

**DRC-2004**

**การควบคุมหุ่นยนต์ติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่โดยใช้ข้อมูลภาพจากกล้องสเตอริโอ**  
**Moving Object Tracking Robot By Visual Servo Control with The Stereo Vision**

**อานันท์ สุตาพันธ์<sup>1</sup>, วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup> สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

\* ติดต่อกัน , โทร 0 2218 6585 , โทรสาร 0 2218 6583

E-mail : [Anan.S@student.chula.ac.th](mailto:Anan.S@student.chula.ac.th)<sup>1</sup> , [Viboon.S@eng.chula.ac.th](mailto:Viboon.S@eng.chula.ac.th)<sup>2</sup>

**บทคัดย่อ**

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบการควบคุมหุ่นยนต์แบบพิกัดฉาก 3 แกน (Cartesian Robot) ร่วมกับการขับเคลื่อนเชิงภาพเพื่อใช้ในการติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ โดยใช้ข้อมูลภาพสเตอริโอหรือข้อมูลภาพ 3 มิติของวัตถุที่เคลื่อนที่ที่ได้จากระบบกล้องวีดีโอ 2 ตัว ที่ติดตั้งอยู่บนแกนอ้างอิงภายนอก ซึ่งข้อมูลตำแหน่งของวัตถุใน 3 มิติที่ได้จากข้อมูลภาพสเตอริโอในข้างต้น สามารถนำไปใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในการควบคุมแบบป้อนกลับของหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ติดตามวัตถุเป้าหมาย โดยการออกแบบระบบควบคุมของหุ่นยนต์จะต้องมีความถี่คัตออฟและความกว้างแถบ (feedback controller bandwidth) ที่ทำให้หุ่นยนต์มีความเร็วเพียงพอที่จะติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่ใน 3 มิติได้

**คำหลัก:** ภาพสเตอริโอ , การติดตามวัตถุ , การขับเคลื่อนเชิงภาพ , หุ่นยนต์พิกัดฉาก

**Abstract**

This research work is the implementation of visual servo control for tracking of a moving object with constant velocity using a 3 Axis Cartesian Robot. The stereo vision or 3-D data of a moving object can be collected from a two-camera set fixed in a reference frame. The result of the 3-D points of a moving object can be used as the referenced command for the feedback controller of the Cartesian Robot so that a moving object can be tracked in real-time. The feedback controller bandwidth of the Cartesian Robot will be designed so that it is fast enough to track the desired speed of the moving object.

**Keywords:** stereo vision, tracking, visual servo control, Cartesian Robot

**1. บทนำ**

การนำกล้องมาใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ให้กับหุ่นยนต์นั้น สามารถทำให้หุ่นยนต์รับรู้ถึงสิ่งแวดล้อมรอบตัวได้โดยหุ่นยนต์ไม่จำเป็นต้องเข้าไปสัมผัสกับสิ่งนั้นโดยตรง เป็นปัจจัยพื้นฐานสำคัญในการที่จะสร้าง

โปรแกรมที่ซับซ้อนให้หุ่นยนต์ หรือสร้างปัญญาประดิษฐ์ให้กับหุ่นยนต์ได้ การใช้กล้องเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้เพื่อหาค่าตำแหน่งพิกัดของวัตถุที่เราสนใจ สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากการมองเห็นจากนั้นสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตามเป้าหมายหรือ

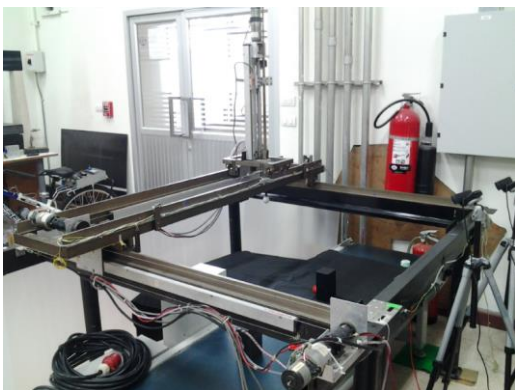
## DRC-2004

เคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางนั้นเรียกว่าการควบคุมการขับเคลื่อนเชิงภาพ (Visual Servo Control) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบควบคุมโดยใช้การขับเคลื่อนเชิงภาพในหลายงานวิจัย เช่น การระบุตำแหน่งด้วยระบบกล้องสองตาสำหรับการหยิบจับของหุ่นยนต์ [1] การใช้ระบบกล้องในการรักษาตำแหน่งของอากาศยาน 4 ใบพัด [2] การใช้ระบบกล้องความเร็วสูงที่ 1000 รอบต่อวินาที ร่วมกับหุ่นยนต์ความเร็วสูง [3] และการประมวลผลด้วยระบบภาพสเตอริโอสำหรับวัดระยะและขนาดของวัตถุในเวลาจริง [4]

