได้แก่ ตำแหน่งใน 3 มิติของแต่ละวัตถุเทียบกับระบบพิกัดที่กำหนด ซึ่งสามารถนำออกไปใช้ในงานด้านต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำไปประยุกต์ในงานวิศวกรรมย้อนกลับ โดยทำการออกแบบหัวสัมผัสชิ้นงานสำหรับเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการเก็บข้อมูลเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ หัวสัมผัสชิ้นงานที่ได้รับการออกแบบจะมีทรงกลม 3 อันเป็นส่วนประกอบเพื่อใช้ในการติดตามโดยระบบและสามารถนำไปแปลงเป็นพิกัดที่ปลายของหัวสัมผัสชิ้นงานได้ การประมวลผลของระบบกระทำบนพีซีคลัสเตอร์ที่พัฒนาขึ้น ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถติดตามวัตถุแต่ละอันได้อย่างถูกต้อง โดยมีความผิดพลาดของการวัดพิกัดขณะติดตามไม่เกิน 1 มิลลิเมตร รวมทั้งสามารถเก็บข้อมูลพื้นผิวที่ต้องการได้โดยใช้หัวสัมผัสชิ้นงานที่สร้างขึ้น

คำหลัก: การติดตามวัตถุหลายอันใน 3 มิติแบบเวลาจริง, ระบบกล้องหลายตัว, การวัดพิกัด 3 มิติ

Abstract

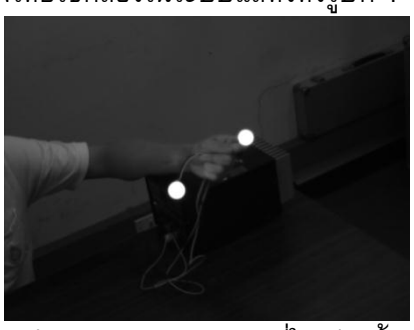
This paper presents a real-time multiple objects tracking system by using multiple cameras. 3-D reconstruction and object tracking algorithms for tracking multiple active spherical objects with almost identical diameter have been developed. Output of the system is 3-D position of each object with respect to a specified coordinate system which can be used in many applications. In this research, it has been applied for reverse engineering application by designing a touch probe to be moved on target surface. The touch probe consists of three spherical objects which can be used for being tracked by the camera system and can be transformed to tip position. The system has been implemented on a PC-cluster. Experimental results show that the system can track each object correctly. The maximum tracking error is 1 mm. It can also acquire surface coordinate by using the touch probe.

Keywords: Real-time 3-D multiple objects tracking, Multi-camera system, 3-D coordinate measurement

1. บทนำ

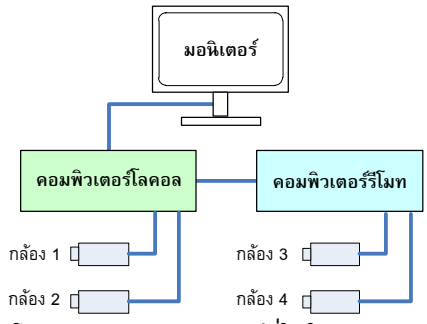
การติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุใน 3 มิติมีความจำเป็นต่องานหลายประเภทจึงได้มีผู้พัฒนาระบบติดตามวัตถุเพื่อใช้ในงานต่างๆ โดยแต่ละระบบจะมีลักษณะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุที่สนใจ ประเภทของงานที่ต้องการประยุกต์ใช้ รวมทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ [1-4] ในช่วงระยะเวลา 20 กว่าปีที่ผ่านมา การพัฒนาระบบติดตามวัตถุโดยใช้กล้องได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการทำงานสูงโดยสามารถปรับเปลี่ยนการทำงานของระบบได้จากโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ภาพและควบคุมระบบ ทำให้มีความหลากหลายในการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้กล้องที่ใช้ในระบบที่มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอต่อการทำงานแบบเวลาจริงมีราคาลดลงเป็นอย่างมาก ทำให้มีความเหมาะสมต่อการพัฒนาเพื่อใช้ในงานต่างๆ

ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบติดตามวัตถุโดยใช้กล้องหลายตัวเพื่อใช้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาต่อยอดในงานเฉพาะด้านต่างๆ โดยในบทความนี้ได้แสดงการประยุกต์สำหรับงานวิศวกรรมย้อนกลับ โดยได้ออกแบบหัวสัมผัสชิ้นงานเพื่อให้เหมาะสมกับการทำงานของผู้ใช้และง่ายต่อการติดตามโดยระบบกล้องที่พัฒนาขึ้น วัตถุเป้าหมายสำหรับการติดตามได้แก่ทรงกลมหลายอันที่มีขนาดใกล้เคียงกันซึ่งบรรจุหลอดไฟอยู่ภายในเพื่อช่วยให้ภาพของวัตถุเป้าหมายมีความเข้มแสงสูงกว่าวัตถุอื่นในภาพ ทำให้ง่ายต่อการตรวจหาวัตถุและช่วยลดเวลาในการรับภาพของกล้องซึ่งช่วยให้ความถี่ในการทำงานของระบบสูงขึ้น ลักษณะของวัตถุเป้าหมายที่ใช้ในการวิจัยเมื่อถ่ายภาพโดยใช้กล้องในระบบแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 วัตถุทรงกลมเปล่งแสงที่ใช้เป็นเป้าหมายในการติดตามโดยระบบ

ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับการประมวลผลบนพีซีคลัสเตอร์ที่ประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง โดยคอมพิวเตอร์หนึ่งเครื่องเรียกว่า คอมพิวเตอร์โลคอล ทำหน้าที่ในการควบคุมระบบและสั่งการคอมพิวเตอร์อีกเครื่องหนึ่งที่เชื่อมต่อกันโดยใช้แผ่นวงจรเคลื่อนย้ายข้อมูลระหว่างบัสพีซีไอ โดยที่คอมพิวเตอร์อีกหนึ่งเครื่องเรียกว่า คอมพิวเตอร์รีโมท ทำหน้าที่ในการแบ่งภาระการประมวลผลของกล้องซึ่งเชื่อมต่ออยู่กับเครื่องนั้น [5] ในการถ่ายภาพตรวจหาวัตถุ และติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์โลคอลเพื่อส่งข้อมูลที่จำเป็นต่อการประมวลผลในขั้นตอนต่างๆ ในกระบวนการติดตามวัตถุ แผนภาพของระบบพีซีคลัสเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลของระบบแสดงดังรูปที่ 2 โดยในระบบนี้ใช้กล้องที่มีการเชื่อมต่อผ่านพอร์ตมาตรฐาน IEEE-1394a ทั้งหมดจำนวน 4 ตัวในการถ่ายภาพวัตถุ



รูปที่ 2 โครงสร้างพีซีคลัสเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

2. การคำนวณพิกัด 3 มิติสำหรับหนึ่งวัตถุ

2.1 เมทริกซ์กล้อง

กำหนดให้ $\mathbf{x}$ แทนตำแหน่งของวัตถุที่สนใจเมื่อฉายลงบนภาพในระบบพิกัดพิกเซล (เมทริกซ์ขนาด 3x1) $\mathbf{X}_w$ แทนตำแหน่งของวัตถุเดียวกันเมื่อเทียบกับระบบพิกัดโลก 3 มิติ (เมทริกซ์ขนาด 4x1) และ $\mathbf{P}$ ซึ่งเป็นเมทริกซ์การแปลง (transformation matrix) (เมทริกซ์ขนาด 3x4) จาก [6] สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุใน 3 มิติซึ่งอยู่ในระบบพิกัดโลก 3 มิติ ($\mathbf{X}_w$) กับตำแหน่งของวัตถุบนระนาบภาพที่เกิดจากการฉายจุดใน 3 มิตินั้นบนระนาบภาพของกล้อง ($\mathbf{x}$) ได้ดังสมการ (1) โดย $\mathbf{P}$

เรียกว่า เมทริกซ์กล้อง (camera matrix) ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ภายในและพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง [7] แฝงอยู่ โดยพิกัดทั้งหมดเขียนในพิกัดเอกพันธุ์ (homogeneous coordinate)

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X}_{\mathrm{w}} \tag{1}$$

2.2 วิธีไทรแองกูเลชันเชิงเส้น

การคำนวณพิกัด 3 มิติสำหรับวัตถุหนึ่งวัตถุโดยใช้วิธีไทรแองกูเลชันเชิงเส้น (linear triangulation method) [8] โดยใช้กล้อง n ตัว เมื่อทราบตำแหน่งของวัตถุในภาพที่ได้จากกล้องแต่ละตัวแล้วมีดังนี้

กำหนดให้ $\mathbf{P}_i$ แทนเมทริกซ์กล้องของกล้องที่ i และ $\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} u_i & v_i & 1 \end{bmatrix}^T$ เป็นเวกเตอร์เอกพันธุ์ที่แทนพิกัดของวัตถุในระบบพิกัดพิกเซลที่วัดจากกล้องที่ i จากสมการ (1) สามารถเขียนเป็น

$$\mathbf{x}_i \times \left(\mathbf{P}_i \mathbf{X}_{\mathrm{w}}\right) = 0 \tag{2}$$

ซึ่งจะได้

$$\left.\begin{aligned} u_i\left(\mathbf{p}_i^{3T}\mathbf{X}_{\mathrm{w}}\right) - \left(\mathbf{p}_i^{1T}\mathbf{X}_{\mathrm{w}}\right) = 0 \\ v_i\left(\mathbf{p}_i^{3T}\mathbf{X}_{\mathrm{w}}\right) - \left(\mathbf{p}_i^{2T}\mathbf{X}_{\mathrm{w}}\right) = 0 \\ u_i\left(\mathbf{p}_i^{2T}\mathbf{X}_{\mathrm{w}}\right) - v_i\left(\mathbf{p}_i^{1T}\mathbf{X}_{\mathrm{w}}\right) = 0 \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

โดยที่ $\mathbf{p}_i^{jT}$ เป็นแถวที่ j ของเมทริกซ์กล้อง $\mathbf{P}_i$

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

$$\mathbf{A}\mathbf{X}_{\mathrm{w}} = \mathbf{0} \tag{4}$$

โดยที่

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} u_1\mathbf{p}_1^{3T} - \mathbf{p}_1^{1T} \\ v_1\mathbf{p}_1^{3T} - \mathbf{p}_1^{2T} \\ u_2\mathbf{p}_2^{3T} - \mathbf{p}_2^{1T} \\ v_2\mathbf{p}_2^{3T} - \mathbf{p}_2^{2T} \\ \vdots \\ u_n\mathbf{p}_n^{3T} - \mathbf{p}_n^{1T} \\ v_n\mathbf{p}_n^{3T} - \mathbf{p}_n^{2T} \end{bmatrix} \tag{5}$$

ระบบสมการ (5) สามารถแก้ได้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดโดยการหาเวกเตอร์ซิงกูลาร์ คำตอบของระบบสมการตรงกับค่าซิงกูลาร์ที่มีค่าน้อยที่สุดของเมทริกซ์ $\mathbf{A}$ [9] ซึ่งจะได้พิกัด 3 มิติของวัตถุที่ทำให้เกิดภาพ (ตำแหน่งในภาพ 2 มิติ) ในกล้องแต่ละตัว

3. การคำนวณพิกัด 3 มิติสำหรับหลายวัตถุ

การคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุหลายวัตถุโดยใช้กล้องหลายตัวที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยหลายขั้นตอน โดยเริ่มจากการถ่ายภาพวัตถุ แล้วนำภาพที่ได้มาตรวจหาวัตถุในภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การแปลงฮัฟวงกลม [10, 11] ในการตรวจหาตำแหน่งของวัตถุที่สนใจในภาพ ซึ่งจะได้ตำแหน่งของวัตถุในภาพที่มีพิกัด 2 มิติโดยมีความละเอียดในระดับพิกเซล จากนั้นจึงนำตำแหน่งดังกล่าวที่ได้จากกล้องทุกตัวมาทำการจำแนกวัตถุ ซึ่งเป็นการค้นหาวัตถุในภาพที่ได้จากกล้องแต่ละตัวซึ่งเกิดจากวัตถุเดียวกันใน 3 มิติ โดยสร้างดัชนี (indexing) ของวัตถุที่สอดคล้องกันซึ่งเป็นหมายเลขลำดับที่ของวัตถุที่ตรวจพบในภาพในกล้องแต่ละตัว แล้วจึงนำดัชนีของวัตถุที่สอดคล้องกันมาคำนวณพิกัด 3 มิติทีละวัตถุโดยใช้การคำนวณในหัวข้อ 2.2

อัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้นสำหรับการคำนวณพิกัด 3 มิติของวัตถุหลายวัตถุ เมื่อทราบข้อมูลตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบในภาพแล้ว มีดังนี้

