

## การโปรแกรมหุ่นยนต์ด้วยวิธีสาธิตเพื่อการประกอบชิ้นงาน Robot Programming by Demonstrations for Assembly Task

ปณิธิ ศิริอักษร และ รศ.ดร.สยาม เจริญเสียง

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทรศัพท์ +66(0)2-4709339, 9691 โทรสาร +66(0)2+4709691

อีเมล panithi.sira-uksorn@nectec.or.th, siam@fibo.kmutt.ac.th

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการพัฒนาระบบโปรแกรมหุ่นยนต์ด้วยวิธีสาธิต โดยมุ่งเน้นเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานแบบ 3 มิติจากมนุษย์สู่หุ่นยนต์ ซึ่งอาศัยระบบการรับภาพแบบสเตอริโอวีชันจากกล้องวีดีโอจำนวน 2 ตัวเพื่อตรวจจับตำแหน่งชิ้นงาน และหาค่าตำแหน่งของชิ้นงานในรูปแบบ 3 มิติด้วยขบวนการระบบประสาท ในส่วนต่อมาระบบทำการวิเคราะห์การกระทำจากข้อมูลตำแหน่งของชิ้นงานที่เคลื่อนที่ในระหว่างการสาธิตด้วยวิธีการพีชชี-สเตทแมชชีน และจำแนกลำดับการสาธิต ในส่วนสุดท้ายระบบจะนำข้อมูลที่ได้ออกมาสร้างเป็นโปรแกรม ควบคุมแขนหุ่นยนต์ให้ทำงานตามการสาธิต และแสดงการทำงานด้วยแขนหุ่นยนต์แบบ 5 องศาอิสระผ่านระบบภาพเสมือนแบบ 3 มิติ เพื่อตรวจสอบข้อผิดพลาดก่อนทำการควบคุมแขนหุ่นยนต์จริง

### Abstract

This research proposes a robot programming by human demonstrations for assembly task. The main objective of the research is to transfer a skill of 3D assembly task from human into robot. In this system, stereo vision is used for tracking objects using two video cameras and 3D positions are provided by using neural network. In the next step, a task sequence is analyzed from positions of moving objects during demonstration by using fuzzy state machine. In the final phase, the system generates a program for controlling a 5-DOF robotic arm in simulation mode before sending robot's commands to a real robot.

### 1. คำนำ

ในปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในงานสาขาต่างๆ เช่น การแพทย์ สถาปัตยกรรม วิทยาศาสตร์ และวิศวกรรม โดยเฉพาะอย่างยิ่งบทบาทในงานด้านอุตสาหกรรม แต่การโปรแกรม

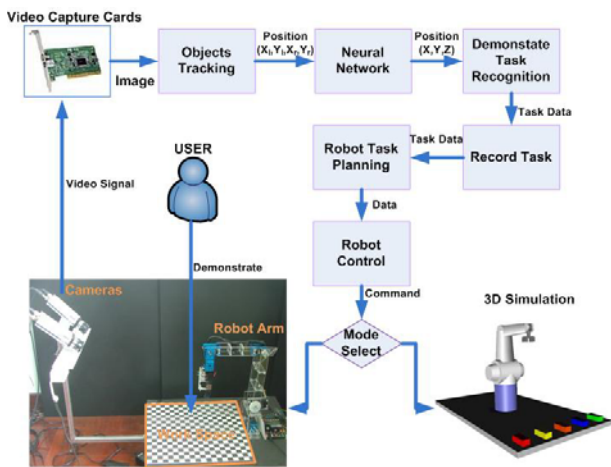
หุ่นยนต์ให้สามารถทำงานตามต้องการนั้นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการโปรแกรม หากต้องการปรับเปลี่ยนการทำงานของหุ่นยนต์หรือทำงานที่ต้องมีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนการทำงานบ่อยครั้งทำให้ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญและเวลาในการดำเนินงานมากขึ้นในการโปรแกรมส่งผลถึงค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้น จึงเกิดแนวคิดในการวิจัยพัฒนาระบบเพื่อใช้ในการถ่ายทอดทักษะจากผู้สาธิตสู่หุ่นยนต์ เช่น งานวิจัยของ Yusuke Maeda และทีมวิจัย [1] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาวิธีการสอนหุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรมด้วยการสาธิตโดยมนุษย์ ซึ่งการศึกษาได้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือการสอน (Teaching) และการวางแผน (Planning) โดยในส่วนการสอนนั้นจะเป็นส่วนการประมวลผลภาพจากกล้องเพื่อหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยสังเกตจากมาร์กเกอร์ที่ติดอยู่บนวัตถุในขณะที่มนุษย์ทำการสาธิต และในส่วนการวางแผนนั้นเป็นส่วนในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพื่อสั่งให้หุ่นยนต์ทำตามการสาธิต งานวิจัยของ Koichi Ogawara และทีมวิจัย [2] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาการโปรแกรมหุ่นยนต์ด้วยวิธีประมวลผลจากการสาธิตซ้ำหลายๆครั้งโดยนำข้อมูลที่ได้ออกมาประมวลผลและกล้องประมวลผลเพื่อหาส่วนการกระทำที่เหมือนกัน และตัดการกระทำที่ไม่จำเป็นออกงานวิจัยของ H. Onda และทีมวิจัย [3] ได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาวิธีการสอนหุ่นยนต์ประกอบชิ้นงานด้วยวิธีการสาธิตในโลกความจริงเสมือน ซึ่งการวิจัยนี้ได้ทดลองโดยการสาธิตนำหลอดใส่ลงในโลกความจริงเสมือน