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบควบคุมหุ่นยนต์พิกัดฉากรวมกับการขับเคลื่อนเชิงภาพ เพื่อใช้ระบุตำแหน่ง 3 มิติของวัตถุที่เป็นเป้าหมายและระบุตำแหน่ง 3 มิติของปลายแขนของหุ่นยนต์ได้ โดยใช้ระบบกล้องสเตอริโอไม่เคลื่อนที่ติดตั้งภายนอกเพื่อให้หุ่นยนต์พิกัดฉากสามารถเคลื่อนที่ติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่ใน 3 มิติได้

### 2. หุ่นยนต์พิกัดฉาก

หุ่นยนต์พิกัดฉากที่ใช้มีลักษณะดังรูปที่ 1 เป็นโต๊ะระนาบที่มีการเคลื่อนที่ 3 แนวแกนตั้งฉากกัน โครงสร้างทำจากอลูมิเนียมและเหล็ก แต่ละแกนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ระยะทางการเคลื่อนที่ตามแนวแกนเอ็กซ์เท่ากับ 950 มิลลิเมตร แกนวายเท่ากับ 1000 มิลลิเมตร และแกนแซดเท่ากับ 450 มิลลิเมตร



รูปที่ 1 หุ่นยนต์พิกัดฉาก Cartesian Robot

### 3. ระบบกล้องสเตอริโอ

ในการได้มาซึ่งภาพ 3 มิติ วิธีการที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือการใช้ระบบภาพสเตอริโอ โดยการใช้ภาพ 2 ภาพที่ถ่ายในเวลาเดียวกันจากกล้อง 2 ตัว มาคำนวณหาจุดคู่สอดคล้องแล้วจึงแปลงเป็นพิกัดใน 3 มิติ โดยในงานวิจัยนี้ใช้กล้องเว็บแคมยูเอสบี ยี่ห้อ Logitech รุ่น C920 ความเร็วรับภาพ 30 เฟรมต่อวินาที ที่ความละเอียดภาพ 640 x 480 พิกเซล ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบกล้อง stereo vision

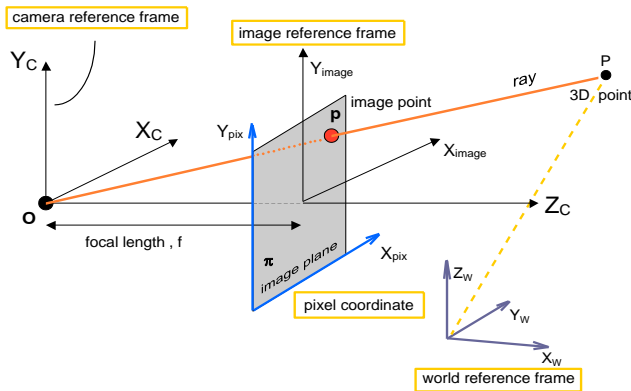
#### 3.1 แบบจำลองของกล้อง

แบบจำลองของกล้องที่ใช้ทั่วไปจะเป็นแบบจำลองกล้องรูเข็ม [5] ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยประกอบด้วยจุดศูนย์กลางการฉาย O (center of projection) หรือเรียกอีกชื่อว่าจุดศูนย์กลางกล้อง (camera center), ระนาบรับภาพ (image plane) และจุดพิกัดใน 3 มิติ (จุด P) และภาพของจุด P (จุด p) สมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจุดใน 3 มิติและจุดภาพที่เกิดจากจุด 3 มิตินั้น จะเรียกว่า "สมการการฉาย" [5] โดยพิกัดที่เกี่ยวข้องจะถูกเขียนแสดงในลักษณะของพิกัดเอกพันธ์ (homogeneous coordinate) ดังแสดงในสมการ (1) และ (2)

$$\lambda \mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{x} \quad (1)$$

$$\lambda \begin{bmatrix} x_{pix} \\ y_{pix} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

**DRC-2004**



รูปที่ 3 แบบจำลองกล้องรูเข็มและแกนอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง

โดยที่  $\lambda$  คือ ค่าคงที่ไม่เจาะจง ซึ่งแสดงถึงการที่กล้องจะลดมิติของข้อมูลจาก 3 มิติ เป็น 2 มิติ โดยกลุ่มของจุดใน 3 มิติที่อยู่บนเส้นตรงเดียวกันและผ่านจุดศูนย์กลางการฉาย เมื่อผ่านการฉายจะปรากฏเป็นจุดภาพเดียวกัน กลุ่มของจุดใน 3 มิติเหล่านี้เมื่อแสดงบนแกนอ้างอิงกล้องจะมีค่าพิกัดเป็นสัดส่วนกัน ซึ่งแสดงด้วยค่า  $\lambda$  นี้

$x$  คือ เวกเตอร์ที่แสดงถึงจุดวัตถุ เทียบกับแกนอ้างอิงโลกแบบพิกัดเอกพันธ์

$x$  คือ เวกเตอร์ที่แสดงถึงจุดภาพ เทียบกับแกนอ้างอิงจุดภาพแบบพิกัดเอกพันธ์

$P$  เรียกว่าเมทริกซ์กล้อง (camera matrix) เป็นเมทริกซ์ขนาด  $3 \times 4$

$K$  เรียกว่าเมทริกซ์การสอบเทียบกล้อง (camera calibration matrix) เป็นเมทริกซ์ขนาด  $3 \times 3$  ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพารามิเตอร์ภายในทั้ง 5 ตัวของกล้อง โดยที่

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & s & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$\alpha, \beta$  คือ ค่าคงที่ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของเลนส์และความละเอียดของอุปกรณ์รับรูปภาพ

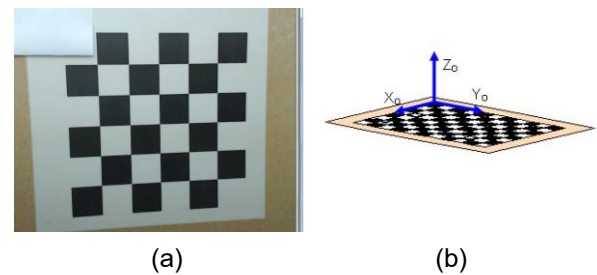
$u_0, v_0$  คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางของภาพซึ่งคือจุดกำเนิดของแกนอ้างอิงภาพ และเป็นจุดตัดของแกนमुखสำคัญของเลนส์ (optical axis) กับระนาบรับภาพ

$s$  คือ ค่าความเบี่ยง ซึ่งแสดงถึงความเบี่ยงเบนอันเนื่องมาจากการที่แกนमुखสำคัญของเลนส์ไม่ตั้งฉากกับระนาบรับภาพของกล้อง

$[R|t]$  คือเมทริกซ์พารามิเตอร์ภายนอก มีขนาด  $3 \times 4$  โดยแบ่งเป็นส่วนของการหมุน, Rotation Matrix,  $R$ . และส่วนของการเลื่อนที่, Translation,  $T$ .

**3.2 การสอบเทียบกล้อง**

ในการนำกล้องไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการวัด การสอบเทียบกล้องเป็นขั้นตอนที่จำเป็นและมีความสำคัญ ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้วัตถุสอบเทียบชนิด 2 มิติ มีลักษณะเป็นตารางหมากรุกขนาด  $6 \times 6$  ดังแสดงในรูปที่ 4(a) สามารถสร้างขึ้นโดยใช้โปรแกรมประยุกต์สำหรับการจัดการรูปภาพและพิมพ์โดยใช้เครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดสูง จุดที่ใช้เป็นจุดควบคุมคือจุดมุมของตารางหมากรุก จากภาพของกระดานสอบเทียบจะสามารถหาตำแหน่งจุดควบคุมได้โดยวิธีการประมวลผล จากภาพถ่ายกระดานสอบเทียบที่ได้จากหลายมุมมองจะสามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ภายในและภายนอกของกล้องได้ [6]



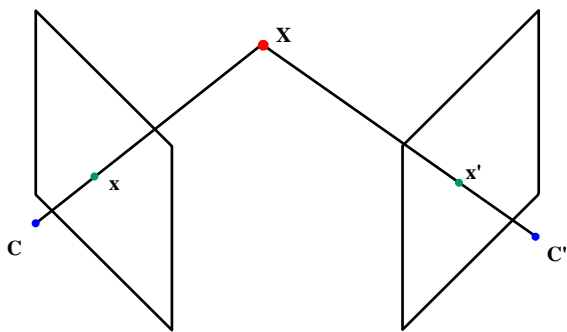
รูปที่ 4 (a) กระดานสอบเทียบ (b) แกนอ้างอิงวัตถุสอบเทียบ