1) ค้นหาตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจพบที่ยังไม่ได้ใช้

2) คำนวณระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างรังสีซึ่งเกิดจากจุดศูนย์กลางกล้องกับตำแหน่งของวัตถุในภาพ ที่ได้จากตำแหน่งในข้อ 1) กับตำแหน่งที่ได้จากกล้องตัวอื่นๆ และกำหนดจุดตั้งต้นให้เป็นจุดที่ใช้แล้ว

3) ถ้ามีตำแหน่งของวัตถุในกล้องใดซึ่งมีค่าระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างรังสีที่ได้จากข้อ 2) น้อยกว่าค่าที่กำหนด ให้ตรวจสอบซ้ำ โดยทำซ้ำขั้นตอนที่ 2) กับกล้องตัวอื่นที่ไม่ซ้ำเดิมอีก 1 กล้อง ถ้าระยะห่างที่น้อยที่สุดระหว่างรังสีที่ได้มีค่าต่ำกว่าที่กำหนด ให้ระบุว่าจุดทั้งสามเป็นจุดที่สอดคล้องกัน และกำหนดให้จุดที่สอดคล้องกันนี้เป็นจุดที่ใช้แล้ว

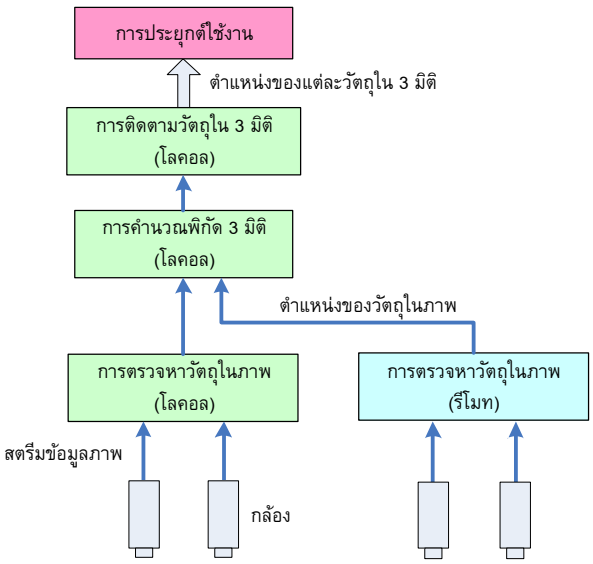
4) ทำซ้ำข้อ 1) ถึงข้อ 3) จนครบจำนวนจุดที่ตรวจพบ

5) นำจุดที่ผ่านการระบุว่าเป็นจุดที่สอดคล้องกันในข้อ 4) มาคำนวณพิกัด 3 มิติด้วยวิธีไทรแองกูเลชันเชิงเส้นทีละชุด

4. การติดตามวัตถุ

การติดตามวัตถุได้แก่ การกำหนดป้ายชื่อ (labeling) ให้แก่วัตถุแต่ละวัตถุเพื่อใช้อ้างอิงในการจำแนกวัตถุและใช้ในการติดตามสถานะของแต่ละวัตถุ โดยในงานวิจัยนี้กำหนดให้ใช้ตัวเลขจำนวนเต็มบวกเป็นป้ายชื่อของแต่ละวัตถุซึ่งจะไม่ซ้ำกัน โดยใช้สมมติฐานว่าวัตถุแต่ละวัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ในแต่ละช่วงเวลาสุ่มเพื่อใช้ประมาณตำแหน่งถัดไป

ในงานวิจัยนี้ได้แยกอัลกอริทึมในส่วนของการคำนวณพิกัด 3 มิติออกจากการติดตามวัตถุเพื่อให้ระบบมีความยืดหยุ่นในการทำงานมากขึ้น โดยระบบสามารถนำไปใช้ในคำนวณหาพิกัด 3 มิติของวัตถุหลายวัตถุในตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการโดยไม่ต้องทำการติดตามวัตถุหรือหากต้องการติดตามวัตถุก็สามารถนำพิกัด 3 มิติที่คำนวณได้ไปใช้ในการติดตามดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 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 ถ้าไม่เกินถือว่าวัตถุยังถูกติดตามอยู่ให้นำค่าที่ได้จากการประมาณตำแหน่งเป็นตำแหน่งปัจจุบันของวัตถุ แต่ถ้าเกินจำนวนครั้งที่กำหนดให้ลบวัตถุนั้นออกจากการติดตาม