### 2. ลักษณะการทำงานของระบบ

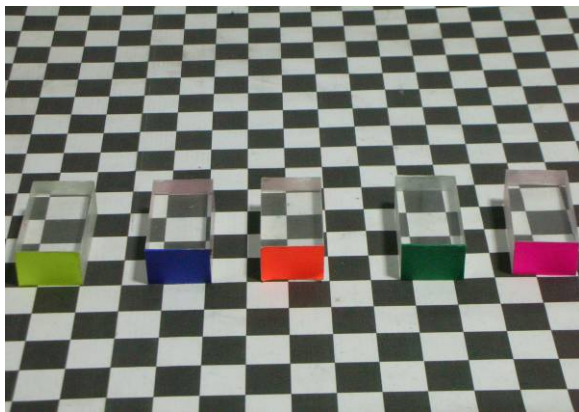
การทำงานของระบบการโปรแกรมหุ่นยนต์เพื่อประกอบชิ้นงานด้วยวิธีสาธิตโดยมนุษย์ ที่พัฒนาขึ้นใช้วิธีการรับการสาธิตผ่านทางระบบรับภาพแบบสเตอริโอด้วยกล้องวีดีโอจำนวน 2 ตัวเพื่อใช้ในการตรวจจับตำแหน่งชิ้นงานแบบ 3 มิติ และหาค่าตำแหน่งของชิ้นงานในรูปแบบ 3 มิติจากกล้องวีดีโอทั้ง 2 ตัวด้วยขบวนการระบบประสาท ในส่วนต่อมาระบบทำการวิเคราะห์การกระทำจากข้อมูลตำแหน่งของชิ้นงานที่เคลื่อนที่ในระหว่างการสาธิตด้วยพีชชีสเตทแมชชีนและจำแนกลำดับการสาธิต จากนั้นระบบนำข้อมูลที่ได้ออกมาสร้างเป็น

โปรแกรมควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ให้ทำงานตามการสาธิต และแสดงการทำงานด้วยแขนหุ่นยนต์แบบ 5 องศาอิสระผ่านระบบภาพเสมือนแบบ 3 มิติ เพื่อตรวจสอบข้อผิดพลาดก่อนทำการควบคุมแขนหุ่นยนต์จริง โดยลักษณะของระบบที่ได้พัฒนาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1

ในการสาธิตการประกอบชิ้นงานใช้วัตถุทรง 3 มิติจำนวน 5 ชิ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2 ซึ่งผู้ใช้งานจะทำการประกอบชิ้นงานภายในพื้นที่ที่จัดเตรียมไว้ ในขณะที่ผู้ใช้งานสาธิตการประกอบชิ้นงาน ระบบจะทำการวิเคราะห์และจดจำลำดับการประกอบชิ้นงานเพื่อสร้างเป็นโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์การสาธิตจากการกระทำ 2 แบบคือ การหยิบวัตถุวางลงบนพื้น และการหยิบวัตถุวางลงบนวัตถุ