**3.3 ระบบสองกล้องและการคำนวณหาพิกัด 3 มิติจากภาพทั้งสอง**

กล้องเป็นอุปกรณ์ที่สามารถรับภาพวัตถุใน 3 มิติใดๆ ให้เป็นภาพที่มีเพียง 2 มิติได้ ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากกล้องจึงหายไป 1 มิติ เพื่อที่จะให้ได้ข้อมูลภาพ 3 มิติจึงจำเป็นต้องใช้กล้องอย่างน้อยสองกล้องที่วางในตำแหน่งที่ต่างกันทำการถ่ายภาพ

**DRC-2004**

วัตถุที่สนใจในเวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งเมื่อพิจารณาจุด 3 มิติจุดหนึ่ง ที่ถูกฉายไปยังกล้องทั้งสองผ่านจุดศูนย์กลางกล้องทั้งสอง ( c และ c') จะก่อให้เกิดจุดภาพขึ้นบนนกล้องแต่ละตัว จุดภาพในกล้องทั้งสองที่เกิดจากจุด 3 มิติจุดเดียวกันนี้ จะถูกเรียกว่าเป็นคู่จุดสอดคล้อง (corresponding points) เมื่อทราบข้อมูลพารามิเตอร์ภายในและพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องทั้งสองตัว จะสามารถทำการฉายกลับ (back-projection) โดยการลากเส้นตรงผ่านจุดศูนย์กลางกล้องและตำแหน่งของจุดภาพนั้น รังสีการฉายกลับจากกล้องทั้งสองจะตัดกัน ณ จุด 3 มิติที่ก่อให้เกิดจุดภาพนั้น หลังจากทำการประมวลผลภาพจากกล้องทั้งสอง และทำการแก้ไขการบิดเบี้ยวในภาพทั้งสองแล้ว จะได้คู่จุดสอดคล้องที่แสดงถึงตำแหน่งวัตถุบนภาพ โดยกำหนดให้  $x = [x \ y \ 1]^T$  เป็นพิกัดเอกพันธ์ของวัตถุบนภาพซ้าย และ  $x' = [x' \ y' \ 1]^T$  เป็นพิกัดเอกพันธ์ของวัตถุบนภาพขวา และกำหนดให้  $X = [X \ Y \ Z \ 1]^T$  คือจุด 3 มิติ ที่ปรากฏเป็นจุดคู่สอดคล้องบนพิกัดเอกพันธ์ของระบบกล้องสเตอริโอ จากสมการการฉายจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังแสดงในสมการที่ (3) และสมการที่ (4)



รูปที่ 5 การใช้กล้องสองตัวในการหาพิกัด 3 มิติ

$$\lambda x = PX \tag{3}$$

เมื่อ P คือเมทริกซ์กล้องซ้าย

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p^{1T} \\ p^{2T} \\ p^{3T} \end{bmatrix}$$

และ

$$\lambda' x' = P'X \tag{4}$$

เมื่อ P' คือเมทริกซ์กล้องขวา

$$P' = \begin{bmatrix} p'_{11} & p'_{12} & p'_{13} & p'_{14} \\ p'_{21} & p'_{22} & p'_{23} & p'_{24} \\ p'_{31} & p'_{32} & p'_{33} & p'_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p'^{1T} \\ p'^{2T} \\ p'^{3T} \end{bmatrix}$$

เนื่องจากค่าคงตัว  $\lambda$  และ  $\lambda'$  เป็นค่าคงตัวที่ไม่ทราบค่าเพื่อจะกำจัดค่าคงตัวเหล่านี้จะใช้ความสัมพันธ์ผ่านทางผลคูณเชิงเวกเตอร์

สำหรับกล้องทางซ้าย

$$x \times (PX) = 0$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p^{1T} X \\ p^{2T} X \\ p^{3T} X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} y p^{3T} X - p^{2T} X \\ p^{1T} X - x p^{3T} X \\ x p^{2T} X - y p^{1T} X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ซึ่งสามารถเขียนได้เป็นสมการพีชคณิต 3 สมการ ดังแสดงในสมการที่ (5) สำหรับ 3 สมการนี้มีเพียง 2 สมการเท่านั้นที่เป็นอิสระจากกัน

$$\begin{aligned} x(p^{3T} X) - p^{2T} X &= 0 \\ y(p^{3T} X) - p^{2T} X &= 0 \\ x(p^{2T} X) - y(p^{1T} X) &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

