การศึกษาความแม่นยำและความคลุมเคลือในการประมาณตำแหน่งด้วยเครื่องหมายภาพ หลายชิ้น หลายขนาด และหลายระนาบ

นายถิรพุทธิ์ ติระพงศ์ธวัช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาระบบกายภาพที่เชื่อมประสานด้วยเครือข่ายไซเบอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A study of accuracy and ambiguity of pose estimation from multiple, multi-scale and multi-planar fiducial markers

Mr. Tiraput Tirapongtawat

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Cyber-Physical System
Department of Mechanical Engineering
FACULTY OF ENGINEERING
Chulalongkorn University
Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความแม่นยำและความคลุมเคลือในการประมาณตำแหน่งด้วยเครื่องหมายภาพ หลายชิ้น หลายขนาด และหลายระนาบ
โดย	นายถิรพุทธิ์ ติระพงศ์ธวัช
สาขาวิชา	ระบบกายภาพที่เชื่อมประสานด้วยเครือข่ายไซเบอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัณหพศ จันทรานุวัฒน์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศกร บำรุงไทย)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ถิรพุทธิ์ ติระพงศ์ธวัช : การศึกษาความแม่นยำและความคลุมเคลือในการประมาณตำแหน่งด้วยเครื่องหมายภาพ หลายชิ้น หลายขนาด และหลายระนาบ. (A study of accuracy and ambiguity of pose estimation from multiple, multi-scale and multi-planar fiducial markers) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ผศ. ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการหาตำแหน่งด้วยภาพ โดยใช้การหาตำแหน่งของเครื่องหมาย (markers) ในรูปแบบของ ArUco ซึ่งสามารถหาตำแหน่งและมุมเทียบกับกล้องได้ อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มความสามารถของการวัดตำแหน่งของวัตถุที่มีหลากหลายเครื่องหมายอยู่ในภาพอย่างแม่นยำ งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวทางเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ 1) การเพิ่มจำนวนเครื่องหมาย 2) การใช้เครื่องหมายหลายขนาด 3) การใช้เครื่องหมายหลายระนาบ จากการศึกษาพบว่า 1) การเพิ่มจำนวนเครื่องหมายเป็น 4 เครื่องหมายกระจายอยู่บนวัตถุ และใช้การหาตำแหน่งด้วยวิธี Perspective-n-Point (PnP) pose computation และปรับปรุงผลต่อด้วยเทคนิค Levenberg-Marquardt minimization จะสามารถลดความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งและเชิงมุมที่ระยะ 1 เมตรได้ร้อยละ 19.59 และ 41.89 ตามลำดับ 2) การพัฒนาเพิ่มเติมโดยการใช้เครื่องหมายสองขนาดร่วมกัน สามารถลดความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งและเชิงมุมที่ระยะ 1 เมตร ได้เพิ่มเติมอีกร้อยละ 41.99 และ 72.89 ตามลำดับ และในขณะเดียวกันสามารถเพิ่มระยะสูงสุดในการตรวจจับได้ จาก 4 เมตร เป็น 8 เมตร 3) นอกจากนี้ยังได้พัฒนาการลดความคลุมเครือในการหาตำแหน่งจากการตรวจจับเครื่องหมายบนหลายวัตถุพร้อมกัน จากการศึกษาพบว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นมาสามารถแยกแยะเครื่องหมายบนวัตถุได้อย่างถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา	ระบบกายภาพที่เชื่อมประสานด้วยเครือข่ายไซเบอร์	ลายมือชื่อนิสิต .....
ปีการศึกษา	2565	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

6470031521 : MAJOR CYBER-PHYSICAL SYSTEM
KEYWORD:

Tiraput Tirapongtawat : A study of accuracy and ambiguity of pose estimation from multiple, multi-scale and multi-planar fiducial markers. Advisor: Asst. Prof. SURAT KWANMUANG, Ph.D.

This research aims to improve the accuracy of object detection using ArUco markers, which can be localized with respect to the camera. To enhance the accuracy of position measurement for objects with multiple ArUco markers in the image, this study proposes three approaches: 1) increasing the number of markers, 2) using markers of different sizes, and 3) using markers at different planes. The findings suggest that increasing the number of markers to four and applying the Perspective-n-Point (PnP) pose computation technique, followed by Levenberg-Marquardt minimization, can reduce position and orientation errors by 19.59% and 41.89%, respectively, at a range of one meter. Additionally, combining two marker sizes can further reduce position and orientation errors by an additional 41.99% and 72.89%, respectively, and extend the maximum detection range from four to eight meters. Overall, the developed system can accurately identify and locate multiple markers on objects, demonstrating its effectiveness for object detection.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Cyber-Physical System Student's Signature .....
Academic Year: 2022 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

วิจันนี้สำเร็จได้ด้วยดีเนื่องจาก คุณพ่อคุณแม่ที่คอยช่วยสนับสนุนและให้กำลังใจ คอยดูแลเรื่องอาหารและการเงินอย่างดี และขอบคุณ ผศ. ดร. สุรัฐ ขวัญเมือง ที่คอยแนะนำการทำวิทยานิพน์, การใช้ชีวิต, ระเบียบวินัยและคอยเตือนเมื่อผมขาดตกบกพร่อง ขอบคุณพี่โบ้ที่คอยใช้คำปรึกษาการใช้ชีวิต ป.โท เคี่ยวเข็ญผมให้ตั้งใจกับการทำงาน ขอบคูณพี่โอที่คอยให้คำปรึกษา, ให้คำแนะนำและชวนคุยคลายเครียด ขอบคุณพี่ปอที่มาทักทายและชวนคุยขณะทำงาน ขอบคูณเพื่อนๆ ป.โท ที่คอยให้กำลังใจและกินข้าวกันบ่อยๆ และสุดท้ายขอบคุณตัวผมเองที่ไม่ท้อใจและล้มเลิกกลางทาง :)

ถิรพุทธิ์ ติระพงศ์ธวัช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ง

กิตติกรรมประกาศ ..... จ

สารบัญ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูปภาพ ..... ญ

บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย 2

1.2.1 พัฒนาเทคนิคการขนส่งวัสดุผ่านการตรวจจับ marker บนชั้นวางของ 2

1.2.2 พัฒนาเทคนิคการนำทางและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อ marker มาช่วยในการระบุตำแหน่งจุดหมาย 2

1.2.3 เปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับ marker กับงานวิจัยอื่น 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.3.1 การใช้งานระบบการนำทางที่มี marker เข้ามาช่วยจะใช้งานในที่ร่มเท่านั้น 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

1.4.1 หุ่นสามารถตรวจจับหาชั้นวางของได้ 2

1.4.2 ระบบสามารถแยก marker ที่ต้องการใช้กับ marker ที่รบกวนได้ 2

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 fiducial marker 3

2.2 Navigation with arUco 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.3 การจับตำแหน่งเครื่องหมายด้วยกล้องและสนามแม่เหล็ก 8
2.4 การใช้เครื่องหมายนำทางการฉีดยาเข้าเส้นเลือดใหญ่ 8
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 10
3.1 อัลกอริทึม ArUco marker 10
3.3 การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแผนที่ 15
3.4 การนำทางของหุ่นยนต์ 16
3.5 Levenberg-Marquardt 17
3.6 ประเภทของ perspective-n-point 17
บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย 20
4.1 การทดลองหาความคลาดเคลื่อนในเครื่องหมายรูปแบบต่าง ๆ 20
4.1.1 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์ 21
4.2 การทดลองประสิทธิภาพการจัดกลุ่มของเครื่องหมายเพื่อลดความคลุมเครือ 27
4.2.1 การตรวจสอบทิศทางของเครื่องหมาย 27
4.2.2 การตรวจสอบระนาบของเครื่องหมาย 28
4.2.3 ระบบการจัดกลุ่มในการลดความคลุมเครือ 30
บทที่ 5 ผลการทดลองและการอภิปราย 34
5.1 ผลการทดสอบหาความคลาดเคลื่อนในการวางเครื่องหมายรูปแบบต่าง ๆ 34
5.1.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่วัดได้กับผลการทดสอบวิจัยอื่น 35
5.1.2 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการตรวจจับ 37
5.2 ผลลัพธ์การทดลองประสิทธิภาพการจัดกลุ่มของเครื่องหมายเพื่อลดความคลุมเครือ 37
5.3 ผลลัพธ์การนำทางและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อเครื่องหมายมาช่วยในการระบุตำแหน่งจุดหมายในสถานการณ์มีเครื่องหมายมารบกวน 38
6. สรุปผล 41

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6.1 สรุปผลการทดลองหาความคลาดเคลื่อนในการวางเครื่องหมายรูปแบบต่าง ๆ 41
6.2 สรุปผลการทดลองประสิทธิภาพการจัดกลุ่มของเครื่องหมายเพื่อลดความคลุมเครือ 41
6.3 สรุปผลการทดลองการนำทางและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อมีเครื่องหมายมาช่วยระบุตำแหน่งจุดหมายในสถานการณ์มีเครื่องหมายมารบกวน 41
บรรณานุกรม 42
ประวัติผู้เขียน 43
ภาคผนวก.....47

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบ marker [4] 5

ตารางที่ 2 คุณสมบัติ articulated robot (delta) [21] 24

ตารางที่ 3 คุณสมบัติกล้อง Logitech C920 [22] 24

ตารางที่ 4 คุณสมบัติ turtlebot3 burger [23] 32

ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers 34

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์การตรวจจับความคลาดเคลื่อนวิจัย [24] 36

ตารางที่ 7 ตารางการเปรียบเทียบการตรวจจับ 4 markers 36

ตารางที่ 8 ผลลัพธ์การทดลองเดินตามตำแหน่งของเครื่องหมายโดยมีเครื่องหมายอื่นรบกวน 39

ตารางที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ท่าทางที่ 0 องศา (ตั้งฉากกับกล้อง) 47

ตารางที่ 10 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rx = 15 องศา 48

ตารางที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rx = -15 องศา 49

ตารางที่ 12 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Ry = -30 องศา 50

ตารางที่ 13 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Ry = -15 องศา 51

ตารางที่ 14 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Ry = 15 องศา 52

ตารางที่ 15 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Ry = 30 องศา 53

ตารางที่ 16 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rz = -30 องศา 54

ตารางที่ 17 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rz = -15 องศา 55

ตารางที่ 18 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rz = 15 องศา 56

ตารางที่ 19 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rz = 30 องศา 57

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 ตัวอย่าง ARTag, AprilTag, ArUco และ STag [4].....3

รูปที่ 2 ผลการทดลองเปรียบเทียบข้อผิดพลาดของระยะจากกล้องถึง fiducial marker.....4

รูปที่ 3 ผลการทดลองการระบุการหมุนและการเคลื่อนที่ของ fiducial marker แบบกระทันหัน [4] .4

รูปที่ 4 ค่าการประมวลผลของ marker โดย Raspberry Pi 3B+ [4].....5

รูปที่ 5 รถเข็นที่แปลงเป็นเตียงสำหรับเพิ่มความสะดวกทางการแพทย์ [5].....6

รูปที่ 6 การติดตั้งกล้องและArUco.....6

รูปที่ 7 การนำรถเข็นเข้าจอดโดย ArUco [5].....7

รูปที่ 8 ทิศทางความเร็วมอเตอร์ของรถเข็นและตัวอย่างเส้นทางการเดินทาง [5].....7

รูปที่ 9 ตัวอย่างการทดลองระบบตรวจภายในพร้อมระบุตำแหน่งแบบ Hybrid [6].....8

รูปที่ 10 ตัวอย่างการฝึกการฉีดยาเข้าเส้นเลือดใหญ่แบบฉุกเฉิน.....9

รูปที่ 11 ArUco marker ที่มีตัวระบุเลขที่ 46.....10

รูปที่ 12 การหาตำแหน่งมุมของ ArUco [10].....12

รูปที่ 13 ตัวอย่างการ calibration.....13

รูปที่ 14 Radial distortion [11].....14

รูปที่ 15 tangential distortion.....15

รูปที่ 16. ตัวอย่างการใช้งาน adaptive Monte Carlo localization [13].....15

รูปที่ 17 ROS navigation stack [14].....16

รูปที่ 18 ตัวอย่างการกำจัดค่าผิดปกติโดย Ransac.....17

รูปที่ 19 โครงสร้างการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจจับ ArUco.....21

รูปที่ 20 ที่ติด ArUco marker บน articulated robot.....21

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 21 ติดตั้ง ArUco end effector กับ articulated robot 22
รูปที่ 22 อุปกรณ์การปรับเทียบ articulated robot 22
รูปที่ 23 การปรับเทียบ articulated robot 23
รูปที่ 24 ผลการปรับเทียบ articulated robot 23
รูปที่ 25 laser end effector 25
รูปที่ 26 ตัวอย่างการทดลองการวัดค่าผิดพลาดของ ArUco 25
รูปที่ 27 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ ArUco ด้วยแขนกล 26
รูปที่ 28 ArUco gripper 26
รูปที่ 29 การเก็บข้อมูล ArUco จากแขนกล 27
รูปที่ 30 การทดลองตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องหมายที่มารบกวน 27
รูปที่ 31 การทดลองตำแหน่งของเครื่องหมายที่มารบกวน 28
รูปที่ 32 การตรวจสอบทิศทาง normal vector กับเครื่องหมายที่ใช้งานที่ฉากกัน 29
รูปที่ 33 ตัวอย่างการจัดกลุ่มของเครื่องหมาย 29
รูปที่ 34 ผังงานการจัดกลุ่มเครื่องหมาย 30
รูปที่ 35 สนามจำลอง 31
รูปที่ 36 รถขนวัสดุจำลอง 31
รูปที่ 37 การติดตั้งเครื่องหมายรบกวนในสนาม 32
รูปที่ 38 สนามจำลอง 32
รูปที่ 39 ค่าความคลาดเคลื่อนที่อ้างอิงตามสี 34
รูปที่ 40 เปรียบเทียบการเรียงตัวของ aruco 35
รูปที่ 42 เวลาในการตรวจจับและประมวณผลเครื่องหมายแบบต่าง ๆ 37
รูปที่ 43 ผลลัพธ์การทดลองตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องหมายรบกวน 38
รูปที่ 44 ผลลัพธ์การทดลองตำแหน่งของเครื่องหมายรบกวน 38

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 45 ตัวอย่างการตรวจจับเครื่องหมายในสนามขณะมีเครื่องหมายไม่เกี่ยวข้องมารบกวน 39

รูปที่ 46 ตำแหน่งระนาบเครื่องหมายที่ทำกับมุมกล้องเข้าใกล้ 0 องศา 40

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปี 2022 ที่ผ่านมาขนาดของตลาดหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัติของโลกมีมูลค่า 2.97 พันล้านยูเอสดอลลาร์และมีการคาดการว่าตลาดนี้จะขยายขึ้นอีกปีละ 15 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการเติบโตต่อปีแบบทบต้น [1] จากปี 2023 ถึง 2030 ซึ่งในตลาดนี้หุ่นยนต์มีหน้าที่เก็บ, เลือก, เคลื่อนย้ายและเรียงวัสดุในอุสาหกรรมปราศจากการควบคุมจากพนักงาน โดยระบบการหุ่นยนต์สามารถทำงานได้จากตัวกล้อง, เซ็นเซอร์ และ โครงสร้างแผนที่โรงงาน

การทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อัตโนมัตินั้นจะช่วยลดโอกาสการเกิดอุบัติเหตุ, ลดค่าแรงงาน , ลดต้นทุนการผลิต, เพิ่มประสิทธิภาพและสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องจึงทำให้หุ่นยนต์สามารถแก้ปัญหาได้หลายแขนงตั้งแต่ผู้ผลิตถึงผู้บริโภคเช่น ระบบการขนส่งวัสดุ, การขนส่งอาหาร จนไปถึงระบบรถไร้คนขับจากระบบทั้งหมดที่กล่าวมาระบบของหุ่นจำเป็นจะต้องมีระบบระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์เพื่อจะรู้ว่าหุ่นยนต์อยู่ตำแหน่งใดเมื่อเทียบกับแผนที่ซึ่งการระบุตำแหน่งก็สามารถระบุได้หลายวิธีเช่น Inertial measurement Unit (IMU) [2] เป็นเครื่องสำหรับการวัดซึ่งจะประกอบไปด้วย gyroscope, accelerometer และ magnetometer จะช่วยกันตรวจจับการเคลื่อนที่และทิศทางได้หลายแกนขณะหุ่นกำลังเคลื่อนที่ Global positioning system (GPS) [3] คือระบบการนำทางด้วยดาวเทียมอย่างน้อย 3 ดวง และอย่างน้อย 24 ดวงในการระบุตำแหน่งในทุกสภาพอากาศแต่ GPS นั้นจะสามารถระบุตำแหน่งได้ในพื้นที่นอกอาคารเท่านั้นไม่สามารถใช้พื้นที่ในอาคารได้เนื่องจากสัญญาณส่งมาไม่ถึง fiducial marker คือ เครื่องหมายที่สามารถระบุตำแหน่งของหุ่นเมื่อเทียบกับเครื่องหมายได้โดยการเทียบขนาดและทิศทางของเครื่องหมายจริงกับขนาดของเครื่องและทิศทางของเครื่องหมายที่ตรวจจับผ่านกล้องซึ่งในการขนส่งวัสดุในอุตสาหกรรมอาจไม่สามารถให้หุ่นอยู่แต่บริเวณนอกอาคารได้และตัวหุ่นนั้นนอกจากสามารถระบุตำแหน่งตัวเองได้นั้นยังจำเป็นต้องการตำแหน่งของเป้าหมายหรือวัสดุที่ต้องขนส่งได้ด้วย

ในงานวิจัยนี้ต้องการให้หุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งของรถขนวัสดุจำลองภายในอาคารเพิ่มความแม่นยำและสามารถลดความคลุมเครือขณะตรวจจับเครื่องหมายที่ไม่เกี่ยวข้องเนื่องจากในอุสาหกรรมจริงสามารถมีรถขนวัสดุได้หลายคันจึงอาจทำให้เครื่องหมายมารบกวนกันได้

1.2 จุดประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 พัฒนาเทคนิคการขนส่งวัสดุผ่านการตรวจจับ marker บนชั้นวางของ

1.2.2 พัฒนาเทคนิคการนำทางและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อ marker มาช่วยในการระบุตำแหน่งจุดหมาย

1.2.3 เปรียบเทียบสมรรถนะการตรวจจับ marker กับงานวิจัยอื่น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 การใช้งานระบบการนำทางที่มี marker เข้ามาช่วยจะใช้งานในที่ร่มเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 หุ่นสามารถตรวจจับหาชั้นวางของได้

1.4.2 ระบบสามารถแยก marker ที่ต้องการใช้กับ marker ที่รบกวนได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

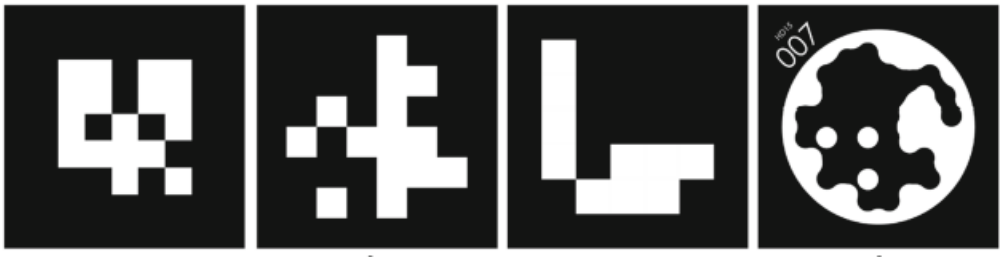
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 fiducial marker

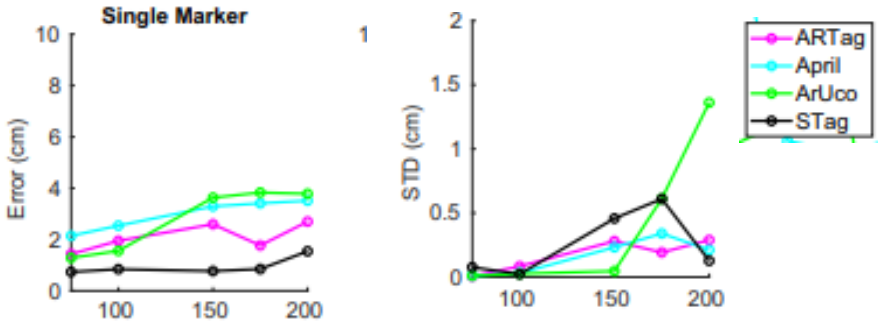
fiducial marker โดยทั่วไปถูกนำไปใช้เป็นจุดอ้างอิงในการวัดขนาดวัตถุจากรูปภาพ ในปัจจุบันมี ผู้ผลิตทำ fiducial marker ออกมาหลายรูปแบบซึ่ง fiducial marker แต่ละอันค่อยข้างมีรูปร่างที่ค่อนข้างแต่ต่างกัน เช่น สี่เหลี่ยม, วงกลม, ผีเสื้อ, เส้นปะ และ จุด (ลวดลายของ marker จะระบุถึง ID marker) นอกจากรูปร่างที่ต่างกันแล้วเรื่องสีในการใช้ก็ต่างกันบเช่น marker monochrome, grayscale และ multicolor แต่ในการถอดรหัสของmarkerนั้นจะส่วนใหญ่จะใช้วิธีการ topological encoding ซึ่งเป็นการถอดรหัสจากโครงสร้างของmarkerที่ต้องการสื่อ จะมีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ใช้ frequency spectrum และ gradient มักใช้งานในที่ต้องการระยะในการบอกตำแหน่งได้ไกลแต่มีความแม่นยำน้อย

ในงานวิจัย Fiducial marker for pose estimation [4] ได้มีการเปรียบเทียบ fiducial marker 4 แบบที่ มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย, เป็น state of art, สามารถเข้าถึงได้โดยไม่มีค่าใช้จ่าย และที่สำคัญคือสามารถลองรับในการใช้ Robotic Operating System (ROS) คือ ARTag, AprilTag, Aruco และ STag ดังรูปที่ 1 เพื่อหาข้อผิดพลาดของ fiducial marker แต่ละชนิดและหาความเหมาะสมในการใช้งาน fiducial marker แต่ละประเภท นอกจากจะเปรียบเทียบ fiducial markerแล้ว วิจัยนี้ได้เปรียบเทียบ การใช้คอมพิวเตอร์แต่ละประเภทในการใช้งานกับ fiducial marker ข้อผิดพลาดของระยะfiducial marker ที่ห่างออกไปจากกล้อง การเพิ่มความชั้นของ fiducial marker การสังเกต fiducial marker ในแสงที่ต่างกัน และ การสังเกตการหมุนและการเคลื่อนที่ของ fiducial marker โดยกระทันหัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



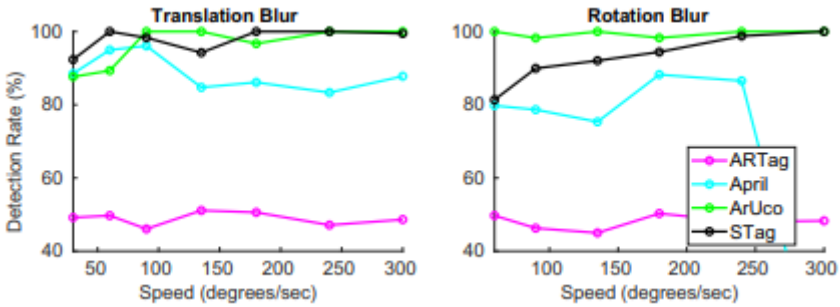
รูปที่ 1 ตัวอย่าง ARTag, AprilTag, ArUco และ STag [4]



รูปที่ 2 ผลการทดลองเปรียบเทียบข้อผิดพลาดของระยะจากกล้องถึง fiducial marker

รูปที่ 2 คือผลการทดลองเปรียบเทียบข้อผิดพลาดของระยะจากกล้องถึง fiducial marker ที่ระยะ 75 , 100 , 150 , 175 และ 200 cm ในสภาพแสง กล้องและ fiducial mark ที่ต่างกัน ขณะที่ fiducial marker หยุดนิ่ง จะเห็นได้ว่า STag มีค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาดน้อยสุด 175 cm ในสภาวะแสงปกติโดยใช้ Pi camera คือ 0.093 mm

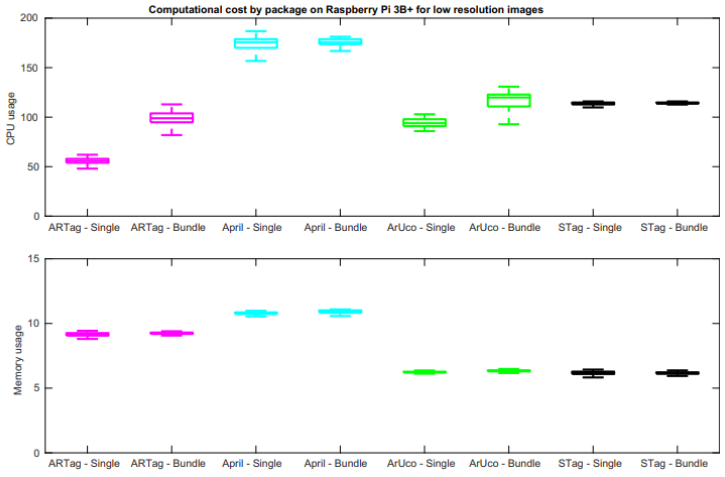
จากผลการทดลองการหมุนและการเคลื่อนที่ของ fiducial marker แบบกะทันหันทำให้ทราบว่า ArUco นั้นมีค่าเฉลี่ยข้อผิดพลาดของการระบุการหมุนแบบกะทันหันน้อยที่สุด และ STag สามารถระบุตำแหน่งการเคลื่อนที่แบบกระทันหันของfiducial marker ได้ดีกว่าmarkerตัวอื่น ดังรูปที่ 2 และ 3 [4]



รูปที่ 3 ผลการทดลองการระบุการหมุนและการเคลื่อนที่ของ fiducial marker แบบกระทันหัน [4]

จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่า ArUco นั้นสามารถตรวจจับเครื่องหมายได้ดีในระยะ 0 ถึง 3 เมตร โดยโอกาสสูงกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าเครื่องหมายอื่นเกือบทุกระยะการตรวจจับ

จากการทดลองการใช้งานทรัพยากร CPU และหน่วยความจำ ในการประมวลผลตำแหน่งของ marker ในเชิงของการใช้หน่วยความจำนั้น AprilTag ต้องการใช้ทรัพยากรมากที่สุดและทั้ง STag และ ArUco ใช้ memory น้อย



รูปที่ 4 *ค่าการประมวลผลของ marker โดย Raspberry Pi 3B+ [4]*

จากการทดลองการเปรียบเทียบmarkerในกรณีต่างๆ สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 1

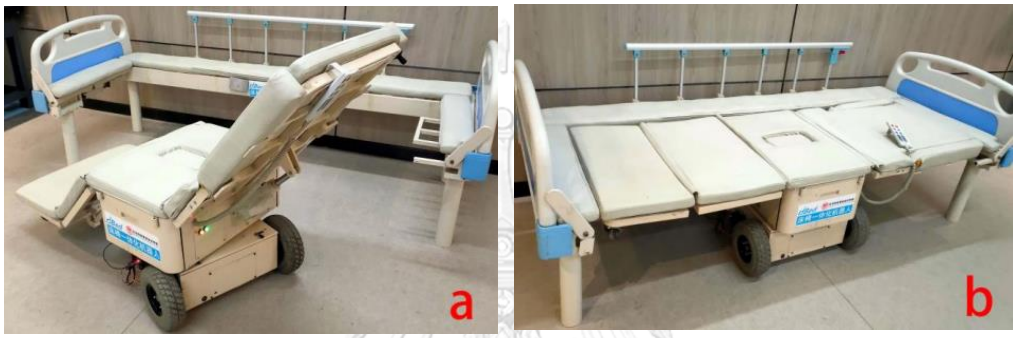
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบ marker [4]

Fiducial Marker	ข้อดี	ข้อเสีย
ARTag	ใช้ทรัพยากรในการคำนวณต่ำ	ตรวจจับmarkerไม่ดี ผลลัพธ์เมื่อตรวจจับ bundle marker ค่อนข้างไม่คงที่
AprilTag	ผลลัพธ์จุดกึ่งกลางและการตรวจจับmarkerดีมาก ผลลัพธ์ตำแหน่งดี	มีความไวต่อการตรวจจับmarker แบบกะทันหัน
ArUco	ผลลัพธ์ตำแหน่งและจุดกึ่งกลางmarkerดี การตรวจจับmarkerดีมาก ใช้ทรัพยากรในการคำนวณต่ำ	มีความไวต่อmarkerขนาดเล็กและระยะไกล
STag	ผลลัพธ์ตำแหน่งและการตรวจจับmarkerดีมาก ผลลัพธ์จุดกึ่งกลางดี	มีความไวต่อmarkerขนาดเล็กและระยะไกล

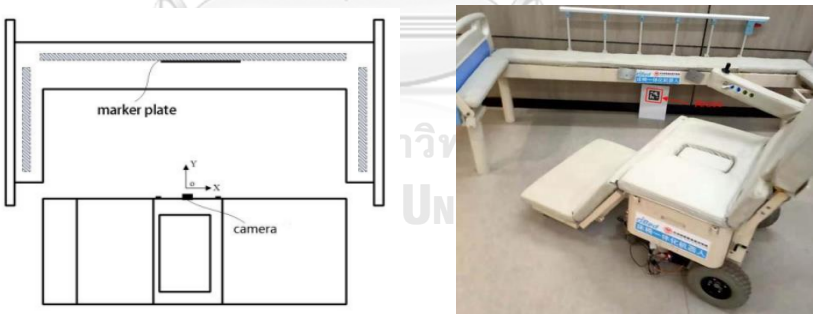
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 Navigation with arUco

การใช้เครื่องหมายมาช่วยในการนำทาง [5] วิจัยมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มความสะดวกของดำเนินการทางการแพทย์และช่วยลดการบำรุงรักษาเครื่องมือโดยงานวิจัยนี้สร้างเตียงที่สามารถแปลงเป็นรถเข็นดังรูปที่ 14 และนำทางตอนเปลี่ยนการใช้งานด้วยArUco ตัวรถเข็นมีการติดตั้งกล้องไว้ด้านล่างของรถเข็นและติดตั้งArUcoไว้ระดับเดียวกับตัวกล้องเพื่อง่านต่อการตรวจจับดังรูปที่ 5 [5]