รูปที่ 1 แสดงระบบการโปรแกรมหุ่นยนต์ด้วยวิธีสาธิต



รูปที่ 2 แสดงวัตถุที่ใช้ในการประกอบชิ้นงาน

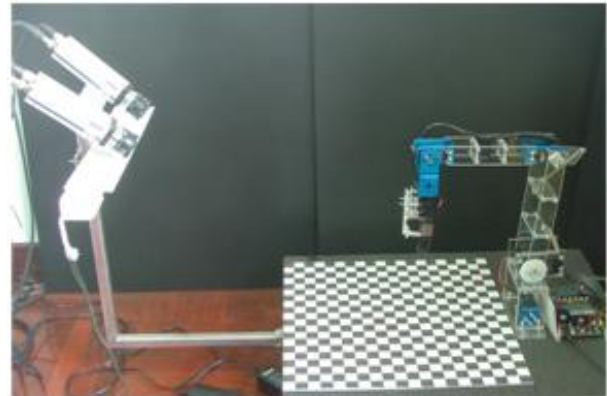
### 3. ส่วนตรวจจับตำแหน่งวัตถุแบบ 3 มิติ

#### 3.1. การรับภาพแบบสเตอริโอ (Stereo Vision) [4]

ส่วนรับสัญญาณภาพจากกล้องแบบสเตอริโอวิชัน เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รับภาพจากพื้นที่สาธิตเพื่อใช้ในการประมวลผลทางภาพและตรวจจับตำแหน่งของชิ้นงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการตรวจจับตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่แบบ 3 มิติ ซึ่งจำเป็นต้องใช้การรับภาพจากกล้อง

วีดีโอจำนวน 2 ตัว ซึ่งติดตั้งวางห่างกัน 14 เซนติเมตร และทำมุม 10 องศาเข้าหากัน แสดงได้ดังรูปที่ 3

การติดตั้งกล้องโดยให้แนวการมองของกล้องทั้งสองตัวไม่ขนานกัน เพื่อช่วยแก้ปัญหาพื้นที่การรับภาพอันเนื่องมาจากมุมมองของกล้องมีจำกัด และการหาตำแหน่งของวัตถุใน 3 มิติกล้องทั้งสองตัวต้องสามารถรับภาพวัตถุได้พร้อมกัน และการรับภาพโดยภาพจากกล้องทั้งสองตัวต้องนำมาผ่านกระบวนการซึ่งโครไนซ์ เพื่อให้ภาพที่ได้จากกล้องทั้งสองตัวเป็นภาพที่ได้จากการรับภาพในเวลาเดียวกันเพื่อลดความผิดพลาดก่อนจะนำมาประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุ ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องแสดงได้ดังรูปที่ 4



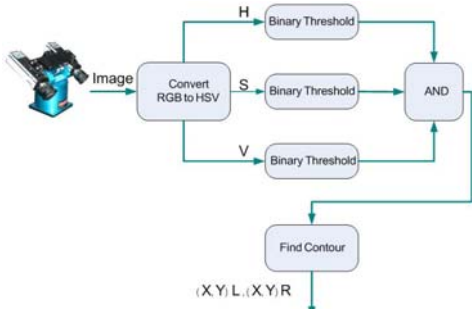
รูปที่ 3 แสดงการติดตั้งกล้องเพื่อรับภาพแบบสเตอริโอ



รูปที่ 4 แสดงภาพที่ได้จากกล้อง

#### 3.2. การตรวจจับตำแหน่งวัตถุ

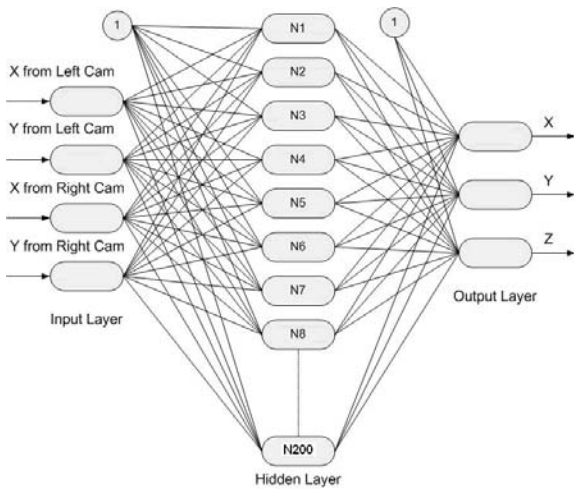
ในการตรวจจับตำแหน่งวัตถุจะใช้กล้องจำนวน 2 ตัวในการรับภาพวัตถุที่ทำการติดแถบสีที่ต่างกันเพื่อใช้ในการแยกแยะ และทำการตรวจจับวัตถุ ซึ่งการตรวจจับตำแหน่งวัตถุจะประมวลผลภาพจากแต่ละกล้องเพื่อให้ได้ตำแหน่งของวัตถุแบบ 2 มิติ โดยอาศัยหลักการตรวจจับตำแหน่งวัตถุด้วยการเปรียบเทียบค่าของสีโดยแปลงระบบสีของภาพจาก RGB เป็น HSV เพื่อลดผลกระทบจากความเข้มแสง จากนั้นทำการแยกแต่ละแชนแนลสีเพื่อทำ Binary Threshold และใช้กระบวนการหา Contour เพื่อหากลุ่มสีของวัตถุ และเป็นการลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น ซึ่งระบบการตรวจจับวัตถุที่ได้พัฒนาขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงระบบการตรวจจับวัตถุ

### 3.3. การหาตำแหน่งวัตถุใน 3 มิติ

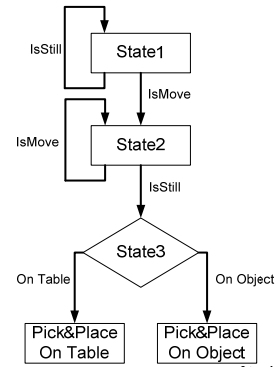
ในการตรวจจับตำแหน่งชิ้นงานใน 3 มิติจำเป็นต้องใช้กล้องมากกว่า 1 ตัว เพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุในสามมิติ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องจำนวน 2 ตัวในการตรวจจับตำแหน่งชิ้นงาน และจำเป็นต้องใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประมวลผลค่าตำแหน่งที่ได้จากกล้องทั้งสองตัวซึ่งเป็นค่าแบบ 2 มิติให้เป็นค่าตำแหน่งจริงแบบ 3 มิติบนพื้นที่ทำงาน งานวิจัยนี้ได้นำข่ายงานระบบประสาท (Neural Network) [5] มาประยุกต์ใช้แทนสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งข่ายงานระบบประสาทที่เลือกใช้เป็นข่ายงานแบบป้อนไปข้างหน้าหลายชั้น (Multilayer Feed-forward Network) ประกอบด้วยชั้นข้อมูลเข้า (Input Layer) จำนวน 4 โหนด ชั้นซ่อน (Hidden Layer) จำนวน 200 โหนด และชั้นข้อมูลออก (Output Layer) จำนวน 3 โหนด แสดงได้ดังรูปที่ 6 โดยข่ายงานระบบประสาทนี้ได้ทำการฝึกสอนด้วยชุดข้อมูลจำนวน 1800 ชุดข้อมูล



รูปที่ 6 แสดงข่ายงานระบบประสาท

### 4. ส่วนวิเคราะห์การกระทำจากการสาดิต

เป็นส่วนที่วิเคราะห์การกระทำจากตำแหน่งของชิ้นงานที่ได้มาจากการตรวจจับตำแหน่งของชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้ทำการจำแนกการกระทำออกเป็นสองแบบคือ การหยิบวัตถุวางลงบนพื้น และการหยิบวัตถุวางลงบนวัตถุ ในการวิเคราะห์ได้ใช้อัลกอริทึมแบบฟัซซีสเตตแมชชีน (Fuzzy State Machine) ซึ่งเป็นการนำฟัซซีโลจิกมาใช้ในการตัดสินใจของสเตตแมชชีน โดยหลักการการทำงานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7

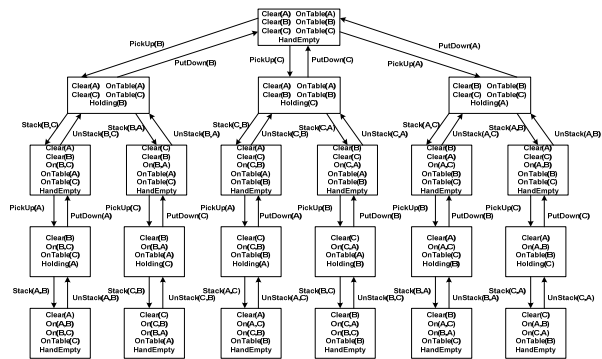


รูปที่ 7 แสดงแผนภาพการทำงานของฟัซซีสเตตแมชชีน

จากรูปที่ 7 ในสเตตที่ 1 ระบบทำการตรวจสอบสถานะของวัตถุว่ามีวัตถุใดเคลื่อนที่ โดยถ้ามีการเคลื่อนที่ระบบจะเข้าสู่สเตตที่ 2 ระบบทำการตรวจสอบว่าวัตถุที่เคลื่อนที่นั้นมีการหยุดการเคลื่อนที่หรือไม่ โดยถ้ามีการหยุดการเคลื่อนที่ระบบจะเข้าสู่สเตตที่ 3 คือการตรวจสอบว่าวัตถุที่หยุดเคลื่อนที่นั้นวางอยู่บนพื้นที่ทำงาน หรือวางอยู่บนวัตถุชิ้นใด

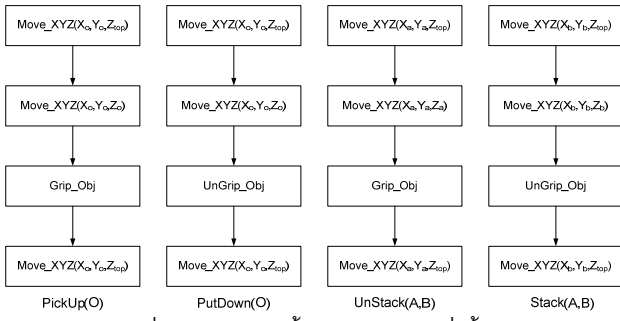
### 5. ส่วนสร้างโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์

ในส่วนการสร้างโปรแกรมเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ ระบบการสร้างสเตตสเปซ ของขั้นตอนการทำงานทั้งหมดของหุ่นยนต์ขึ้นมาเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาและสร้างโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ ซึ่งการสร้างสเตตสเปซได้ใช้วิธีการ STRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver) [6] สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงการสร้างสเตตสเปซในกรณีวัตถุจำนวน 3 ชิ้น[6]

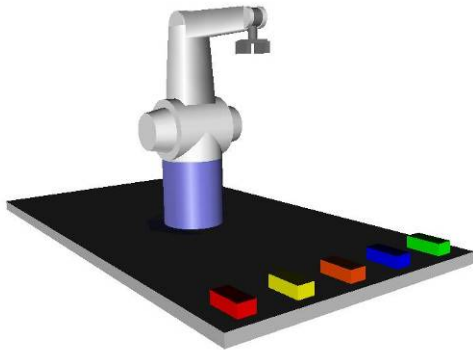
ในการสร้างโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ประกอบด้วยคำสั่งพื้นฐาน 3 คำสั่งคือ เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง XYZ(Move\_XYZ) จับวัตถุ (Grip\_Obj) และปล่อยวัตถุ (UnGrip\_Obj) และคำสั่งขั้นสูง 4 คำสั่งคือ หยิบวัตถุขึ้นจากพื้น (PickUp) วางวัตถุลงบนพื้น (PutDown), หยิบวัตถุขึ้นจากอีกวัตถุ (UnStack) และวางลงบนวัตถุ (Stack) ซึ่งคำสั่งขั้นสูงเป็นการนำคำสั่งพื้นฐานมาเรียงลำดับขั้นตอน แสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงลำดับขั้นตอนสำหรับคำสั่งขั้นสูง

## 6. ส่วนแสดงภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ

หลังจากสร้างโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ระบบจะทำการสร้างภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติเพื่อแสดงภาพการควบคุมแขนหุ่นยนต์ตามการสาธิต ภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติที่สร้างขึ้นประกอบด้วยแขนกลหุ่นยนต์ CRS รุ่น A255 [7] ซึ่งเป็นแขนกลที่มี 5 องศาอิสระ และวัตถุที่ใช้ในการสาธิตแสดงได้ดังรูปที่ 10

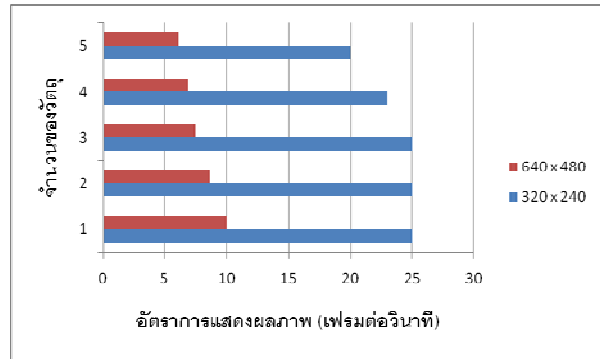


รูปที่ 10 แสดงภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ

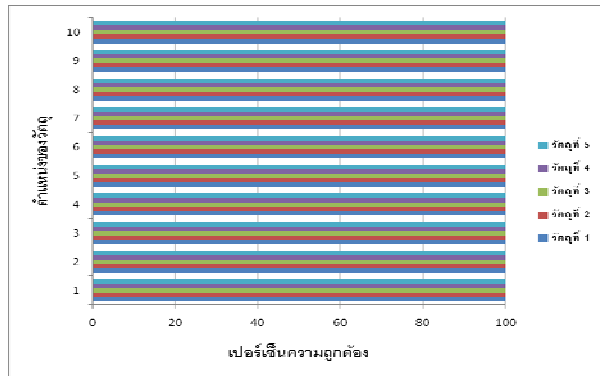
## 7. ผลการทดลอง

### 7.1. การตรวจจับตำแหน่งวัตถุ

เนื่องจากการตรวจจับตำแหน่งวัตถุใช้หลักการตรวจจับสีจากกล้องจำนวน 2 ตัว ความถูกต้องและความเร็วในการประมวลผลภาพมีผลต่อการตรวจจับตำแหน่งของวัตถุ จากการทดลองตรวจจับตำแหน่งวัตถุตั้งแต่ 1 ถึง 5 ชั้น ด้วยภาพที่มีความละเอียดของภาพ 320x240 และ 640x480 ได้ผลดังตารางที่ 1 และมีความถูกต้องดังตารางที่ 2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าที่ความละเอียดภาพ 640x480 ความเร็วในการตรวจจับวัตถุน้อยกว่า 320x240 ก่อนข้างมาก ในขณะที่ความถูกต้องในการตรวจจับวัตถุทั้ง 5 ชั้นได้ผลที่เท่ากัน



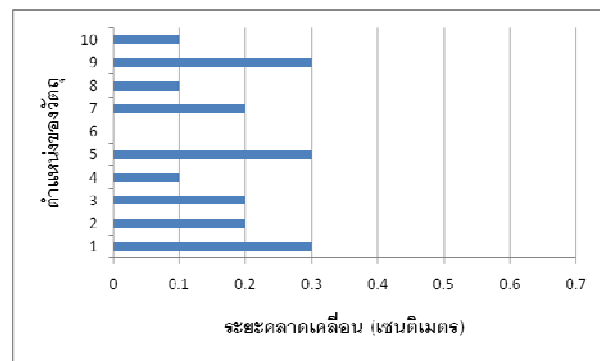
ตารางที่ 1 แสดงความเร็วในการตรวจจับวัตถุ



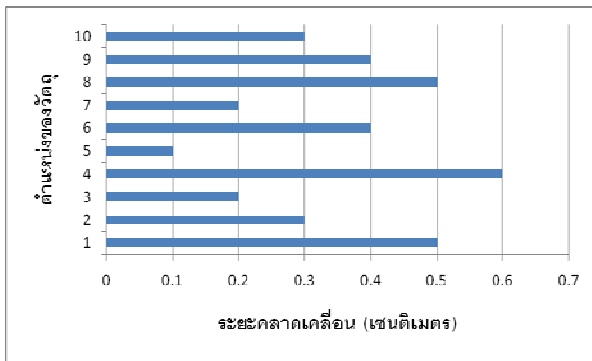
ตารางที่ 2 แสดงความถูกต้องในการตรวจจับวัตถุ

### 7.2. การหาตำแหน่งวัตถุใน 3 มิติ

เนื่องจากการหาตำแหน่งวัตถุใน 3 มิติใช้หลักการขยายงานระบบประสาทในการคำนวณหาตำแหน่ง ซึ่งจากการทดลองพบว่าความคลาดเคลื่อนในการหาตำแหน่งในตำแหน่งที่ใช้ในการฝึกสอนขยายงานระบบประสาทจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าตำแหน่งที่ไม่ได้นำมาใช้ในการฝึกสอน แสดงได้ดังตารางที่ 3 และ 4



ตารางที่ 3 ความคลาดเคลื่อนในตำแหน่งที่ใช้ฝึกสอน



ตารางที่ 4 ความคลาดเคลื่อนในตำแหน่งที่ไม่ได้ใช้ฝึกสอน

### 7.3. การโปรแกรมหุ่นยนต์ตามการสาธิต

จากการทดลองโดยให้ผู้ใช้งานทำการสาธิตการประกอบชิ้นงานในรูปแบบที่แตกต่างกัน พบว่าระบบสามารถทำการสร้างโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ และแสดงการทำงานของโปรแกรมที่สร้างขึ้นด้วยการควบคุมแขนกลผ่านภาพเคลื่อนไหวแบบ 3 มิติ ซึ่งระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามการสาธิต

### 8. สรุป

จากการทดลองพบว่าการทำงานของโปรแกรมหุ่นยนต์ด้วยวิธีสาธิตเพื่อการประกอบชิ้นงานทำให้เห็นว่า การตรวจจับตำแหน่งวัตถุสามารถทำงานได้ดีภายในสภาวะแวดล้อมที่ควบคุม และการประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาทในการหาตำแหน่งวัตถุใน 3 มิติสามารถใช้ในการหาตำแหน่งวัตถุใน 3 มิติโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยังคงทำให้ระบบทำงานได้อย่างถูกต้องทั้งในจุดที่ใช้ในการฝึกสอนและจุดที่ไม่ได้ทำการฝึกสอน ในส่วนการสร้างโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามการสาธิตระบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประกอบชิ้นงานในพื้นที่แบบ 3 มิติที่มีการปรับเปลี่ยนขั้นตอนการบ่อยครั้ง ซึ่งผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความเชี่ยวชาญในการโปรแกรมหุ่นยนต์

### 9. เอกสารอ้างอิง

1. Yusuke MAEDA, Nanako ISHIDO, Haruka KIKUCHI and Tamio ARAI, "Teaching of Grasp/Graspless Manipulation for Industrial Robots by Human Demonstration", Proc. of 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002), pp. 1523-1528, 2002.
2. K. Ogawara, J. Takamatsu, H. Kimura, and K. Ikeuchi, "Generation of a task model by integrating multiple observations of human demonstrations", In Proceedings of the IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA '02), volume 2, pages 1545-1550, May 2002.
3. H. Onda, T. Suehiro, and K. Kitagaki, "Teaching by Demonstration of Assembly Motion in VR - Non-deterministic Search-type Motion in the Teaching Stage", Proceedings of

2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3066-3072, 2002.

4. Rafael C. Gonzalez. , Digital Image Processing. Prentice Hall, 2002.
5. Jyh-Shing Roger Jang, Chuen-Tsai Sun, and Eiji Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft Computing. Matlab Curriculum Series.
6. Fu, K.S., Gonzalez, R.C., Lee, C.S.G., Robotics : control, sensing, vision, and intelligence, McGraw-Hill, pp. 497-504.
7. CRS Plus Inc., Arm and Controller Installation Manual, 1993.