เช่นเดียวกันสำหรับกล้องขวาสามารถเขียนได้เป็นสมการพีชคณิต 3 สมการ ดังแสดงในสมการที่ (6) และ 3 สมการนี้มีเพียง 2 สมการเท่านั้นที่เป็นอิสระจากกัน

$$\begin{aligned} x'(p'^{3T} X) - p'^{2T} X &= 0 \\ y'(p'^{3T} X) - p'^{2T} X &= 0 \\ x'(p'^{2T} X) - y'(p'^{1T} X) &= 0 \end{aligned} \tag{6}$$

ทำการเลือก 2 สมการแรกจากสมการที่ (5) และสมการที่ (6) แล้วจัดรูปใหม่ได้ดังแสดงในสมการที่ (7)

**DRC-2004**

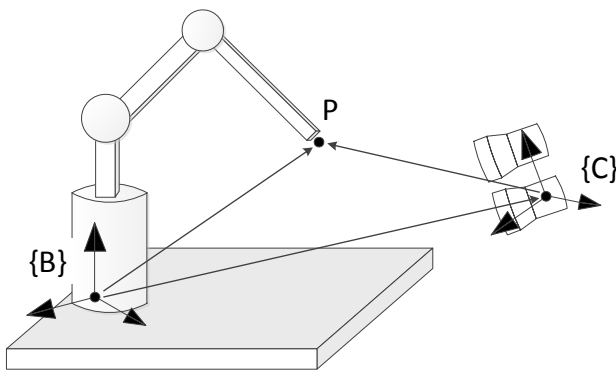
$$\begin{bmatrix} xp^{3T} - p^{1T} \\ yp^{3T} - p^{2T} \\ x^i p^{3T} - p^{iT} \\ y^i p^{3T} - p^{i2T} \end{bmatrix} \mathbf{X} = \mathbf{0} \quad (7)$$

หรือ  $LX=0$

ซึ่งสามารถทำการแก้สมการหาค่า  $x$  ได้ โดยค่า  $x$  ที่หาได้นี้คือจุดพิกัด 3 มิติ ที่เราสนใจบน พิกัดเอกพจน์ของระบบกล้องสเตอริโอนั่นเอง

**3.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิง กล้องสเตอริโอ และแกนอ้างอิงของหุ่นยนต์**

เนื่องจากตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้จาก ระบบกล้องสเตอริโอเขียนอ้างอิงเทียบกับแกน อ้างอิงของกล้องสเตอริโอ แต่ตำแหน่งที่สั่งให้หุ่นยนต์ เคลื่อนที่นั้นเขียนเทียบกับแกนอ้างอิงของหุ่นยนต์ พิกัดจาก ดังนั้นจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ ระหว่างแกนอ้างอิงของกล้องเทียบกับแกนอ้างอิงของ หุ่นยนต์พิกัดจาก ซึ่งความสัมพันธ์นี้จะอยู่ในรูปแบบ เมทริกซ์การแปลงเอกพจน์ ( Homogeneous transformation matrices ),  ${}^B T$  [7] ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงภาพความสัมพันธ์ระหว่างเฟรมของ หุ่นยนต์ และเฟรมของกล้องสเตอริโอ

โดยกำหนดให้ตำแหน่งจุด P เป็นตำแหน่ง ปลายแขนของหุ่นยนต์บนพิกัดอ้างอิงโลก และ กำหนดให้  ${}^B P$  เป็นเวกเตอร์แสดงตำแหน่งของจุด P

เทียบกับแกนอ้างอิงของหุ่นยนต์ และ  ${}^C P$  เป็น เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของจุด P เทียบกับแกนอ้างอิง ของระบบกล้องสเตอริโอ

และสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างจุด  ${}^B P$  และ  ${}^C P$  ได้ดังสมการที่ (8) และ (9)

$${}^B P = {}^B T {}^C P \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} {}^B x \\ {}^B y \\ {}^B z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C x \\ {}^C y \\ {}^C z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

จากสมการที่ (9) พบว่า การที่จะแก้สมการ หาค่า  ${}^B T$  จำเป็นจะต้องมีค่าตำแหน่ง  ${}^B P$  และ  ${}^C P$  อย่างน้อย 4 จุด เพื่อที่จะแก้ระบบสมการหาค่าแม่นยำ หรือจำนวนจุด  ${}^B P$  และ  ${}^C P$  มากกว่า 4 จุด เพื่อหา ค่าที่เหมาะสมของ  ${}^B T$  ได้ด้วยวิธีการหาค่าต่ำ สุดกำลังสองเชิงเส้น หรือ Linear Least squares Minimization โดยสามารถจัดรูปสมการใหม่เพื่อหาค่า  ${}^B T$  ได้ดังแสดงในสมการที่ (10)

$$\begin{bmatrix} {}^B x_1 \\ {}^B x_2 \\ {}^B x_3 \\ \vdots \\ {}^B x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^C x_1 & {}^C y_1 & {}^C z_1 & 1 \\ {}^C x_2 & {}^C y_2 & {}^C z_2 & 1 \\ {}^C x_3 & {}^C y_3 & {}^C z_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ {}^C x_n & {}^C y_n & {}^C z_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ \vdots \\ {}^B x_{Corg} \end{bmatrix}$$

