

การพัฒนาระบบต้นแบบในงาน **Bin-picking**

โดยวิเคราะห์ข้อมูลจุดกลุ่มเมฆจากกล้องถ่ายภาพความลึก

**Development of Bin-picking Object Detection system**

**using Depth Camera and Point cloud data Analysis**

**รชฎาภรณ์ ใจสนิท รหัส 60525000379**

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**

**สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์**

**ปีการศึกษา พ.ศ. 2563**

**ลิขสิทธิ์เป็นของสถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์**



การพัฒนาระบบต้นแบบในงาน **Bin-picking**

โดยวิเคราะห์ข้อมูลจุดกลุ่มเมฆจากกล้องถ่ายภาพความลึก

**Development of Bin-picking Object Detection system**

**using Depth Camera and Point cloud data Analysis**

**รชฎาภรณ์ ใจสนิท รหัส 60525000379**

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**

**สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ**

**คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์**

**ปีการศึกษา พ.ศ. 2563**

**ลิขสิทธิ์เป็นของสถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์**

เรื่อง การพัฒนาระบบต้นแบบในงาน Bin-picking โดยวิเคราะห์ข้อมูลจุดกลุ่มเมฆจากกล้องถ่ายภาพความลึก

Development of Bin-picking Object Detection system using Depth Camera and Point cloud data Analysis

โดย นางสาวรชฎาภรณ์ ใจสนิท

สาขาวิชา วิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ

อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ภาคภูมิ ปฐมภาคย์

ได้รับการอนุมัติเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร[พิมพ์ชื่อปริญญา] สาขา[พิมพ์ชื่อสาขาวิชา]

.......................................................... คณบดีคณะ[พิมพ์ชื่อคณะ]

([พิมพ์ชื่อ นามสกุลคณบดี])

คณะกรรมการสอบป้องกันปริญญานิพนธ์

.......................................................... ประธานกรรมการสอบ

([พิมพ์ชื่อ นามสกุลประธานกรรมการ])

.......................................................... รองประธาน

([พิมพ์ชื่อ นามสกุลรองประธาน])

.......................................................... กรรมการและเลขานุการ

([พิมพ์ชื่อ นามสกุลกรรมการสอบป้องกัน])

.......................................................... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

([พิมพ์ชื่อ นามสกุลอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม])

หัวข้อโครงงาน การพัฒนาระบบต้นแบบในงาน Bin-picking โดยวิเคราะห์ข้อมูลจุดกลุ่มเมฆ จากกล้องถ่ายภาพความลึก

ผู้จัดทำโครงงาน นางสาวรชฎาภรณ์ ใจสนิท

ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ภาคภูมิ ปฐมภาคย์

จำนวนหน้า

**บทคัดย่อ**

วัตถุประสงค์และวิธีดำเนินการวิจัย เนื้อหาคือ [.................................................................... ........................................................................................................................................]

ผลการวิจัยประกอบด้วย [..................................................................................................... ........................................................................................................]

**คำสำคัญ [(ไม่เกิน 3-5 คำ)............................................................................................ ........................................................................................................]**

สาขาวิชา................................................................ ลายมือชื่อนักศึกษา..............................................

คณะ....................................................................... ลายมือชื่อนักศึกษา..............................................

ปีการศึกษา............................................................. ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.................................

Title [พิมพ์ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ............................................................]

[พิมพ์ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ (ต่อ)....................................................]

[พิมพ์ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ (ต่อ)....................................................]

Author’s Name [พิมพ์ชื่อผู้วิจัย (ใส่คำนำหน้าชื่อ)]

Advisor [พิมพ์ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา]

[พิมพ์ชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา]

Page

**Abstract**

[The objective is to carry out research content. ..................................................... ..................................]

[The findings include. ..................................................................................................... ..................................]

**Key Words [(ไม่เกิน 3-5 คำ)...................................................................................... .........................................................................................................]**

Major................................................................ Student signature..............................................

Faculty................................................................. Student signature..............................................

Year...................................................................... Advisor signature..............................................

**กิตติกรรมประกาศ**

[(ตัวอย่างย่อหน้าแรก) วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจาก.................................. ..................................................................................]

[(ตัวอย่างย่อหน้าที่สอง) ขอขอบพระคุณ.................................................................]

[(ย่อหน้าที่สาม) (ถ้าไม่มีลบทิ้งได้)..............................................................................]

[(ย่อหน้าที่สี่) (ถ้าไม่มีลบทิ้งได้)...................................................................................]

[ชื่อ-สกุลผู้วิจัย (ไม่ใส่คำนำหน้าชื่อ)]

[เดือน ปีที่จบ (อยู่ตรงกลางชื่อผู้วิจัย)]

**สารบัญ**

**หน้า**

|  |  |
| --- | --- |
| บทคัดย่อภาษาไทย.................................................................................................................. | ก |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ............................................................................................................. | ข |
| กิตติกรรมประกาศ................................................................................................................... | ค |
| สารบัญ..................................................................................................................................... | ง |
| สารบัญตาราง........................................................................................................................... | ฉ |
| สารบัญภาพ.............................................................................................................................. | ซ |
|  |  |
| **บทที่** |  |
| 1 บทนำ.................................................................................................................................. | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา............................................................ | 1 |
| 1.2 คำถามวิจัย (ถ้ามี)….…………………………………..………………………………..……..….. | 3 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย................................................................................... | 4 |
| 1.4 สมมติฐานของการวิจัย (ถ้ามี)............................................................................. | 4 |
| 1.5 ขอบเขตของการวิจัย.......................................................................................... | 5 |
| 1.6 ข้อจำกัดของการวิจัย (ถ้ามี)............................................................................... | 6 |
| 1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย............................................................. | 10 |
| 1.8 นิยามศัพท์เฉพาะ............................................................................................... | 12 |
| 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง......................................................................................................... | 15 |
| 2.1 ทฤษฎีและแนวคิดที่เกี่ยวข้อง……………………………………..………………..……..…… | 18 |
| 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง…………….…………………………………………………..…………..….. | 20 |
| 2.3 กรอบแนวคิดการวิจัย……………….………………………………………………………..…... | 23 |
| 3 วิธีดำเนินการวิจัย................................................................................................................ | 30 |
| 3.1 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง/แหล่งข้อมูล/ผู้ให้ข้อมูล………………………………….... | 32 |
| 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย……………...………………..……………………………..……..….. | 38 |
| 3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล………….………………………………..………………..…………..…. | 42 |
| 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล………….…..……………….………………………..…………………..….. | 45 |
| 4 ผลการวิจัย.......................................................................................................................... | 50 |
| 4.1 [พิมพ์หัวข้อสำคัญ]…………………………..…………………………………………….………. | 62 |
| 4.2 [พิมพ์หัวข้อสำคัญ]…………………………..………………………………………..……….….. | 68 |
| 4.3 [พิมพ์หัวข้อสำคัญ]…………………………..………………………………………………….…. | 75 |
| 4.4 [พิมพ์หัวข้อสำคัญ]…………………………..………………………………………..……….….. | 83 |

**สารบัญ (ต่อ)**

**หน้า**

|  |  |
| --- | --- |
| 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ................................................................... | 98 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย……………………………………..…………………………………...………….. | 102 |
| 5.2 อภิปรายผล…………….…………………………………………………..…………………………. | 120 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ……………….…………………………………………………………………....…… | 155 |
|  |  |
| บรรณานุกรม............................................................................................................................ | 155 |
| ภาคผนวก................................................................................................................................. | 155 |
| ภาคผนวก ก เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย…………………………………………………………….. | 160 |
| ภาคผนวก ข [พิมพ์ชื่อภาคผนวก]............................................................................. | 168 |
| ภาคผนวก ค [พิมพ์ชื่อภาคผนวก]............................................................................. | 176 |
| ประวัติย่อของผู้ทำการค้นคว้าอิสระ………………………..………………………………….…….………….. | 185 |

# บทที่ 1

บทนำ

## 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันงานด้านอุตสาหกรรมได้นำแขนกลมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านต่างๆ ยกตัวอย่าง เช่น งานประกอบเครื่องจักร ประกอบอะไหล่ยนต์ ไลน์การผลิต งานเชื่อมอุตสาหกรรม งานในโรงงานผลิตเหล็กงานเกี่ยวกับคลังสินค้าขนาดใหญ่ และอื่น ๆ โดยปลายของแขนกลเหล่านั้นที่ใช้ทำงานจะมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสมในงาน ไม่ว่าจะเป็น หัวเชื่อม มือคีบจับ อุปกรณ์ประกอบชิ้นส่วน หัวปืนพ่นสี หัวเจาะ และเครื่องมือติดตั้งอื่น ๆ อีกมากมาย

งานด้านการหยิบจับนั้น โดยปกติแล้วการจัดเรียงชิ้นงานจะถูกดำเนินการด้วยหุ่นยนต์หรือแขนกลในการช่วยเหลือการจัดรูปแบบจัดวาง หุ่นยนต์จะหยิบจับชิ้นงานออกหรือบรรจุลงกล่อง หยิบวางลงบนสายพานการผลิต หยิบจากสายพานหนึ่งไปวางสู่อีกสายพานหนึ่ง การป้อนชิ้นงานลงสายพานการผลิตหรือในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการจัดเรียงหรือจัดรูปแบบการวางของชิ้นงานลงสู่สายพานในลักษณะที่ถูกต้อง ซึ่งหนึ่งในการประยุกต์ใช้แขนกลในการหยิบ จับหมุนชิ้นงาน จำเป็นต้องมีการนำเทคโนโลยี Machine vision มาช่วยเหลือในการระบุตำแหน่งรูปแบบการวางของชิ้นงานก่อนจัดเรียงลงสายพานการผลิตการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดังกล่าวเพื่อช่วยเหลือในการหยิบจับชิ้นงานและจัดเรียงลงสายพานจึงมีความเหมาะสมในกรณีที่ชิ้นงานมีลักษณะเฉพาะเช่น ท่อ อะไหล่ สิ้นส่วนยานยนต์ สายเคเบิล เป็นต้น อย่างไรก็ตามการประมวลผลภาพ (Image processing) มีข้อจำกัดในเรื่องของ การวัดในเชิงสามมิติ เช่นรายละเอียดของขนาดชิ้นงาน การจัดเรียง ความสูงของชิ้นงานในแกน z รวมไปถึงปริมาตรเชิงสามมิติ ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงการนำเข้าข้อมูลเพื่อจำแนกวัตถุชิ้นงาน เทคโนโลยี Point cloud จึงมีความเหมาะสมในการวิเคราะห์ภาพ เพื่อจำแนกชิ้นงานและระบุตำแหน่งวัตถุเชิงสามมิต

ระบบ Bin picking ในเชิงพาณิชย์ที่วางขายกัน มีต้นทุนสูงเนื่องจากมีการจัดซื้อทั้งระบบ รวมถึงอุปกรณ์ภายในระบบที่มีราคาแพงแม้จะมีความแม่นยำสูง การควบคุมต้นทุนเป็นสิ่งสำคัญเพราะ ดังนั้นการใช้กล้อง 3D ต้นทุนต่ำจึงเป็นการศึกษาที่เป็นตัวแปรสำคัญในการลดต้นทุนสายการผลิตที่ใช้หุ่นยนต์ ภายใต้การควบคุมต้นทุนที่อยู่ในขอบเขตได้และประสิทธิภาพยอมรับได้

ในโรงงานอุตสาหกรรม มีการใช้หุ่นยนต์ทำงาน ต้นทุนวางระบบหยิบจับชิ้นงานสูง และกรณีที่ใช้หุ่นยนต์หยิบจับชิ้นงาน ที่วาง ..... ทำให้การใช้ กล้อง 3D cam เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อสายการผลิต โดยการศึกษานี้มุ่งเน้นการใช้อุปกรณ์กล้องความลึกต้นทุนต่ำกับการตรวจหาชิ้นงาน ในระบบหยิบจับ Bin-Picking จะตอบรับกับประสิทธิภาพที่เหมาะสมและยอมรับได้กับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

## 1.2 คำถามวิจัย

1.2.1 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ Bin-picking กับข้อมูล point cloud ส่วนมากถูกสร้างและในเชิงพาณิชย์และถูกพัฒนาตอบรับกับชิ้นงานหรือกระบวนการทำงานที่เฉพาะเจาะจงตามจุดประสงค์ของสายการผลิตเฉพาะหรือไม่สามารถปรับพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับงานที่ยืดหยุ่น ดังนั้นการพัฒนาชุดคำสั่งและกระบวนการที่สามารถปรับค่าได้จะทำให้มีความเหมาะสมนำไปใช้งานที่หลากหลาย

1.2.2 กล้องถ่ายภาพความลึกของผู้ผลิตระบบ Bin-picking ในเชิงพาณิชย์ ที่ถูกออกแบบมาเพื่อเสนอขายพร้อมกับหุ่นยนต์ทั้งระบบ มีต้นทุนจัดซื้อที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นการพัฒนาตามวัตถุประสงค์ของโรงงานที่จัดซื้อ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีข้อสังเกตว่าในกรณีที่อุปกรณ์ถ่ายภาพความลึกที่มีราคาต้นทุนต่ำกว่า สามารถมีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้ในการตรวจหาวัตถุ ในงานลักษณะที่คล้ายกันได้หรือไม่

## 1.3 จุดประสงค์ของการวิจัย

1.3.1 พัฒนากระบวนการประมวลผลข้อมูลจุดกลุ่มเมฆจากกล้องถ่ายภาพความลึกในงานหยิบจับ Bin-picking

1.3.2 ทดสอบระบบต้นแบบการตรวจหาชิ้นงานด้วยชิ้นงานจริงกับกล้องถ่ายภาพความลึก

## 1.4 ขอบเขตการวิจัย

1.4.1 การศึกษาการประมวลผลข้อมูล Point cloud เป็นองค์ความรู้ที่มีความเฉพาะที่ถูกนำไปใช้ในบางสายงาน อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ข้อมูลนี้มีการประมวลผลที่ค่อนข้างซับซ้อนต่างจากข้อมูลภาพ 2 มิติ โดยชุดคำสั่งที่ใช้โดยทั่วกันถูกเขียนขึ้นมาด้วยภาษา C++ (Point Cloud Library) แต่ทว่าชุดคำสั่งดังกล่าวมีการนำไปใช้รวมถึงกระบวนการติดตั้งที่ค่อนข้างซับซ้อนและไม่เหมาะกับการนำไปใช้ข้ามแพลตฟอร์มหรือ OS ที่หลากหลาย ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาชุดคำสั่งเปิด (Open source) ด้วยการเขียนโปรแกรมภาษา Python และใช้ ไลบรารี่ Open3D ที่มีการใช้งานที่ใช้งานสะดวกและถ่ายโอนต่อได้หลายระบบปฏิบัติการ ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีการเลือกใช้เครื่องมือและชุดคำสั่งที่มีอยู่ใน Open3D ที่เป็นภาษา Python

1.4.2 งานวิจัยนี้การทดสอบจำเป็นต้องมีการใช้ชิ้นงานที่มีปริมาณจำนวนหนึ่ง ซึ่งชิ้นงานที่สนใจเป็นชิ้นงานที่มีการอ้างอิงถึงความต้องการที่จะพัฒนาชุดคำสั่งในงานวิจัยนี้เพื่อตอบรับกับสายการผลิตของท่อ PVC โดยการการทดสอบจะถือการใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะเดียวกันนี้ในการทดสอบระบบต้นแบบ

## 1.5 ข้อจำกัดการวิจัย

กระบวนการพัฒนาการระบบต้นแบบเพื่อตรวจหาชิ้นงาน Bin-picking นี้อ้างอิงจากองค์ความรู้ในงานวิจัยที่หลากหลายซึ่งมีคำแนะนำต่างกันออกไปโดยบางงานวิจัยมีการเลือกอัลกอริทึมที่หลากหลายในการวิเคราะห์ให้เหมาะสมกับรูปแบบของงาน หรือบางงานได้เลือกใช้อัลกอริทึมที่ซับซ้อนเช่นการใช้ Machine learning อย่างไรก็ตาม ระบบต้นแบบที่ถูดพัฒนาในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อัลกอริทึมแบบดั้งเดิม เนื่องจากเป็นการพัฒนาระบบต้นแบบ ดังนั้น อัลกอริทึมที่ซับซ้อนสามารถจะนำมากล่าวถึงในการพัฒนาในอนาคตเพื่อระบบมีความเสถียรภาพในต้นแบบในเบื้องต้น นอกจากนี้การพัฒนาระบบต้นแบบจำเป็นต้องมีการพัฒนาเพื่อ Optimization การประมวลผลโดยต้องมีการทดสอบที่หลากหลายและเป็นการทดสอบจริง ซึ่งผู้วิจัยมีระยะเวลาศึกษาไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ทดสอบแบบในระบบงานจริง การศึกษานี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อการตรวจหาและระบุตำแหน่งชิ้นงงานเพียงเท่านี้เพื่อเป็นการวิจารณ์และศึกษาแนวทางการพัฒนาต่อยอดในอนาคตได้

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลลัพธ์การพัฒนากระบวนการในงานวิจัยนี้ เป็นไปเพื่อพัฒนาและความเป็นไปได้ในการใช้กล้องถ่ายภาพความลึกต้นทุนต่ำเพื่อพัฒนาระบบต้นแบบในการตรวจหาชิ้นงานในงานหยิบจับ Bin-Picking ซึ่งชุดคำสั่งที่ถูกพัฒนารวมถึงแนวคิดเชิงกระบวนการจะสามารถนำมาปรับปรุงและพัฒนาต่อยอดในอนาคตตที่ให้เหมาะสมแก่การนำไปใช่ในงานอื่นๆ รวมถึงการนำองค์ความรู้ขั้นสูง เช่น การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) หรือ ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มาประยุกต์ต่อยอดให้การตรวจหาและหยิบจับชิ้นงานมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยกล้องถ่ายภาพความลึกต้นทุนต่ำได้

## 1.7 นิยามศัพท์เฉพาะ

Bin-Picking

Point cloud

Depth Camera

Descriptor

Normal

Clustering

Registration

Refinement

Partial view

# บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ข้อมูลจุดเมฆ (Point cloud)

// คืออะไร ได้มาจากไหน

//ใช้ในงานไหน

## 2.2 กล้องความลึก (Depth camera)

//คืออะไร

//มีกี่แบบ ตรวจจับได้อย่างไร ( structured light, laser, stereo, lidar)

### 2.2.1 ข้อมลภาพความลึก (Depth image)

//ข้อมูลภาพความลึกคือ โครงสร้าง

### 2.2.2 ข้อมูล Point cloud จากภาพความลึก

//การแปลงข้อมูลภาพความลึกเป็น Point cloud

## 2.3 การเขียนโปรแกรมภาษาไพธอน (Python programming)

//ใครคิด ปีไหน คิดขึ้นมาทำไม

//ทำไมถึงนิยมใช้ ใช้ในงานไหนบ้าง

## 2.4 การประมวลผลข้อมูลจุดเมฆ (Point cloud data processing)

//ใช้ในงานไหน แต่ละงานประมวลผลในลักษณะไหนบ้าง (งานบันเทิง งานภาพพยนต์ งานภูมิศาสตร์ งานหุ่นยนต์ งานโรงงาน)

### 2.4.1 การลดจำนวนจุด (Down sampling)

### 2.4.2 การคัดกรองข้อมูลจุด (Remove Outliers)

### 2.4.3 ตัวอธิบาย (Descriptor)

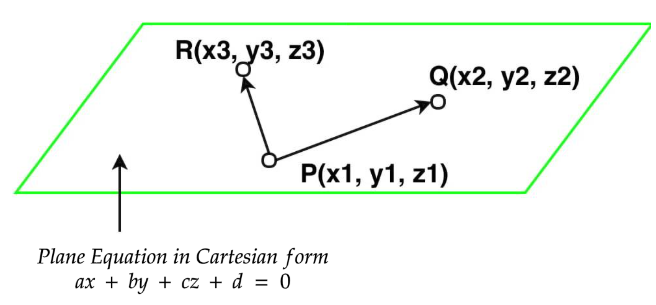
### 2.4.4 การทำ Registration

**2.4.4.1 Global registration**

ทฤษฎี RANSAC

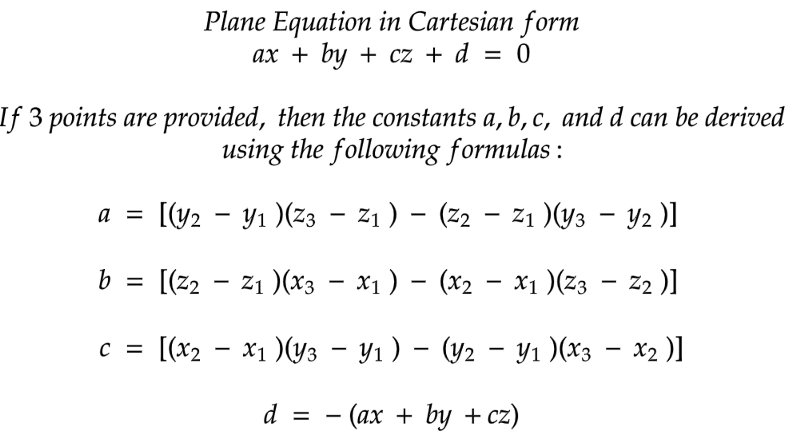
RANSACย่อมาจากRAN dom S ampling และC onsensus อัลกอริธึมการปรับโมเดลที่แข็งแกร่งและประสิทธิภาพของมันมักจะถูกเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมการถดถอยเชิงเส้น ในกรณีนี้จะใช้อัลกอริทึม RANSAC บนข้อมูล Lidar point cloud (pcd) เพื่อแบ่งส่วนระนาบพื้นออกจากเครื่องบินอื่นซึ่งอาจประกอบด้วยยานพาหนะสัญญาณไฟจราจรหรืออะไรก็ตามที่อยู่เหนือระนาบพื้นดินซึ่งจำเป็นต้องจัดประเภทสำหรับ หลีกเลี่ยงการชนกันหรือเพื่อการวางแผนวิถี ในการนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่ง RANSAC เป็นที่ต้องการสำหรับการแบ่งส่วนระนาบพื้นเนื่องจากคุณสมบัติโดยธรรมชาติจะปฏิเสธค่าผิดปกติ (ค่าผิดปกติถือได้ว่าเป็นข้อสังเกตที่ผิดปกติซึ่งมีแนวโน้มที่จะถูกปฏิเสธ) อัลกอริทึมหลักค่อนข้างตรงไปตรงมา

ขั้นตอนที่ 1 : เลือกชุดคะแนนแบบสุ่ม



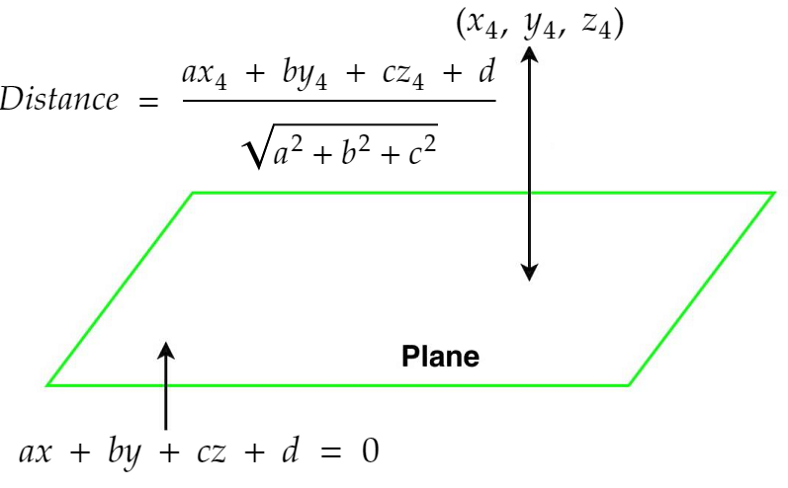
ภาพที่ … การ…..

ขั้นตอนที่ 2 : คำนวณพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับสมการระนาบ



ภาพที่ … สมการเครื่องบิน 3 มิติสำหรับ 3 จุดที่ไม่ใช่ collinear

ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณค่าเบี่ยงเบนของจุดทั้งหมดในพอยต์คลาวด์จากระนาบโดยใช้การประมาณระยะทาง



ภาพที่ ……………….

**2.4.4.2 Local registration**

### 2.4.5 แปลงระบบพิกัดข้อมูล Point cloud (Point cloud Transformation)

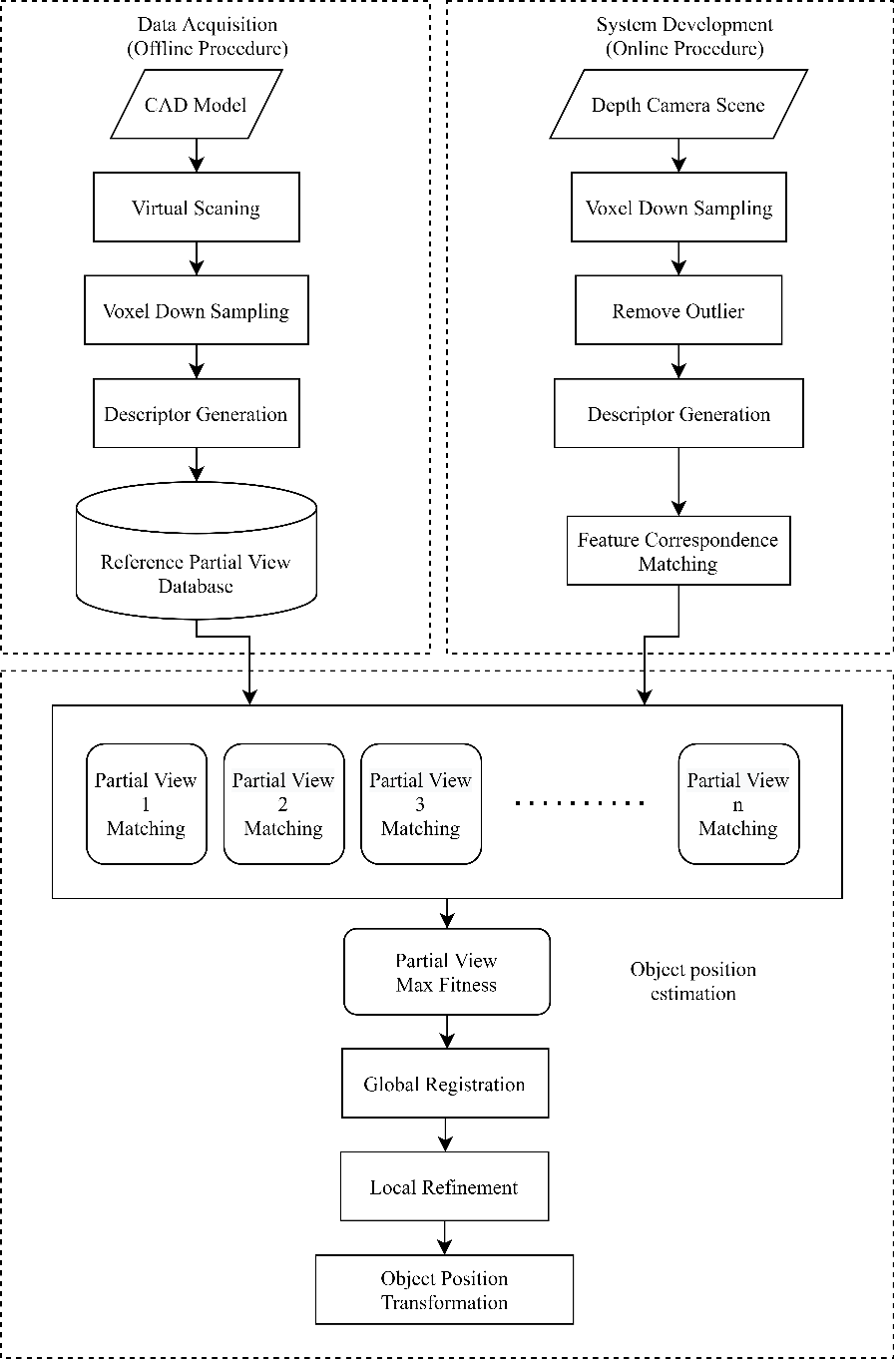
## 2.5 ระบบ Bin-picking

# บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

## 3.1 กรอบแนวคิดการศึกษา

**การศึกษานี้ตั้งอยู่พื้นฐานของการประมวลผลข้อมูลจุดเมฆเป็นหลัก แนวคิดการพัฒนาผังการประมวลผล วิธีการ และอัลกอรึทึม ถูกเลือกมาตามแนวทางการศึกษาและการใช้งานเครื่องมือที่มีอยู่ในงานวิจัยอื่นๆและเอกสารความรู้ที่เกี่ยวข้อง นอกจากนี้ ชิ้นงานที่เป็นตัวอย่างในการศึกษา เป็นชิ้นงานที่มีการใช้งานจริงในงานหยิบจับของแขนกล แต่การบรรจุภัณฑ์สิ้นค้าดังกล่าวยังไม่สามารถมีการประยุกต์ใช้แขนกลในการบรรจุชิ้นงานลงห่อสินค้า การพัฒนาระบบ** Bin-picking **เพื่อสอดรับกับความต้องการใช้แขนกลในงานบรรจุห่อสินค้าจึงมีความจำเป็นในสายการผลิต ภาพที่ …. แสดงถึงผังงานการศึกษาวิจัยนี้ ซึ่งเริ่มจากการสร้างข้อมูลอ้างอิงที่ใช้ในการอ้างอิงมุมมองของกล้องที่มีต่อชิ้นงานในมุมต่างๆ (Offline procedure) ซึ่งตัวอย่างชิ้นงานจะมีการจัดวางในกล่องแบบในลักษณะใด โดยข้อมูลอ้างอิงจะถูกสร้างขึ้นมาจากแบบจำลองสามมิติ** (CAD Model) **เมื่อฐานข้อมูลอ้างอิงมีข้อมูลมุมมองชิ้นงานที่เพียงพอแล้ว การพัฒนาผังการประมวลผลตรวจหาชิ้นงาน (Online procedure) จะเป็นการนำเข้าข้อมูลจุดกลุ่มเมฆที่แปลงมาจากภาพความลึกจากกล้องถ่ายภาพความลึก นำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งชิ้นงานที่หยิบจับได้**



ภาพที่ .. ผังกระบวนการพัฒนาระบบตรวจหาชิ้นงานจากข้อมูลภาพความลึกและข้อมูลจุดกลุ่มเมฆ

หลังจากมีการเก็บข้อมูลอ้างอิงมุมมองชิ้นงานและวางชุดคำสั่งตรวจหาชิ้นงานแล้ว จะเป็นการทดสอบกับชิ้นงานจริงโดยชิ้นงานจะถูกบรรจุลงกล่องแล้วมีการจัดวางปะปนแบบสุ่มทับซ้อนกันในหลากหลายรูปแบบเพื่อประเมินประสิทธิภาพการตรวจหาชิ้นงานพบ

## 3.2 เครื่องมือและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

**3.2.1 อุปกรณ์**

**3.2.1.1 กล้องความลึก Intel Realsense D435i**

กล้องถ่ายภาพความลึกนี้เป็นกล้องถูกผลิตจากบริษัท Intel ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อถ่ายภาพและประมวลผลภาพสีและความลึก โดยอาศัยหลักการ Active stereoscopic ในการคำนวณหาความลึกของภาพ นอกจากนี้ยังมีขนาดที่เล็ก ใช้กำลังไฟน้อยด้วยการเชื่อมต่อผ่าน USB-Type C จากอุปกรณ์คอมพิวเตอร์หรือไมโครคอลโทรลเลอร์ได้

// ภาพกล้อง

มีกล้องประเภทเดียวกันหลากหลายผู้ผลิตที่นำมาวางขายกันแพร่หลายในรูปแบบเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากต้นทุน ขนาด และองค์ประกอบอื่นๆแล้ว กล้องนี้ถือว่ามีความเหมาะสมเพียงพอต่อการนำมาศึกษาพัฒนางานวิจัยนี้

**3.2.1.2 ตัวอย่างชิ้นงานท่อ PVC ข้อต่อ 90 องศา**

ชิ้นงานที่สนใจเป็นท่อ PVC ข้อต่อ 90 องศา ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ 35 มิลลิเมตร (1 ¼ นิ้ว) ทนแรงดันได้ 13.5 บาร์ น้ำหนัก น้ำหนัก 0.142 กิโลกรัม ต่อชิ้น ซึ่งชิ้นงานที่นำมาทดสอบ มีทั้งหมด 9 ชิ้น แต่ในกระบวนการรวบรวมข้อมูลจะใช้ข้อมูลแบบจำลอง 3 มิติ ของชิ้นงาน (CAD model)

//ภาพท่อตัวอย่าง + กล่อง+ cadmodel

**3.2.2 ซอฟต์แวร์**

3.2.2.1 โปรแกรมประยุกต์และชุดคำสั่งภาษาไพธอน (Python Programming)

ชุดคำสั่งภาษาไพธอน นอกจากจะถูฏนำมาพัฒนาซอฟต์แวร์ในหลากลายประเภทแล้ว ยังสามารถนำมาพัฒนาชุดคำสั่งกระบวนการในการประมวลผลข้อมูลจุดกลุ่มเมฆได้ ด้วยการที่โครงสร้างของการเขียนโปรแกรมภาษานี้ที่ไม่ซับซ้อนและนำไปใช้ได้สะดวกบนหลาย ระบบปฏิบัติการ ชุดคำสั่งเปิด (Open source) หลายผู้พัฒนาจึงสามารถนำมาเผยแพร่และนำไปประยุกต์ได้ในศาสตร์หลายแขนง

3.2.2.2 ไลบรารี่ภาษาไพธอน open3d

เนื่องด้วยความง่ายของการติดตั้งชุดคำสั่งและการใช้ที่กว้างขวางจากผู้พัฒนาต่างๆ Open3D ถือเป็นอีกไลบรารี่ที่น่าสนใจ เนื่องจากผู้พัฒนาได้มีการสร้างชุดคำสั่งที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลข้อมูล 3 มิติ ทั้งภาพความลึก ข้อมูล Point cloud ข้อมูลพื้นผิว รวมถึงการนำเข้าและส่งออกไฟล์ได้อย่างยืดหยุ่นผ่านการเขียนโปรแรกมภาษาไพธอน ผู้วิจัยจึงสนใจที่นำ Open3D และ Python มาเป็นโครงสร้างหลักในการพัฒนาระบบต้นแบบการตรวจหาชิ้นงาน

// GUI ของ Open3D ตัวอย่าง

## 3.3 การรวบรวมข้อมูล

การวิจัยนี้สนใจใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่เป็นท่อ PVC ข้อต่อ 90 องศา ซึ่งในการตรวจหาชิ้นงาน จำเป็นต้องมีการประมวลผลข้อมูลจาก CAD Model ในช่วงการสร้างฐานข้อมูลชิ้นงานอ้างอิง (Offline procedure) และ ใช้กล้องถ่ายภาพความลึกในการทอดสอบการตรวจหาชิ้นงาน (Online procedure) ดังนั้นการรวบรวมข้อมูลเพื่อการดำเนินงานวิจัยจะมีทั้งสองรูปแบบ อย่างไรก็ตาม การรวบรวมข้อมูลจะพิจารณาจากความเป็นจริงที่ระบบจะมองเห็นชิ้นงานและมุมมองที่กล้องเห็นจะมีการจัดวางอุปกรณ์ในลักษณะคล้ายกับแนวทางการนำไปใช้

//ภาพ Cad model ใน Mesh lab + ภาพที่ตั้งกล้องหันลงกล่อง

## 3.4 วิธีการศึกษา

### 3.4.1 การเก็บข้อมูลตัวอย่างชิ้นงานอ้างอิง (Offline Procedure)

การเก็บตัวอย่างชิ้นงานเป็นไปเพื่อการวิเคราะห์ ลักษณะเฉพาะสำคัญของวัตถุในลักษณะการจัดวางต่างๆ (Orientation) ที่อาจจะเกิดในกล่องชิ้นงานจริงและถูกพิจารณาว่าแขนกลสามารถหยิบจับได้ การมีชิ้นงานหลายชิ้นวางซ้อนกันเป็นจำนวนมากจะถูก ประมวลจำแนกชิ้นที่มีความแน่นอนที่จะสามารถถูกหยิบจับได้ก่อน กล่าวคือชิ้นงานดังกล่าวอาจอยู่ในตำแหน่งบนสุดหรือสะดวกในการหยิบจับมากที่สุด โดยกระบวนการประมวลผลเก็บตัวอย่างงานนี้เริ่มจากการนำ แบบจำลอง 3 มิติ ท่อ PVC ขอข้อต่อ 90 องศา (CAD model) ทำการใช้เครื่องมือ Virtual scanner เพื่อจำลองการถ่ายภาพชิ้นงานจากมุมมองต่างๆ โดยข้อมูลที่ส่งออกมาเป็นข้อมูล Point cloud บนพื้นผิวของแบบจำลองชิ้นงาน โดยการจัดมุมมองที่หลากหลายและระยะความกว้างการมองเห็นของกล้องที่ใกล้เคียงกับระยะกล้องจริง จะทำให้การประมวลผลสอดคล้องกับความเป็นจริงมากขึ้น โดยแนวคิดการเลือกมุมมองการจำลองถ่ายภาพชิ้นงานหรือจำนวนมุมมองที่เหมาะสมได้มีการศึกษาโดย.... ที่มีการจำลองมุมถ่ายภาพโดยอ้างอิงจากรูปทรง Tessellated sphere ที่มีลักษณะทรงเหลี่ยมคล้ายทรงกลม โดยตามมุมต่างๆของรูปทรง Tessellated sphere นั้น ถือเป็นมุมที่วางกล้องหันเข้าหาวัตถุ งานวิจัยนี้ได้อ้างอิงรูปทรง Dodecahedron ที่ประกอบด้วยพื้นผิว 5 เหลี่ยมประกอบดันเป็นรูปทรงคล้ายทรงกลม ในการจำลองมุมถ่ายภาพชิ้นงานจากแบบจำลองสามมิติ ที่มีมุมถ่ายทั้งหมด 20 มุม ซึ่งในความเป็นจริงแล้วการเลือกรูปทรงเหล่านี้มีผลต่อความแม่นยำในการตรวจหาด้วย อย่างไรก็ตามยังมีรูปทรงที่คล้าบคลึงกัน เช่น Icosahedron ที่เป็นโรงข่ายพื้นผิว 3 เหลี่ยมประกอบกัน ซึ่งได้ 12 มุมถ่ายภาพจำลอง แต่ผู้วิจัยได้พิจารณาแล้วว่า รูปทรง Dedecahedron ให้จำนวนมุมมองที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปใช้ตรวจหาชิ้นงานท่อ PVC

//Tessalated sphere

เมื่อมีการแสกนจำลองการถ่ายภาพชิ้นงานจาก CAD model แล้ว จะได้ข้อมูล Point cloud ทั้งหมด 20 แบบตามจำนวนมุมมองของ Dodecahedron ซึ่งทั้ง 20 ไฟล์นี้จะถูกนำไปลดจำนวนข้อมูลจุด หรือทำ Down sampling จำนวนจุดข้อมูลลง ซึ่งกระบวนการนี้สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการ Voxel Down Sampling ที่เป็นการหาตำแหน่งจุดเชิงกริด ที่มีระยะห่างที่แน่นอน ภาพที่ .... เป็นการลดจำนวนจุดด้วยวิธี Voxelization โดยระยะกริดที่เลือกคือ 5 กล่าวคือกระบวนการนี้จะได้จุดที่มีโครงสร้างเป็นแถวและคอลัมน์ ด้วยระยะห่าง 5 มิลลิเมตรเท่าๆ กัน อย่างไรก็ตามการลดจำนวนจุดมีได้อีกหนึ่งวิธีคือ Uniform Down sampling ที่ทำการกำหนดจุดใหม่ด้วยการกำหนดจำนวนจุดใกล้เคียงใด เพื่อระบุข้อมูลจุดใหม่ 1 จุดเป็นตัวแทนกลุ่มนั้นๆ ซึ่งผลอาจะทำให้ข้อมูลมีความไม่สม่ำเสมอและโครงสร้างไม่เป็นระเบียบซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำในการประมวลผลขั้นต่อไป

// Voxel down sampling

จากข้อมูลมุมมองชิ้นงาน 20 มุมมองที่ถูก down sampling แล้ว แต่ละชิ้นงานจะถูกนำไปคำนวณหา ตัวอธิบายหรือ Descriptor ที่เป็นตัวแทนของลักษณะเฉพาะของมุมมองชิ้นงานนั้นๆ โดยอาศัยการคำนวณเชิงคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ลักษณะหรือความสัมพันธ์เชิงเรขาของข้อมูลจุดที่อยู่ในแต่ละมุมมองชิ้นงาน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึง Descriptor ที่มีหลากหลายในการทำประมวลผลภาพ อย่างไรก็ตามมี Descriptor อยู่ส่วนหนึ่งที่สามารถแสดงความสัมพันธ์และรูปลักษณ์เฉพาะของข้อมูลสามมิติ เช่น PFH FPFH หรือ VPFH ฯลฯ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ FPFH (Fast Point Feature Histogram) เป็น Descriptor ที่ใช้ในการระบุลักษณะเฉพาะของมุมมองแต่ละมุมของชิ้นงาน ภาพที่ .... แสดงถึงความสัมพันธ์ของ FPFH Descriptor ที่มีการคำนวณ ความสัมพันธ์ของทิศทางหน้าพื้นผิวระหว่างแต่ละจุดใกล้เคียง และนำมาคำนวณเป็น ลักษณะเชิงเรขาแทนค่าเป็นความถี่ของตัวแทนลักษณะทางเรขาแต่ละจุด เช่น ขอบ มุม ทรงกลม กระบอก เป็นต้น

ภาพที่ …. โครงข่าย FPFH + สูตร

เมื่อมีการคำนวณ FPFH Descriptor แล้วมุมมองชิ้นงานใดๆ ผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นกราฟความถี่ (Histogram) ที่เป็นตัวแทนเอกลักษณ์ทางเรขาของมุมมองชิ้นงานแต่ละมุมมอง (ภาพที่ ...) ซึ่งจำนวน Descriptor จะมี 20 รูปแบบตามจำนวนมุมมองชิ้นงานที่สแกนด้วย Virtual scanner ลักษณะเฉพาะเหล่านี้

ภาพที่ ... ตัวอย่างชิ้นงาน + histogram

ข้อมูล Point cloud แต่ละมุมมองและ Descriptor จะถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลหรือแหล่งที่จัดเก็บไฟล์ ซึ่งถือว่าเป็นที่จัดเก็บข้อมูลอ้างอิงของมุมมองชิ้นงานไว้ ซึ่งฐานข้อมูลดังกล่าวนี้จะถูกนำไปประมวลผลวิเคราะห์การเข้ากันได้และทำนายการจัดวางของชิ้นงานในขั้นตอนต่อไป

### 3.4.2 การพัฒนากระบวนการประมวลผลข้อมูลจากกล้องความลึก (Online Procedure)

ในส่วนของการประยุกต์ทดสอบการตรวจหาชิ้นงานเพื่อประเมินกระบวนการประมวลผลในกล่องชิ้นงานจริง จะมีขั้นตอนคือนำกล้องความลึก (Depth camera) ตรวจจับภาพชิ้นงานจริงที่จัดวางแบบสุ่มในกล่องบรรจุโดยหันหน้าเลนส์ลงบนกองวัตถุ ซึ่งตัวกล้องจะส่งข้อมูลภาพความลึกผ่านเข้ามาในคอมพิวเตอร์และแปลงข้อมูลภาพเป็นข้อมูลจุดเมฆ ในส่วนของการประมวลผลจะมีขั้นตอนเริ่มจากการ ถ่ายภาพความลึกของชิ้นงานที่ถูกบรรจุในกล่อง ภาพที่ … แสดงถึงข้อมูลภาพความลึกและข้อมูลจุดเมฆที่ได้จากกล้องและผลการแปลงข้อมูลเป็น Point cloud ของชิ้นงานจริงที่วางอยู่ในกล่อง

// Depth cam + view

หลังจากได้ข้อมูลจุดเมฆจากการถ่ายภาพความลึกและแปลงเป็น point cloud ข้างต้นจะเป็นการทำ voxel down sampling เพื่อลดจำนวนจุดและจัดระเบียบข้อมูลจุดในระนาบ 3 มิติ โดยขนาด Voxel เป็นขนาดเดียวกับ ที่ประมวลผลข้อมูลอ้างอิงในฐานข้อมูล นอกจากนี้ เพื่อป้องกันการคำนวณที่ผิดพลาดจากการมีข้อมูลจุดที่ผิดปกติ (Outliers) อัลกอริทึม Remove Radius Outliers ทำการลบข้อมูลจุดที่อาจะเป็น ข้อมูลผิดปกติที่อยู่ไกลหรือผิดจากวัตถุที่อยู่ในข้อมูล โดยพิจารณาจาก รัศมีทรงกลมโดยรอบ หากมีกลุ่มหรือข้อมูลจุดที่ไม่ตรงเงื่อนไข ก็จะทำการลบข้อมูลจุดนั้นไป ภาพที่ ... แสดงให้เห็นถึงตัวอย่างของการลดจำนวนจุดด้วย Voxel Down sample และลบข้อมูลผิดปกติออก

// Voxel และ Outlier Removal

ต่อเนื่องจากการเก็บข้อมูลตัวอย่างชิ้นงาน ข้อมูลที่ได้จากการ Voxel down sample และ Outliers removal จะถูกนำไปวิเคราะห์หา ตัวอธิบาย (Descriptor) เพื่อนำตัวอธิบายไปจับคู่ (Feature matching) หาความสัมพันธ์และความสอดคล้อง (Correspondence) ระหว่าง Descriptor ของข้อมูลที่ได้จากกล้องที่พบในข้อมูลทดสอบ กับแต่ละข้อมูลมุมมองชิ้นงานที่อยู่ในฐานข้อมูลอ้างอิง 20 มุมมอง ทุกข้อมูลชิ้นงานอ้างอิงจะถูกมานำเปรียบเทียบความสอดคล้องกับ Point cloud ที่ได้จากกล้อง ในกรณีที่มีความเข้ากันได้หรือมีค่า fitness ที่สูงที่สุดในการจับคู่ทั้ง 20 มุมมองและมากกว่าค่ากระตุ้น (Threshold) จะถูกนำไปพิจารณาทำนายการ Transformation โดยวิธีการตรวจสอบความเข้ากันได้และทำนาย Transformation ดังกล่าวเรียกว่า Global registration โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างมุมมองชิ้นงานจากฐานข้อมูลและ Point cloud จากกล้องถ่ายชิ้นงานจริง มาทำนายค่า Transformation ซึ่งการศึกษานี้ใช้อัลกอริทึม RANSAC ในการตรวจหาความเข้ากันได้และทำนายค่า Transform โดยให้ข้อมูลมุมมองอ้างอิงชิ้นงานที่เหมาะสมนั้นเคลื่อนไปซ้อนทับกับชิ้นงานหรือ ข้อมูลจากกล้องที่ทดสอบ เมื่อการทำนายได้มาซึ่งค่า Transformation แล้วมีค่า Fitness อยู่ในขอบเขตที่กำหนดดังกล่าวจะถือว่ามีความเข้ากันได้ระหว่างข้อมูลอ้งอิงในฐานข้อมูลและชิ้นานจริง ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการทำนายตำแหน่งชิ้นงานดังกล่าวไปสู่ข้อมูลกล่องบรรจุคือชิ้นงานที่ตรวจพบเจอและสามารถให้แขนกลหยิบจับได้ ภาพที่ ….. เป็นตัวอย่างก่อนการทำ Global registration และหลังเพื่อทำนายตำแหน่งและการจัดวางชิ้นงานบนกล่องโดยอ้างอิงจากข้อมูลมุมมองและข้อมูลจากกล้อง

ภาพที่ … RANSAC

อย่างไรก็ตามเมื่อมีการตรวจหาชิ้นงานเจอ และค่า fitness อยู่ในขอบเขตแล้ว หากมีการ transform ข้อมูลชิ้นงานอ้างอิงไปสู่ข้อมูลทดสอบจากกล้อง แล้วจะพบว่าชิ้นงานยังไม่แนบสนิทกับข้อมูลทดสอบเนื่องจากการทำ Global registration เป็นการทำนายตำแหน่งชิ้นงานแบบ Corse registration หรือ Registration แบบหยาบ โดยเป็นการTransform ให้ข้อมูลอ้างอิงและทดสอบมีความเข้ากันได้และเคลื่อนตำแหน่งไปใกล้เคียงกันในตำแหน่งที่เหมาะสม แต่ขั้นตอนนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งของชิ้นงานเล็กน้อยที่อาจะทำให้แขนกลอาจหยิบจับผิดพลาดอยู่กระบวนการขัดเกลาหรือ Refinement จึงเป็นการทำ Registration แบบละเอียด (Fine registration) ทำให้ข้อมูลชิ้นงานเคลื่อนเข้ามาแนบสนิทกับ ชิ้นงานบนข้อมูลทดสอบที่แม่นยำ ภาพที่ … แสดงถึงหลังจากมีการ Refinement จำทำให้ชิ้นงานมีตำแหน่งที่เหมาะสมและแม่นยำต่อการถูกหยิบจับได้

ภาพที่ …. ICP Registration Refinement

กระบวยการทดสอบระบบต้นแบบนี้อ้างอิงถึงแนวคิดโดยภาพรวมของการทำงาน Bin-picking โดยการตรวจเอกสารในงานวิจัยที่คล้ายกัน อังนั้นการทดสอบระบบนี้จำเป็นต้องมีการทดสอบในข้อมูลที่หลากหลาย โดยผู้วิจัยได้เลือกกรณีศึกษาข้อมูลทดสอบ 2 แบบ ได้แก่ กรณีชิ้นงานที่บรรจุในกล่องในปริมาณมาก และกรณีที่ชิ้นงานมีน้อยและวางกระจายกันในกล่องบรรจุ เพื่อศึกษาและวิจารณ์ผลการวิเคราะห์เพื่อชี้ถึงปัญหาที่อาจเกิดและข้อจำกัดที่ควรมีการเสนอแนะในการทำวิจัยต่อยอด

### 3.4.3 การทดสอบระบบต้นแบบการตรวจหาชิ้นงาน

//ทดสอบกับชิ้นงานแบบไหนบ้าง กี่ชิ้น จัดวางยังไง กี่ตัวอย่างและจะประเมินความถูกต้องอย่างไร

# บทที่ 4

**ผลการวิจัย**

## 4.1 การพัฒนาระบบต้นแบบการตรวจหาชิ้นงานที่หยิบจับได้จากข้อมูลจุดกลุ่มเมฆ

ระบบตรวจหาชิ้งานที่ถูกพัฒนาพร้อมกับการทดสอบระบบต้นแบบโดยใช้ไลบรารี่ Open3D ภาษา Python มีเครื่องมือให้ใช้ค่อนข้างไม่หลากหลายแต่ทว่าการออกแบบโครงสร้างการประมวลผลค่อนข้างมีความง่ายต่อการศึกษา อย่างไรก็ตามต้นแบบที่ถูกพัฒนาออกมามีความแตกต่างในบางส่วนและมีการใช้เครื่องมือที่คล้ายกันในบางส่วนของการวิเคราะห์เมื่อเทียบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยหลังจากผู้วิจัยได้ศึกษา มีการค้นพบประเด็นสำคัญที่ต่อการพัฒนาแนวคิดประมวลผลหรือแม้แต่การทดสอบดังนี้

### 4.1.1 เมื่อพิจารณาตามแนวคิดการประมวลผลของงานวิจัยอื่นมีที่มีลักษณะเดียวกันพบว่างานวิจัยส่วนหนึ่งมีการกล่าวถึงการใช้ Keypoint เพื่อนำไปคำนวณหา Descriptor โดยการใช้ Keypoint ดังกล่าวให้ผลที่มีนัยสำคัญต่อการชี้ลักษณะเฉพาะได้ดีกว่าการคำนวณ Descriptor โดยที่ไม่ผ่านการวิเคราะห์ Keypoint โดยการศึกษานี้พบว่า ไลบราี่ Open3D มีการวิเคราะห์ Keypoint เพียงอัลกอริทึม ISS () เท่านั้น นอกจากนี้ในตัวอย่าง Source code ที่มีการใช้งาน มิได้มีการวิเคราะห์หา Keypoint โดยนำข้อมูล Point cloud ที่มีคำนวณหา FPFH โดยตรง ดังนั้นผู้วิจัยจึงลองตั้งข้อสังเกตโดยมีการแทรกกระบวนการหา Keypoint ก่อนนำไปคำนวณ Descriptor พบว่า ผลการทำ Registration มีความแตกต่างจาก การประมวลผลแบบไม่ทำ Keypoint คือชิ้นงานไม่สามารถถูกตรวจพบได้ในการทดสอบซึ่งสาเหตุคือจำนวน Keypoint มีน้อยและส่งผลให้การประมวลผล Registration ไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 4.1.2 ด้วยความง่ายต่อการพัฒนาระบบต้นแบบด้วยภาษา Python เมื่อเทียบกับไลบรารี่ PCL ที่ถูกเขียนมาจาก ภาษา C++ พบว่าการพัฒนาด้วยภาษา Python มีไลบรารี่อื่นๆที่รองรับและใช้งานได้ยืดหยุ่นกว่าในด้านการส่งออกหรือการแสดงผลข้อมูลต่างๆที่เป็นอเนกประสงค์เช่น ข้อมูลความถี่ FPFH ที่ทำได้ผ่าน การแปลงเป็นข้อมูล Numpy array เป็นต้น อย่างไรก็ตาม PCL มีเครื่องมือให้เลือกใช้ที่ได้ค่อนข้างมากกว่า Open3D และด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงอาจจำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมที่มีเพียงตัวเลือกเดียวใยการประมวลขั้นตอนบางขั้นตอนอย่างเลี่ยงไม่ได้ ซึ่งข้อสังเกตนี้ ถือเป็นข้อจำกัดหนึ่งต่อการพัฒนาระบบ Bin-picking ด้วยภาษาไพธอน

## 4.2 ผลการทดสอบระบบการตรวจหาชิ้นงาน

ในการทดสอบผู้วิจัยได้คาดหวังผลการศึกษาโดย ในหนึ่งข้อมูลทดสอบหรือหนึ่งภาพความลึกที่ถูกถ่ายและแปลงข้อมูลเป็น Point cloud ควรมีการตรวจหาชิ้นงานพบ 1 ชิ้นที่จะสามารถให้แขนกลหยิบจับได้และอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้อง ซึ่งผลการทดสอบพบว่ามีตัวอย่างข้อมูลทดสอบที่พบชิ้นงานอยู่ในตำแหน่งถูกต้อง และพบชิ้นงานแต่อยู่ในตำแหน่งที่คลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่ควรเป็น ซึ่งการทดสอบที่มีทั้งชิ้นงานที่บรรจุในกล่อง แบบกระจายน้อยชชิ้นและ มากชึ้นวางซ้อนกัน ภาพที่ …. แสดงถึงผลการตรวจหาชิ้นงานที่เจอและถูกต้อง

ภาพ … เจอ+ถูก

ในตรงกันข้าม กรณีที่การตรวจหาชิ้นงานพบได้ในกล่องบรรจุแต่ตำแหน่งของชิ้นงานที่พบมีความคลาดเคลื่อน ผู้วิจัยพบว่าปัญหาของการจำแนกชิ้นงานคือควาไม่แน่นอนจากการสุ่มค่าโดยอัลกอริทึม RANSAC ในการทำนาย Transformation ซึ่งผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นถึงการทำนายค่า Transformation ที่มีค่า fitness สูงสุด กลับทำให้ตำแหน่งชิ้นงานมีความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ ... ซึ่งกรณีดังกล่าวเกิดขึ้นบางครั้งของการประมวลผลตรวจหา ในข้อมูลทดสอบชุดเดียวกัน

ภาพที่ … เจอ + ผิดที่

นอกจากนี้การทดสอบระบบตรวจหาชิ้นงานจากกล้องความลึก ได้มีข้อสังเกตเกี่ยวกับความเป็นไปได้ในการตรวจหาชิ้นงานพบมากกว่า 1 ชิ้น โดยวางแนวคิดจากการที่ระบบจะเทียบ Descriptor เพื่อหาการ transformation ที่มีค่า fitness สูงที่สุดเพื่อหาชิ้นงานพบ ผู้วิจัยจึงตั้งข้อสังเกตวการทำนายค่า transformation ในลำดับรองจากที่มีค่า fitness สูงที่สุด จะสามารถตรวจพบชิ้นงานอื่นนอกจาก ชิ้นที่พบอันดับแรกหรือไม่

## 4.3 วิจารณ์ผลการทดสอบการตรวจหาชิ้นงานจากระบบต้นแบบ

แม้ว่าการพัฒนาต้นแบบนี้เป็นไปตามกระบวนการโดยมีผลการศึกษาที่สามารถทำได้และยังไม่สามารถทำได้ การปรับปรุงแนวคิดการประมวลผลจึงมีความสำคัญให้สอดคล้องกับงานหยิบจับในแต่ละงานที่เหมาะสม อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของจำนวนเครื่องมือในไลบรารี่ Open3D ที่ทำให้กระบวนการ Clustering มีแค่ DBSCAN ทำให้ผู้วิจัยเล็งเห็นถึงการนำอัลกอริทึมที่ต่างกันในการจับกลุ่มข้อมูล Point cloud จากไลบรารี่อื่นมาช่วยในการประมวลผล เช่น การใช้อัลกอริทึม Optics clustering มาใช้แทน DBSCAN อย่างไรก็ตามข้อสังเกตุหลักคือจำนวนข้อมูลอ้างอิงของ Partial view นั้นมีไม่พอกับความหลากหลายของการจัดวางของชิ้นงานที่เกิดกับการใช้งานจริง

โดยการทดสอบดังกล่าวมีการควบคุมพารามิเตอร์ของการ Down sampling ที่มีขนาด voxel 5 มิลลิเมตร ซึ่งได้มีการทดสอบด้วยขนาด Voxel ที่ 2.5 มิลลิเมตรแล้วพบว่า ผลการตรวจหาชิ้นงานได้ถูกต้องแค่บางข้อมูลทดสอบ อย่างไรก็ตามประเด็นสำคัญที่มีผลต่อการตรวจหาชิ้นงานที่แม่นยำคือกระบวนการ Global registration ที่ทำนายค่า Transformation จากพิกัดจุดศุนย์ข้อมูลจากฐานข้อมูลลงสู่ข้อมูล Point cloud ในกล่องบรรจุชิ้นงาน

# บทที่ 5

**สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ**

## 5.1 สรุปผลการศึกษา

แนวคิดการพัฒนาระบบต้นแบบที่สามารถปรับปรุงได้ ของการตรวจหาชิ้นงานในงาน Bin-Picking โดยการข้อมูล Point cloud เป็นพื้นฐานการวิเคราะห์ โดยชิ้นงานตัวอย่างที่นำมาทดสอบคือท่อ PVC ข้อต่อ 90 องศา พบว่า งานวิจัยต่างๆได้กล่าวถึงการวิเคราะห์การประมวลผลในลักษณะเดียวกันมีความหลากหลายรวมถึงอัลกอริทึมที่สามารถใช้ได้ โดยการศึกษานี้ได้เลือกไลบรารี่ Open3D ที่เขียนโดยภาษา Python ที่นิยมใช้ ซึ่งแม้ว่าเครื่องมือมีจำนวนน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ PCL library แต่การประมวลผลยังชี้ถึงประสิทธิภาพที่สามารถนำไปปรับปรุงให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีขึ้นได้ โดยข้อสังเกตุจากการศึกษาพบในเรื่องของจำนวนข้อมูลอ้างอิงของชิ้นงานที่เหมาะสม พารามิเตอร์ของการประมวลผลจำแนกกลุ่มชิ้นงานและการทำ Registration เพื่อตรวจหาและระบุตำแหน่งชิ้นงานบนกอง ข้อจำกัดต่างๆเหล่านี้สามารถนำมาถูกปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นต่อการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ชิ้นงานอื่นๆและงานด้านสายการผลิตที่เกี่ยวข้อง ซึ่งงานการหยิบจับชิ้นงาน Bin-Picking มีความท้าทายที่แตกต่างกันไปตามขนาดและความซับซ้อนของชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้สรุปผลและชี้นัยะหนึ่งว่า กล้องถ่ายภาพความลึกในงานวิจัยนี้ (Realsense D435i) เป็นอุปกรณ์ที่มีต้นทุนเหมาะสมและขนาดเล็ก ที่มีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้ในงาน Bin-picking ได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการลดจำนวนข้อมูล Point cloud ของชิ้นงาน หรือ Down sampling ควรมีการพิจารณาถึงขนาด Voxel ที่เหมาะสมต่อการตรวจพบชิ้นงานซึ่งชิ้นงานอาจมีขนาดและความซับซ้อนที่สอดรับกับการวิเคราะห์หาลักษณะเฉพาะ (Feature Description) ที่ต่างกัน นอกจากนี้การประมวลผลจำแนกหา Cluster ของชิ้นงานยังต้องมีการพิจารณาปรับปรุงรวมถึงพารามิเตอร์ หรืออาจหาอัลกอริทึมที่เหมาะสมต่อการจำแนก Cluster ชิ้นงานได้ และ จำนวนของข้อมูลอ้างอิงควรถูกพิจารณาอย่างเหมาะสมต่อสมดุลระหว่างเวลาการคำนวณและความแม่นยำการตรวจหาชิ้นงาน

# ภาคผนวก