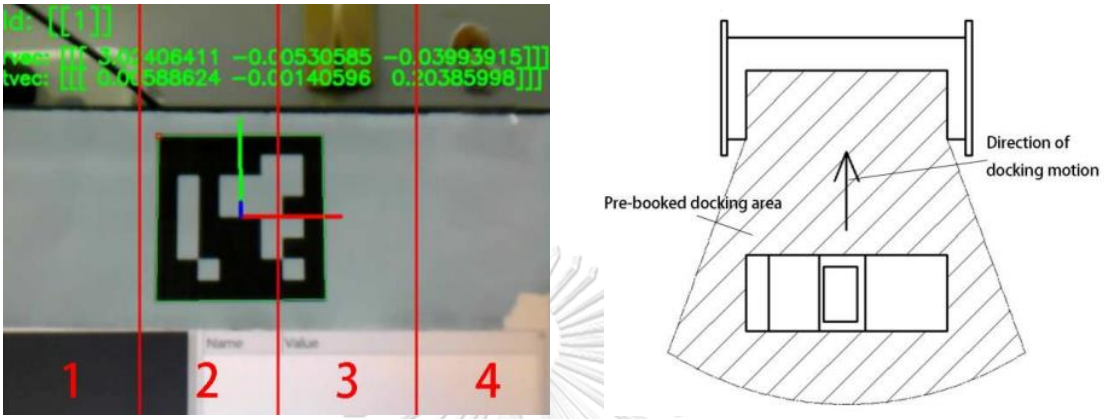
รูปที่ 5 รถเข็นที่แปลงเป็นเตียงสำหรับเพิ่มความสะดวกทางการแพทย์ [5]



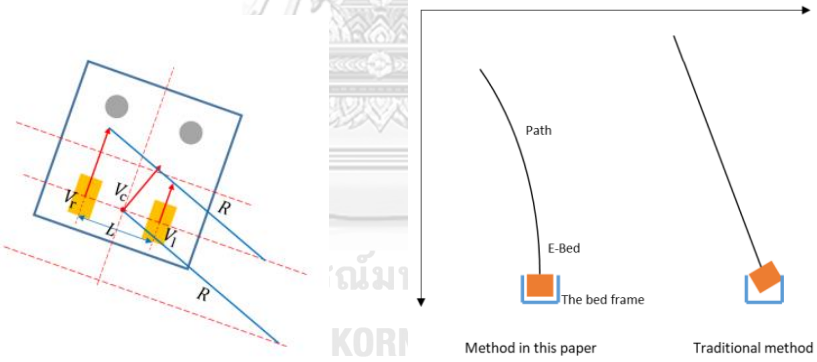
รูปที่ 6 การติดตั้งกล้องและArUco

โดยเมื่อคนไข้ต้องการเปลี่ยนจากรถเข็นเป็นเตียงนั้นจะต้องขับไปในโซนของการเปลี่ยนรูปแบบรถเข็นหลังจากนั้นเมื่อคนไข้เลือกให้รถเข็นเปลี่ยนเป็นเตียงตัวรถเข็นนั้นจะตรวจหา ArUco และทำการเทียบจอดกับตัวเตียงโดยเส้นทางของตัวรถเข็นนั้นจะถูกควบคุมโดยกล้องที่ตรวจจับ ArUco ที่แบ่งรูปเป็น 4 ส่วนเมื่อ ArUco ดังรูปที่ 6 มอเตอร์ทั้งสองข้างจะปรับความเร็วให้ ArUco อยู่ตรงกลางของโซน 2 และ 3 โดยทิศทางของความเร็วนั้นคือ V_c เป็นทิศที่กึ่งกลางขนเข็นชี้ไปหา

ArUcoและเมื่อตำแหน่งของ ArUco ตรงบริเวณตรงกับเตียงแล้วมอเตอร์ก็จะหยุดทำงาน ตัวอย่างเส้นทางที่รถเคลื่อนที่ไปดังรูปที่ 7



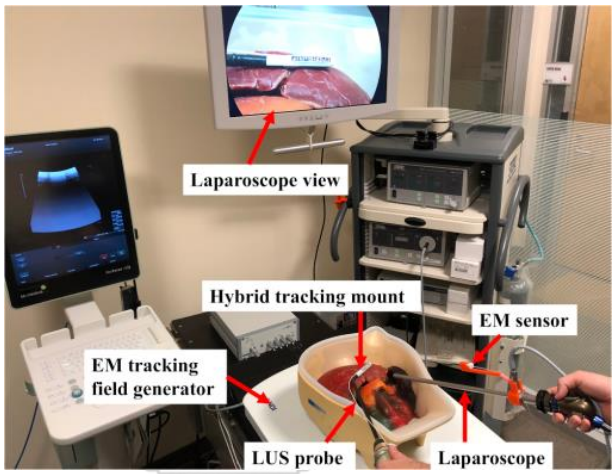
รูปที่ 7 การนำรถเข็นเข้าจอดโดย ArUco [5]



รูปที่ 8 ทิศทางความเร็วมอเตอร์ของรถเข็นและตัวอย่างเส้นทางการเดินทาง [5]

2.3 การจับตำแหน่งเครื่องหมายด้วยกล้องและสนามแม่เหล็ก

ในงานวิจัยนี้ [6] ต้องการ ultrasound อวัยวะภายในร่างกายและต้องการระบุตำแหน่งอวัยวะภายในตำแหน่งที่สนใจจึงได้ใช้เครื่องหมาย arUco มาช่วยในการระบุตำแหน่งขณะ ultrasound โดยขณะ ultrasound นั้นได้สอดกล้อง LUS probe เป็นเครื่อง ultrasoundที่ติดตั้งกับเครื่องหมายและ Laparoscope (กล้อง) เพื่อดูตำแหน่งของเครื่องหมายตามรูปที่ 9



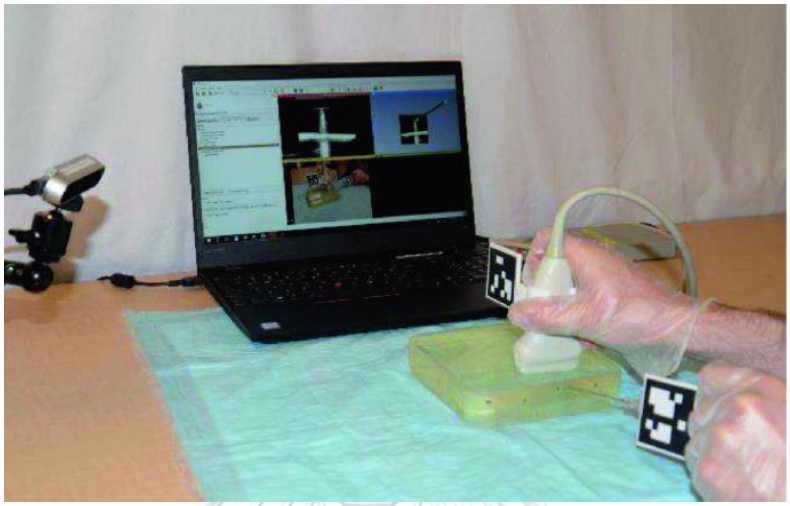
รูปที่ 9 ตัวอย่างการทดลองระบบตรวจภายในพร้อมระบุตำแหน่งแบบ Hybrid [6]

โดยจากรูปที่ 9 นั้นขณะที่ กล้องนั้นตรวจจับเครื่องหมายที่ติดกับ probe แต่เนื่องจากกล้องไม่สามารถตรวจจับเครื่องหมายได้ตลอดเวลาเนื่องจากอาจมีสิ่งขีดขว้างในร่างกายจึงในควบคู่กับสนามแม่เหล็กที่สามารถตรวจจับได้ตลอดเวลาโดยที่ probe นั้นจะติด EM sensor และถูกตรวจจับโดย EM tracking field generator

2.4 การใช้เครื่องหมายนำทางการฉีดยาเข้าเส้นเลือดใหญ่

ในงานวิจัยนี้ [7] ต้องการแพทย์การให้ยากับคนไข้ในกรณีฉุกเฉินโดยต้องฉีดยาเข้าเส้นเลือดใหญ่บริเวณไหปลาร้าโดยในการฉีดให้เข้าเส้นใหญ่โดยตรงนั้นจำเป็นต้องให้ปลายเข็มอยู่ในตำแหน่งเส้นเลือดใหญ่จึงได้นำเครื่องหมายระบุตำแหน่งมาช่วยในการระบุปลายเข็มพร้อมกับ ultrasound หาตำแหน่งปลายเข็มไปพร้อมกันจากในรูปที่ 10 จะมีการติดเครื่องหมายที่ ultrasound และเข็มเพื่อหาตำแหน่งของปลายเข็มขณะฉีดยาให้คนไข้การทำแบบนี้เพื่อให้แพทย์รู้ตำแหน่งปลายเข็มได้อย่าง

แน่นอนและลดการเสียเวลาในการใช้ ultrasound หาตำแหน่งปลายเข็ม ลดการบาทเจ็บของบาทแผล และลดข้อผิดพลาดขณะผ่าตัดฉุกเฉิก



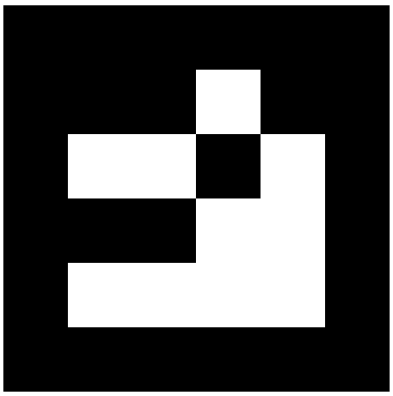
รูปที่ 10 ตัวอย่างการฝึกการฉีดยาเข้าเส้นเลือดใหญ่แบบฉุกเฉิน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 อัลกอริทึม ArUco marker

ArUco marker ถูกสร้างขึ้นโดย S.Garrido-Jurado et [8] ซึ่งมีรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขอบรอบนอกสีดำเพื่อการหาตำแหน่งของกล้องเทียบกับเครื่องหมายโดยใช้สมการ camera model เปรียบเทียบตำแหน่งของเครื่องหมายจริงกับเครื่องหมายที่ตรวจจับได้จากกล้องและมีตารางสี่เหลี่ยมที่ขอบด้านในบางส่วนเป็นสีขาวไว้สำหรับถอดรหัสตัวระบุเลขเป็นระบบเลขฐานสองซึ่ง ArUco ทั่วไปนั้นจะใช้ระบบเลขฐานสอง 2-4 คอลัมน์ในการเก็บตัวระบุเลขที่



รูปที่ 11 ArUco marker ที่มีตัวระบุเลขที่ 46

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การประมาณค่าตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของ ArUco เมื่อเทียบกับตัวกล้องนั้นจะสามารถหาได้หลายรูปแบบแต่มีแนวโน้มคล้ายกันตัวอย่างที่ 1 จากสมการแปลงมุมมองของรูปเป็นตำแหน่งจริงในสมการที่ (1) [9]

$$s * p_i = A[R_G|T_G]q_i \qquad (1)$$

จากสมการที่ (1) s คือมาตราส่วนตัวคูณ p_i คือตำแหน่ง pixel บนรูปจากกล้อง A คือ intrinsic camera parameter เป็น เมทริกซ์ที่ประกอบไปด้วย f_x (focal length of x), f_y (focal length of y), u_0 (จุดกึ่งกลางบรูปภาพในแกน x) , v_0 (จุดกึ่งกลางบรูปภาพในแกน y), $[R_G | T_G]$ คือ extrinsic camera parameter ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่ประกอบด้วย roll, pitch, yaw ที่อยู่ในรูปร่างของ

rotation matrix และ translation ของกล้องเมื่อเทียบกับ camera frame และ q_i คือ จุดภาพจริงเมื่อเทียบกับกล้องได้มาจากการปรับเทียบของกล้องกับกระดานหมากรุกที่ระยะต่างๆ แล้วเก็บค่า pixelของกระดานหมากรุกที่เปลี่ยนไปเทียบกับขนาดหมากรุกจริง

การอธิบายข้างต้นนั้นจะไปสมการ (2) จากสมการนั้นต้องการหา rotation matrix ซึ่งมีตัวแปรที่ต้องการหาทั้งหมด 6 ตัว คือ roll, pitch, yaw, t_1, t_2 และ t_3 ดังนั้นจึงต้องหา q_i อย่างน้อย 2 จุดเพื่อแก้สมการซึ่งการตรวจจับArUcoนั้นใช้ทั้ง 4 จุดคือทั้ง 4 มุมของArUcoเพื่อแก้สมการดังกล่าว

$$T_z \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Intrinsic matrix extrinsic matrix

หลังจากที่แก้สมการ(2) จึงแปลง rotation matrix เป็น roll, pitch และ yaw ดังสมการที่ (3), (4) และ (5) [9]

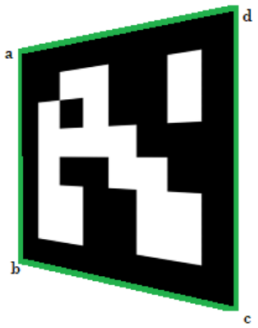
$$\theta_x = arctan2(r_{32}, r_{33}) \quad (3)$$

$$\theta_y = arctan2\left(-r_{31}, \sqrt{r^2{}_{32} + r^2{}_{33}}\right) \quad (4)$$

$$\theta_z = arctan2(r_{21}, r_{11}) \quad (5)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตัวอย่างการหาองศาการหมุนของ ArUco ในแกน Z หรือแกนที่ชี้ออกจาก ArUco ที่ 2 จำเป็นต้องใช้ข้อมูลขนาดของ ArUcoในแนวตั้งและแนวนอนและตำแหน่งที่จุดมุมของ ArUco ซึ่ง OpenCV นั้นจะตรวจดูตำแหน่งมุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัสรอบ ArUco ได้แก่จุด (x_a, y_a),(x_b, y_b),(x_c, y_c)(x_d, y_d)ดังรูปที่ 12เพื่อได้ข้อมูลตำแหน่ง pixel ที่กล้องสามารถจับได้ออกมา



รูปที่ 12 การหาตำแหน่งมุมของ ArUco [10]

จากนั้นนำตำแหน่งของมุม ArUco ทั้ง 4 มุมในแนวแกน x มาใส่สมการ (6) เพื่อขนาดของ ArUco marker ในแนวนอน

$$s_a = \frac{|x_a - x_d| + |x_c + x_b|}{2} \quad (6)$$

สมการหาขนาดของ ArUco ในแนวนอน

ต่อมานำตำแหน่งมุมของ ArUco ในแกน y เพื่อหาขนาดของ ArUco ในแนวตั้งตามสมการ (6)หลังจากนั้นจึงนำค่าที่ได้จากสมการ (6) และ (7) มาหาองศาในแนวแกน z ของ ArUco ในสมการ (8)

$$s_i = |y_a + y_b| \quad (7)$$

สมการหาขนาดของ ArUco ในแนวตั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\theta_z = \arccos\left(\frac{s_a}{s_i}\right) \quad (8)$$

สมการหาองศาในแกน z ของ ArUco

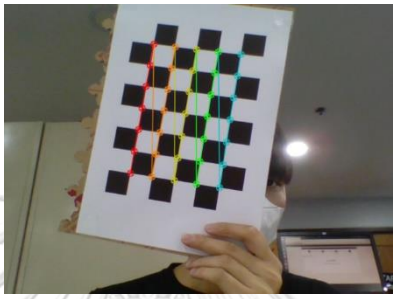
เมื่อได้ขนาดองศาในแกน z ของ ArUco ได้ต้องนำมาพิจารณาหาทิศทางของแกน z ในสมการ(9)

$$\theta = \begin{cases} +\theta_z, & if\,|y_a - y_b| < |y_d - y_c| \\ -\theta_z, & if\,|y_a - y_b| > |y_d - y_c| \end{cases} \quad (9)$$

สมการหาทิศทางในแนวแกน z

3.2 การปรับเทียบกล้อง

เนื่องจากกล้องแต่ละรุ่นนั้นมีระยะโฟกัสและเลนส์หน้ากล้องที่ต่างกันจึงจำเป็นต้อง calibration camera คือการประมาณค่าของ intrinsic, extrinsic และ distortion coefficient โดยการใช้ chess board มาติดบนวัตถุเรียบและแข็งเพื่อให้ chess board อยู่ในระนาบเดียวกัน หลังจากนั้นถ่ายรูป chess board ด้วยกล้องที่ต้องการ calibration ให้ทั่วรอบพื้นที่ที่กล้องสามารถถ่ายได้หลังจากนั้นจึงcalibrateเพื่อหาค่า parameter ที่จะกล่าวด้านล่าง



รูปที่ 13 ตัวอย่างการ calibration

Extrinsic camera parameter

Extrinsic camera parameter คือเมทริกซ์ที่แปลงจุด world coordinate systemเป็น camera coordinate system จากสมการ (2) extrinsic matrix จะประกอบด้วย 1) rotational matrix มาจากการแปลง roll, pitch และ yaw ที่เทียบระหว่างมุมของ world coordinate system และ camera coordinate system ตามสมการ (10) ไปรวมกับระยะห่างแกน x, y และ z ระหว่าง 2 ระบบจะขึ้นกับตำแหน่งและจุดศูนย์กลางกล้องเมทริกซ์นี้ประกอบด้วย rotation และ translation ของ x, y และ z จากสมการ (2)

$$R = \begin{bmatrix} cos\beta cos\gamma & sin\alpha sin\beta cos\gamma - cos\alpha sin\gamma & cos\alpha sin\beta cos\gamma + sin\alpha sin\gamma \\ cos\beta sin\gamma & sin\alpha sin\beta sin\gamma + cos\alpha cos\gamma & cos\alpha sin\beta sin\gamma - sin\alpha cos\gamma \\ -sin\beta & \sin\alpha\ cos\beta & \cos\alpha\ cos\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

Intrinsic camera parameter

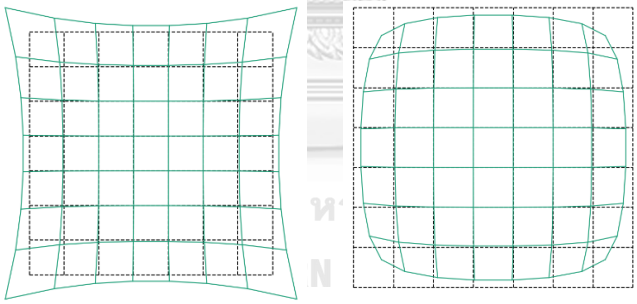
Intrinsic camera parameter คือเมทริกซ์ที่แปลง camera coordinate system เป็น pixel coordinate system ขึ้นกับคุณสมบัติของกล้องจากสมการ (2) เมทริกซ์นี้จะประกอบด้วย focal length ในแกน x และ y คือความหนาแน่นของ pixel ในแต่ละแกน u_0 และ v_0 จุดกึงกลางภาพในแกน x และ y

Distortion coefficient

Distortion coefficient คือค่าสัมประสิทธิ์ความบิดเบือนของภาพจากเลนส์ที่ใช้ distortion effect นั้นแบ่งได้ 2 แบบคือ

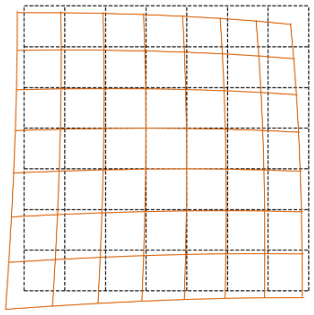
1.Radial distortion เกิดจากความโค้งของเลนส์ในการเก็บภาพสามารถแบ่งได้สองแบบคือ Pincushion radial distortion และ Barrel radial distortion ดังรูปที่ 14

2. Tangential distortion เกิดจากการวางเลนส์กับplane ของภาพไม่ตรงกันดังรูปที่ 15



รูปที่ 14 Radial distortion [11]

ด้านขวาของรูปที่ 14 คือ Pincushion radial distortion เป็นแบบ positive distortion เพราะภาพที่ได้ใหญ่เกินกว่าขอบที่ควรเป็น และด้านซ้ายของรูปคือ Barrel radial distortion เป็นแบบnegative distortion ภาพที่ได้นั้นเล็กกว่าภาพที่ควรเป็น

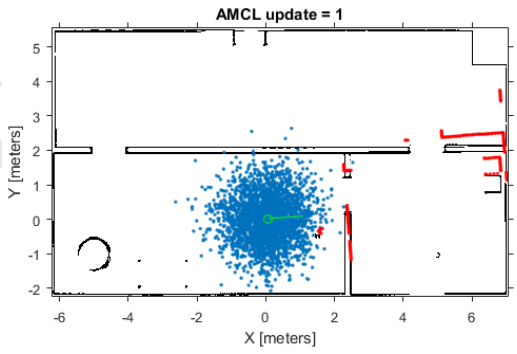


รูปที่ 15 tangential distortion
ภาพที่ได้นั้นจะบิดเบือนแต่จุดกลางภาพนั้นจะบิดเบือนน้อย [12]

3.3 การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแผนที่

การระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ในแผนที่ หรือ Robot localization คือกระบวนการพิจารณาตัดสินใจว่าตัวหุ่นนั้นอยู่ตรงไหนของสิ่งแวดล้อมในแผนที่โดยจะรวบรวมข้อมูลมาดูตำแหน่งในแผนที่จากเซนเซอร์ที่ติดไว้ที่หุ่นยนต์ซึ่งเทคนิคของ Robot localization นั้นมักจัดการกับข้อผิดพลาดจากเซนเซอร์หรือตัวระบบที่เกิดขึ้นและวัดวัดความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในการประมาณ

ใน Robot operating system นั้นใช้ adaptive Monte Carlo localization หรือ AMCL ในการหาตำแหน่งหุ่นยนต์ในแผนที่โดยที่ AMCL นั้นจะรับค่า transform topic ที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่าง Laser scan กับ Odometry จากนั้น AMCL จะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็น Pose arrayที่แสดงถึงความเป็นไปได้ที่ตัวหุ่นนั้นจะอยู่ ณ ตำแหน่งทิศทางที่ลูกศรของ Pose arrayชี้ยิ่งตำแหน่งที่มีลูกศรชี้ไปมาก ยิ่งมีโอกาสที่ตัวหุ่นยนต์จะอยู่ ณ ตำแหน่งนั้นมาก ตัวอย่างการใช้งาน AMCL ตามรูปที่ 16



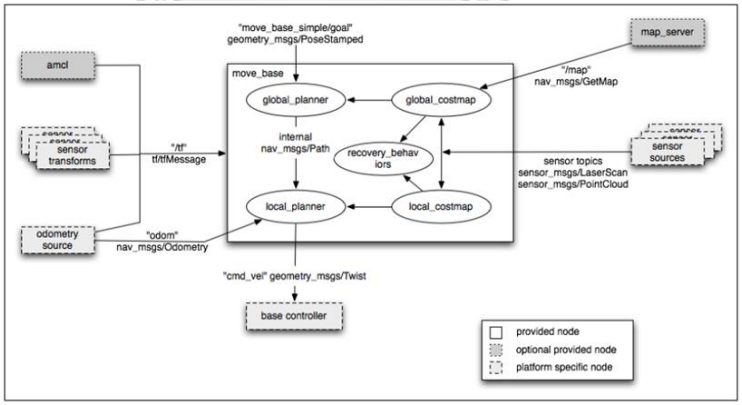
รูปที่ 16. ตัวอย่างการใช้งาน adaptive Monte Carlo localization [13]

จุดสีน้ำเงินในรูปนั้นAMCL ที่กำลังชี้ไปยังตำแหน่งที่หุ่นมีโอกาสจะอยู่ตำแหน่งนั้นในแผนที่ การที่ทำให้ความแม่นยำสูงขึ้นนั้นต้องให้หุ่นสำรวจพื้นที่รอบๆ เพื่อหาว่าสิ่งแวดล้อมรอบๆ นั้นตรงกับตำแหน่งใดในแผนที่

3.4 การนำทางของหุ่นยนต์

ROS Navigation

ในการนำทางอัตโนมัติของ ROS เริ่มแรกหุ่นยนต์จะทำการหาว่าตัวเองอยู่ตำแหน่งใดใน Map (มาจาก map_server_node) โดยการใช้ AMCL ดังที่กล่าวไว้ด้านบนร่วมกับ sensor transforms เป็นการอ้างอิงตำแหน่งในการติดตั้ง sensor, odometry source คือค่าที่บอกว่าหุ่นยนต์นั้นอยู่ตำแหน่งใดเมื่อเทียบกับจุดเริ่มต้น และ sensor source จะใช้ point cloud ที่ได้จาก sensor ในการประมวลผลหาเส้นทางที่จะไปโดยใช้ global-planner เพื่อค้นหาเส้นทางจากจุดที่อยู่จนถึงเป้าหมาย อัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางจะเป็น A* และ Dijkstra แต่เส้นทางระยะสั้นจะใช้แพกเกจ local-planner เป็นการหลบสิ่งกีดขว้างโดย odometry และ laser ช่วยในการเลือกความเร็วของหุ่นยนต์ที่เหมาะสม กรณีที่หุ่นยนต์เจอสิ่งขีดขว้างและไม่สามารถใช้เส้นทางเดิมได้ตัวหุ่นจะหาเส้นทางใหม่โดยใช้ global-costmap และ local-costmap ในการหาเส้นทางระยะใกล้และไกลตามลำดับเมื่อได้เส้นทางที่หุ่นยนต์สามารถเดินไปได้แล้ว จึงสั่งการ base controller ในการเคลื่อนหุ่นยนต์ ซึ่งโครงสร้างการควบคุมเป็นไปดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 ROS navigation stack [14]

3.5 Levenberg-Marquardt

Levenberg-Marquardt หรือที่เรียกว่า damped least squares (DLS) [15] เป็นการหาสมการที่ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดโดยการนำค่าความคลาดเคลื่อนหลายค่ามากำลังสองและนำมารวมกันหลังจากนั้นจึง differentiate เปรียบเทียบกับตัวแปลที่เราต้องการเท่ากับ 0 เพื่อหาค่าตัวแปลที่น้อยที่สุดที่ทำให้ error น้อยที่สุดโดยวิธีนี้จะทำจนกว่าจะได้ค่า error น้อยกว่าที่กำหนดไว้หรือครบจำนวนรอบที่กำหนด DLS นี้จะถูกใช้ควบคู่กับสมการในหัวข้อ 2.3 เพื่อหาค่า Translational vector และ Rotational vector ที่มีค่า error น้อยที่สุด

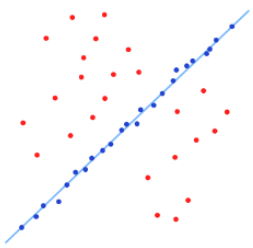
3.6 ประเภทของ perspective-n-point

ในการตรวจจับหาตำแหน่งเครื่องหมายแบบ perspective-n-point ด้วยไลบรารี่ opencv นั้นสามารถแบ่งได้ 3 แบบเหมาะกับงานวิจัยคือ Generic, Ransac และ RefineLM [16]

การตรวจจับหาตำแหน่งเครื่องหมายแบบ Generic เป็นวิธีการหาตำแหน่งและตำแหน่งเชิงมุมตามที่กล่าวมาข้างต้นแต่มีการเก็บข้อมูล n รอบตามที่กำหนดและใช้ค่าเฉลี่ยกำลังสองเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อน [17]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การตรวจจับหาตำแหน่งเครื่องหมายแบบ Random sample consensus (Ransac) [18] นั้นตรวจจับโดยการเลือกค่าข้อมูล 2 ค่าสร้างสมการเส้นตรงลากผ่านกลุ่มข้อมูลหลังจากนั้นจึงนับค่าข้อมูลที่อยู่ใกล้เคียงสมการเส้นตรง Ransac นั้นจะทำการสุ่มลากเส้นตรงและเลือกเส้นตรงที่มีค่าข้อมูลอยู่ใกล้เคียงเส้นตรงนั้นมากที่สุดมาใช้งานเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนจากการนำข้อมูลที่ผิดปกติมาคำนวณตามรูปที่ 18



รูปที่ 18 ตัวอย่างการกำจัดค่าผิดปกติโดย Ransac

การตรวจจับหาตำแหน่งเครื่องหมายแบบ RefineLM (Refine levenberg-marquardt) [17, 19] หรือ Nonlinear least square เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์ c_1 ไปจนถึง c_n เพื่อหาสมการที่เชื่อมโยงระหว่างตัวแปร 2 ตัวในกรณีต่าง ๆ ซึ่งในที่นี้ y เปรียบเสมือน u และ v , function f เปรียบเสมือน Intransic camera parameter, x เปรียบเสมือน world coordinate และ c_n เปรียบเสมือน rotation matrix ในสมการ (2)

$$y = f(x\,; c_1, c_2, \dots, c_n) \tag{10}$$

จากสมการที่ (10) y มีความสัมพันธ์กับ x และตัวแปร c_1 ไปจนถึง c_n

$$r_i = y_i - f(x_i\,; c_0, c_1, c_2, \dots., c_n) \tag{11}$$

ในการเก็บข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนนั้นได้จากสมการที่ (11) r_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (projection error), y_i คือค่าจริงที่เกิดขึ้นที่กล้องตรวจจับได้และ function f คือ ค่าที่หาได้จากสมการที่ใช้ x_i และตัวแปร c_1 ไปจนถึง c_n เป็นค่าที่ได้จากการทดลองหลังจากนั้นจึง สมการ Taylor series [20] เพื่อหา c_1' ไปจนถึง c_n' ที่ทำให้สมการเป็นจริงตามสมการที่ (12)

$$f(x_1\,; c_1', c_2', \dots, c_n') = f(x_1\,; c_1, c_2, \dots, c_n) + \frac{\partial f}{\partial c_1}(c_1' - c_1) + \dots + \frac{\partial f}{\partial c_n}(c_n' - c_n) \tag{12}$$

$$f(x_1\,; c_1, c_2, \dots, c_n) = y_1 - R_1 \tag{13}$$

หลังจากนั้นจึงนำสมการที่ (13) แทนในสมการที่ (12) และจัดรูปแบบเมทริกซ์สมการที่ (14) หลังจากนั้นจึงแก้สมการเพื่อหา $\triangle c_1$ ถึง $\triangle c_n$ ที่ r_i คือ 0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial c_1} & \cdots & \frac{\partial f}{\partial c_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial c_1} & \cdots & \frac{\partial f}{\partial c_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \triangle c_1 \\ \vdots \\ \triangle c_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4 วิธีดำเนินการวิจัย

ในการทดลองงานวิจัยนี้จะทดลองเพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนที่ของเครื่องหมาย, การลดความคลุมเครือของกลุ่มเครื่องหมายขณะมีเครื่องหมายที่ไม่ได้ใช้มารบกวน และทดลองใช้งานจริงในสถานการณ์จำลองที่เกิดขึ้นซึ่งเพื่อให้ได้ผลลัทธ์ดังกล่าวจึงแบ่งออกเป็น 3 การทดลองได้แก่ 1) การทดลองหาความคลาดเคลื่อนในการวางเครื่องหมายรูปแบบต่าง ๆ 2) การทดลองประสิทธิภาพการจัดกลุ่มของเครื่องหมายเพื่อลดความคลุมเครือ 3) การทดลองการนำทางและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อเครื่องหมายมาช่วยในการระบุตำแหน่งจุดหมายในสถานการณ์มีเครื่องหมายมารบกวน

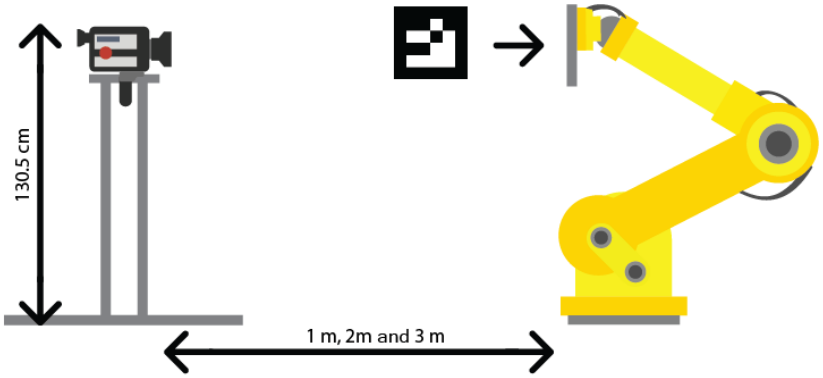
และใช้เครื่องมือดังนี้

4.1 การทดลองหาความคลาดเคลื่อนในเครื่องหมายรูปแบบต่าง ๆ

จะใช้หุ่นยนต์เคลื่อนจากตำแหน่งใด ๆ ที่ไปยังจุดหมายคือใต้ชั้นวางวัสดุโดยตัวหุ่นนั้นจะรู้ตำแหน่งที่หุ่นอยู่และเส้นทางที่จะไปจากการใช้กล้องตรวจจับ ArUco ซึ่งจะติด ArUco ที่บนพื้นกำแพงและเพดาน ตามความเหมาะสมของสถานที่ เนื่องจากพื้นที่ที่ตัวหุ่นเดินนั้นแต่ละอาจที่มีจุดบอดและแสงที่ไม่เพียงพอต่อ ArUco เป็นการเพิ่มความแม่นยำในการบอกตำแหน่ง และติดตั้ง ArUco ไว้ที่ชั้นวางของเพื่อตัวหุ่นจะสามารถเข้าไปใต้ชั้นวางของได้ ณ ตำแหน่งใด ๆ

เริ่มต้นนั้นผู้วิจัยจะเขียนโค้ดเพื่อตรวจจับตำแหน่งของ ArUco หลังจากนั้นจะทดสอบหาความคลาดเคลื่อนในการบอกตำแหน่งที่พลาดไปของการตรวจจับ ArUco โดยใช้ articulated robot เป็นตัวเลื่อน ArUco แล้วดูผลจากกล้องดังรูปที่ 19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



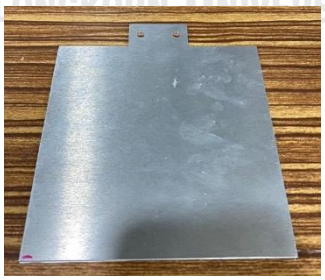
รูปที่ 19 โครงสร้างการทดลองหาค่าความคลาดเคลื่อนของการตรวจจับ ArUco

4.1.1 รูปแบบการติดตั้งอุปกรณ์

ผู้วิจัยได้เขียนโค้ดเพื่อให้กล้องสามารถตรวจจับ ArUco เพื่อหาตำแหน่งของ ArUco เมื่อเทียบกับตัวกล้องเองและทดสอบประสิทธิภาพจาก articulated robot โดยการสั่งให้แขนกลเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ได้กำหนดไว้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่กล้องตรวจจับตำแหน่งของ ArUco

โดยเริ่มต้นนั้นผู้วิจับต้องออกแบบ end effector ใหม่เนื่องจากไม่มีปลายแขนกลที่สามารถติด ArUco marker ได้จึงตัดแผ่น aluminium หนา 2 mm แทน end effector ดังรูปที่ 20

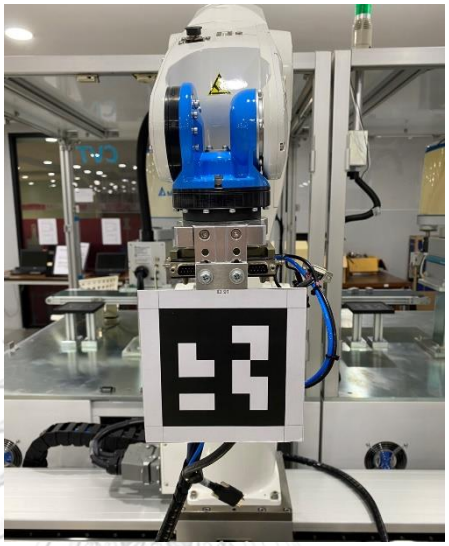
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



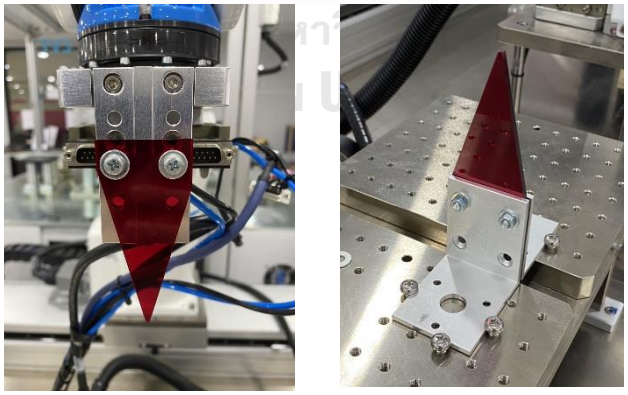
รูปที่ 20 ที่ติด ArUco marker บน articulated robot

หลังจากนั้นผู้วิจัยติดตั้ง end effector กับ articulated robot ดังรูปที่ 21 เพื่อทดสอบตำแหน่งการตรวจจับ ArUco แต่ผู้วิจัยได้พบปัญหาว่าเมื่อสั่งให้แขนกลหมุนแค่แกนเดียวแขนกลนั้น

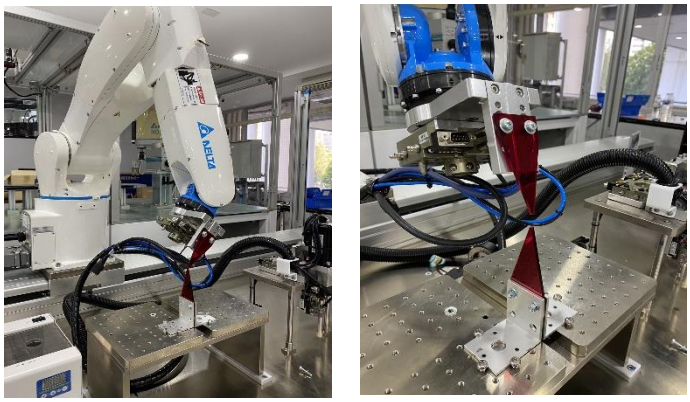
หมุนรอบจุดศูนย์กลางที่ปลายแขนไม่ได้หมุนรอบจุดศูนย์กลาง ArUco จึงต้องปรับเทียบ end effector ใหม่ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบโดยการใส่ end effector ดังรูปที่ 22 แล้วหมุนตำแหน่งต่างๆ โดยที่ปลายทั้งสองข้างตรงกันจึงได้ Tool Size ต่อจากนั้นจึงปรับเทียบเพื่อหา tool orientation ที่ตรงกับ tool ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบ ดังรูปที่ 23 เมื่อตั้งค่าเสร็จจะได้ดังรูปที่ 24



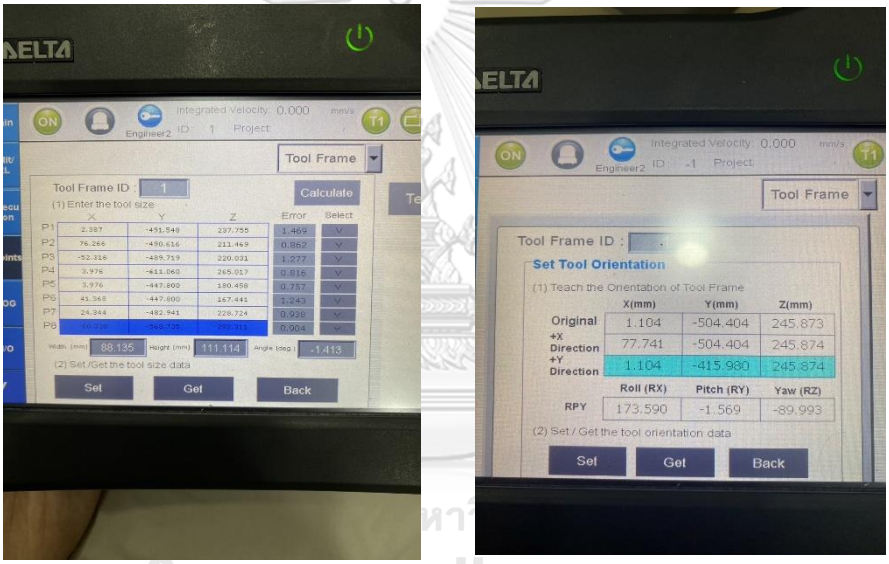
รูปที่ 21 ติดตั้ง ArUco end effector กับ articulated robot



รูปที่ 22 อุปกรณ์การปรับเทียบ articulated robot



รูปที่ 23 การปรับเทียบ articulated robot



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 24 ผลการปรับเทียบ articulated robot

เมื่อผู้วิจัยได้ปรับเทียบเสร็จจึงเริ่มทดลองตั้งกล้องตรวจจับ ArUco โดยที่การทดลองหาความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ในแนวแกน X Y Z นั้นจะตั้งกล้องที่อยู่ระดับเดียวกับ ArUco แล้วตั้งฉากกับตัวกล้อง แกนสีแดง เขียว และ น้ำเงิน คือ แกน X Y Z ตามลำดับ ดังรูปที่ 22

ตารางที่ 2 คุณสมบัติ articulated robot (delta) [21]

Articulated robot

Model	DRV90L Series
Number of Axes	6
Maximum working range	900 mm
Maximum payload	7 kg
Maximum composite speed	10600 mm/sec
Repeatability	±0.03 mm
Weight	39 kg
Robot controller	DCV Series

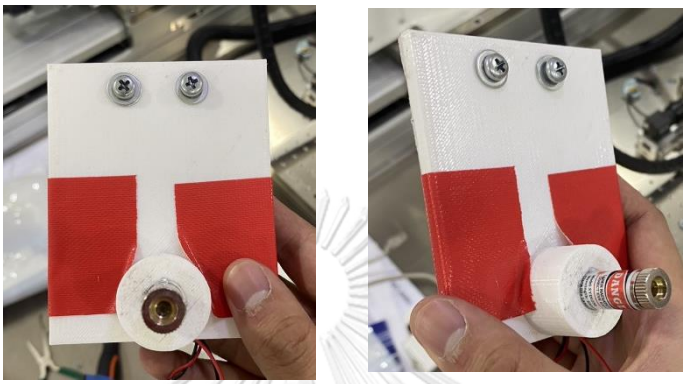
ตารางที่ 3 คุณสมบัติกล้อง Logitech C920 [22]

Logitech C920

	Logitech C920
Resolution	1920x1080
Frame rate	30 fps
Horizontal field of view	70.42°
Vertical field of view	43.3°
Focal length	3.67 mm
Size (L x W x H)	24 mm x 94 mm x 29 mm

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หลังจากการปรับเทียบ articulated robot และติดตั้งตัวกล้องกับ ArUco เพื่อทำการทดสอบการตรวจจับ ArUco ที่ระยะ 1m ในแกน X Y Z ที่ ทำ laser end effector เพื่อตั้งกล้องให้ตรงกันตำแหน่งของ ArUco end effector ตามรูปด้านล่างและหลังจากนั้นจึงล็อคขาตั้งกล้องกับพื้น



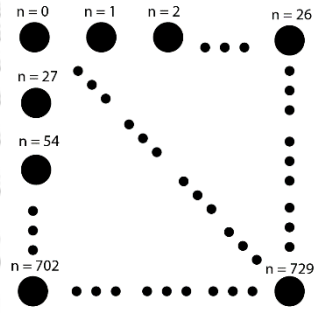
รูปที่ 25 laser end effector

รูปที่ 26 ตัวอย่างการทดลองการวัดค่าผิดพลาดของ ArUco

ในการเก็บข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนจะแบ่งเป็น 2 ระบบ คือ 1) ระบบแขนกล 2) ระบบการตรวจจับ ArUco 2 ระบบนี้จะทำงานไปพร้อมกันเพื่อเก็บค่าความคลาดเคลื่อนจำนวนมาก

1) ระบบแขนกล

แขนกลจะจับ ArUco end effector ที่ roll และ pitch ที่ 15, -15, 30, -30 และ yaw ที่ 15 และ -15 องศาที่ตัวกล้องห่างจาก gripper 1 เมตร และเคลื่อนที่ตามจุดที่กำหนดเมื่อเคลื่อนที่ถึงจุดจะทำกระพริบไฟ 1 ครั้งเพื่อส่งสัญญาณให้ระบบการตรวจจับ ArUco เก็บข้อมูลตำแหน่งจำนวน 729 ต่อ 1 ท่าทาง จุดแรกจะเป็นจุดอ้างอิงตรงกลางสี่เหลี่ยมจัตุรัส n = -1 เมื่อทำครบทุกท่าทางจึงเปลี่ยนขนาด ArUco end effector ตามรูปด้านล่าง



รูปที่ 27 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ ArUco ด้วยแขนกล

รูปที่ 28 ArUco gripper

2) ระบบการตรวจจับ ArUco

กล้องตรวจจับ marker ตลอดเวลาแต่จะเก็บข้อมูลเมื่อมีแสงสีเขียวเปิดในพื้นที่ที่กำหนดไว้จึงนำข้อมูล x, y, z, roll, pitch และ yaw มาเก็บเพื่อพิจารณาในขั้นต่อไป ตามรูปด้านล่าง

รูปที่ 29 การเก็บข้อมูล ArUco จากแขนกล

4.2 การทดลองประสิทธิภาพการจัดกลุ่มของเครื่องหมายเพื่อลดความคลุมเครือ

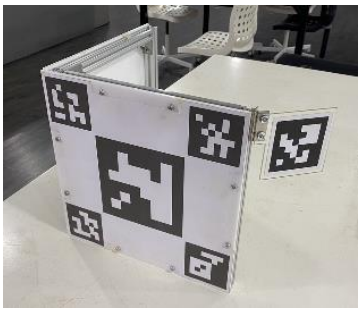
การตรวจจับและใช้งานเฉพาะเครื่องหมายที่ต้องการนั้นจะแบ่งแยกการตรวจสอบเครื่องหมาย 2 อย่าง โดยถ้าเครื่องหมายผ่านการแบ่งแยกทั้ง 2 กรณีได้จึงจะจัดอยู่ในกลุ่มเดียวกัน

4.2.1 การตรวจสอบทิศทางของเครื่องหมาย

ในการแบ่งกลุ่มนั้นผู้วิจัยนำ normal vector แต่ละตัวมา คูณเวกเตอร์เพื่อตรวจว่าเครื่องหมายหันด้านหน้าไปยังทิศเดียวกันโดยถ้าคูณกันได้มากกว่า 0.95 จะถืออยู่ในกลุ่มเครื่องหมายที่ใช้งานกลุ่มเดียวกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การทดลองตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องหมายที่มารบกวนในการตรวจจับและตรวจจับ 100 ครั้งต่อ 1 ท่าทางของเครื่องหมายที่มารบกวน



รูปที่ 30 การทดลองตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องหมายที่มารบกวน

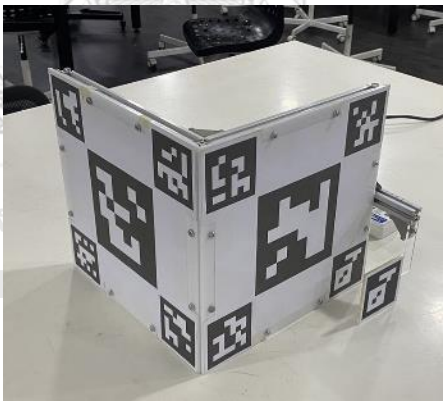
จากรูปที่ 30 เครื่องหมายที่รบกวนคือเครื่องหมายที่ติดตรงบานพับด้านขวามือของรูปซึ่งการทดลองนี้จะปรับบานพับเพื่อเก็บข้อมูลการแยกกลุ่มของเครื่องหมายขณะเครื่องหมายมารบกวนในมุมต่าง ๆ

4.2.2 การตรวจสอบระนาบของเครื่องหมาย

การตรวจสอบจะนำจุดกำเนิดระหว่าง 2 เครื่องหมายมาตรวจสอบโดยสร้างเวกเตอร์ระหว่าง 2 จุดกำเนิดละนำมาคูณกับ normal vector ของตัวใดตัวหนึ่งเพื่อหาระยะระหว่างระนาบกับจุดกำเนิดตามสูตร (15) [8] โดย x_i และ x_0 คือเวกเตอร์ที่ต้องการตรวจสอบ normal vector คือทิศทางที่เครื่องหมายที่ I หันหน้าและ D คือระยะห่างระหว่างจุดกำเนิดกับระนาบของ x_i ถ้าระยะระหว่างจุดกับระนาบน้อยกว่า 1 เซนติเมตรจะถือว่าเป็นระนาบเดียวกัน

$$D = \hat{n} \cdot (\vec{x}_0 - \vec{x}_i) \qquad (15)$$

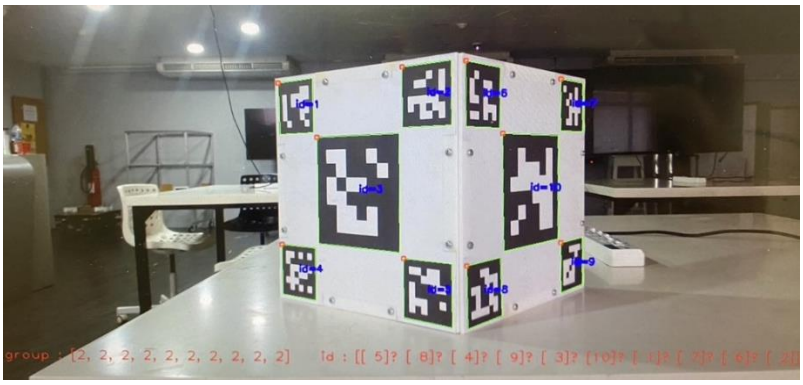
การทดลองตำแหน่งของเครื่องหมายที่มารบกวนในการตรวจจับและตรวจจับ 100 ครั้งการเคลื่อน 1 เซนติเมตรของเครื่องหมายที่มารบกวน



รูปที่ 31 การทดลองตำแหน่งของเครื่องหมายที่มารบกวน

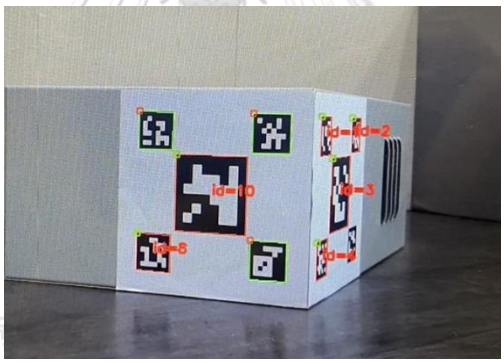
จากรูปที่ 31 เครื่องหมายที่มารบกวนคือเครื่องหมายที่ติดตั้งกับอลูมิเนียมโปรไฟล์บริเวณขวาล่างของรูปซึ่งการทดลองนี้จะเลื่อนอลูมิเนียมโปรไฟล์ที่ระยะต่าง ๆ เพื่อเก็บข้อมูลการแยกกลุ่มของเครื่องหมายขณะมีเครื่องหมายมารบกวน

หลังจากที่ตรวจสอบทิศทางและระนาบของเครื่องหมายแล้วจะตรวจสอบอีกครั้งว่าอยู่ระนาบตั้งฉากกับกลุ่มเครื่องหมายที่ต้องการใช้งานเดียวกันตามรูปที่ 28



รูปที่ 32 การตรวจสอบทิศทาง normal vector กับเครื่องหมายที่ใช้งานที่ฉากกัน

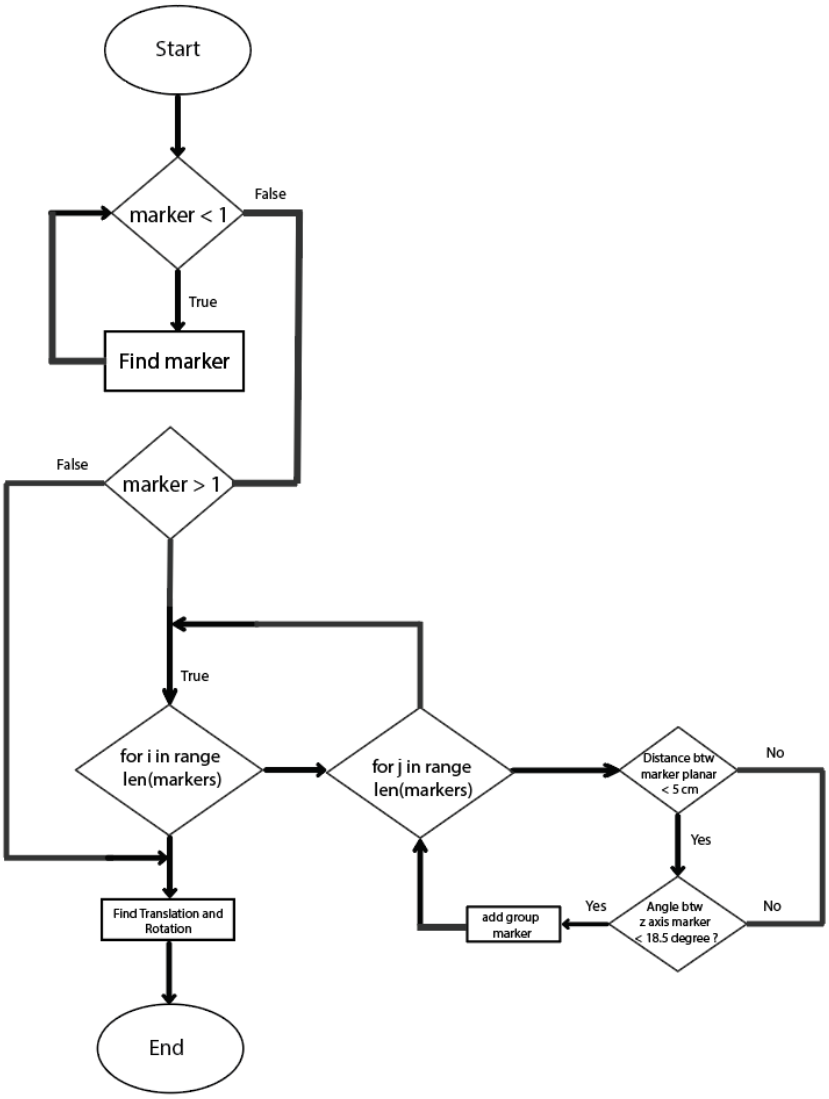
จากรูปที่ 32 ขณะที่กล้องตรวจจับเครื่องหมายได้จะจัดกลุ่มด้วยการตรวจสอบว่าเครื่องหมายที่พบขนานกันและตั้งฉากกับเพื่อนบริเวณด้านข้าง หลังจากพบว่าเป็นกลุ่มเดียวกันจะถูกจัดให้เป็นกลุ่มเครื่องหมายเดียวกันและเพื่อความง่ายให้การพิจารณาการจัดกลุ่มจึงเปลี่ยนสีในการตรวจจับกลุ่มที่เป็นสีแดงเป็นกลุ่มที่นำไปใช้ต่อตามรูปที่ 33



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 33 ตัวอย่างการจัดกลุ่มของเครื่องหมาย

4.2.3 ระบบการจัดกลุ่มในการลดความคลุมเครือ

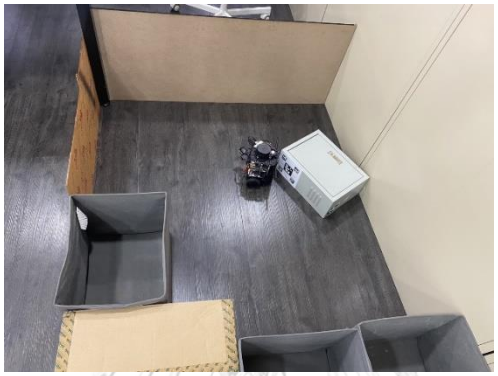


รูปที่ 34 ผังงานการจัดกลุ่มเครื่องหมาย

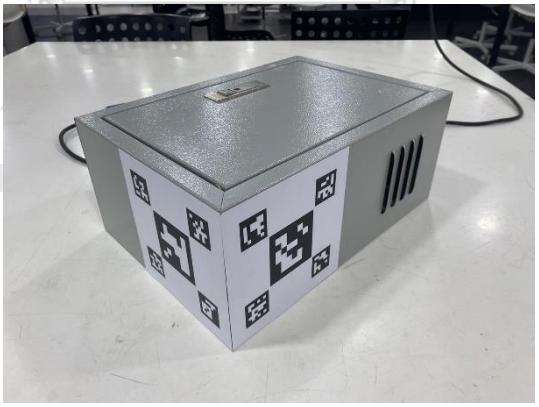
ระบบจะทำการตรวจจับเครื่องหมายทั้งหมดที่พบหลังจากนั้นจึงนับจำนวนเครื่องหมายทั้งหมดถ้าไม่พบเครื่องหมายระบบจะหาเครื่องหมายจนกว่าจะพบเมื่อพบเครื่องหมายแต่น้อยกว่าสองเครื่องหมายจะทำการหา Translation และ Rotation matrix แต่ถ้ามากกว่าหนึ่งเครื่องหมายระบบจะทำการเช็คระยะระหว่างระนาบและมุมระหว่างระนาบของเครื่องหมายแต่ละเครื่องหมายหลังจากนั้นจึงจัดกลุ่มเครื่องหมายที่ผ่านทั้ง 2 กรณี (2 กรณีนี้ได้กล่าวไว้ที่หัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2) เมื่อจัดกลุ่มจนครบทุกเครื่องหมายจึงนำเครื่องหมายในกลุ่มที่ต้องการนำมุมมาหา Translation และ Rotation matrixตามรูปที่ 34

4.3 การทดลองการนำทางและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อ marker มาช่วยในการระบุตำแหน่งจุดหมายในสถานการณ์มีเครื่องหมายมารบกวน

ในการทดสอบนั้นจะทำการจำลองขอบเขตของสนามขึ้นมาเพื่อให้หุ่นสามารถเก็บแผนที่ดังรูปที่ 35 และได้จำลองรถขนวัสดุตามรูปที่ 36 จากทำการสั่งหุ่นไปยังรถขนวัสดุแล้วจึงวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่ระบุโดยเครื่องหมายขณะมีเครื่องอื่นมารบกวน



รูปที่ 35 สนามจำลอง

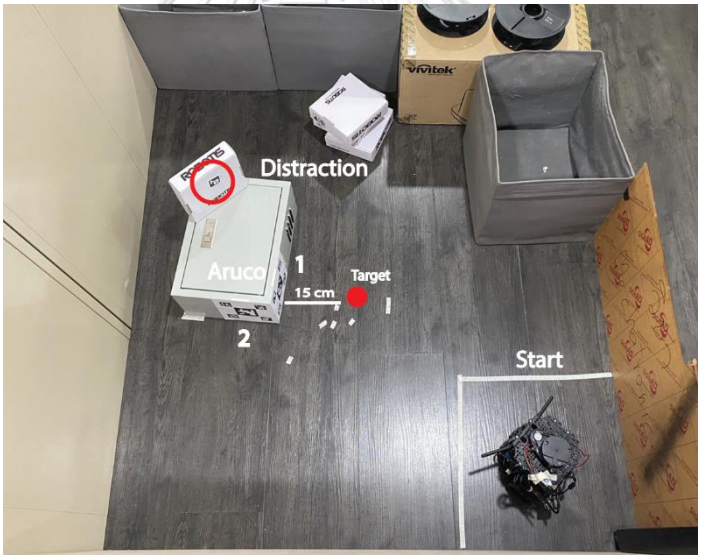


รูปที่ 36 รถขนวัสดุจำลอง

หลังจากนั้นจะทำการเก็บแผนที่สนามและทำ amcl เพื่อระบุว่าหุ่นอยู่ตรงไหนของสนามหลังจากนั้นจึงสั่งให้หุ่นเดินไปยังรถขนวัสดุจำลองตามรูปที่ 36 และทำการเก็บผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อน โดยขณะที่หุ่นเดินไปนั้นจะทำการรบกวนหุ่นด้วยเครื่องหมายที่ไม่เกี่ยวข้องตามรูปที่ 37

รูปที่ 37 การติดตั้งเครื่องหมายรบกวนในสนาม

ในการทดลองนี้จะเริ่มจากติดตั้งหุ่นในบริเวณจุดเริ่มต้นหลังจากนั้นจึงสั่งให้หุ่นหาชั้นวางวัสดุจำลองและสุดท้ายจึงสั่งไปยังตำแหน่งของห่างจากชั้นวางวัสดุด้านที่ 1 15 เซนติเมตรหลังจากนั้นจึงทำการเก็บผลลัพธ์ที่ค่าความคลาดเคลื่อนของหุ่นกับตำแหน่งที่กำหนดไว้ตามรูปที่ 38



รูปที่ 38 สนามจำลอง

ตารางที่ 4 คุณสมบัติ turtlebot3 burger [23]

Turtlebot3 burger

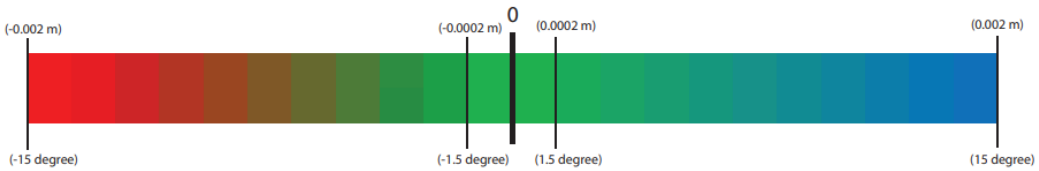
	Turtlebot3 burger
Maximum translational velocity	0.22 m/s
Maximum rotational velocity	2.84 rad/s (162.72 deg/s)
Maximum payload	15kg
Size (L x W x H)	138mm x 178mm x 192mm
Weight (+ SBC + Battery + Sensors)	1kg
Threshold of climbing	10 mm or lower
SBC (Single Board Computers)	Raspberry Pi
MCU	32-bit ARM Cortex®-M7 with FPU (216 MHz, 462 DMIPS)
Actuator	XL430-W250
LDS(Laser Distance Sensor)	360 Laser Distance Sensor LDS-01
IMU	Gyroscope 3 Axis Accelerometer 3 Axis

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5 ผลการทดลองและการอภิปราย

5.1 ผลการทดสอบหาความคลาดเคลื่อนในการวางเครื่องหมายรูปแบบต่าง ๆ

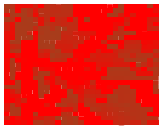
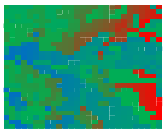
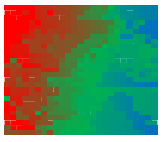
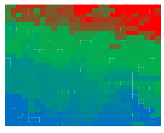
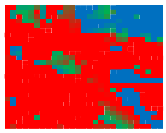
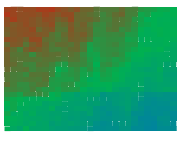
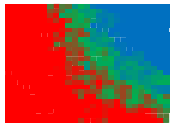
เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมากจึงแปลงข้อมูลมาเป็นสีโดยแต่ละสีจะมี ค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่างกันโดยอ้างอิงตามรูปที่ 39



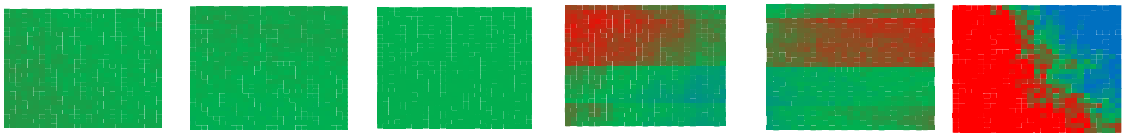
รูปที่ 39 ค่าความคลาดเคลื่อนที่อ้างอิงตามสี

โดยตำแหน่งของจุดกึงกลางนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ 0 mm และที่สีน้ำเงินขวาสุดและแดงซ้ายสุดมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ 2 mm และ -2 mm ตามลำดับและในตำแหน่งเชิงมุมนั้นจุดกึงกลางนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ 0 องศา และที่สีน้ำเงินขวาสุดและแดงซ้ายสุดมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ 15 องศา และ -15 องศา ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers

	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker 0° (parallel image plane)						
4 markers 0° (parallel image plane)						

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5 markers 0° (parallel image plane)	

จากผลการทดลองนั้นได้ผลว่ายิ่ง ArUco ไกลกับตัวกล้องยิ่งทำให้ข้อผิดพลาดสูงขึ้นและเมื่อ ArUco อยู่ในแสงที่ไม่เหมาะสมหรือมีสิ่งขีดขว้างมาบังที่ขอบของ ArUco กล้องจะไม่สามารถตรวจจับ ArUco ได้ ผลลัทธ์ของการตรวจจับ 1 marker ในระยะ 1 m ของ ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งและเชิงมุมคือ 22.69 มิลลิเมตร และ 37.354 องศา ตามลำดับ, 4 markers ในระยะ 1 m ของความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งและเชิงมุมคือ 18.245 มิลลิเมตร และ 22.004 องศา ตามลำดับและ 5 markers ในระยะ 1 m ของ ความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งและเชิงมุมคือ 10.583 มิลลิเมตร และ 5.98 องศา ตามลำดับ จาก 4 markers มีประสิทธิภาพของความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งและเชิงมุมมากกว่า 1 marker 19.59% และ 41.89% ตามลำดับ จาก 5 markers มีประสิทธิภาพของความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งและเชิงมุมมากกว่า 4 markers 41.99% และ 72.82% ตามลำดับ

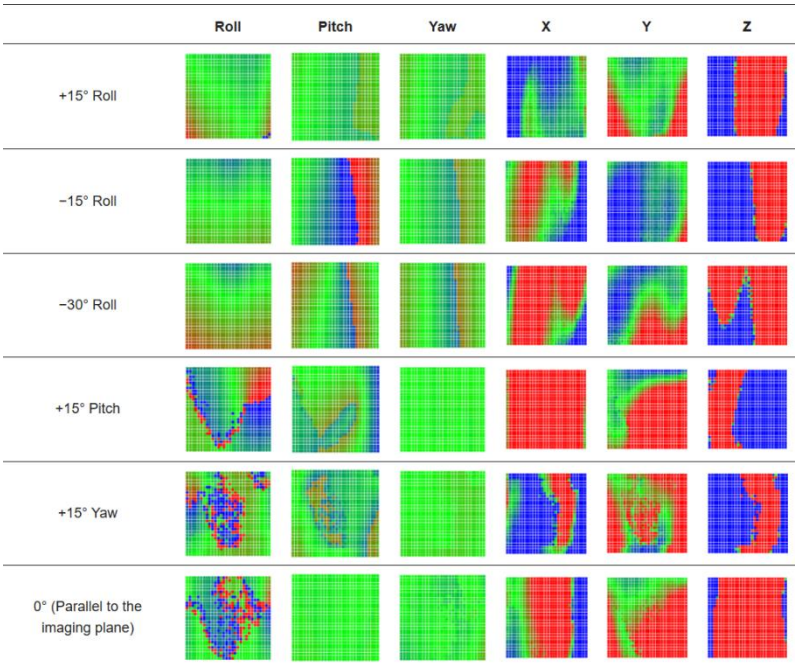
5.1.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบที่วัดได้กับผลการทดสอบวิจัยอื่น

จากงานวิจัยพัฒนาการตรวจจับเครื่องหมายโดย a novel 3d placement strategy [24] หาความคลาดเคลื่อนของ 4 markers เรียงตัวตามรูปด้านล่าง และผลลัพธ์ตามตารางที่ 6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 40 เปรียบเทียบการเรียงตัวของ aruco

ตารางที่ 6 ผลลัพธ์การตรวจจับความคลาดเคลื่อนวิจัย [24]



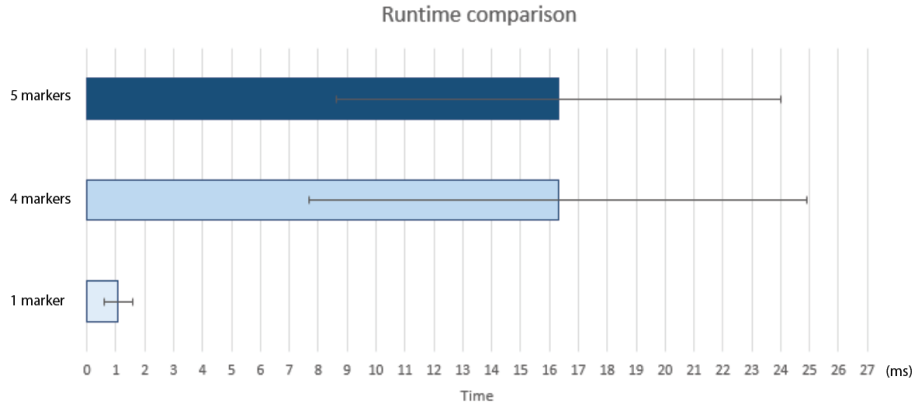
ตารางที่ 7 ตารางการเปรียบเทียบการตรวจจับ 4 markers

	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
4 markers (0°)						
4 markers (0°, *Improved pose estimation of aruco tags*						

ผู้วิจัยจึงนำการทดลอง 4 markers มาเปรียบเทียบกับการทดลอง [24] จะได้ผลตามตารางที่ 7 จากผลลัพธ์จะเห็นได้ว่าในการทดลองของผู้วิจัยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัดคาดว่าเป็นประสิทธิภาพกล้องที่ไม่เท่ากันการควรคุมสภาพแวดล้อมและการวางตัวของเครื่องหมายที่ต่างกัน

5.1.2 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการตรวจจับ

การตรวจจับเครื่องหมายทั้ง 3 รูปแบบนั้นได้ความแม่นยำที่ดีขึ้นจากมุมที่สามารถตรวจจับได้มากขึ้นแต่มีข้อเสียคือขนาดของเครื่องหมายที่ต้องมีพื้นที่มากขึ้นและเวลาในการตรวจจับที่มากขึ้นซึ่งในหารตรวจจับทั้งการวางเครื่อง 3 รูปแบบนั้นใช้เวลา 1.084 ms, 16.300 ms และ 16.325 ms ของ 1 เครื่องหมาย, 4 เครื่องหมายและ 5 เครื่องหมายตามลำดับซึ่งสามารถทำเป็นอัตราส่วนได้ตามรูปที่ 42



รูปที่ 41 เวลาในการตรวจจับและประมวณผลเครื่องหมายแบบต่าง ๆ

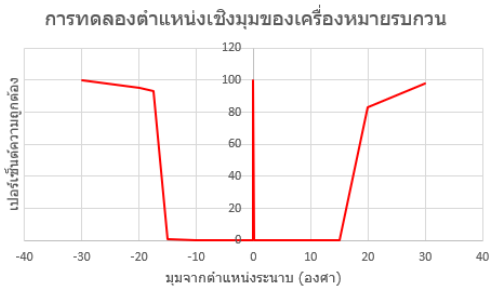
จากรูปที่ 42 เป็นกราฟแสดงเวลาในการพิจารณาหาตำแหน่งของเครื่องหมายซึ่งนอกจาก 4 และ 5 เครื่องหมายจะได้ความแม่นยำสูงแต่ใช้เวลามากกว่า 1 เครื่องหมายถึงประมาณ 16 เท่าตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

5.2 ผลลัพธ์การทดลองประสิทธิภาพการจัดกลุ่มของเครื่องหมายเพื่อลดความคลุมเครือ

ในการทดลองตำแหน่งและตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องหมายที่มารบกวนนั้น ผู้วิจัยได้ทดลอง 100 ครั้งต่อ 1 ท่าทางของเครื่องหมายที่รบกวน ได้ผลลัพธ์ตามรูปที่ 42 และ 43 ในแกน x คือมุมของระนาบเครื่องหมายที่รบกวนเทียบกับระนาบเครื่องหมายที่ต้องการใช้งานโดย 0 องศาคือระนาบที่ขนานกับเครื่องหมายที่ต้องการใช้งาน ในแกน y คือเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง ในการทดลองแยกเครื่องหมายที่มารบกวน 100 ครั้ง กรณีระบบสามารถแยกเครื่องหมายได้ถูกต้องจะถือว่าเปอร์เซ็นต์

ความถูกต้องคือ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่กรณีระบบไม่สามารถแยกเครื่องหมายที่มารบกวนหรือแยกผิดพลาด 100 ครั้ง เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องคือ 0 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 42 ผลลัพธ์การทดลองตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องหมายรบกวน

จากรูปที่ 43 ทำสามารถสรุปได้ว่าเครื่องหมายที่รบกวนนั้นกรณีตำแหน่งเชิงมุมทั้งฝั่งมุมบวกและลบมีผลลัพธ์สมมาตรและเริ่มมีผลลัพธ์ที่ตกลงในช่วง 20 และ -20 องศา

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 43 ผลลัพธ์การทดลองตำแหน่งของเครื่องหมายรบกวน

จากรูปที่ 44 ในช่วง 6 เซนติเมตรนั้นเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องเริ่มไม่คงที่และเริ่มตกลงในช่วง 4.5 ถึง 5.5 เซนติเมตรและหลังจาก 4 เซนติเมตรมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้อง 0 เปอร์เซ็นต์

5.3 ผลลัพธ์การนำทางและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อเครื่องหมายมาช่วยในการระบุตำแหน่งจุดหมายในสถานการณ์มีเครื่องหมายมารบกวน

ในการทดลองนี้ทำการเก็บความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งของหุ่นยนต์เทียบกับตำแหน่งของตำแหน่งของคำสั่งที่ให้หุ่นเดินไปตามรูปที่ 45

รูปที่ 44 ตัวอย่างการตรวจจับเครื่องหมายในสนามขณะมีเครื่องหมายไม่เกี่ยวข้องมารบกวน

จากรูปที่ 45 จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์สามารถตรวจจับเครื่องหมายที่ติดตั้งบนชั้นวางวัสดุจำลองและสามารถแยกเครื่องหมายที่ไม่เกี่ยวข้องด้านได้โดยเครื่องหมายที่ไม่เกี่ยวข้องจะเห็นเป็นกรอบสีเขียวคลุมอยู่

ตารางที่ 8 ผลลัพธ์การทดลองเดินตามตำแหน่งของเครื่องหมายโดยมีเครื่องหมายอื่นรบกวน

การทดสอบ	ค่าความคลาดเคลื่อนในแกน x (เซนติเมตร)	ค่าความคลาดเคลื่อนในแกน y *(เซนติเมตร)*
ครั้งที่ 1	0.3	1.2
ครั้งที่ 2	5.2	17.1
ครั้งที่ 3	0.2	-5.0
ครั้งที่ 4	-5.1	-6.5
ครั้งที่ 5	-2.9	-7.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากตารางที่ 8 จะเห็นได้ว่ามีบางครั้งที่หุ่นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่มาจากตำแหน่งระนาบเครื่องหมายที่ทำกับมุมกล้องเข้าใกล้ 0 องศา จึงทำให้เครื่องหมายระบุตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อนสูงและทำให้แก่นที่ตรวจจับเครื่องหมายอาจกลับด้านตามรูปที่ 46

รูปที่ 45 ตำแหน่งระนาบเครื่องหมายที่ทำกับมุมกล้องเข้าใกล้ 0 องศา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

6. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ต้องการเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการหาตำแหน่งของเครื่องหมายด้วยภาพและพัฒนาเทคนิคการนำทางและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อ marker มาช่วยในการระบุตำแหน่งจุดหมาย โดยในการระบุตำแหน่งของเครื่องหมายนั้นได้ใช้ Perspective-n-Point (PnP) จาก OpenCV มาช่วยในการแก้สมการหาตำแหน่งและตำแหน่งเชิงมุมของเครื่องหมาย

6.1 สรุปผลการทดลองหาความคลาดเคลื่อนในการวางเครื่องหมายรูปแบบต่าง ๆ

การวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากการเรียงตัวของเครื่องหมายแบบต่าง ๆ โดยใช้ articulated robot ในการเคลื่อนเครื่องหมายเปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ได้จากกล้องผลปรากฏว่าการเรียงตัวแบบ 5 เครื่องหมายพัฒนาจากเครื่องหมายเดียวถึง 61.58% และ 114.78% ของตำแหน่งและตำแหน่งเชิงมุมตามลำดับจากค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด

6.2 สรุปผลการทดลองประสิทธิภาพการจัดกลุ่มของเครื่องหมายเพื่อลดความคลุมเครือ

การตรวจจับเครื่องหมายแบบคลุมเครือโดยนำทิศทางและตำแหน่งของเครื่องหมายแต่ละตัวมาตรวจสอบว่าอยู่ในระนาบเดียวกันและตั้งฉากกับเครื่องหมายกลุ่มด้านข้างได้ผลลัพธ์ว่าสามารถแยกเครื่องหมายที่รบกวนได้ดีที่ไม่อยู่ในช่วง 20 ถึง -20 องศาและระยะน้อยกว่า 6 เซนติเมตร

6.3 สรุปผลการทดลองการนำทางและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อมีเครื่องหมายมาช่วยระบุตำแหน่งจุดหมายในสถานการณ์มีเครื่องหมายมารบกวน

ในการช่วยบอกตำแหน่งของชั้นวางวัสดุกับตัวหุ่นขณะมีเครื่องหมายมารบกวนนั้นหุ่นสามารถแยะเครื่องหมายได้แต่ในบางทดสอบยังมีค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากตำแหน่งหุ่นทำกับตัวระนาบเครื่องหมายเข้าใกล้ 0 องศาจึงทำให้ขณะเครื่องหมายมาบอกตำแหน่งแกนสลับด้านจุดหมายจึงคลาดเคลื่อน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บรรณานุกรม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ถิรพุทธิ์ ติระพงศ์ธวัช
วัน เดือน ปี เกิด	20 ตุลาคม 1998
สถานที่เกิด	โรงพยาบาล กรุงเทพคริสเตียน
วุฒิการศึกษา	โรงเรียนกรุงเทพคริสเตียน
ที่อยู่ปัจจุบัน	350/101 ถนน พระราม 3 ซอย71 แขวงช่องนนทรี เขต ยานนาวา กทม 10120

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. *Autonomous Mobile Robots Market Size*. [cited Accessed on 1 July 2023 Available from: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/autonomous-mobile-robots-market.
2. *What is IMU*. [cited Access on 1 July 2023; Available from: https://www.vectornav.com/resources/inertial-navigation-articles/what-is-an-inertial-measurement-unit-imu?gclid=CjwKCAjwqZSlBhBwEiwAfoZUIPIREz-mWHfbFlbC5tOsLAl07_lgVWYZW2c71KBMWz5j8Y2afRn4phoCvaoQAvD_BwE.
3. *What is GPS*. [cited Access on 1 July 2023; Available from: https://www.garmin.com/th-TH/aboutgps/.
4. Kalaitzakis, M., et al., *Fiducial markers for pose estimation.* Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021. **101**(4): p. 1-26.
5. Tian, W., et al. *The application of navigation technology for the medical assistive devices based on Aruco recognition technology*. in *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2020. IEEE.
6. Liu, X., W. Plishker, and R. Shekhar, *Hybrid electromagnetic-ArUco tracking of laparoscopic ultrasound transducer in laparoscopic video.* Journal of Medical Imaging, 2021. **8**(1): p. 015001-015001.
7. Asselin, M., et al. *A training tool for ultrasound-guided central line insertion with webcam-based position tracking*. in *Simulation, Image Processing, and Ultrasound Systems for Assisted Diagnosis and Navigation: International Workshops, POCUS 2018, BIVPCS 2018, CuRIOUS 2018, and CPM 2018, Held in Conjunction with MICCAI 2018, Granada, Spain, September 16–20, 2018, Proceedings*. 2018. Springer.
8. Garrido-Jurado, S., et al., *Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion.* Pattern Recognition, 2014. **47**(6): p. 2280-2292.
9. Guo, J., P. Wu, and W. Wang. *A precision pose measurement technique based on multi-cooperative logo*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. IOP Publishing.
10. Sampathkrishna, A., *ArUco Maker based localization and Node graph approach to mapping.* arXiv preprint arXiv:2208.09355, 2022.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

11. *Exploring Distortion and Distortion Model*. 2021 [cited Access on 3 March 2023; Available from: https://www.tangramvision.com/blog/camera-modeling-exploring-distortion-and-distortion-models-part-i.
12. Thrun, S., et al., *Probabilistic algorithms and the interactive museum tour-guide robot minerva.* The international journal of robotics research, 2000. **19**(11): p. 972-999.
13. *Localize Turtlebot using Monte Carlo Localization Algorithm*. Access on 7 January 2023]; Available from: https://www.mathworks.com/help/nav/ug/localize-turtlebot-using-monte-carlo-localization.html.
14. Guimarães, R.L., et al., *ROS navigation: Concepts and tutorial.* Robot Operating System (ROS) The Complete Reference (Volume 1), 2016: p. 121-160.
15. Levenberg, K., *A method for the solution of certain non-linear problems in least squares.* Quarterly of applied mathematics, 1944. **2**(2): p. 164-168.
16. Marchand, E., H. Uchiyama, and F. Spindler, *Pose estimation for augmented reality: a hands-on survey.* IEEE transactions on visualization and computer graphics, 2015. **22**(12): p. 2633-2651.
17. *Camera Calibration and 3D Reconstruction*. 2023 [cited Access on 10 January 2022; Available from: https://docs.opencv.org/4.x/d9/d0c/group__calib3d.html.
18. Zuliani, M., *RANSAC for Dummies.* Vision Research Lab, University of California, Santa Barbara, 2009.
19. *Levenberg–Marquardt algorithm*. 16/04/2023 [cited 2023 29/06/2023]; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Levenberg%E2%80%93Marquardt_algorithm.
20. Taylor, B., *Methodus incrementorum directa & inversa*. 1717: Inny.
21. *Articulated robot*. [cited Access on 3 March 2023; Available from: https://filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060603/Catalogue/DELTA_IA-Robot_DRV_C_EN_20200819_Web.pdf.
22. *C920 Technical Specification*. 2022 [cited Access on 3 March 2023; Available from: https://support.logi.com/hc/en-us/articles/360023307294-C920-Technical-Specifications.
23. *Turtlebot3 specification*. 2022 [cited Access on 10 June 2023; Available from: https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/turtlebot3/features/#specifications.

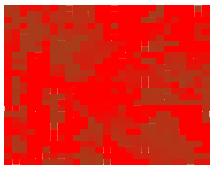
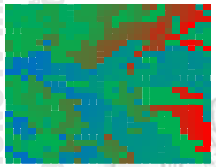
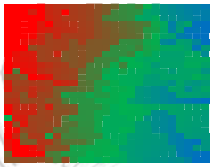
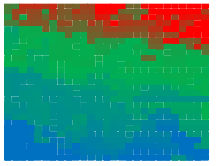
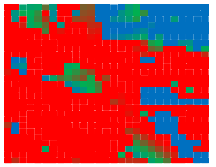
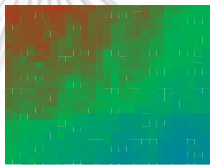
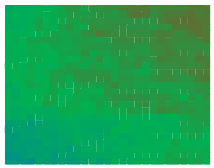
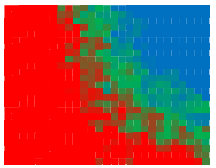
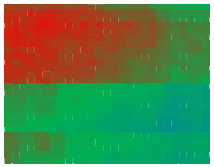
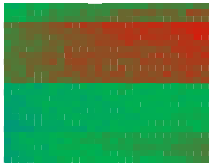
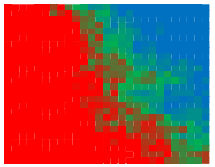
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

24. OšČádal, P., et al., *Improved pose estimation of aruco tags using a novel 3d placement strategy.* Sensors, 2020. **20**(17): p. 4825.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

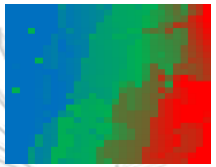
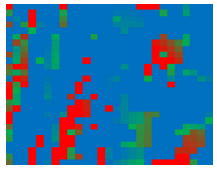
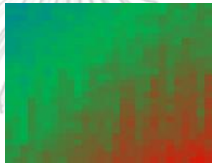
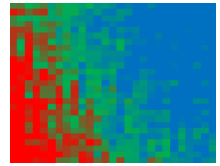
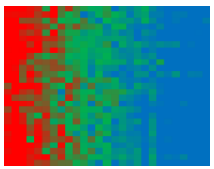
ภาคผนวก

ตารางที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ท่าทางที่ 0 องศา (ตั้งฉากกับกล้อง)

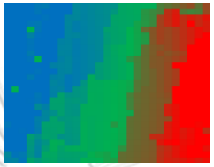
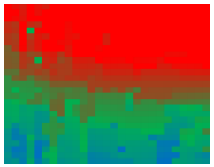
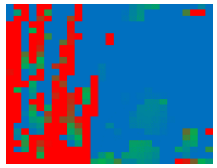
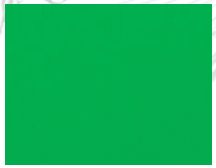
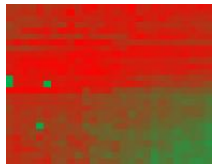
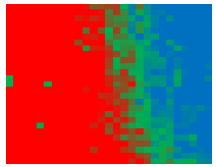
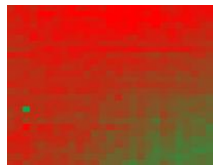
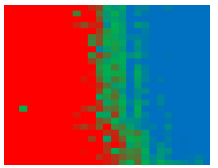
	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker 0° (parallel image plane)						
4 markers 0° (parallel image plane)						
5 markers 0° (parallel image plane)						

CHULALONGKORN UNIVERSITY

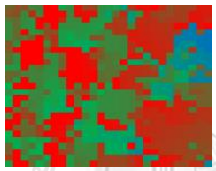
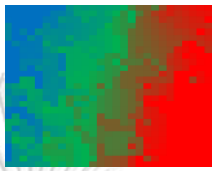
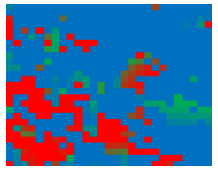
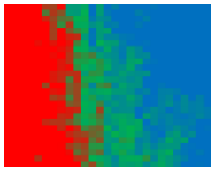
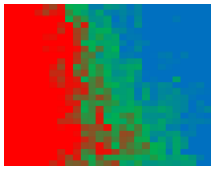
ตารางที่ 10 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rx = 15 องศา

	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Rx 15° (parallel image plane)						
4 markers Rx 15° (parallel image plane)						
5 markers Rx 15° (parallel image plane)						

ตารางที่ 11 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rx = -15 องศา

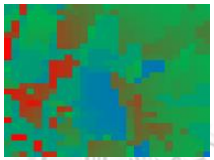
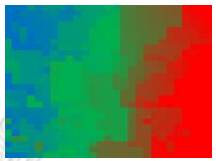
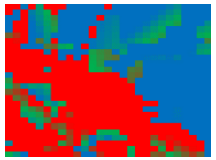
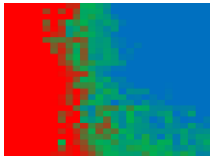
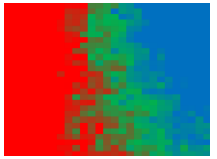
	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Rx -15° (parallel image plane)						
4 markers Rx -15° (parallel image plane)						
5 markers Rx -15° (parallel image plane)						

ตารางที่ 12 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Ry = -30 องศา

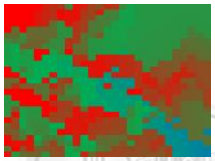
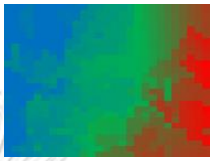
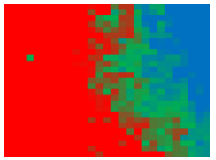
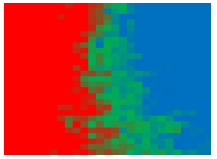
	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Ry -30° (parallel image plane)						
4 markers Ry -30° (parallel image plane)						
5 markers Ry -30° (parallel image plane)						

CHULALONGKORN UNIVERSITY

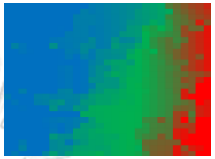
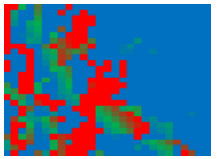
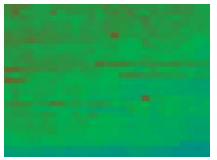
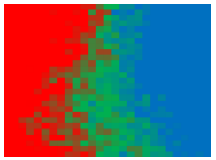
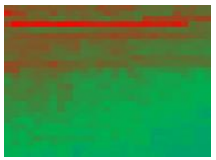
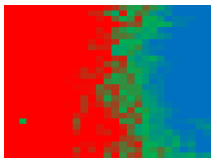
ตารางที่ 13 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Ry = -15 องศา

	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Ry -15° (parallel image plane)						
4 markers Ry -15° (parallel image plane)						
5 markers Ry -15° (parallel image plane)						

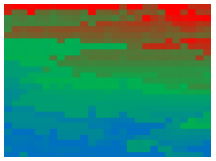
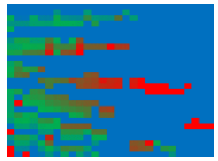
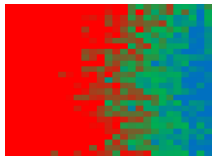
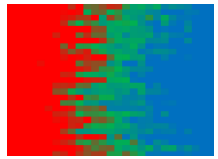
ตารางที่ 14 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Ry = 15 องศา

	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Ry 15° (parallel image plane)						
4 markers Ry 15° (parallel image plane)						
5 markers Ry 15° (parallel image plane)						

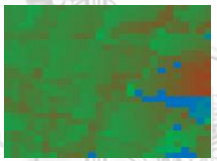
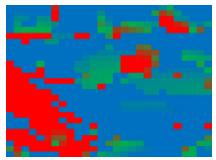
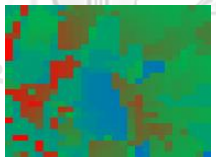
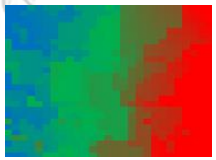
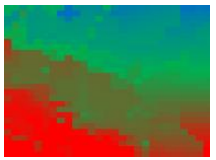
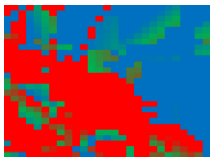
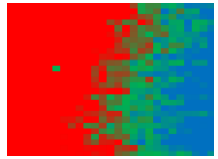
ตารางที่ 15 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Ry = 30 องศา

	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Ry 30° (parallel image plane)						
4 markers Ry 30° (parallel image plane)						
5 markers Ry 30° (parallel image plane)						

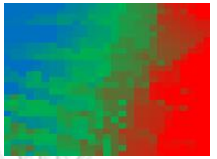
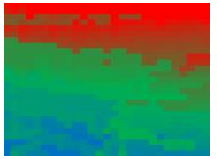
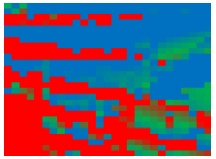
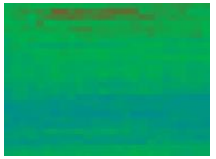
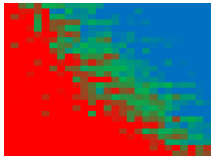
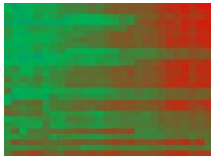
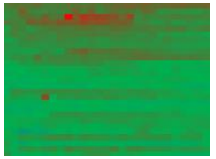
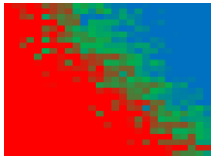
ตารางที่ 16 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rz = -30 องศา

	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Rz -30° (parallel image plane)						
4 markers Rz -30° (parallel image plane)						
5 markers Rz -30° (parallel image plane)						

ตารางที่ 17 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rz = -15 องศา

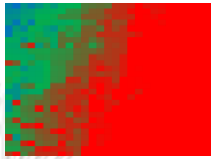
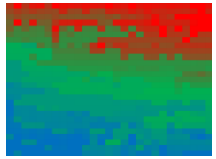
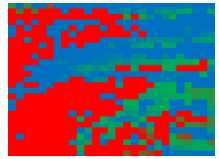
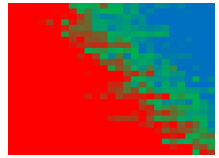
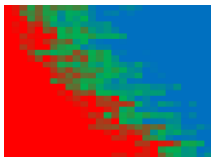
	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Rz -15° (parallel image plane)						
4 markers Rz -15° (parallel image plane)						
5 markers Rz -15° (parallel image plane)						

ตารางที่ 18 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rz = 15 องศา

	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Rz 15° (parallel image plane)						
4 markers Rz 15° (parallel image plane)						
5 markers Rz 15° (parallel image plane)						

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 19 ค่าความคลาดเคลื่อนของ 1, 4 และ 5 markers ที่ Rz = 30 องศา

	Roll	Pitch	Yaw	X	Y	Z
1 marker Rz 30° (parallel image plane)						
4 markers Rz 30° (parallel image plane)						
5 markers Rz 30° (parallel image plane)						

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University