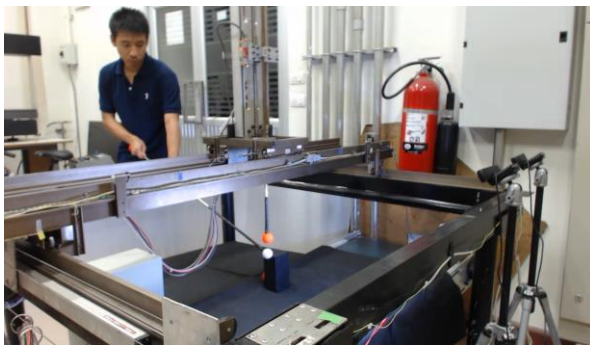
$$\begin{bmatrix} {}^B y_1 \\ {}^B y_2 \\ {}^B y_3 \\ \vdots \\ {}^B y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^C x_1 & {}^C y_1 & {}^C z_1 & 1 \\ {}^C x_2 & {}^C y_2 & {}^C z_2 & 1 \\ {}^C x_3 & {}^C y_3 & {}^C z_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ {}^C x_n & {}^C y_n & {}^C z_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ \vdots \\ {}^B y_{Corg} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} {}^B z_1 \\ {}^B z_2 \\ {}^B z_3 \\ \vdots \\ {}^B z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^C x_1 & {}^C y_1 & {}^C z_1 & 1 \\ {}^C x_2 & {}^C y_2 & {}^C z_2 & 1 \\ {}^C x_3 & {}^C y_3 & {}^C z_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ {}^C x_n & {}^C y_n & {}^C z_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \\ \vdots \\ {}^B z_{Corg} \end{bmatrix} \quad (10)$$

## DRC-2004

### 4 การติดตามวัตถุใน 3 มิติ

ในการทดลองควบคุมหุ่นยนต์พิกัดฉาก 3 แกนให้สามารถเคลื่อนที่ติดตามวัตถุเป้าหมายที่เคลื่อนที่ในพิกัด 3 มิติใดๆ ด้วยการควบคุมการขับเคลื่อนเชิงภาพนั้น เริ่มต้นจากเลือกตำแหน่งการวางระบบกล้องสเตอริโอไว้ในตำแหน่งที่กล้องทั้งสองตัวสามารถที่จะมองเห็นบริเวณพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ได้ ทำการสอบเทียบกล้องแต่ละตัวเพื่อหาเมทริกซ์กล้อง และหาความสัมพันธ์ระหว่างแกนอ้างอิงกล้องสเตอริโอและแกนอ้างอิงหุ่นยนต์พิกัดฉาก จากนั้นกำหนดตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์พิกัดฉากและตำแหน่งเป้าหมาย โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้วัตถุสีขาวสะท้อนแสงติดไว้ที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์พิกัดฉากเพื่อให้ระบบกล้องสเตอริโอสามารถที่จะมองเห็นตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ และให้วัตถุสีขาวสะท้อนแสงเป็นวัตถุเป้าหมายที่หุ่นยนต์พิกัดฉากต้องเคลื่อนที่ตามไป เนื่องจากกล้องจำเป็นจะต้องมองเห็นวัตถุทั้งสองชั้น จึงกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างวัตถุทั้งสองในแกน Z (Z-axis) เท่ากับ 50 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 7