4) ในกรณีที่มีตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณพิกัด 3 มิติเหลือจากการเชื่อมโยงข้อมูลในข้อ 2) และ 3) ให้เพิ่มเป็นวัตถุอันใหม่เพื่อทำการติดตามในวงรอบถัดไป

5. การออกแบบหัวสัมผัสชิ้นงาน

ในการประยุกต์ระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการวัดพื้นผิวชิ้นงานเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์ ได้ออกแบบหัวสัมผัสชิ้นงานที่ประกอบด้วยด้ามจับและทรงกลมเปล่งแสง 3 อันสำหรับใช้ในการติดตามโดยระบบเพื่อให้สามารถคำนวณตำแหน่งและทิศทางของหัวสัมผัสชิ้นงานได้ ลักษณะของหัวสัมผัสชิ้นงานที่ได้ออกแบบและสร้างมีลักษณะดังรูปที่ 4 โดยปลายหัวสัมผัสชิ้นงานอยู่ห่างจากระนาบของทรงกลมทั้งสามที่ใช้เป็นเป้าหมายเป็นระยะประมาณ 130 มิลลิเมตร

การคำนวณพิกัดที่ปลายของหัวสัมผัสชิ้นงานสามารถทำได้โดยการประมาณค่าเมทริกซ์การหมุน (rotation matrix) **R** และเมทริกซ์การเลื่อนขนาน (translation matrix) **t** ระหว่างระบบพิกัดโลก 3 มิติและระบบพิกัดของหัวสัมผัสชิ้นงาน โดยใช้อัลกอริทึมของ Arun, K.S. และคณะ [12] ในการประมาณค่าเม-

รูปที่ 4 หัวสัมผัสชิ้นงานที่ได้ออกแบบสำหรับใช้วัดพื้นผิวชิ้นงาน

ทริกซ์ **R** และ **t** เมื่อมีการเคลื่อนที่แต่ละจังหวะเพื่อแปลงไปยังพิกัดที่ปลายของหัวสัมผัสชิ้นงานเทียบกับระบบพิกัดโลก 3 มิติ

6. การทดลอง

การทดลองทั้งหมดได้กระทำบนพีซีคลัสเตอร์ที่ประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์โลคอลที่ใช้หน่วยประมวลผลกลางอินเทลคอร์ทูควอด ความเร็ว 2.83 กิกะเฮิรตซ์ หน่วยความจำ 4 กิกะไบท์ และเครื่องคอมพิวเตอร์รีโมทใช้หน่วยประมวลผลกลางอินเทลเพนเทียมโฟร์ ความเร็ว 3.4 กิกะเฮิรตซ์ หน่วยความจำ 2 กิกะไบท์ โดยทั้งสองเครื่องทำงานบนระบบปฏิบัติการไมโครซอฟต์วินโดวส์เอ็กซ์พี สำหรับภาพที่ใช้ในการประมวลผลมีขนาด 640x480 พิกเซล

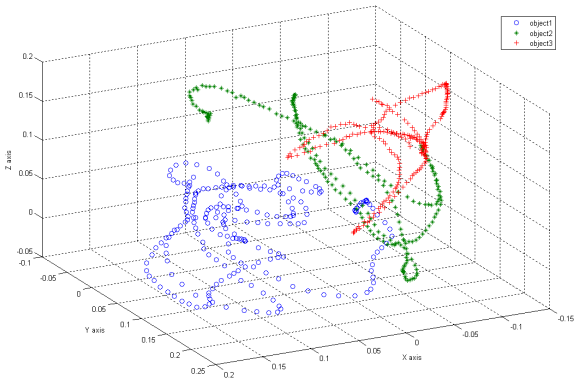
ในการทดลองที่ 1 เป็นการทดสอบความแม่นยำของระบบได้ใช้ทรงกลมเปล่งแสง 2 อันที่ถูกเชื่อมต่อแบบแข็งเกร็งเข้ากับก้านไม้อัด โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของทรงกลมทั้งสองที่วัดจากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัส ยี่ห้อ Brown & Sharpe รุ่น Microval 343 ได้เท่ากับ 99.95 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิง เมื่อทดสอบโดยเคลื่อนที่ก้านของวัตถุภายในปริมาตรทำงานของระบบ และให้ระบบที่พัฒนาขึ้นติดตามการเคลื่อนที่และบันทึกตำแหน่งของวัตถุทั้งสองแบบต่อเนื่องกันจำนวน 100 จังหวะ พิกัดของวัตถุใน 3 มิติที่ได้นำมาคำนวณระยะทางระหว่างทรงกลมและสามารถคำนวณความผิดพลาดเทียบกับค่าที่ได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัสทั้ง 100 ค่า ความผิดพลาดที่ได้สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1 พบว่ามีความผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 1 ค่าทางสถิติของผลต่างระหว่างค่าที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นกับค่าที่ได้จากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบสัมผัส ในการนำพิกัด 3 มิติของทรงกลม 2 อันที่เชื่อมต่อกันแบบแข็งเกร็งที่วัดได้ มาหาระยะทางระหว่างกัน จำนวน 100 ตำแหน่ง

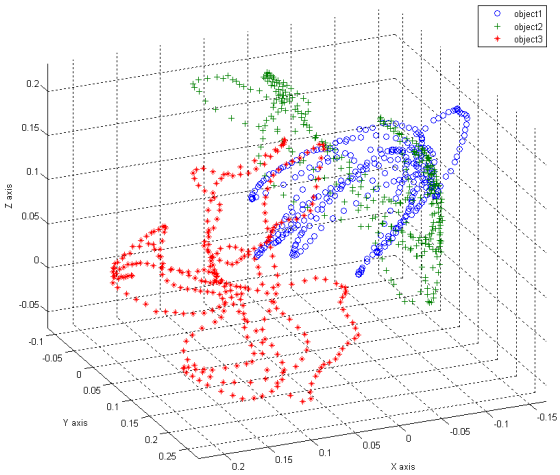
ค่าทางสถิติ	ค่า(มม.)
ค่าเฉลี่ย	0.247245
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.184489
ค่าสูงสุด	0.768799

การทดลองที่ 2 เป็นการติดตามวัตถุเมื่อเคลื่อนที่อย่างอิสระใน 3 มิติโดยใช้ทรงกลมเปล่งแสง 3 อันเป็นวัตถุเป้าหมาย โดยทดลองจำนวน 2 ครั้งซึ่งมีรูปแบบการเคลื่อนที่แตกต่างกัน เพื่อทดสอบความสามารถในการจำแนกและติดตามวัตถุแต่ละอัน ลักษณะการเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายในการทดลองแสดงดังรูปที่ 5 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 6 และ 7 พบว่าระบบสามารถติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุแต่ละอันและทำการกำหนดป้ายชื่อให้แก่วัตถุได้อย่างถูกต้อง

รูปที่ 5 การเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายอย่างอิสระใน 3 มิติ

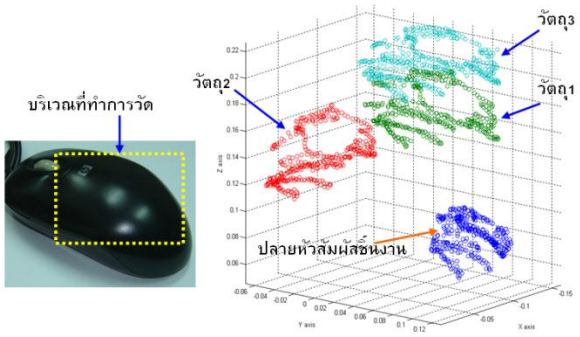


รูปที่ 6 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบเมื่อเคลื่อนที่วัตถุ 3 อันอย่างอิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 1

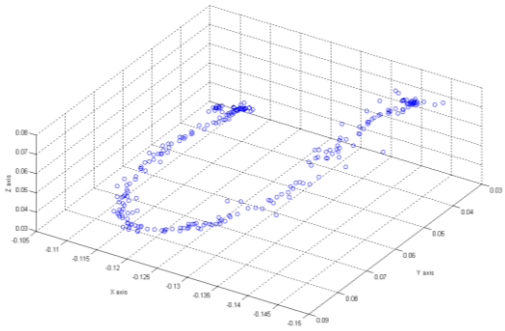


รูปที่ 7 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จากระบบเมื่อเคลื่อนที่วัตถุ 3 อันอย่างอิสระใน 3 มิติ ครั้งที่ 2

การทดลองที่ 3 เป็นการติดตามหัวสัมผัสชิ้นงานที่ได้สร้างขึ้นเมื่อเคลื่อนที่บนพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการวัดพิกัด เพื่อทดสอบความสามารถในการนำพิกัดที่ได้จากการติดตามของระบบมาคำนวณพิกัดที่ปลายของหัวสัมผัสชิ้นงาน โดยทำการทดลองวัดพื้นผิวเมาส์ ซึ่งผลการทดลองในรูปที่ 8 ได้แสดงตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายบนหัวสัมผัสชิ้นงานจำนวน 3 อันและพิกัดที่ได้รับการแปลงไปยังตำแหน่งปลายของหัวสัมผัสชิ้นงาน รวมทั้งภาพชิ้นงานต้นแบบที่ทำการวัด ส่วนรูปที่ 9 แสดงผลการทดลองเมื่อเคลื่อนหัวสัมผัสชิ้นงานบนแนวขอบที่อยู่บนชิ้นงานเมาส์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแนวทางการประยุกต์ใช้งานหัวสัมผัสชิ้นงานในการวัดพิกัดพื้นผิวตามแนวเส้นที่ต้องการได้



รูปที่ 8 ผลการทดลองวัดพิกัดบนพื้นผิวเมาส์โดยใช้หัวสัมผัสชิ้นงานที่สร้างขึ้น



รูปที่ 9 ตำแหน่งปลายหัวสัมผัสชิ้นงานเมื่อเคลื่อนที่บริเวณขอบของเมาส์และชิ้นงานต้นแบบ

7. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบกล้องหลายตัวสำหรับติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมเปล่งแสงหลายอันในแบบเวลาจริง โดยสามารถคำนวณพิกัด 3 มิติของแต่ละวัตถุได้ รวมทั้งได้ประยุกต์การใช้งานของระบบในการวัดพิกัดพื้นผิวชิ้นงานสำหรับงานวิศวกรรมย้อนกลับ โดยใช้หัวสัมผัสชิ้นงานที่ได้รับการออกแบบเป็นวัตถุเป้าหมายในการเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวที่ต้องการเก็บข้อมูล ผลการทดลองพบว่าระบบสามารถติดตามการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมจำนวน 3 อันได้อย่างถูกต้อง และสามารถติดตามวัตถุทรงกลมเป้าหมายบนหัวสัมผัสชิ้นงานและนำไปคำนวณพิกัดบนพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการได้ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถปรับปรุงเพื่อใช้ในงานด้านการติดตามวัตถุและการวัดพิกัดที่มีความซับซ้อนมากขึ้นต่อไป

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ภายใต้โครงการเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมศาสตร์สหสาขาเพื่อพัฒนาและ

สร้างความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมศาสตร์ในระดับภูมิภาคและการเรียนการสอนไปสู่ระดับโลก ในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100 ปี)

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Sangveraphunsiri, V. and Longtantong, W. (2006). A 3D Particle Tracking System Using Stereo Vision. *Thai Robot Society Conference on Robotics and Industrial Technology*, pp 55-66.

[2] Svoboda, T., Hug, H., and Van Gool, L. (2002). ViRoom – low cost synchronized multicamera system and its self-calibration. Pattern Recognition, *24th DAGM Symposium*, number 2449 in LNCS, pp. 515-522. Springer, September.

[3] Velipasalar, S., Schlessman, J., Chen, C.Y., Wolf, W., and Singh, J. (2008). A Scalable Clustered Camera System for Multiple Object Tracking. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, Vol. 2008, Article ID 542808, 22 pages.

[4] Kurihara, K., Hoshino, S., Yamane, K. and Nakamura, Y. (2002). 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.

[5] 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.

[6] Hartley, R., and Zisserman, A. (2003). *Multiple View Geometry in Computer Vision*, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

[7] Trucco, E., and Verri, A. (1998). *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*. Prentice Hall.

[8] Hartley, R., and Sturm, P. (1997). Triangulation, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 68. No. 2, November, pp. 146-157.

[9] Faugeras, O., and Luong, Q. (2001). *The Geometry of Multiple Images*. Cambridge, MA, USA: MIT Press.

[10] Hough, P.V.C. (1962). Method and means for recognizing complex patterns. *U.S. Patent* 3,069,654, December 18.

[11] Gonzalez, R.C., and Woods, R.E. (2008). *Digital image processing*. 3rd edition. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice Hall.

[12] Arun, K.S., Huang, T.S., and Blostein, S.D. (1987). Least-squares fitting of two 3-D point sets. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 9:699-700.

[13] Tsai, R. A. (1987). 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: 323-344.