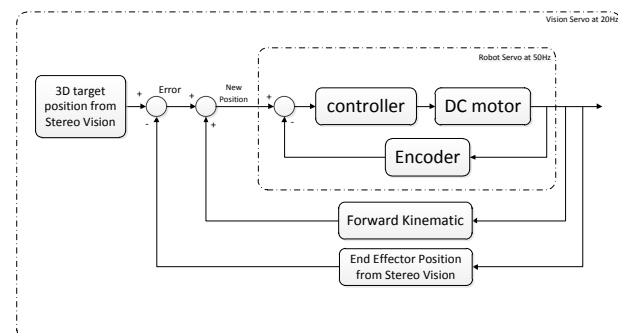


รูปที่ 7 การทดสอบให้หุ่นยนต์พิกัดฉาก 3 แกนเคลื่อนที่ติดตามวัตถุใน 3 มิติ

การออกแบบระบบควบคุมจะแบ่งระบบควบคุมออกเป็น 2 วงรอบ คือ วงนอกและวงใน ดังนั้นวงนอกจะเป็นการควบคุมการป้อนกลับด้วยภาพหรือการขับเคลื่อนเชิงภาพ เริ่มจากระบบกล้องสเตอริโอรับภาพวัตถุเป้าหมาย (งานวิจัยนี้เลือกใช้วัตถุสีขาวสะท้อนแสงเป็นวัตถุเป้าหมาย) คำนวณหา

ตำแหน่ง 3 มิติของวัตถุเป้าหมายเทียบกับแกนอ้างอิงกล้อง และแปลงตำแหน่ง 3 มิติของวัตถุเป้าหมายจากแกนอ้างอิงกล้องให้เทียบกับแกนอ้างอิงของหุ่นยนต์ จากนั้นสร้างสัญญาณค่าผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายกับตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์พิกัดฉากที่ได้จากระบบกล้อง (ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์พิกัดฉากเลือกใช้วัตถุสีขาวสะท้อนแสง) เพื่อส่งให้ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งใหม่ของวัตถุต่อไป เนื่องจากในการควบคุมการขับเคลื่อนเชิงภาพมีปริมาณข้อมูลที่ต้องประมวลผลมาก จึงทำให้เวลาที่ใช้ในการประมวลผลมากไปด้วย ซึ่งสามารถหาค่าความถี่ในการติดตามสูงสุดได้ประมาณ 20 - 30 Hz ความแม่นยำในการคำนวณพิกัด 3 มิติของระบบมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร

วงในจะเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับของหุ่นยนต์พิกัดฉากด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ (encoder) โดยจะรับค่าตำแหน่งที่หุ่นยนต์จะต้องเคลื่อนที่ไปจากระบบการควบคุมการขับเคลื่อนเชิงภาพจากวงนอก ทำการเปรียบเทียบตำแหน่งปัจจุบันของหุ่นยนต์ที่รับมาจากเอ็นโค้ดเดอร์ จากนั้นส่งสัญญาณค่าผิดพลาดทางตำแหน่งผ่านตัวควบคุมที่ออกแบบไว้ให้หุ่นยนต์พิกัดฉากเคลื่อนที่ต่อไป เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ตอบสนองได้รวดเร็วและไม่มีค่าผิดพลาดที่สถานะสุดท้าย ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PI [8] ด้วยอัตราป้อนกลับสูงสุดที่ 50 Hz ดังแสดงในแผนภาพบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 8

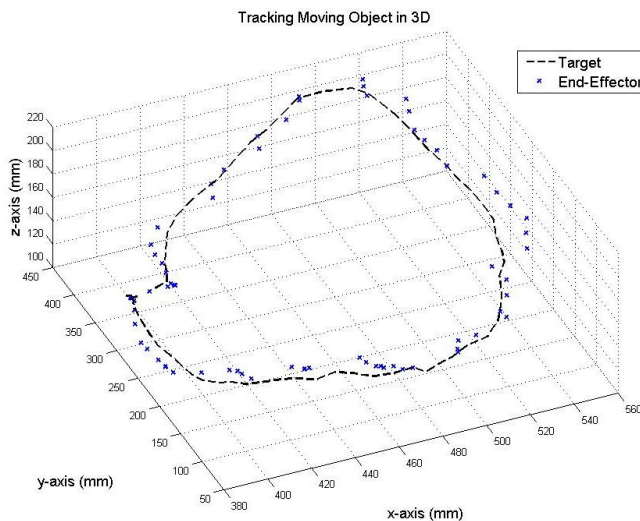


รูปที่ 8 แผนภาพระบบควบคุมแบบป้อนกลับด้วยการขับเคลื่อนเชิงภาพ

## DRC-2004

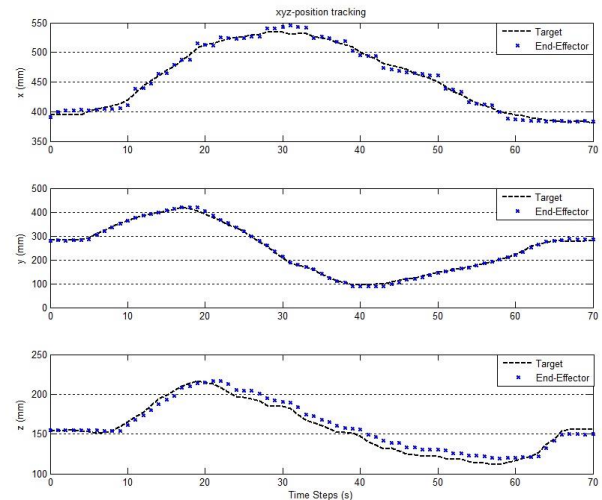
### 5. ผลการทดลอง

จากการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์พิกัดฉาก 3 แกน ให้เคลื่อนที่ติดตามวัตถุเป้าหมายที่เคลื่อนที่ในพิกัด 3 มิติใดๆ ด้วยการควบคุมการขับเคลื่อนเชิงภาพนั้นแสดงได้ในรูปที่ 9 ซึ่งได้ทดสอบโดยเคลื่อนที่วัตถุเป้าหมายเป็นรูปวงกลมในตำแหน่งพิกัด 3 มิติใดๆ ด้วยความเร็วคงที่ประมาณ 2 เซนติเมตรต่อวินาที และให้หุ่นยนต์พิกัดฉาก 3 แกนเคลื่อนที่ติดตามเป้าหมายในเวลาจริง ซึ่งตำแหน่งวัตถุเป้าหมายแทนด้วยเส้นประสีดำ และตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์แทนด้วยจุดกากบาทสีน้ำเงิน



รูปที่ 9 ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์พิกัดฉากในพิกัด 3 มิติ และตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในพิกัด 3 มิติ

และเมื่อนำตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในแต่ละแนวแกนมาพล็อตกราฟเทียบกับตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์พิกัดฉาก สามารถแสดงได้ในรูปที่ 10 โดยที่แกนตั้งเป็นตำแหน่งของวัตถุในแนวแกนเอ็ก แกนวาง แกนแซด และแกนนอนเป็นเวลาในหน่วยวินาที ซึ่งตำแหน่งวัตถุเป้าหมายแทนด้วยเส้นประสีดำ และตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์แทนด้วยจุดกากบาทสีน้ำเงิน



รูปที่ 10 กราฟแสดงตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์พิกัดฉากเทียบกับตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายที่เวลาต่างๆ

### 6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสรุปได้ว่า หุ่นยนต์พิกัดฉาก 3 แกนสามารถเคลื่อนที่ติดตามวัตถุเป้าหมายที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ประมาณ 2 เซนติเมตรต่อวินาทีในพิกัด 3 มิติใดๆ ภายใต้ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์พิกัดฉากในเวลาจริงได้ โดยวงนอกใช้การขับเคลื่อนเชิงภาพด้วยระบบกล้องสเตอริโอในการสร้างตำแหน่งใหม่ให้กับหุ่นยนต์พิกัดฉากด้วยความถี่บ๊อกลัมที่ 20 Hz และวงในใช้เอ็นโค้ดเดอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ในการรักษาตำแหน่งของหุ่นยนต์พิกัดฉาก ที่ความถี่บ๊อกลัมสูงสุดที่ 50 Hz

### 7. เอกสารอ้างอิง

[1] Hao Li, Yen-Lun Chen, Tianhai Chang, Xinyu Wu, Yongsheng Ou, and Yangsheng Xu. Binocular Vision Positioning for Robot Grasping. Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 1522-1527, 2011.

[2] Engel, J., Sturm, J., and Cremers, D. Camera-based navigation of a low-cost quadcopter. Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ

## DRC-2004

International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2815-2821, 2012.

[3] Ishikawa, M., Namiki, A., Senoo, T., and Yamakawa, Y. Ultra High-speed Robot Based on 1 kHz Vision System. Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5460-5461, 2012.

[4] Mustafah, Y.M., Noor, R., Hasbi, H., and Azma, A.W. Stereo Vision Images Processing for Real-time Object Distance and Size Measurements. Proceedings of the 2012 International Conference on Computer and Communication Engineering, pp. 659-663, 2012.

[5] Richard Hartley and Andrew Zisserman., 2006, Multiple View Geometry in Computer Vision., Cambridge, UK.

[6] Gary Bradski and Adrian Kaehler., 2008., Learning OpenCV, O'Reilly Media , Inc. USA.

[7] JOHN J. CRAIG., 1955, Introduction to robotics: mechanics and control 2<sup>nd</sup> Edition., Addison-Wesley Publishing Company Inc., USA.

[8] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 2.กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย