

ระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน

นายปกรณ์ อรรถนัสชาติ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและเพิ่มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

NAVIGATION AND OBSTACLE AVOIDANCE SYSTEM FOR PERSON SIDE-BY-SIDE MOBILE ROBOT

Mr. Pakorn Udsatid

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Computer Engineering

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน
โดย	นายปกรณ์ อรรถนัสชาติ
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.นัทที นิภานันท์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง

ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศสิทธิ์วงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุกรี สิ้นธุภิณโณ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.นัทที นิภานันท์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.สงกรานต์ จารุศิริสวัสดิ์)

ปกรณ์ อรรถนัสชาติ: ระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน. (NAVIGATION AND OBSTACLE AVOIDANCE SYSTEM FOR PERSON SIDE-BY-SIDE MOBILE ROBOT)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.นันทิ นิภาพันธ์, 58 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นที่จะพัฒนาระบบสำหรับหุ่นยนต์ที่มีความสามารถในการเดินเคียงข้างไปกับคนและหลบหลีกสิ่งกีดขวาง โดยนำเสนอแบบจำลองของคนที่ประกอบด้วยเท้า 2 ข้างของคนจากการใช้อุปกรณ์ Kinect รวมถึงวิธีการหลบหลีกสิ่งกีดขวางโดยการเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่จากการเดินข้างคนเป็นเดินตาม ผลการทดลองกับหุ่นยนต์จริงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานของการพัฒนาหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับคนในสถานการณ์ต่างๆ

ภาควิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา.....2555.....

## 5370454421: MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS: MOBILE ROBOT/ACCOMPANYING ROBOT/OBSTACLE AVOIDANCE/PERSON SIDE-BY-SIDE ROBOT

PAKORN UDSATID: NAVIGATION AND OBSTACLE AVOIDANCE SYSTEM FOR PERSON SIDE-BY-SIDE MOBILE ROBOT. ADVISOR: NATTEE NIPARNAN, Ph.D., 58 pp.

This study aimed to develop a mobile robot system which features a person side-by-side movement and also obstacle avoidance by proposing a human model, two feet of human, using Kinect as a sensor. Experiment results show the good performance of the proposed method which can be a base for developing robots moving with a person in many situations.

Department:.....Computer engineering.....Student's Signature.....

Field of Study:.....Computer engineering.....Advisor's Signature.....

Academic Year.....2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.นันทิ นิภาพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ สำหรับความกรุณาในการแนะนำทั้ง การทำวิจัย และเรื่องอื่นๆ รวมทั้งเป็นที่ปรึกษาเมื่อเกิดปัญหาต่างๆ ตั้งแต่ช่วงเวลาทำโครงการทางวิศวกรรมระดับปริญญาบัณฑิต จนกระทั่งในปัจจุบัน

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผศ. ดร.สุกรี สินธุภิญโญ, ผศ. ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง และ ดร.สงกรานต์ จารุศิริสวัสดิ์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณบิดา มารดา น้องชาย และญาติๆ ที่คอยเป็นแรงผลักดันที่สำคัญ ให้กำลังใจและสนับสนุนทุก ทางเดินที่ได้ตัดสินใจเลือกมาโดยตลอด

ขอขอบคุณข้อแนะนำ คำวิจารณ์ กำลังใจและความร่วมแรงร่วมใจที่ได้จากสมาชิกห้องปฏิบัติการระบบ อัจฉริยะ ISL2 ทั้งในการทำงานวิจัย และผลงานอื่นที่ได้ทำร่วมกัน ขอขอบคุณสุขุม สัตตรัตน์มัย และ วราญ จริยาวัฒน์ และยุทธนา สุทธสุภา สำหรับความช่วยเหลือในการทดลอง

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ทุกคน ที่คอยไต่ถาม และให้กำลังใจในทุกช่วงเวลาตลอดมา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ปัญหา.....	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.3 การนำเสนอและลำดับเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	5
บทที่ 2 การติดตามคน.....	6
2.1 แบบจำลองของคน (Human model).....	6
2.2 การประมาณค่าสถานะของคน.....	10
2.3 ปัญหาของการติดตามคน.....	11
บทที่ 3 การนำทางหุ่นยนต์.....	13
3.1 ความหมายและแนวคิดพื้นฐานของการนำทางหุ่นยนต์.....	13
3.2 ผลของรูปแบบการวางตัวของล้อที่มีต่อการนำทางหุ่นยนต์.....	13
3.3 ความแตกต่างระหว่างหุ่นยนต์เดินข้างกับเดินตาม.....	15
3.4 การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Obstacle avoidance).....	15
บทที่ 4 ระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน.....	17
4.1 ความต้องการของระบบ (Functional requirement).....	17
4.2 ภาพรวมของระบบ.....	18

4.3 การติดตามคน.....	19
4.3.1 แนวคิด.....	19
4.3.2 อุปกรณ์.....	19
4.3.3 แบบจำลองของคน.....	20
4.3.4 ขั้นตอนการติดตามคน.....	21
4.4 การนำทางหุ่นยนต์.....	27
4.4.1 การกำหนดตำแหน่งเป้าหมายของหุ่นยนต์.....	28
4.4.2 การเคลื่อนไปยังตำแหน่งเป้าหมาย.....	29
4.4.3 การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง.....	34
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง.....	36
5.1 อุปกรณ์.....	36
5.1.1 Microsoft Kinect for Xbox 360 (Kinect).....	36
5.1.2 Laser range finder (LRF).....	37
5.1.3 หุ่นยนต์ทดลอง.....	37
5.2 สถานที่.....	37
5.3 การทดลองการติดตามคนด้วยวิธีการติดตามเท้าของคน.....	38
5.3.1 การทดลองการตรวจจับตำแหน่งของเท้า.....	38
5.3.2 การทดลองการติดตามตำแหน่งของคน.....	39
5.3.3 การทดลองการตรวจจับทิศทางการวางตัวของเท้า.....	40
5.3.4 การทดลองการติดตามทิศทางการเคลื่อนที่.....	41
5.4 การทดลองการนำทางหุ่นยนต์.....	42
5.5 การทดลองทั้งระบบ.....	45
บทที่ 6 สรุปการวิจัยและแนวทางการวิจัยในขั้นถัดไป.....	51
6.1 สรุปการวิจัย.....	51



6.2 แนวทางการวิจัยในชั้นถัดไป.....	51
รายการอ้างอิง.....	53
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	58

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.1 แสดงผลทดลองการตรวจจับตำแหน่งของเท้าเทียบกับตำแหน่งของแถบผ้าสี .....	39
ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองการติดตามตำแหน่งของคนเทียบกับตำแหน่งของคนที่ได้จาก LRF .....	39
ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองการตรวจจับทิศทางการวางตัวของเท้าเทียบกับการวางตัวของรอยเท้า .....	40
ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองการตรวจจับทิศทางการวางตัวของเท้าเทียบกับการวางตัวของรอยเท้าเมื่อ เลื่อนจุดเริ่มต้นขึ้นมาให้เท่าตำแหน่งของหุ่นยนต์.....	41
ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดลองการตรวจจับทิศทางการเคลื่อนที่ของคนเทียบกับทิศทางการเดิน .....	41
ตารางที่ 5.6 แสดงผลการทดลองการตรวจจับทิศทางการเคลื่อนที่ของคนเทียบกับทิศทางการเดินเมื่อเลื่อน จุดเริ่มต้นขึ้นมาให้เท่าตำแหน่งของหุ่นยนต์ .....	42
ตารางที่ 5.7 แสดงผลการวัดค่าเมื่อหุ่นยนต์เดินตามคน .....	43
ตารางที่ 5.8 แสดงผลการวัดค่าเมื่อหุ่นยนต์เดินเคียงข้างคน .....	43
ตารางที่ 5.9 แสดงผลการวัดค่าเมื่อหุ่นยนต์ทำงานทั้งระบบ .....	46

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	แบบจำลองของคนแบบ convex [32] .....	4
รูปที่ 1.2	แสดงแบบจำลองของคนที่ได้จากการติดตั้ง LRF ที่ความสูง 2 ระดับ [34] .....	4
รูปที่ 2.1	แสดงการติดตามคนจากสีของเสื้อ [14] .....	7
รูปที่ 2.2	แบบจำลองของคนจากการติดตั้ง LRF ที่ระดับลำตัวของคน [13] .....	8
รูปที่ 2.3	แบบจำลองของคนที่ประกอบด้วยขาคน 2 ข้าง [3] .....	8
รูปที่ 2.4	แบบจำลองของคนที่เป็นโครงร่างกายจากภาพสีของกล้อง [33] .....	9
รูปที่ 2.5	แบบจำลองของคนที่เป็นโครงร่างกายจาก Kinect .....	9
รูปที่ 3.1	แสดงแผนที่หุ่นยนต์แบบ Holonomic สามารถเคลื่อนที่ไปได้ .....	14
รูปที่ 3.2	แสดงแผนที่หุ่นยนต์แบบ Nonholonomic ที่มีระบบขับเคลื่อนแบบ Differential drive สามารถเคลื่อนที่ไปได้ .....	14
รูปที่ 4.1	ผังงานแสดงภาพรวมของระบบ .....	18
รูปที่ 4.2	อุปกรณ์ Kinect .....	19
รูปที่ 4.3	(ซ้าย) ภาพแสดงควมลึกที่ได้จาก Kinect (ขวา) ภาพสีจาก Kinect .....	20
รูปที่ 4.4	แสดงแบบจำลองของคนจากข้อมูลเท้า และการหาสถานะของคนจากสถานะของเท้าทั้ง 2 ข้าง .....	20
รูปที่ 4.5	แสดง RGB image และ Depth image ของตารางหมากรุกที่ได้จาก Kinect .....	21
รูปที่ 4.6	แสดงการจับกลุ่มข้อมูลของเท้า ลูกศรแสดงทิศทางการวางตัวของเท้าที่คำนวณได้ .....	23
รูปที่ 4.7	การแปลงเฟรมจากมุมมองของ Kinect เป็นมุมมองจากด้านบน .....	24
รูปที่ 4.8	(ซ้าย) ภาพสีที่ได้จาก Kinect เมื่อส่องลงบริเวณที่คนยืน (ขวา) ภาพควมลึก .....	25
รูปที่ 4.9	(ซ้าย) ภาพที่ได้จากการ project ข้อมูลที่น่าจะเป็นเท้าลงบนระนาบ $xy$ (ขวา) ภาพที่ผ่านการกำจัด noise .....	25
รูปที่ 4.10	(บน) แสดงการจัดกลุ่มข้อมูลจาก LRF พร้อมระบุหมายเลขและวงล้อมกลุ่ม (ล่าง) สภาพแวดล้อมจริง เส้นประสีเขียวแสดงระดับที่ LRF วัดข้อมูล .....	27
รูปที่ 4.11	แสดง Reference frame ทั้งหมดของระบบ $\omega, h, r$ แทน reference frame ของโลก, คน และหุ่นยนต์ ตามลำดับ .....	28
รูปที่ 4.12	กรอบอ้างอิงของคน .....	28
รูปที่ 4.13	แสดงการกำหนดตำแหน่งเป้าหมายจาก Reference frame ของคน (ซ้าย) การกำหนดตำแหน่งเป้าหมายสำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน (ขวา) สำหรับหุ่นยนต์เดินตามคน .....	29

รูปที่ 4.14	ผังงาน RotateGoal.....	31
รูปที่ 4.15	ผังงาน MoveGoal.....	32
รูปที่ 4.16	ผังงาน RotateHuman.....	33
รูปที่ 4.17	ผังงาน Follow.....	33
รูปที่ 4.18	แสดงสถานการณ์ที่หุ่นยนต์เปลี่ยนจากการเดินข้างคนเป็นเดินตามคน วงกลมแทนสิ่งกีดขวาง.....	34
รูปที่ 4.19	แสดงสถานการณ์ที่หุ่นยนต์เปลี่ยนจากการเดินตามคนเป็นเดินข้างคน.....	35
รูปที่ 5.1	แสดงการติดตั้ง Kinect กับหุ่นยนต์โดยทำมุม 15° กับเส้นแนวตั้งของพื้น.....	36
รูปที่ 5.2	โครงสร้างอะลูมิเนียมและการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนหุ่นยนต์.....	37
รูปที่ 5.3	บริเวณที่ใช้ในการทดลอง.....	37
รูปที่ 5.4	แสดงภาพรวมการทดลองการติดตามคนด้วยวิธีการติดตามเท้า.....	38
รูปที่ 5.5	(ซ้าย) ภาพสีที่ได้จาก Kinect (ขวา) ภาพที่ได้จากการคัดกรองเฉพาะสีของแถบผ้า.....	39
รูปที่ 5.6	ภาพเท้าคนที่ Kinect รับรู้ได้ เมื่อคนยืนหันไปทิศทาง 10° (ซ้าย) ที่ตำแหน่งเริ่มต้น (ขวา) ที่ตำแหน่งข้างหุ่นยนต์.....	40
รูปที่ 5.7	แสดงความผิดพลาดของตำแหน่งเป้าหมายเมื่อทิศทางการเคลื่อนที่ของคนคลาดเคลื่อนไป 15°.....	42
รูปที่ 5.8	แสดงเวกเตอร์แทนทิศทางการหันของหุ่นยนต์และคน.....	43
รูปที่ 5.9	แสดงการทดลองหุ่นยนต์เดินตามคน.....	44
รูปที่ 5.10	แสดงการทดลองหุ่นยนต์เดินข้าง.....	44
รูปที่ 5.11	แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของคน (เส้นสีฟ้า)และหุ่นยนต์(เส้นสีแดง)เมื่อทดลองการเดินข้างคนของหุ่นยนต์ (หน่วยเป็นเซนติเมตร).....	45
รูปที่ 5.12	แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของคน (เส้นสีฟ้า)และหุ่นยนต์(เส้นสีแดง)เมื่อทดลองการเดินข้างคนของหุ่นยนต์.....	45
รูปที่ 5.13	แผนผังการทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 1.....	46
รูปที่ 5.14	การทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 1.....	47
รูปที่ 5.15	แผนผังการทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 2.....	47
รูปที่ 5.16	การทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 2.....	48
รูปที่ 5.17	แผนผังการทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 3.....	49
รูปที่ 5.18	การทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 3.....	50

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ปัญหา

การนำหุ่นยนต์มาใช้งานในสภาพแวดล้อมที่อยู่ร่วมกับคน ถือเป็นงานที่กำลังได้รับความนิยมในวงกว้าง หุ่นยนต์ปัจจุบัน ที่ผ่านมามีหุ่นยนต์ได้เข้าไปอยู่ในวงการอุตสาหกรรมในรูปของเครื่องจักรกลที่สามารถทำงานที่มีความยากและอันตรายแทนมนุษย์ ต่อมาเมื่อมีการพัฒนาทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ซึ่งเป็นการทำให้เครื่องจักรกลรับรู้สภาพแวดล้อมและสามารถตอบสนองกับสิ่งแวดล้อมในลักษณะต่างๆได้ จึงทำให้เกิดการพัฒนาให้หุ่นยนต์สามารถทำงานท่ามกลางผู้คนในโลกจริง เช่น ในสำนักงาน พิพิธภัณฑ์ โรงพยาบาล หรือ บ้าน ดังนั้นแทนที่หุ่นยนต์จะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำหรือการหยิบจับเคลื่อนย้ายสิ่งของตามขั้นตอนที่คนกำหนดไว้ล่วงหน้าตามลักษณะของหุ่นยนต์ในโรงงาน หุ่นยนต์ที่ทำงานกับผู้คนต้องสามารถเรียนรู้และปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา รวมไปถึงสามารถสื่อสารกับผู้คนได้อีกด้วย [1]

หุ่นยนต์ผู้ช่วยคน (Assistive robot) เป็นรูปแบบหนึ่งของหุ่นยนต์ที่มีความน่าสนใจทั้งในแง่การพัฒนาและแง่การนำไปใช้งาน กล่าวคือ หุ่นยนต์ประเภทนี้ต้องมีการเคลื่อนที่ที่สอดคล้องไปกับคนอย่างต่อเนื่อง (ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งในการสื่อสารกับคน) และสามารถรับรู้สถานะต่างๆของคนที่ติดตามได้ นอกจากนี้หากพิจารณาถึงการที่ผู้สูงอายุหรือผู้ป่วยต้องเดินไปมา การมีหุ่นยนต์ผู้ช่วยเคลื่อนที่ไปด้วยกันย่อมทำให้เกิดความมั่นใจได้ว่า ถ้าเกิดเหตุฉุกเฉินขึ้นกับคน จะมีหุ่นยนต์ที่รับรู้ถึงเหตุการณ์นั้นได้ทันท่วงที หรือการนำเที่ยวในพิพิธภัณฑ์ หากนักท่องเที่ยวมีหุ่นยนต์นำทางในลักษณะการเดินเคียงข้างไป ย่อมเป็นการอำนวยความสะดวกแก่นักท่องเที่ยวและทำให้เกิดความรู้สึกที่ดีในการเยี่ยมชม

การที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่สอดคล้องไปกับคนที่กล่าวถึงนั้น มักอยู่ในรูปแบบการเดินตามคน คือ เมื่อหุ่นยนต์สามารถระบุตำแหน่งของคนที่กำลังติดตามอยู่ได้แล้ว หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งนั้น โดยอาจจะมีการเว้นระยะห่างประมาณหนึ่งระหว่างคนกับหุ่นยนต์เพื่อความปลอดภัย แต่หากพิจารณาในเชิงการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างคนกับหุ่นยนต์ (Human-robot interaction) แล้ว จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์ที่เดินตามคนจะไม่สามารถทำให้คนกับหุ่นยนต์สื่อสารกันได้มากเท่าที่ควร เนื่องจากตำแหน่งของคนจะนำหน้าหุ่นยนต์ตลอดและการเคลื่อนที่ลักษณะนี้คนจะไม่มีรู้สึกถึงการมีหุ่นยนต์อยู่ด้วย ดังนั้นหากเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากเดินตามคนเป็นเดินเคียงข้างย่อมแก้ปัญหานี้ได้ เพราะการเดินเคียงข้างกันจะทำให้ตำแหน่งของคนและหุ่นยนต์ใกล้กัน ส่งผลให้หุ่นยนต์รับรู้ได้ดีขึ้นว่าในขณะที่คนมีสถานะอย่างไร และยังให้ความรู้สึกเป็นมิตรมากกว่าการเดินตามคนอีกด้วย

หุ่นยนต์เดินเคียงข้างคนจะมีความแตกต่างไปจากการเดินตามคนในประเด็นของการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งที่เหมาะสม ในการเดินตามคนนั้นหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามตำแหน่งปัจจุบันของคน แม้คนจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางเคลื่อนที่ หุ่นยนต์ก็สามารถเปลี่ยนทิศทางตามคนได้ในขณะที่การเคลื่อนที่ที่ยังอยู่บนแนวเส้นตรง แต่สำหรับการเดินเคียงข้างนั้น หากคนเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ ตำแหน่งที่เหมาะสมของหุ่นยนต์จะเปลี่ยนไปตามแนวเส้นรอบวงที่มีจุดศูนย์กลางที่หุ่นยนต์และรัศมีเท่ากับระยะห่างของหุ่นยนต์และคน ซึ่งยากแก่การควบคุมเพราะต้องมีการปรับความเร็วให้หุ่นยนต์เคลื่อนไปให้ถึงตำแหน่งอย่างทันเวลา นอกจากนี้การเดินตามคนยังมีโอกาสที่หุ่นยนต์จะชนสิ่งกีดขวางได้น้อย เนื่องจากคนที่เดินนำหุ่นยนต์จะเดินหลบสิ่งกีดขวางเอง หุ่นยนต์ที่เดินตามคนก็สามารถหลบสิ่งกีดขวางนั้นๆได้ด้วย (ในกรณีที่มีสิ่งกีดขวางอยู่กับที่ หรือสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่ไม่เร็วมาก) แต่การเดินเคียงข้างคน นอกจากที่หุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งข้างคนตลอดเวลาแล้ว หุ่นยนต์ยังต้องสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ด้วยตัวเองอีกด้วย

จากปัญหาที่กล่าวมา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนอการพัฒนาระบบการนำทางหุ่นยนต์เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานกับคนด้วยการเคลื่อนที่เคียงข้างคน และหุ่นยนต์ต้องไม่ชนสิ่งกีดขวาง โดยระบบไม่จำเป็นต้องรู้แผนที่ของบริเวณพื้นที่ที่จะทำงานมาก่อน วิทยานิพนธ์นี้มุ่งหมายที่จะพัฒนาการติดตามคนที่สามารถระบุสถานะของคนจากมุมมองด้านข้างตามทิศทางารับข้อมูลของอุปกรณ์รับหุ่นยนต์ โดยการหัน Kinect ลงพื้นเพื่อใช้ในการหาสถานะของเท้าคนจากภาพความลึก และจึงนำมาค้นหาสถานะของคน วิธีการนี้มีข้อดีจากการเลือกใช้ Kinect ซึ่งให้ข้อมูลความลึกได้หลายระดับมากกว่าอุปกรณ์วัดระยะอื่นๆ และการค้นหาเท้าจะเกิดความสับสนกับวัตถุอื่นได้ยากกว่าเพราะเท้าคนมีลักษณะที่ค่อนข้างเฉพาะ นอกจากนี้ระบบจะเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากการเดินข้างให้เป็นการเดินตามคนเมื่อหุ่นยนต์รับรู้ว่ามีสิ่งกีดขวางในบริเวณที่หุ่นยนต์กำลังจะเคลื่อนที่ไป ทำให้หุ่นยนต์ยังคงสามารถเคลื่อนที่ไปกับคนได้ จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้คือการนำระบบไปประยุกต์ใช้กับงานหุ่นยนต์ผู้ช่วยที่จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับผู้ป่วยและผู้สูงอายุ หรือการนำเที่ยวโดยหุ่นยนต์ในพิพิธภัณฑ์

## 1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

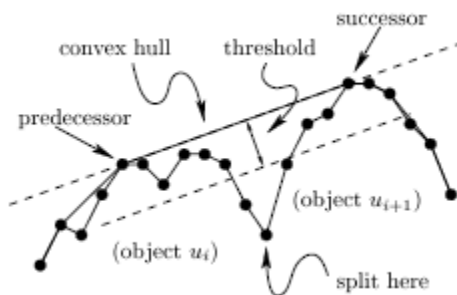
ปัจจุบันมีการนำหุ่นยนต์ไปทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีคนอยู่ในหลากหลายรูปแบบเช่น การแข่งขันหุ่นยนต์บริการ (Robocup @home) [2], หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามคน [3–8], หุ่นยนต์ในสำนักงาน [1], หุ่นยนต์ในงานนิทรรศการ [9], หุ่นยนต์ในห้างสรรพสินค้า [10, 11] หรือหุ่นยนต์ที่เดินไปกับคน [12, 13] เป็นต้น ซึ่งความสามารถพื้นฐานที่สำคัญที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่กล่าวมา คือ การที่หุ่นยนต์มีความสามารถในการติดตามคน (Human tracking) เนื่องจากหุ่นยนต์ประเภทนี้ต้องทำงานในเชิงการมีปฏิสัมพันธ์กับคน การติดตามคนนอกจากจะทำให้หุ่นยนต์สามารถระบุตัวตนของคนเป้าหมายได้ถูกต้องแล้ว ยังนำไปสู่การแสดงออกที่ต่างกันอย่างชัดเจนเมื่อหุ่นยนต์รับรู้ถึงสถานะของคน

ข้อมูลหลักที่ใช้ในงานติดตามคน คือ ข้อมูลที่ใช้ระบุตำแหน่งของคน สำหรับอุปกรณ์รับรู้ต่างๆ (Sensor) ที่ถูกนำมาใช้ในการระบุตำแหน่งของคนนั้น กล้องวิดีโอ [14,15] ถือเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่มีความนิยมในการวิจัย เนื่องจากข้อดีของกล้องวิดีโอ คือ ใช้งานง่าย ราคาถูก ให้ข้อมูลในปริมาณมาก และมีความเร็วในการส่งข้อมูลสูง แต่ปัญหาของการใช้กล้องวิดีโอคือ ข้อมูลที่ได้จากกล้องวิดีโอเป็นข้อมูลภาพใน 2 มิติเท่านั้น ไม่ได้มีข้อมูลระยะทางจากกล้องถึงวัตถุ ซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการติดตามคนใน 3 มิติ ในงานวิจัยหลายๆงาน จึงประยุกต์การใช้อุปกรณ์รับรู้อื่นๆเพื่อมาช่วยในการหาข้อมูลระยะทาง เช่น การใช้กล้องสเตอริโอ (Stereo camera) [5, 16], กล้องตรวจจับความร้อน[17], กล้องโทมออฟไฟลท์ (Time-of-flight camera) ซึ่งเป็นกล้องที่ใช้คำนวณระยะทางโดยอาศัยการวัดเวลาเดินทางของแสงที่ปล่อย [18] และการใช้กล้องวิดีโอร่วมกับระบบการระบุด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (RFID)[19] เป็นต้น

อุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์เป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการติดตามคน ทำงานโดยอาศัยหลักการสะท้อนแสงเลเซอร์จากวัตถุต่างๆ ซึ่งมีความแม่นยำสูงจึงทำให้มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง ทั้งการติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์อยู่กับที่ [20–23] และติดตั้งบนหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ [3, 8, 24, 25] นอกจากนี้ยังได้มีการนำอุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์ไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์รับรู้อื่นๆ โดยใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์เป็นข้อมูลหลัก เช่น กล้องออบนิ [26], กล้องวิดีโอ [6, 7, 27] แต่อย่างไรก็ตามจุดด้อยของอุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์คือราคาสูง

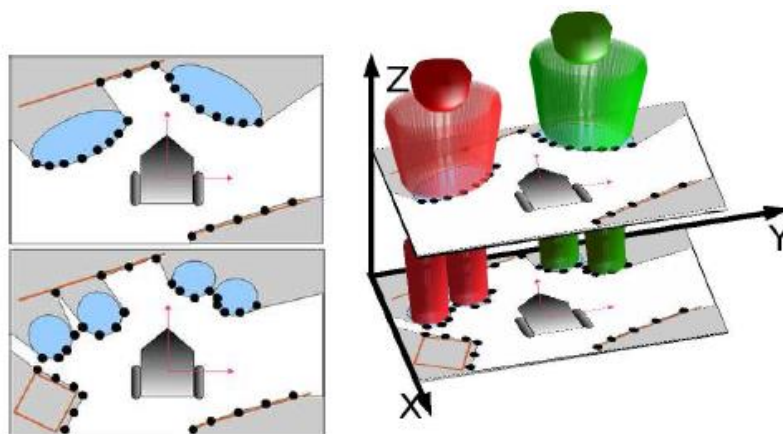
เมื่อไม่นานมานี้ การใช้งาน Microsoft Kinect for Xbox 360 (Kinect) [28] ซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมในการเล่นเกมที่ใช้ต่อพ่วงกับ Xbox 360 มาเป็นอุปกรณ์สำหรับงานทางด้านหุ่นยนต์ [29–31] Kinect ประกอบด้วยกล้องวิดีโอและอุปกรณ์รับรู้ความลึกด้วยแสงอินฟราเรด อุปกรณ์รับรู้ความลึกด้วยแสงอินฟราเรดของ Kinect ให้ผลลัพธ์เป็นภาพความลึก (Depth image) ซึ่งเป็นข้อมูลความลึกจากความสูงหลายระดับ ในขณะที่อุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์ให้ข้อมูลความลึกที่ความสูงเดียว แม้ปัญหาหลักของการใช้ Kinect คือการที่มีมุมมองที่แคบกว่า และใช้ได้เฉพาะในอาคารแต่หากพิจารณาถึงข้อดีของ Kinect แล้ว จะเห็นได้ว่ามีความน่าสนใจในการพัฒนา

แบบจำลองของคน (Human model) ในงานการติดตามคนนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเนื่องจากเป็นสิ่งที่บอกข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์รับรู้ลักษณะใดถือว่าเป็นคน ซึ่งมีผู้เสนอแบบจำลองของคนในรูปแบบต่างๆกันไป [20, 32] เสนอแบบจำลองของคนที่มีลักษณะเป็นคอนเวกซ์ (convex) ซึ่งเป็นรูปร่างที่มีลักษณะนูนออกมา เช่นส่วนลำตัวของมนุษย์แบบตัดขวาง, ในปี 2005 มีงานวิจัยที่ออกแบบให้แทนส่วนต่างๆของมนุษย์ เช่น ศีรษะ แขน ขา ลำตัว ด้วยสี่เหลี่ยมที่สามารถปรับขนาดและการวางตัวได้ [33], [17]ค้นหาคนจากรูปร่างที่ได้จากกล้องตรวจจับความร้อน โดยหาส่วนของวงรี 2 เส้นที่มีความยาวต่างกันชัดเจน โดยเส้นหนึ่งแทนส่วนที่เป็นศีรษะ ซึ่งจะมีความยาวน้อยกว่า อีกเส้นหนึ่งที่ยาวกว่า จะแทนส่วนที่เป็นหัวไหล่และขา, ในปี 2007 [21] เสนอให้ใช้วงกลม 3 วงแทนลำตัวและแขนสองข้างของคนในมุมมองจากด้านบนโดยมีตัวแปรอธิบายทิศทางการวางตัวของแขนและลำตัวด้วย



รูปที่ 1.1 แบบจำลองของคนแบบ convex [32]

แบบจำลองที่กล่าวมาข้างต้น มักจะเลือกส่วนที่เป็นลำตัวของคนมาเป็นข้อมูลซึ่งมักจะทำให้เกิดความสับสนกับวัตถุที่มีรูปร่างที่คล้ายกันได้ง่าย การเปลี่ยนมาใช้ขา 2 ข้าง [24, 26, 27] จึงเป็นที่นิยมในการติดตามคนในงานวิจัย ในช่วงนี้ เนื่องจากนอกจากตำแหน่งของคนที่ได้แล้ว ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการติดตามขา (Legs Tracking) ได้แก่ ความเร็วของขา ลักษณะและเส้นทางในการเดิน ไปวิเคราะห์ในระดับลึกขึ้นได้อีก เช่นในงานวิจัย [3, 22] ที่นำแบบจำลองการเดินของคน (Walking Model) เช่นลักษณะการแกว่งขา มาปรับเข้ากับข้อมูลที่ได้จากการติดตามขา แต่ข้อจำกัดของการติดตามขาคือ จะใช้งานได้เฉพาะในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวางที่อยู่ในระดับเดียวกับตำแหน่งความสูงของขาที่เลือก [34] จึงเสนอวิธีการค้นหาตำแหน่งของคนโดยติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์ ที่ความสูง 2 ระดับเพื่อค้นหาส่วนที่เป็นลำตัวของขาของคน ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นกว่าการเลือกใช้ข้อมูลจากความสูงเพียงระดับเดียว



รูปที่ 1.2 แสดงแบบจำลองของคนที่ได้จากการติดตั้ง LRF ที่ความสูง 2 ระดับ [34]

จากการที่อุปกรณ์รับรู้ไม่สามารถให้ค่าการวัดที่มีความแม่นยำอย่างสมบูรณ์เนื่องจากการให้ค่าการวัดของอุปกรณ์เป็นเพียงการประมาณเท่านั้น ประกอบกับอุปกรณ์อาจมีความคลาดเคลื่อนในตัวเอง จึงต้องมีวิธีการจัดการกับความไม่แน่นอนในการวัดค่า ซึ่งวิธีการจัดการความไม่แน่นอนในการวัดค่าของอุปกรณ์รับรู้ในงานวิจัยมีความแตกต่างกันไป[35] เช่น Unscented Kalman filter (UKF) [3, 22, 27], Extended Kalman Filter (EKF) [3],



Particle Filter [8, 13, 17, 26, 27], Sample based Joint Probabilistic Data Association filter (SJFDA) [20]

จากงานวิจัยข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีการใช้อุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์มาใช้ในการติดตามคนอย่างแพร่หลาย แต่เนื่องจากอุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์จะให้ข้อมูลที่ความสูงระดับเดียว จึงมีการแก้ปัญหาด้วยการนำอุปกรณ์รับรู้อื่นๆมาทำงานร่วมด้วย อย่างไรก็ตาม แบบจำลองของคนที่ใช้ในงานวิจัยมักจะเป็นรูปแบบที่ได้จากข้อมูลระนาบเดียว จึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเมื่อเจอวัตถุที่มีรูปร่างคล้ายคลึงกันและไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าคนหันไปทิศทางใด วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงมีความมุ่งหมายที่จะพัฒนาวิธีการติดตามคนโดยเลือกแบบจำลองของคนที่ใช้แทนข้อมูลของคนได้ดี รวมไปถึงการเลือกใช้อุปกรณ์รับรู้อื่นๆมาทำงานร่วมกับอุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์ เพื่อใช้ในระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เดินเคียงข้างคน

### 1.3 การนำเสนอและลำดับเนื้อหาวิทยานิพนธ์

การนำเสนอเนื้อหาวิทยานิพนธ์แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง, ขั้นตอนการแก้ปัญหาของวิทยานิพนธ์ และการทดสอบการทำงานและสรุปผล

1. ส่วนของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะอธิบายทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบนำทางหุ่นยนต์และหลบหลีกสิ่งกีดขวาง โดยเนื้อหาประกอบด้วย
 

**บทที่ 2** จะอธิบายถึงการติดตามคนโดยการใช้แบบจำลองของคนประเภทต่างๆ รวมถึงการจัดการกับค่าการวัดจากเซนเซอร์ที่ไม่แน่นอน และปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับการติดตามคน

**บทที่ 3** จะกล่าวถึง หลักการของการนำทางหุ่นยนต์ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะสนใจการนำทางหุ่นยนต์เพื่อเดินตามคนและเดินเคียงข้างคน นอกจากนี้ในบทนี้จะกล่าวถึงการหลบหลีกสิ่งกีดขวางซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการนำทางหุ่นยนต์ด้วย
2. ส่วนของขั้นตอนการแก้ปัญหาของวิทยานิพนธ์ ซึ่งในบทที่ 4 จะอธิบายวิธีการติดตามคนด้วยแบบจำลองของคนแบบใหม่และวิธีการนำทางหุ่นยนต์พร้อมกับการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง
3. ส่วนของการทดสอบการทำงานและสรุปผล จะแสดงผลการทดสอบวิธีการติดตามคนด้วยแบบจำลองของคนแบบใหม่ และผลลัพธ์จากการนำวิธีการที่เสนอไปใช้กับหุ่นยนต์ในบทที่ 5 และในบทที่ 6 จะเป็นการสรุปและเสนอแนวทางการวิจัยต่อไปของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## บทที่ 2

### การติดตามคน

การติดตามคนสำหรับหุ่นยนต์ คือกระบวนการที่หุ่นยนต์รับข้อมูลจากเซนเซอร์ นำมาประมวลผลเพื่อค้นหาว่าสถานะ จุดมุ่งหมายของการติดตามคนมักเป็นการระบุตำแหน่งของคนในระบบติดตาม ใน space ที่มี เช่น ตำแหน่งของจุดภาพ (Pixel) ในภาพ, ตำแหน่งสองมิติบนระนาบจากข้อมูลของเลเซอร์ หรือพิกัดในโลก 3 มิติ เป็นต้น

#### 2.1 แบบจำลองของคน (Human model)

เมื่อเซนเซอร์ได้รับข้อมูลจากสิ่งแวดล้อม และส่งมายังระบบหรือตัวหุ่นยนต์แล้ว ขั้นตอนที่มีความสำคัญที่สุดในการติดตามคนคือ การค้นหาว่าข้อมูลที่ได้นั้นมีส่วนใดที่บ่งบอกถึงตัวตนของคนในระบบสนใจ วิธีการค้นหาจะแตกต่างกันไปตามการกำหนดแบบจำลองของคนของแต่ละระบบ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า แบบจำลองของคนคือ ต้นแบบหรือข้อมูลที่มีลักษณะเฉพาะที่สื่อถึงคนในแต่ละระบบ แบบจำลองของคนที่ดีควรมีลักษณะเฉพาะ เพื่อให้ค้นหาได้ง่ายและไม่ให้เกิดความสับสนกับข้อมูลในส่วนอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการติดตามคนด้วย ตัวอย่างแบบจำลองของคนที่เป็นที่นิยมในงานการติดตามคน โดยเฉพาะอย่างยิ่งบนหุ่นยนต์ มีดังนี้

#### แบบจำลองจากข้อมูลภาพ

แบบจำลองนี้จะรับข้อมูลที่เป็นภาพ และวิธีการที่ง่ายและตรงไปตรงมาที่สุดวิธีหนึ่งคือการนำข้อมูลภาพมาพิจารณาที่อยู่ในบริเวณต่างๆ ระบบจะค้นหาบริเวณที่มีกลุ่มของสีตรงกับสีเสื้อผ้าของคนในระบบต้องการติดตาม การแทนค่าสีอาจใช้เพียงสีเดียวหรือใช้ histogram ในกรณีที่เสื้อประกอบด้วยหลายสี แบบจำลองชนิดนี้มักเกิดความสับสนและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย เช่นมีคนสวมเสื้อแบบและสีเดียวกัน หรือลักษณะของเสื้อด้านหน้าและด้านหลังมีความแตกต่างกัน

แบบจำลองจากข้อมูลภาพยังสามารถใช้การค้นหาจุดสังเกต (Features) อื่นในภาพที่อาจเป็นสมบัติเฉพาะของคนที่ต้องการติดตาม เช่นลายของเสื้อ (SIFT [36]) หรือเป็นจุดสังเกตทั่วไปในภาพได้แก่ ตำแหน่งของเส้น มุม จุดตัด จากนั้นการเคลื่อนที่ของจุดเหล่านี้สามารถใช้แทนการเคลื่อนที่ของคนได้ (Optical flow) ข้อเสียของวิธีนี้คือ จะไม่สามารถทำงานได้หากไม่มีจุดสังเกตหรือมีจุดสังเกตน้อย ซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีเช่น เสื้อไม่มีลวดลาย หรือเกิดการบังหรือเดินตัดบริเวณที่มีจุดสังเกต ทำให้จุดหายไป

การวิเคราะห์จากข้อมูลภาพอีกแบบหนึ่ง คือการค้นหาใบหน้าของคนปรากฏในภาพ โดยอาศัยหลักการค้นหาจุดสังเกตของใบหน้าเพื่อระบุตำแหน่งและขนาดของใบหน้าที่เจอรวมถึงการระบุตัวตนของคนที่เจอจากความแตกต่างของจุดสังเกตที่กล้องมองเห็น วิธีการนี้ไม่นิยมใช้เป็นวิธีหลักในการติดตามคนเนื่องจากการค้นหา

ใบหน้าพร้อมการระบุตัวตนยังมีข้อผิดพลาดมาก วิธีการนี้จึงมักถูกใช้เสริมกับแบบจำลองแบบอื่นเพื่อยืนยันว่าสิ่งที่กำลังติดตามอยู่เป็นความจริง (การที่มีหน้าคน) [37]

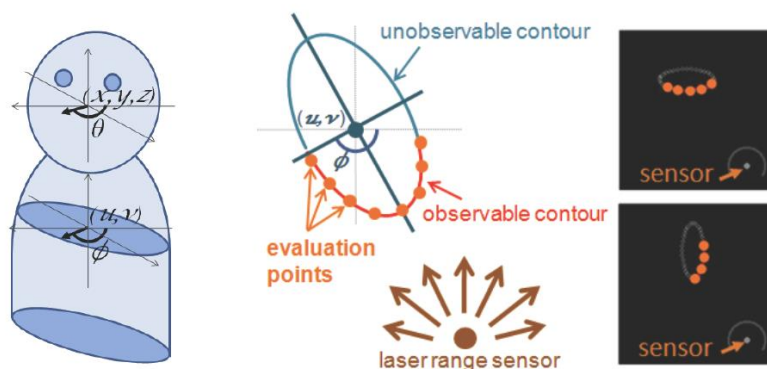
แม้ว่าข้อมูลภาพจะสามารถนำมาแปลความหมายได้หลายแบบ แต่ทุกแบบมีข้อเสียเปรียบคือหากวัตถุหรือคน หันด้านที่ไม่มีจุดสังเกตเดิมเข้ากล้อง จะทำให้การทำงานผิดพลาด ซึ่งในการใช้งานจริงกับหุ่นยนต์ การหันหน้าหรือ หันวัตถุบางชนิดเข้าหากกล้องตลอดเวลา เป็นสภาพที่มีข้อจำกัดมากเกินไป นอกจากนี้แบบจำลองที่อาศัยข้อมูลภาพ อย่างเดียวเช่นนี้จะไม่เสถียรเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแสง



รูปที่ 2.1 แสดงการติดตามคนจากสี่ของสี่ [14]

### แบบจำลองส่วนลำตัวของคน

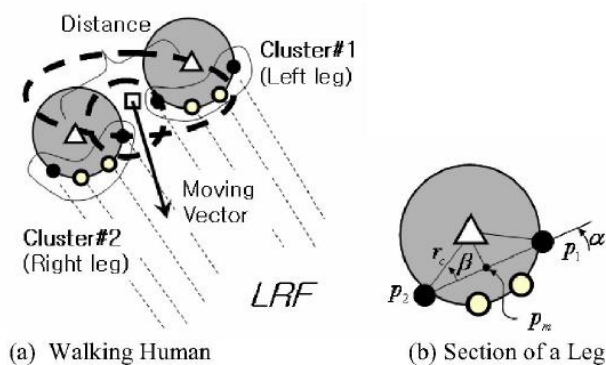
แบบจำลองของคนส่วนลำตัวมักจะใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์วัดระยะความลึกเช่น Laser range finder ติดตั้งไว้ที่ ความสูงระดับลำตัวหรือเอว เพื่อหาข้อมูลที่มีลักษณะคล้ายวงกลมหรือวงรี ซึ่งเป็นรูปร่างของภาพตัดขวางของช่วง ลำตัว แบบจำลองนี้เป็นที่นิยมเนื่องจากไม่เกิดปัญหาเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแสง เนื่องจากข้อมูลจาก LRF เป็นแสงเลเซอร์ที่ได้รับผลกระทบจากแสงน้อยเมื่อเทียบกับการใช้กล้องวิดีโอ และเป็นข้อมูลที่ค่อนข้างจะ ครอบคลุมบริเวณกว้าง แต่ความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นเช่น ในกรณีที่เจอวัตถุที่มีรูปร่างคล้าย หรือมีวัตถุอื่นมาบัง เนื่องจากข้อมูลจาก LRF เป็นข้อมูลความลึกบนระนาบความสูงเดียว ไม่มีข้อมูลอื่นมาทดแทน



รูปที่ 2.2 แบบจำลองของคนจากการติดตั้ง LRF ที่ระดับลำตัวของคน [13]

### แบบจำลองขาคู่

จากปัญหาการใช้แบบจำลองของคนที่มีรูปร่างเหมือนลำตัวคน ทำให้มีการปรับปรุงแบบจำลองโดยยังคงใช้ข้อมูลเลเซอร์แต่เปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งเป็นที่ความสูงของช่วงขา ทำให้ได้ข้อมูลที่มีลักษณะเป็นวงกลม 2 วงแทนขา 2 ข้างของคน ซึ่งเป็นแบบจำลองของคนที่มีความเฉพาะตัวมากกว่าส่วนลำตัว ระบบจะต้องเห็นขา 2 ข้างพร้อมกัน จึงจะถือว่าเป็นข้อมูลของขาคนจริงๆ ทำให้แบบจำลองนี้เป็นที่นิยมเช่นกัน แต่ปัญหาที่เกิดขึ้นคล้ายกับปัญหาของการใช้ลำตัว เนื่องจากข้อมูลขามีขนาดเล็ก อาจเกิดการบังโดยวัตถุอื่น หรือแม้กระทั่งบังด้วยขาอีกข้าง



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของคนที่ประกอบด้วยขาคน 2 ข้าง [3]

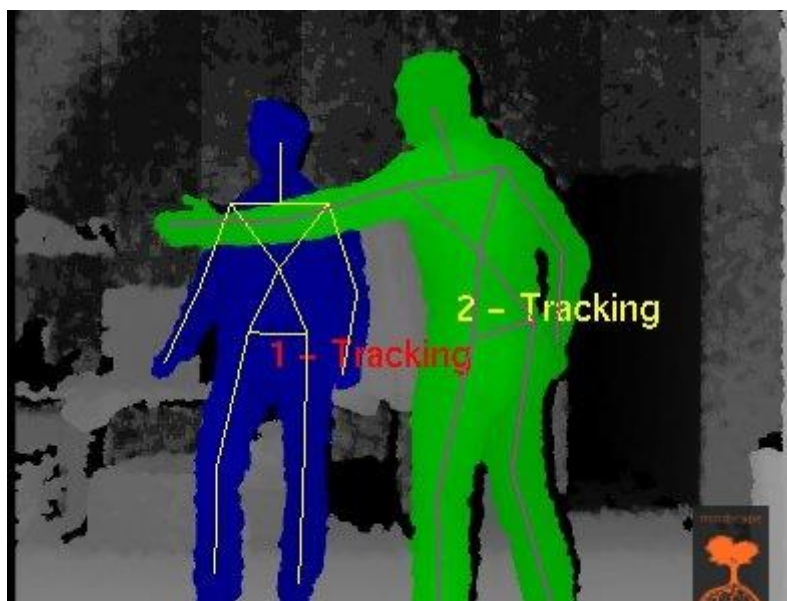
### แบบจำลองโครงร่างกาย

แบบจำลองชนิดนี้มีความเฉพาะตัวมากที่สุด เนื่องจากแบบจำลองนี้มีรูปร่างเป็นโครงร่างทั้งร่างกายของคน ซึ่งสามารถแยกแยะออกจากวัตถุอื่นได้ง่ายจึงเกิดความผิดพลาดน้อยกว่ากับวัตถุอื่นได้ยาก แต่อุปกรณ์ที่นำมาใช้จำเป็นต้องมองเห็นข้อมูลครอบคลุมทั้งร่างกาย เช่น Kinect หรือกล้องต่างๆ ซึ่งการติดตั้งอุปกรณ์เหล่านี้เพื่อให้มองเห็นคนทั้งตัว จะต้องติดตั้งที่ระยะห่างจากคนระดับหนึ่ง จะไม่สะดวกนักที่จะนำแบบจำลองนี้มาใช้ในกรณีที่มีการติดเซนเซอร์ไว้ที่หุ่นยนต์ การติดตั้งเซนเซอร์ให้ประจำอยู่ตามจุดต่างๆรอบๆบริเวณที่คนอยู่อาจเป็นวิธีแก้ปัญหานี้ แต่จะส่งผลให้เกิดการจำกัดพื้นที่ที่คนจะถูกติดตาม ปัญหาที่สามารถเกิดขึ้นอีกอย่างหนึ่งคือหากมุมมองของ

เซนเซอร์ที่เห็นคนเปลี่ยน เช่นจากด้านหน้ากลายเป็นด้านข้าง อาจทำให้ไม่สามารถค้นหาคนได้ เพราะมองเห็นร่างกายไม่ครบทุกส่วน



รูปที่ 2.4 แบบจำลองของคนที่เป็นโครงร่างกายจากภาพสีของกล้อง [33]



รูปที่ 2.5 แบบจำลองของคนที่เป็นโครงร่างกายจาก Kinect

แบบจำลองที่ยกตัวอย่างมาหลายชนิด มีความเหมาะสมด้านลักษณะของการติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับหุ่นยนต์เช่นแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลภาพหรือข้อมูลเลเซอร์ เนื่องจากไม่จำเป็นที่อุปกรณ์จะต้องครอบคลุมบริเวณกว้าง แต่อุปกรณ์แต่ละชนิดต่างก็มีปัญหาที่แตกต่างกันไปตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น จึงมีหลายงานที่นำเซนเซอร์ต่างชนิด(รวมถึงแบบจำลองของคนหลายแบบ) มาทำงานร่วมกัน ซึ่งเซนเซอร์จะทำงานทดแทนเซนเซอร์อีกชนิดหนึ่งเมื่อเกิดปัญหา เช่น ใช้ LRF ร่วมกับกล้อง เป็นต้น

## 2.2 การประมาณค่าสถานะของคน

การติดตามคนในระบบหุ่นยนต์นั้น อาศัยการรับค่าจากเซนเซอร์มาประมวลผลเป็นหลัก ค่าการวัดที่ได้จากเซนเซอร์ไม่สามารถนำมาใช้แทนสถานะของคนได้โดยตรง เนื่องจากเซนเซอร์ย่อมมีความคลาดเคลื่อนในตัวเองทำให้ค่าที่วัดได้มีความผิดพลาด รวมถึงความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการประมาณการเปลี่ยนแปลงของสถานะคน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสถานะไม่สามารถอธิบายในรูปของสมการที่ไม่มีมีความผิดพลาดเลย จึงจำเป็นที่จะต้องมีการประมาณค่าสถานะกับการประมาณค่าสถานะของคน โดยที่มีการพิจารณาความคลาดเคลื่อนต่างๆที่มีโอกาสเกิดขึ้นด้วย

### การประมาณค่าสถานะของคนด้วย Kalman filter

Kalman filter [38] เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ประมาณค่าสถานะของระบบแบบ dynamic (ระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตามกาลเวลา) โดยมีสมมุติฐานว่าสถานะของระบบ ณ เวลาปัจจุบัน จะขึ้นอยู่กับสถานะของระบบ ณ เวลาก่อนหน้า(สถานะมีการเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้น) จุดมุ่งหมายของ Kalman filter คือประมาณสถานะของระบบจากสถานะ ณ เวลาก่อนหน้า, ค่าที่วัดได้จริง รวมทั้งมีการพิจารณาความคลาดเคลื่อนที่มีโอกาสเกิดขึ้นได้ในระบบ [39] โดยความคลาดเคลื่อนของสถานะที่ถูกนำมาพิจารณาจะอยู่ในรูปของ Gaussian noise

Kalman filter สามารถนำมาใช้ประมาณค่าสถานะของการติดตามคนได้ เนื่องจากการติดตามคนถือเป็นระบบแบบ dynamic ระบบหนึ่ง สถานะของระบบซึ่งอาจจะเป็นตำแหน่งหรือความเร็วของคนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาเมื่อคนมีการเคลื่อนที่ไปมา และขึ้นอยู่กับสถานะก่อนหน้า เนื่องจากคนมีการเคลื่อนที่ต่อเนื่อง สถานะไม่สามารถระโดดไปมาได้ ในการนำ Kalman filter มาใช้กับการติดตามคน จึงมักจะกำหนดให้ข้อมูลนำเข้า (Input) เป็นตำแหน่งของคนทีวัดได้จากเซนเซอร์ และข้อมูลขาออก (Output) เป็นตำแหน่งและความเร็วของคน

Kalman filter ประกอบไปด้วยการทำงาน 2 ขั้นตอน คือ Time Update และ Measurement Update ทำงานในลักษณะวนซ้ำไปเรื่อยๆ เพื่อประมาณค่า  $x_k$  ซึ่งเป็นสถานะจริงของระบบที่ไม่ทราบค่าและไม่สามารถบอกค่าจริงๆในธรรมชาติได้ ด้วยการประมาณค่า  $\hat{x}_k$  ให้ใกล้เคียง  $x_k$  มากที่สุด กำหนดให้  $x_k$  แทนสถานะของระบบที่เวลา  $k$ ,  $z_k$  แทนค่าที่ได้จากการวัดจริงที่เวลา  $k$  โดยมี Process model ซึ่งอธิบายการเปลี่ยนแปลงสถานะของระบบเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลง คือ

$$x_k = Fx_{k-1} + \omega_{k-1}$$

และมี measurement model ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสถานะของระบบกับค่าที่วัดได้จริง ที่เวลา  $k$  ดังนี้

$$z_k = Hx_k + v_k$$

โดย  $F$  เป็นเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $x_k$  และ  $x_{k-1}$ ,  $\omega_k \sim N(0, Q)$  เป็น process noise,  $v_k \sim N(0, R)$  เป็น measurement noise ที่มีค่าความแปรปรวนร่วมเป็น  $Q$  และ  $R$  ตามลำดับ,  $H$  แทนเมทริกซ์แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $x_k$  และ  $Z_k$

ขั้นตอน Time Update เป็นการนำค่า  $\hat{x}_k$  ด้วยสถานะจากรอบที่แล้ว ( $\hat{x}_{k-1}$ ) ซึ่งหาได้จาก

$$\hat{x}_k^- = F\hat{x}_{k-1}$$

$$P_k^- = FP_{k-1}F^T + Q$$

จากนั้น Measurement update เป็นการปรับแก้ค่าที่คำนวณในขั้นตอน Time update ด้วยค่าที่วัดได้จริง ซึ่งหาได้จาก

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H\hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H)P_k^-$$

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วย 2 ขั้นตอนข้างต้นคือ การแทนสถานะของระบบด้วยการกระจายเชิงความน่าจะเป็น (Probability distribution) ที่มีการกระจายตัวแบบปรกติ (Normal distribution) มีค่าเฉลี่ย  $\hat{x}$  และมีค่าความแปรปรวนร่วมเป็น  $P$

### 2.3 ปัญหาของการติดตามคน

ในการติดตามคนต้องพิจารณาปัญหาต่างๆ เช่น

#### ปัญหาการเลือกแบบจำลองของคน

การอธิบายลักษณะของคนจากข้อมูลเซนเซอร์มีหลายรูปแบบ ตามที่เสนอไปในหัวข้อแบบจำลองของคน เช่น แบบจำลองจากข้อมูลภาพ ลำตัว ขา คู่ โครงร่างกาย ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีเหมาะสมกับระบบที่แตกต่างกันไป ไม่ว่าจะเป็น ชนิดของเซนเซอร์ที่เลือกใช้ หรือ ลักษณะการติดตั้ง เป็นต้น

#### ปัญหาการโดนบัง(Occlusion)

ในสถานการณ์จริงของการติดตามคน มีความเป็นไปได้ที่ในบริเวณพื้นที่ที่เซนเซอร์ครอบคลุม จะมีผู้คนเดินไปมาหรือมีวัตถุต่างๆปรากฏอยู่ด้วย ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะเกิดการบังคนที่ระบบกำลังติดตาม ทำให้ข้อมูลของคนนั้นหายไปแล้วอาจทำให้ไม่สามารถติดตามคนต่อได้ การแก้ปัญหาคือการติดตามคนเมื่อเกิดการโดนบังอาจทำได้โดยมี

สมมุติฐานว่า ณ ช่วงที่โดนบ้ง คนจะมีการเคลื่อนที่ในรูปแบบเดิม การนำสถานะความเร็วของคนในระบบติดตามมา ใช้ทำนายตำแหน่งที่คนจะเคลื่อนที่ไปในเวลาที่โดนบ้ง อาจเป็นวิธีที่สามารถทำให้ระบบยังคงทำงานต่อไปได้



## บทที่ 3

### การนำทางหุ่นยนต์

#### 3.1 ความหมายและแนวคิดพื้นฐานของการนำทางหุ่นยนต์

การนำทางหุ่นยนต์ (Robot navigation) เป็นหนึ่งในรูปแบบของการวางแผนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นปัญหาของหารูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่งให้พ้นจากสถานการณ์ที่มีความอันตรายเช่นการชน [40] หรือสถานะที่ไม่ปลอดภัย เช่น จากอุณหภูมิต่ำ เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วการนำหุ่นยนต์ไปใช้งานในสิ่งแวดล้อมปกติ (ห้องโถง อาคาร หรือทางเดิน ซึ่งจะมีความปลอดภัยกว่าในโรงงานอุตสาหกรรม โรงเก็บของ หรืออาคารซากปรักหักพัง) มักจะสนใจการนำทางให้ไม่เกิดการชนเท่านั้น

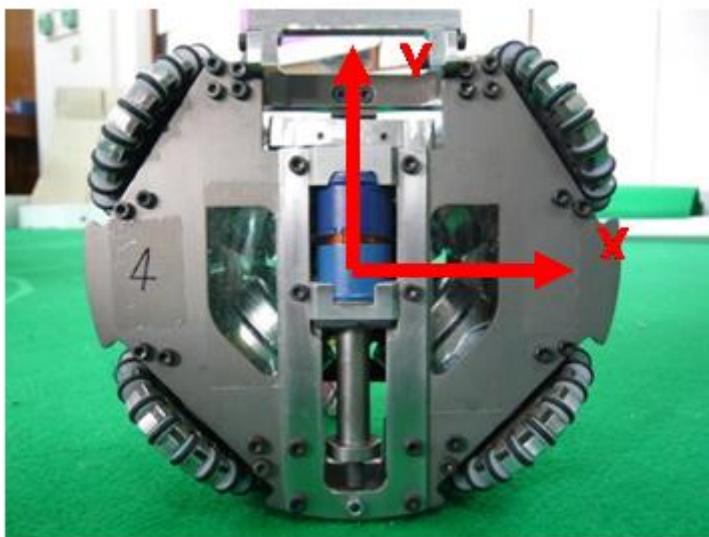
แนวคิดในการสั่งการหุ่นยนต์คือ การกำหนดตำแหน่งจุดหมายและให้หุ่นยนต์เคลื่อนไปยังตำแหน่งนั้น โดยใช้พิกัดตำแหน่งในระนาบ 2 มิติ รวมถึงอาจใช้ทิศทางทางการวางตัวของหุ่นยนต์มาเป็นสถานะ แต่หุ่นยนต์ไม่สามารถเข้าใจการสั่งให้เคลื่อนที่ด้วยพิกัด ดังนั้นการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งและทิศทางเป้าหมายจึงต้องคำนวณให้อยู่ในรูปความเร็วในการเคลื่อนที่เพื่อนำไปสั่งล้อ(มอเตอร์ของล้อแต่ละข้าง) และหุ่นยนต์จะนำไปแปลงเป็นความเร็วในการหมุนของล้ออีกทีหนึ่ง แต่ในหุ่นยนต์บางรุ่นอาจต้องสั่งการด้วยความเร็วในการหมุนล้อโดยตรงเลย ดังนั้นการนำทางหุ่นยนต์จึงต้องพิจารณาใน 2 ประเด็น คือ วิธีการกำหนดสถานะเป้าหมาย และวิธีการสั่งการไปยังหุ่นยนต์

#### 3.2 ผลของรูปแบบการวางตัวของล้อที่มีต่อการนำทางหุ่นยนต์

หุ่นยนต์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามรูปแบบการวางตัวของล้อ ได้แก่ Holonomic และ Nonholonomic ซึ่งมีความแตกต่างกันดังนี้

##### หุ่นยนต์แบบ Holonomic

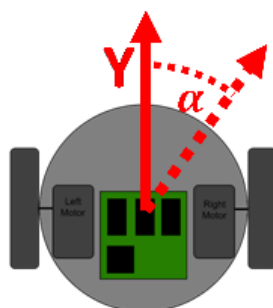
ระบบที่จะเป็น Holonomic ได้นั้น ต้องเป็นระบบที่มีองศาอิสระที่ควบคุมได้ (Controllable degrees of freedom) จำนวนเท่ากับองศาอิสระทั้งหมด (Total degrees of freedom) เช่น หุ่นยนต์ที่มีล้อเป็นแบบเคลื่อนได้รอบทิศทาง (Omni-directional drive robot) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้อิสระทั้งตามแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  และมี Controllable degrees of freedom เท่ากับ Total degrees of freedom (2 แกน คือ แกน  $x$  และ แกน  $y$ ) (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 แสดงแกนที่หุ่นยนต์แบบ Holonomic สามารถเคลื่อนที่ไปได้

#### หุ่นยนต์แบบ Nonholonomic

ในทางตรงกันข้าม ระบบแบบ Nonholonomic คือระบบที่มี Controllable degrees of freedom น้อยกว่า Total degrees of freedom เช่น รถยนต์ หรือ หุ่นยนต์แบบ 2 ล้อขับเคลื่อน (Differential drive robot) ที่มี Total degrees of freedom เท่ากับ 3 ได้แก่ตำแหน่ง 2 แกน และทิศทางการวางตัวอีกหนึ่งแกน แต่มี Controllable degrees of freedom เป็น 2 ได้แก่ตำแหน่งในแกนเดินหน้าถอยหลัง และการเลี้ยว ซึ่งจะทำให้ระบบแบบนี้เคลื่อนที่ไปในทุกทิศทางได้ยาก (ในกรณีที่ระบบไม่มีการลื่นหรือไถล)[41] (รูปที่ 3.2) ตัวอย่างของการเคลื่อนที่ที่อาจดูได้จาก รถยนต์ซึ่งมีการเคลื่อนที่ได้ด้วยการเดินหน้าและถอยหลัง การเคลื่อนที่ไปด้านข้างไม่อาจทำได้ง่ายโดยการเลี้ยว แต่ต้องทำการหมุนตัวรถเพื่อให้รถวางตัวตามแนวทิศทางที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 แสดงแกนที่หุ่นยนต์แบบ Nonholonomic ที่มีระบบขับเคลื่อนแบบ Differential drive สามารถเคลื่อนที่ไปได้

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า รูปแบบการวางล้อที่แตกต่างกันส่งผลต่อการเคลื่อนที่ที่ต่างกันออกไป กล่าวคือ หุ่นยนต์แบบ Holonomic สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางใต้ง่ายกว่าแบบ Nonholonomic ซึ่งต้องมีการเลี้ยว เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการได้ ดังนั้นหากหุ่นยนต์ที่ใช้เป็นแบบ Nonholonomic ต้องคำนึงถึงการสั่งให้หุ่นยนต์หันไปในทิศทางที่ต้องการ นอกเหนือจากการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายด้วย

### 3.3 ความแตกต่างระหว่างหุ่นยนต์เดินข้างกับเดินตาม

การเคลื่อนที่ไปกับคนของหุ่นยนต์ โดยที่สถานะของคนเป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่ให้หุ่นยนต์มี 2 รูปแบบ คือ การเดินข้างและเดินตามคน มีความแตกต่างกันที่ชัดเจน คือ ตำแหน่งระหว่างหุ่นยนต์และคน ตำแหน่งของหุ่นยนต์เมื่อเดินเคียงข้างคน จะอยู่ข้างคน ส่วนตำแหน่งของหุ่นยนต์เมื่อเดินตามคน จะอยู่ข้างหลังคน ตำแหน่งเป้าหมายของหุ่นยนต์ที่แตกต่างกันไปจึงทำให้การกำหนดสถานะเป้าหมายมีความแตกต่างเช่นกัน

ความแตกต่างอีกประการหนึ่งคือทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ หุ่นยนต์เดินตามมีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งของคน ส่วนการเดินเคียงข้างคน หุ่นยนต์จะมีทิศทางการเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งข้างคน หากต้องการให้หุ่นยนต์หันหน้าไปทิศทางเดียวกันกับคนด้วย จำเป็นที่จะต้องมีการกำหนดพฤติกรรมของหุ่นยนต์เพิ่มจากแนวคิดนี้

### 3.4 การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Obstacle avoidance)

ในสภาพแวดล้อมจริงนั้น บริเวณที่หุ่นยนต์ต้องไปทำงานร่วมกับคน ไม่จำเป็นจะต้องเป็นพื้นที่โล่งเสมอไป และมีความเป็นไปได้ที่จะมีผู้คนเดินผ่านและมีสิ่งของตามจุดต่างๆ ซึ่งถ้าหากหุ่นยนต์ไม่สามารถรับรู้ได้ว่า พื้นที่รอบตัวมีสิ่งกีดขวางหรือไม่ อาจทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปชน และส่งผลให้ทำงานผิดพลาดได้ หุ่นยนต์จึงต้องสามารถค้นหาและระบุสิ่งกีดขวางรอบตัว เพื่อนำไปสู่การนำทางหุ่นยนต์ที่มีประสิทธิภาพ

ดังนั้น สำหรับหุ่นยนต์ที่มีเป้าหมายหลักคือการเคลื่อนที่ไปกับคน การหลบหลีกสิ่งกีดขวางจึงเป็นการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเพื่อตอบสนองต่อการมองเห็นสิ่งกีดขวาง ไม่ใช่การเคลื่อนที่หลัก เช่นเดียวกับคนที่มีการเคลื่อนที่หลบเมื่อเจอสิ่งกีดขวางในขณะที่กำลังทำสิ่งต่างๆอยู่

แนวคิดพื้นฐานของการเคลื่อนที่ที่มีการหลบหลีกสิ่งกีดขวางไปด้วย คือ หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมาย ในขณะที่เดียวกันหุ่นยนต์ก็พยายามเคลื่อนที่ออกห่างจากสิ่งกีดขวาง วิธีการหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่สะท้อนแนวคิดพื้นฐานนี้ได้แก่ การใช้สนามศักย์หรือสนามแรง (Potential field, Force field) [40-41] สนามศักย์หรือสนามแรงเป็นการแทนทิศทางและความเร็วที่จะสั่งหุ่นยนต์ด้วยแรงจำลอง (Artificial force) ซึ่งแรงนี้เป็นผลลัพธ์ของฟังก์ชันที่มีความสัมพันธ์กับความเร็วและระยะห่างของวัตถุที่อยู่รอบๆหุ่นยนต์ แรงจำลองมีทิศทางเข้าสู่จุดหมาย และทิศทางออกจากสิ่งกีดขวาง ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ณ เวลาหนึ่งๆ ได้จากการ

นำขนาดและทิศทางของเวกเตอร์แรงลัพธ์ของแรงจำลองทั้งหมดไปแปลงเป็นคำสั่ง แนวคิดนี้ได้รับความนิยมมาก  
เนื่องจากความไม่ซับซ้อนในการคำนวณ

## บทที่ 4

### ระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงส่วนหลักที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือระบบนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน ซึ่งประกอบด้วยวิธีการติดตามคน และวิธีการนำทางหุ่นยนต์

#### 4.1 ความต้องการของระบบ (Functional requirement)

##### ระบบพื้นฐานของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ที่ใช้เป็นแบบ Nonholonomic มีการขับเคลื่อนแบบ differential drive 2 ล้อ คำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่จะมี 2 รูปแบบ คือความเร็วในการเคลื่อนและความเร็วในการหมุน ความเร็วเป็นความเร็วของทั้ง 2 ล้อ

##### การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ต้องสามารถเคลื่อนที่ไปกับคนทั้งเดินตามคนและเดินเคียงข้างไปกับคนได้ นอกจากนี้หุ่นยนต์ยังสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้

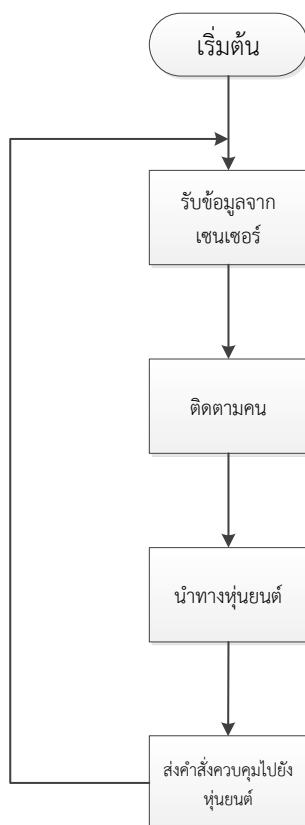
##### อุปกรณ์รับรู้ที่ใช้

อุปกรณ์รับรู้ (Sensor) ที่ใช้คือ Kinect

##### สิ่งแวดล้อมที่หุ่นยนต์ทำงาน

บนพื้นที่หุ่นยนต์ทำงาน ต้องเป็นพื้นเรียบ ไม่มีสิ่งของวางระเกะระกะบนพื้น

## 4.2 ภาพรวมของระบบ



รูปที่ 4.1 ผังงานแสดงภาพรวมของระบบ

ระบบมีภาพรวมและลำดับการทำงานตามรูปที่ 1.1 โดยประกอบด้วย 4 ส่วนการทำงานย่อย ได้แก่ คือส่วนรับข้อมูลจากเซนเซอร์ซึ่งเป็นข้อมูลนำเข้าของระบบ นำมาแปลงและสกัด features ต่างๆ, ส่วนติดตามคนจะนำ feature มาค้นหาและประมาณค่าสถานะของคนด้วย Kalman filter, ส่วนนำทางหุ่นยนต์จะนำสถานะของคน, หุ่นยนต์รวมถึงสภาพแวดล้อมมาคำนวณเป็นคำสั่งในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และส่วนส่งคำสั่งไปยังหุ่นยนต์ที่จะสั่งให้มอเตอร์ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามที่ต้องการ

การติดตามคนและการนำทางหุ่นยนต์จะมีการทำงานใน 2 รูปแบบตามลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้น คือ เดินข้างคนและเดินตามคน วิทยานิพนธ์นี้เน้นพัฒนาวิธีติดตามคนเพื่อให้หุ่นยนต์เดินข้างโดยใช้ Kinect ส่วนการเดินตามคนจะเป็นวิธีการทั่วไปที่เสนอในงานวิจัยอื่นๆโดยเซนเซอร์ชนิดอื่น เนื่องจาก Kinect ที่ใช้สำหรับการเดินข้างถูกติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ไม่สามารถรับรู้ข้อมูลได้ครอบคลุมเพียงพอสำหรับการเดินตามคน

### 4.3 การติดตามคน

#### 4.3.1 แนวคิด

การติดตามคนในงานวิจัยอื่นๆ ใช้อุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์มาเป็นอุปกรณ์ที่ใช้บอกตำแหน่งของคน ด้วยการวางไว้ที่ความสูงระดับต่างๆ เพื่อให้เลเซอร์ตัดขวางและได้ข้อมูลจากส่วนต่างๆของร่างกาย ซึ่งการใช้แบบจำลองของคนและอุปกรณ์เช่นนี้อาจเกิดข้อผิดพลาดเนื่องจากเลเซอร์ที่ปล่อยมีเพียงระนาบเดียว และลักษณะข้อมูลของร่างกายของคนที่ได้มานั้นอาจมีความคล้ายคลึงกับวัตถุอื่นได้ง่าย

จากปัญหาข้างต้น จึงนำไปสู่แนวคิด 2 ประเด็น ประเด็นแรกคือการเลือกใช้เซนเซอร์ที่สามารถให้ข้อมูลได้มากกว่าอุปกรณ์วัดระยะด้วยเลเซอร์ การให้ข้อมูลได้มากกว่าในที่นี้คือการให้ข้อมูลที่ครอบคลุมบริเวณกว้างกว่าหรือการที่ให้ข้อมูลความลึกจากความสูงหลายระดับ และอีกประเด็นคือการเลือกแบบจำลองของคนที่มีความเฉพาะตัว ซึ่งจะทำให้การค้นหาค้นหาคนจากข้อมูลเซนเซอร์มีความแม่นยำและเกิดความผิดพลาดน้อย

สำหรับการเดินเคียงข้างคนของหุ่นยนต์นั้น ผลลัพธ์จากการติดตามคนที่ระบบต้องนำไปใช้คือ พิกัดตำแหน่งของคนบนระนาบ  $xy$  และทิศทางที่คนหันไป เพื่อส่งไปยังส่วนการนำทางหุ่นยนต์หาตำแหน่งเป้าหมายของหุ่นยนต์ และแปลงเป็นคำสั่งอีกทอดหนึ่ง

#### 4.3.2 อุปกรณ์

##### Microsoft Kinect for Xbox 360 (Kinect)

Kinect [28] ข้อดีของ Kinect คือ สามารถให้ข้อมูลทั้งภาพสี (RGB image) และภาพความลึก (Depth image) เพราะอุปกรณ์ทั่วไปในท้องตลาดสามารถให้ข้อมูลเพียงอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้ Kinect ยังเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาต่ำกว่าอุปกรณ์ที่มีสามารถรับรู้ความลึกอื่นๆ เช่น Hokuyo LRF [44] และ SICK LRF [45] อีกด้วย แต่ข้อจำกัดของ Kinect เมื่อเทียบกับอุปกรณ์รับรู้ความลึกอื่นๆ คือ ความกว้างของมุมมองที่แคบกว่า และไม่สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีแสงแดดจัดได้ วิธีการที่จัดการกับข้อจำกัดดังกล่าว คือ การใช้ Kinect เพื่อรับข้อมูลจากบริเวณเฉพาะเท่านั้น



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ Kinect

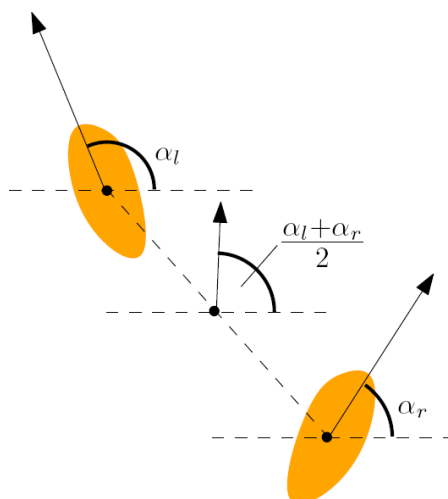


รูปที่ 4.3 (ซ้าย) ภาพแสดงความลึกที่ได้จาก Kinect (ขวา) ภาพสีจาก Kinect

#### 4.3.3 แบบจำลองของคน

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอแบบจำลองของคน ประกอบด้วย เท้าของคน 2 ข้างที่มีลักษณะคล้ายวงรี จากการพิจารณาส่วนต่างๆของร่างกายคนพบว่า เท้าของคนมีลักษณะที่ค่อนข้างเฉพาะ เช่น หากมองจากมุมมองด้านบน จะเห็นว่าเท้ามีรูปร่างคล้ายวงรี ทิศทางการวางตัวของเท้าสามารถบ่งบอกถึงทิศทางการเดินของคนได้อย่างคร่าวๆ ด้วยการใช้ค่ากึ่งกลางของการวางตัวของเท้าสองข้าง นอกจากนี้ตำแหน่งของเท้าในขณะที่เดินนั้นแยกออกจากส่วนอื่นของร่างกายค่อนข้างชัดเจน เนื่องจากเท้าจะวางตัวตั้งฉากกับร่างกายของคน

สถานะของคนที่ได้จากแบบจำลองของคนนี้ได้แก่ ตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ โดยตำแหน่งของคนจะหาได้จากจุดกึ่งกลางระหว่างจุด centroid ของเท้าสองข้าง และทิศทางการเคลื่อนที่ของคนคำนวณได้จากค่ามุมกึ่งกลางระหว่างมุมของทิศทางของเท้าทั้งสองข้างเช่นกัน



รูปที่ 4.4 แสดงแบบจำลองของคนจากข้อมูลเท้า และการหาสถานะของคนจากสถานะของเท้าทั้ง 2 ข้าง



#### 4.3.4 ขั้นตอนการติดตามคน

Kinect จะถูกติดตั้งให้ชี้ลงที่พื้นข้างๆหุ่น ซึ่งเป็นบริเวณที่ต้องการให้คนอยู่แล้วทำการรับข้อมูลมาประมวลผล ขั้นตอนการติดตามคนโดยอาศัยแบบจำลองข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

##### 1. รับ depth image

ข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการติดตามเท้าในวิธีนี้คือ Depth image จาก Kinect และนำค่าจากพิกเซล ที่  $(i, j)$  ของ Depth image (โดย  $i$  เป็นพิกัดตามแกน  $x$  ของภาพและ  $j$  เป็นพิกัดตามแกน  $y$  ของภาพ) ซึ่งเป็นระยะทางของพิกเซลนั้นมาแปลงเป็นพิกัดใน 3 มิติ ตามสมการดังนี้

$$P3D.x = (i - C_x) * z(i, j) / f_{depthx}$$

$$P3D.y = (j - C_y) * z(i, j) / f_{depthy}$$

$$P3D.z = z(i, j)$$

โดย  $C_x$  และ  $C_y$  คือพิกัดกึ่งกลางภาพตามแกน  $x$  และแกน  $y$  ส่วน  $f_{depthx}$  และ  $f_{depthy}$  คือระยะโฟกัสตามแกน  $x$  และแกน  $y$  ซึ่งทั้ง 4 ค่าเป็น intrinsic parameter ของกล้อง infrared ของ Kinect ที่ได้จากการทำ calibration[46] (รูปที่ 4.8 แสดงภาพสีและภาพความลึกจาก Kinect เมื่อส่องเห็นพื้นและเท้าคน)

สำหรับการ calibration ทำได้โดยใช้ Kinect ถ่าย depth image ของลายตารางหมากรุก(วิทยานิพนธ์นี้ใช้ขนาด  $9 \times 7$  ช่อง)ในมุมมองที่แตกต่างกันอย่างน้อย 10 รูป โดยที่ Kinect ต้องอยู่กับที่ จากนั้นนำพิกัดของจุดขอบของแผ่นตารางหมากรุกในแต่ละภาพมาแก้สมการที่บรรยาย Camera model ด้วยวิธีการ least square เพื่อที่จะได้ผลลัพธ์คือ เมตริกซ์ของ intrinsic parameter



รูปที่ 4.5 แสดง RGB image และ Depth image ของตารางหมากรุกที่ได้จาก Kinect

##### 2. การหาระนาบพื้น

เนื่องจากการติดตามเท้ามีสมมุติฐานว่า บริเวณพื้นที่ที่คนเดินไปมา เป็นพื้นระนาบเรียบไม่เอียง การหาลักษณะการวางตัวของระนาบพื้นจึงมีประโยชน์ต่อการหาเท้า โดยพื้นจะถูกใช้เป็นฐานล่าง ขั้นตอนนี้จะทำครั้งเดียวก่อนที่ระบบจะเริ่มทำงาน โดยบริเวณที่ Kinect ส่องต้องเป็นพื้นว่าง จากนั้นนำ depth image

แปลงเป็นพิกัด 3 มิติตามขั้นตอนที่แล้ว และนำไปผ่านกระบวนการ Principal component analysis (PCA) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้หาการวางตัวของระบบพิกัดใหม่ที่สามารถอธิบายกลุ่มข้อมูลได้ด้วยองค์ประกอบที่ไม่ขึ้นต่อกัน ผลลัพธ์ของ PCA คือ Eigen vector ที่วางตัวตามแนวแกนของระบบพิกัดใหม่

### 3. การเลือกข้อมูลที่น่าจะเป็นเท้า

การวางตัวของระนาบพื้นสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์การเลือกข้อมูลเท้าได้ โดยปกติเวลาคนเดินจะมีการยกเท้าสูงจากพื้นที่มีความสูงระดับหนึ่ง ดังนั้นข้อมูลที่จะถูกเลือกในขั้นตอนนี้ คือข้อมูลที่วางตัวอยู่สูงกว่าระนาบพื้นในช่วงความสูงที่กำหนดไว้

### 4. การ project ข้อมูลลงภาพ

ข้อมูลที่ถูกเลือกมานั้นอยู่ในรูปของพิกัด 3 มิติ จึงต้องมีการแปลงรูปแบบข้อมูลเพื่อให้เกิดความง่ายต่อการทำงานในขั้นถัดๆไป โดยขั้นแรกข้อมูลจะถูกแปลง frame ให้เป็นการมองจากด้านบน (รูปที่ 4.7) และ project ข้อมูลจากขั้นตอนที่แล้วลงบนระนาบ  $xy$  (รูปที่ 4.9 (ซ้าย)) นอกจากนี้ข้อมูลยังต้องผ่านกระบวนการ erosion และ dilation เพื่อกำจัด noise ทำให้มีลักษณะที่เป็นกลุ่มก้อนมากขึ้น (รูปที่ 4.9 (ขวา))

### 5. การจับกลุ่มข้อมูลเท้า

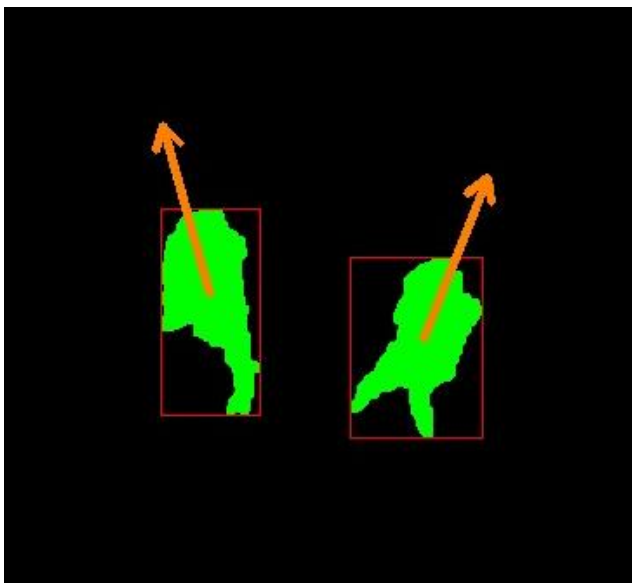
ภาพที่ได้จากขั้นตอนที่แล้วประกอบไปด้วยข้อมูลที่มีความน่าจะเป็นเท้าของคน แต่ยังไม่สามารถระบุตำแหน่งได้เนื่องจากไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล ดังนั้นจึงต้องมีการจับกลุ่มของข้อมูล ข้อมูลที่รวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อน 2 กลุ่มและคุณสมบัติตามข้อกำหนด(เช่น มีขนาดอยู่ในช่วงที่กำหนด เพื่อคัดกรองข้อมูลของวัตถุอื่นออกไป) จะถูกระบุว่าเป็นเท้า

### 6. การหาสถานะของคน

กลุ่มข้อมูลเท้าแต่ละข้างจะถูกนำมาประมวลผลเพื่อหาสถานะได้แก่ ตำแหน่ง และทิศทางการวางตัว สำหรับตำแหน่งของเท้าแต่ละข้างจะถูกแทนด้วยตำแหน่งของจุด centroid ของกลุ่มข้อมูล ส่วนทิศทางการวางตัวจะได้จากการหา image moment [47] ของเท้าแต่ละข้างแล้วนำมาคำนวณตามสมการ

$$\alpha_l = \frac{1}{2} \arctan \left( \frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}} \right)$$

โดย  $\alpha_l$  แทนทิศทางการวางตัวของเท้าซ้าย และ  $\mu_{ij}$  คือ Central moment[48] ลำดับที่  $ij$  ของกลุ่มข้อมูลเท้าซ้าย ส่วนทิศทางการวางตัวของเท้าขวาจะแทนด้วย  $\alpha_r$  และคำนวณจากสมการข้างต้นเช่นกัน centroid และทิศทางการวางตัวของเท้าแต่ละข้างแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงการจับกลุ่มข้อมูลของเท้า ลูกศรแสดงทิศทางการวางตัวของเท้าที่คำนวณได้

#### 7. การติดตามสถานะของเท้าด้วย Kalman filter

Kalman filter ถูกนำมาใช้เพื่อจัดการกับการติดตามสถานะของเท้าได้แก่ ตำแหน่ง 2 มิติ ความเร็ว ทิศทางการวางตัว และความเร็วในการเปลี่ยนทิศทางการวางตัวของเท้า ซึ่งสถานะของเท้า 2 ข้างจะถูกติดตามอย่างเป็นอิสระต่อกัน สถานะทุกสถานะของเท้าจะถูกอธิบายอยู่บนระนาบ  $xy$  เวกเตอร์สถานะ (State vector) ของ Kalman คือ

$$\mathbf{x}_n = (p_n^{lx}, p_n^{ly}, p_n^{rx}, p_n^{ry}, v_n^{lx}, v_n^{ly}, v_n^{rx}, v_n^{ry}, \alpha_n^l, \alpha_n^r, \omega_n^l, \omega_n^r)^T$$

โดยตัวแปร  $\mathbf{p}$  แทนตำแหน่งของเท้าข้างซ้าย ( $l$ ) หรือข้างขวา ( $r$ ) ในแกน  $x$  หรือ  $y$  ตัวแปร  $\mathbf{v}$  แทนความเร็ว ตัวแปร  $\alpha$  แทนทิศทางการวางตัวของเท้า และตัวแปร  $\omega$  แทนความเร็วในการเปลี่ยนทิศทางการวางตัวของเท้า

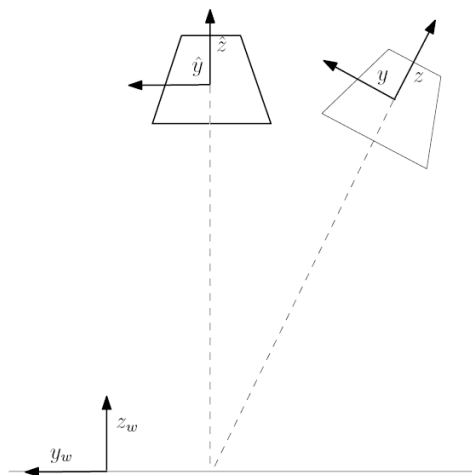
State transition matrix  $\mathbf{F}$  เป็นดังนี้

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \Delta T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

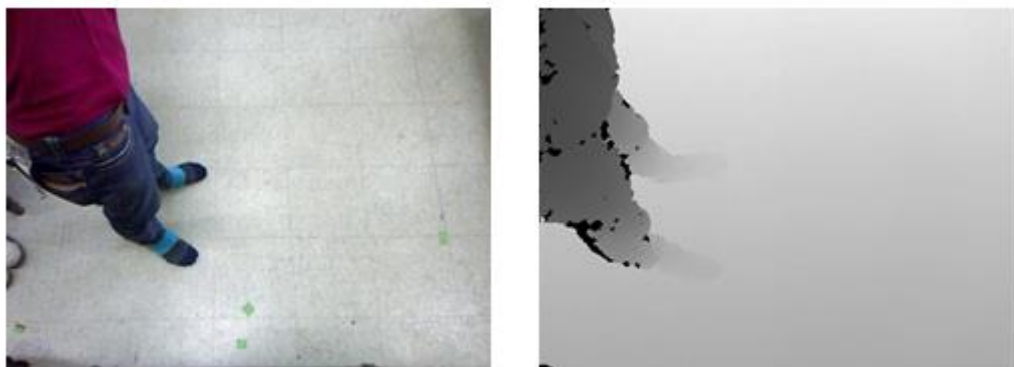
โดย  $\Delta T$  เป็นเวลาที่ผ่านไปจากการทำงานรอบที่แล้ว

ในกรณีที่เท้าถูกบัง ซึ่งส่งผลให้เซนเซอร์ไม่สามารถวัดค่าสถานะของเท้าได้ ค่าสถานะในรอบที่แล้วจะถูกนำมาเป็น measurement ของรอบปัจจุบันแทน

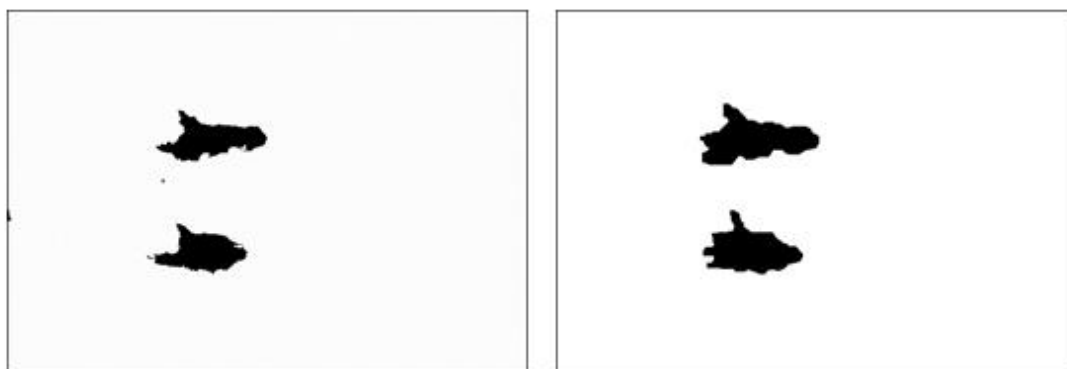
state vector จะถูกประมาณด้วย Kalman filter ซึ่งทำงานใน 2 ขั้นตอนได้แก่ Time Update และ Measurement Update วนซ้ำไปเรื่อยๆตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.2 จากนั้นสถานะของเท้าทั้ง 2 ข้าง จะถูกนำมาแปลงเป็นสถานะของคน โดยตำแหน่งของคนจะคำนวณได้จากจุดกึ่งกลางระหว่างตำแหน่งของเท้าทั้ง 2 ข้าง และทิศทางการวางตัวของคนจะคำนวณได้จาก  $\frac{\alpha_l + \alpha_r}{2}$



รูปที่ 4.7 การแปลงเฟรมจากมุมมองของ Kinect เป็นมุมมองจากด้านบน



รูปที่ 4.8 (ซ้าย) ภาพสีที่ได้จาก Kinect เมื่อส่องลงบริเวณที่คนยืน (ขวา) ภาพความลึก



รูปที่ 4.9 (ซ้าย) ภาพที่ได้จากการ project ข้อมูลที่นำจะเป็นเท้าลงบนระนาบ  $XY$  (ขวา) ภาพที่ผ่านการกำจัด noise

วิธีการติดตามที่ได้อธิบายข้างต้นเป็นการติดตามคนจากสถานะของเท้าเพื่อนำไปใช้สำหรับหุ่นยนต์เดินเคียงข้างคน จากความต้องการของระบบในหัวข้อ 4.1 ที่ระบุว่าหุ่นยนต์ต้องเดินตามคนได้และเดินเคียงข้างคนได้ ดังนั้น หุ่นยนต์ต้องมีการติดตามคนเพื่อนำไปใช้ในการเดินตามคนด้วย ซึ่งต้องใช้วิธีการติดตามคนที่แตกต่างออกไปจากวิธีแรก เนื่องจากวิธีแรกอาศัยข้อมูลจาก Kinect ที่ส่องลงพื้น ข้อมูลที่ Kinect รับจะไม่ครอบคลุมบริเวณด้านหน้าของหุ่นยนต์ซึ่งเป็นพื้นที่ที่คนอยู่

การติดตามคนเพื่อให้หุ่นยนต์เดินตามคนจะใช้อุปกรณ์ LRF ติดตั้งบนหุ่นยนต์ที่ความสูงที่ระยะประมาณลำตัวของคน โดยหันด้านหน้าของ LRF ให้ตรงกับด้านหน้าของหุ่นยนต์ และมีขั้นตอนดังนี้

#### 1. รับข้อมูลจากLRF

ข้อมูลที่ถูส่งมาจาก LRF แต่ละครั้งนั้นเป็นระยะทางจาก LRF ถึงวัตถุที่อยู่ในเส้นทางของเลเซอร์แต่ละ

เส้น ข้อมูลเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นพิกัดบนระนาบ  $xy$  เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้และมีความสอดคล้องกับการติดตามคนที่ใช้ Kinect

## 2. การจัดกลุ่มข้อมูลและการเลือกข้อมูลที่น่าจะเป็นคน (Human candidates)

ข้อมูลจาก LRF จะถูกนำมาจัดกลุ่ม โดยข้อมูลเลเซอร์ที่จะอยู่ในกลุ่มเดียวกันจะมีระยะห่างจากข้อมูลที่อยู่ติดกันไม่เกินค่าๆหนึ่ง การจัดกลุ่มข้อมูลเลเซอร์จะทำงานให้เกิดความสะดวกรในการทำงานมากขึ้น เนื่องจากการจัดกลุ่มข้อมูลเลเซอร์เปรียบได้กับการคัดกรองข้อมูลที่ไม่ต้องการออกไป ทำให้ปริมาณข้อมูลที่จำเป็นต้องพิจารณาลดลงหลายเท่า นอกจากนี้การจัดกลุ่มข้อมูลยังทำให้สามารถคำนวณคุณลักษณะบางอย่างเช่น ตำแหน่งกึ่งกลาง หรือ ความกว้างของกลุ่มข้อมูล ซึ่งเป็นค่าประมาณของข้อมูลทางกายภาพของวัตถุในโลกจริง ซึ่งความกว้างของกลุ่มข้อมูลจะนำมาใช้เป็นเกณฑ์เพื่อเลือกกลุ่มข้อมูลมาเป็น Human candidates รูปที่ 4.10 (บน) แสดงภาพการจัดกลุ่มข้อมูลเลเซอร์ (ล่าง) ภาพจริง

## 3. การระบุกลุ่มข้อมูลของคน

กลุ่มข้อมูลเลเซอร์จากขั้นตอนที่แล้วจะถูกนำมาพิจารณา โดยมี centroid ของแต่ละกลุ่มแทนตำแหน่งของกลุ่มนั้นๆ การระบุว่ากลุ่มข้อมูลเลเซอร์กลุ่มใดเป็นกลุ่มของข้อมูลของคนที่กำลังติดตามอยู่จะใช้หลักการ Nearest neighbor [49] คือพิจารณาว่ากลุ่มข้อมูลใดที่มีระยะห่างจากตำแหน่งของคนในรอบที่สั้นที่สุด ให้ถือว่ากลุ่มข้อมูลนั้นแทนข้อมูลของคนและใช้ตำแหน่งของกลุ่มข้อมูลนั้นแทนสถานะของคนในรอบปัจจุบัน การระบุว่าเป็นกลุ่มข้อมูลของคนยังต้องพิจารณาด้วยว่าระยะห่างจากตำแหน่งของคนต้องมีค่าไม่เกินค่าๆหนึ่ง เพื่อเป็นการป้องกันในกรณีที่มีการกระโดดของข้อมูล หากระยะห่างที่คำนวณมีค่าเกินค่าที่กำหนดจะไม่เลือกข้อมูลกลุ่มนั้น ถ้าไม่มี Human candidate ในรอบนั้นๆ ให้ใช้การทำนายตำแหน่งของคนมาเป็นสถานะของคนแทน หากยังไม่มี Human candidate ต่อเนื่องเป็นเวลาช่วงหนึ่ง ให้ถือว่าระบบไม่ได้ติดตามคนในขณะนั้น

## 4. การติดตามสถานะของคนด้วย Kalman filter

สถานะของคนจะถูกนำมาประมวลผลผ่าน Kalman filter โดยที่ State vector ของ Kalman คือ

$$x_n = (p_n^x, p_n^y, v_n^x, v_n^y)^T$$

โดยตัวแปร  $p$  แทนตำแหน่งของคนในแกน  $x$  หรือ  $y$  ตัวแปร  $v$  แทนความเร็ว State transition matrix  $F$  เป็นดังนี้

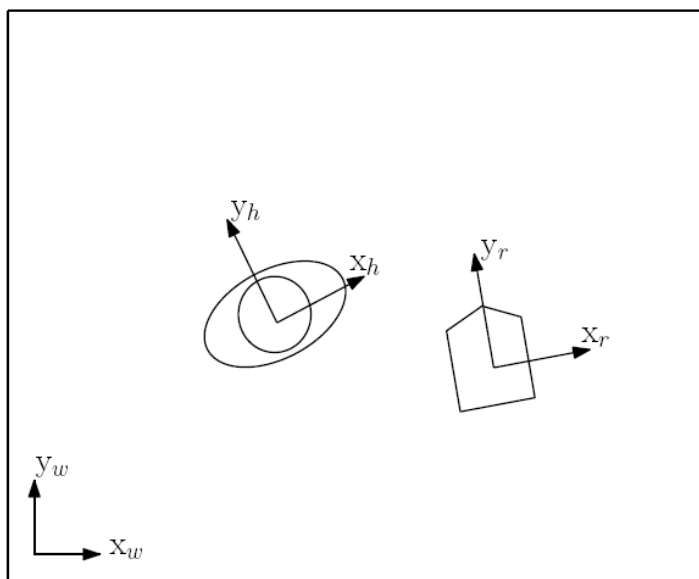
$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta T & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta T \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



รูปที่ 4.10 (บน) แสดงการจัดกลุ่มข้อมูลจาก LRF พร้อมระบุหมายเลขและวงล้อมกลุ่ม (ล่าง) สภาพแวดล้อมจริง  
เส้นประสีเขียวแสดงระดับที่ LRF วัดข้อมูล

#### 4.4 การนำทางหุ่นยนต์

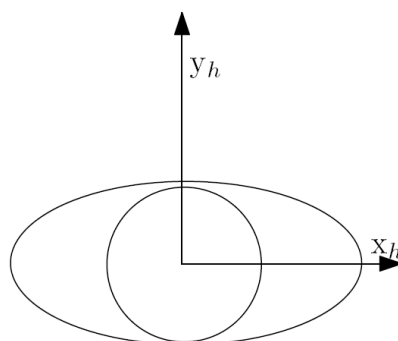
การนำทางหุ่นยนต์เป็นการส่งคำสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการโดยการนำสถานะของคนที่ได้จากการติดตามคนในขั้นตอนที่แล้วมาคำนวณ ขั้นตอนของการนำทางหุ่นยนต์มีดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.11 แสดง Reference frame ทั้งหมดของระบบ  $\omega, h, r$  แทน reference frame ของโลก, คน และหุ่นยนต์ ตามลำดับ

#### 4.4.1 การกำหนดตำแหน่งเป้าหมายของหุ่นยนต์

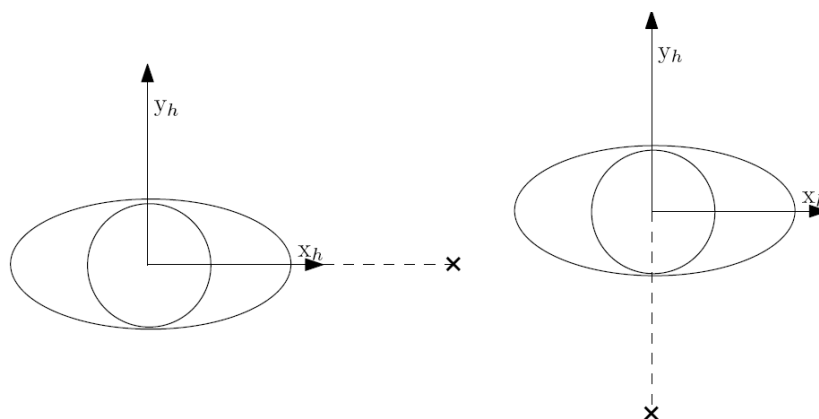
วิธีการกำหนดตำแหน่งเป้าหมายของหุ่นยนต์จะทำได้โดยการกำหนดตำแหน่งเทียบกับตำแหน่งปัจจุบันของคนกรอบอ้างอิง (Reference frame) ของโลก, คน และหุ่นยนต์จะถูกกำหนดตามรูปที่ 4.11 ในการกำหนดตำแหน่งเป้าหมายของหุ่นยนต์ Reference frame ที่มีจุดกำเนิดอยู่ที่ตำแหน่งของคนจะถูกคำนวณในทุกกรอบของการทำงาน โดยมีข้อกำหนดคือ แกน  $y$  ของ Reference frame นี้จะวางตัวตามทิศทางที่คนหันหน้าไป และแกน  $x$  จะวางตัวตามทิศของแกน  $y + 90^\circ$  ตามทิศเข็มนาฬิกา การที่ Reference frame ของคนเช่นนี้ทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งเป้าหมายได้ง่ายเพราะเป็นการกำหนดตำแหน่งเทียบกับคนตลอดเวลา ไม่ต้องกำหนดเป็นพิกัดในโลกจริง (รูปที่ 4.12)



รูปที่ 4.12 กรอบอ้างอิงของคน



สำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน กำหนดให้ตำแหน่งเป้าหมายที่หุ่นยนต์ต้องอยู่ อยู่ทางด้านขวามือของคน ดังนั้น ตำแหน่งเป้าหมายจะอยู่บนแกน  $x$  ตาม Reference frame ของคน (รูปที่ 4.13 ซ้าย) ในขณะเดียวกันสำหรับ หุ่นยนต์เดินตามคน ตำแหน่งเป้าหมายจะอยู่บนแกน  $y$  (รูปที่ 4.13 ขวา) เนื่องจากกำหนดให้ตำแหน่งเป้าหมายอยู่ ข้างหลังคน



รูปที่ 4.13 แสดงการกำหนดตำแหน่งเป้าหมายจาก Reference frame ของคน (ซ้าย) การกำหนดตำแหน่ง เป้าหมายสำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน (ขวา) สำหรับหุ่นยนต์เดินตามคน

#### 4.4.2 การเคลื่อนไปยังตำแหน่งเป้าหมาย

การส่งคำสั่งควบคุมไปยังหุ่นยนต์จะอาศัยหลักการ Proportional control ซึ่งเป็นการนำความแตกต่าง (error) ระหว่างสถานะปัจจุบันกับสถานะเป้าหมายมาเป็นข้อมูลนำเข้าไปในระบบ และคำสั่งที่ส่งไปยังหุ่นยนต์เป็น สัดส่วนกับ error ดังกล่าว หาก error มีค่ามาก คำสั่งก็จะมีค่ามากตาม ซึ่งเป็นหลักการเดียวกับที่ผู้ขับรถพยายาม เร่งเครื่องยนต์ให้ถึงความเร็วที่ต้องการ

เนื่องจากสถานะของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการนำทางประกอบด้วยสถานะตำแหน่งแบบพิกัดบนระนาบ  $xy$  และ สถานะทิศทางของหน้าหุ่น จึงจำเป็นที่จะต้องคำนวณหา error ของตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ error ของ ตำแหน่งสามารถหาได้จากการหาระยะห่างระหว่างตำแหน่งเป้าหมายกับตำแหน่งปัจจุบันของหุ่นยนต์ตามสมการ

$$v_g = K_v \|\overline{p_g} - \overline{p_r}\|$$

โดย  $v_g$  แทนคำสั่งความเร็วของหุ่นยนต์ที่จะเคลื่อนไปยังตำแหน่งเป้าหมาย,  $K_v$  แทนค่าคงที่,  $\overline{p_r}$  แทนตำแหน่ง ปัจจุบันของหุ่นยนต์ และ  $\overline{p_g}$  แทนตำแหน่งเป้าหมาย

สำหรับการหา error ของทิศทางจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ error ของทิศทางหุ่นยนต์กับทิศทางไปยัง ตำแหน่งเป้าหมาย และ error ของทิศทางหุ่นยนต์กับทิศทางของคน ซึ่งความแตกต่างในการนำไปใช้จะอธิบายต่อไป คำสั่งในการหมุนหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งเป้าหมายและไปยังทิศทางของคน จะคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ตามลำดับ

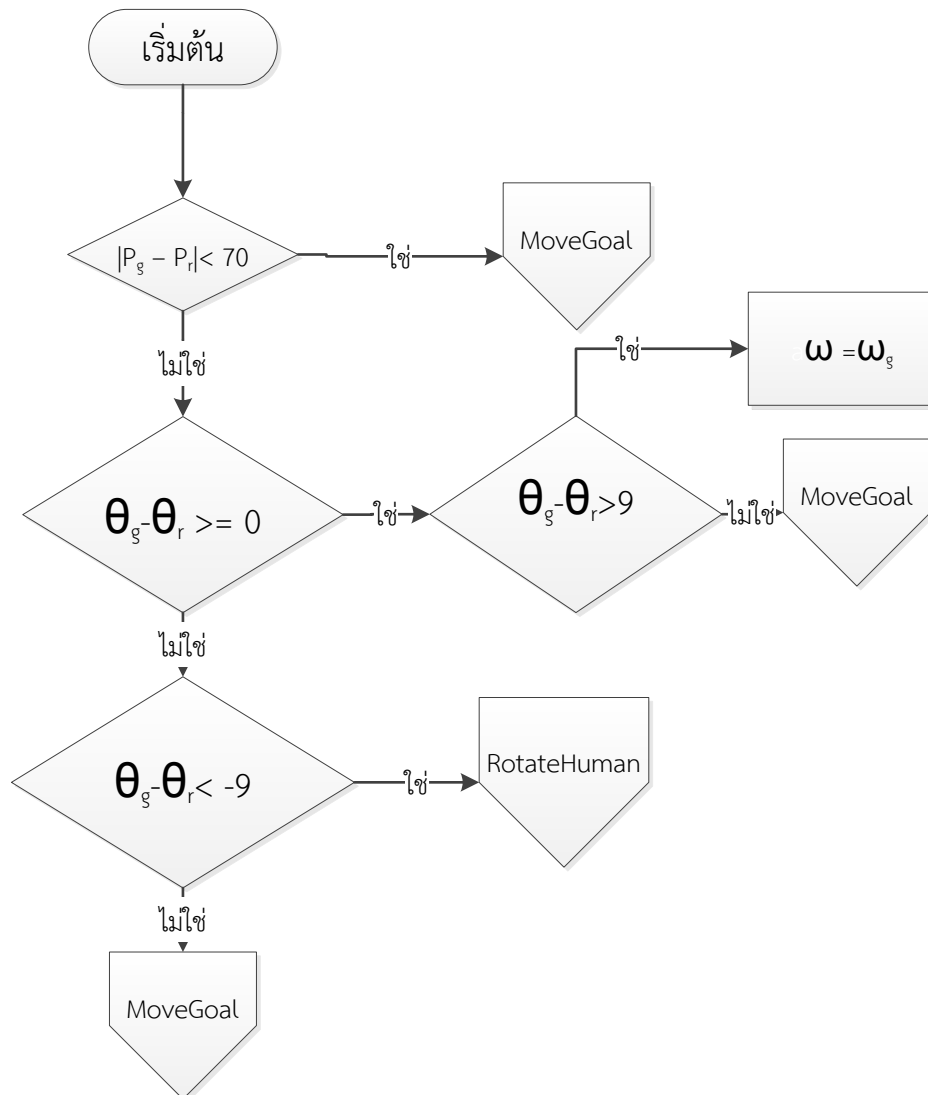
$$\omega_g = K_\omega \|\theta_g - \theta_r\|$$

$$\omega_h = K_\omega \|\theta_h - \theta_r\|$$

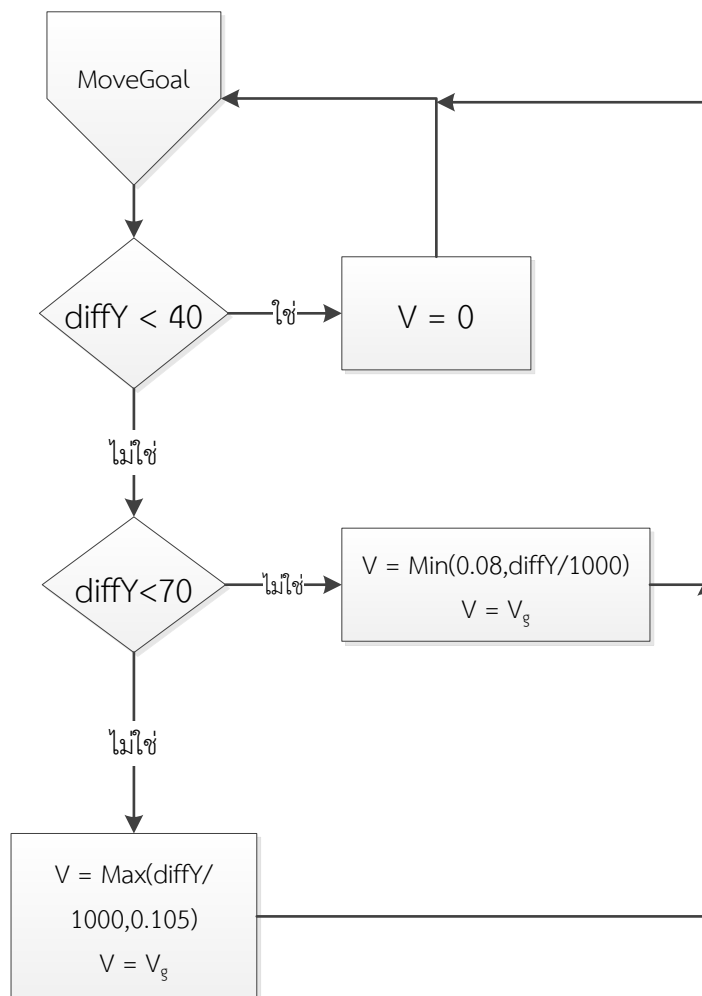
โดย  $\omega_g$  แทนค่าสิ่งในการหมุนหุ่นยนต์ให้หันไปยังตำแหน่งเป้าหมาย,  $\omega_h$  แทนค่าสิ่งในการหมุนหุ่นยนต์ไปยังทิศทางเดียวกับคน,  $K_\omega$  แทนค่าคงที่,  $\theta_r, \theta_g$  และ  $\theta_h$  แทนทิศทางของหุ่นยนต์ ตำแหน่งเป้าหมายและคนตามลำดับ

การเดินข้างคนจะแทนด้วย state machine ประกอบไปด้วย 3 state คือ RotateGoal, MoveGoal และ RotateHuman (รูปที่ 4.14 - รูปที่ 4.16 ตามลำดับ) โดยการทำงานจะเริ่มที่การที่หุ่นยนต์หมุนไปยังทิศทางเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมาย (RotateGoal) จากนั้นหุ่นยนต์จะเคลื่อนเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมาย (MoveGoal) และหุ่นยนต์จะหันไปทิศทางเดียวกับคน (RotateHuman)

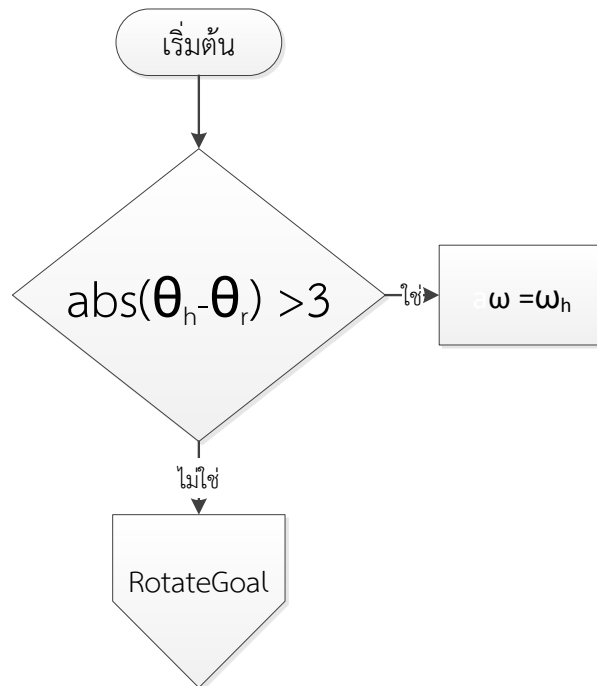
ในกรณีที่ตำแหน่งเป้าหมายอยู่ด้านหลังของหุ่นยนต์ (คนหันไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา) หุ่นยนต์จะหมุนตัวไปในทิศทางเดียวกับคน การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เทียบกับคนสามารถอธิบายได้ว่า หากคนเคลื่อนที่(หมุน)ไปในทิศทางวนเข็มนาฬิกา หุ่นยนต์จะหมุนโดยมีคนเป็นจุดศูนย์กลางการเคลื่อนที่ ในทางตรงกันข้าม หากคนเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา หุ่นยนต์จะหมุนรอบตัวเอง



รูปที่ 4.14 ผังงาน RotateGoal

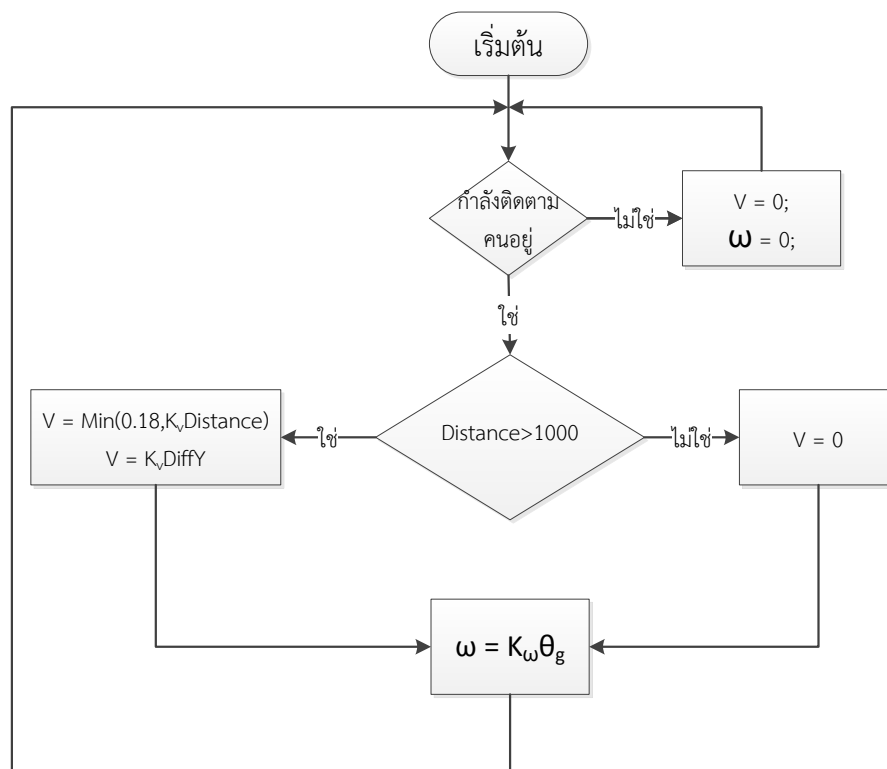


รูปที่ 4.15 ผังงาน MoveGoal



รูปที่ 4.16 ฟังก์ชัน RotateHuman

สำหรับการเคลื่อนที่แบบเดินตาม จะมี state ตามรูปที่ 4.17



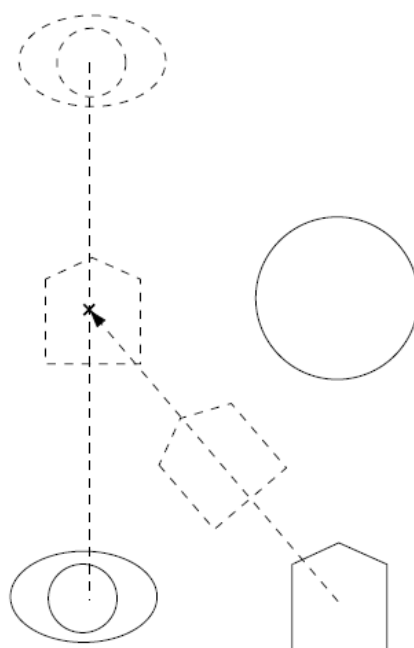
รูปที่ 4.17 ฟังก์ชัน Follow

#### 4.4.3 การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

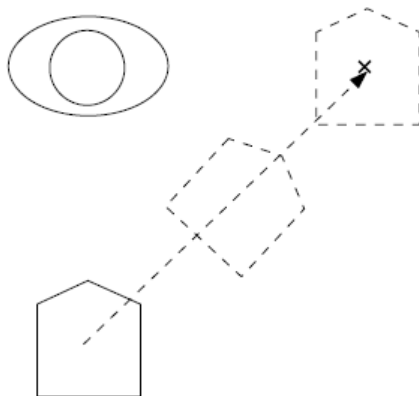
เนื่องจากการใช้ LRF ในการติดตามคนเพื่อให้หุ่นยนต์เดินตาม สามารถรับรู้ข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ค่อนข้างกว้าง ข้อมูลที่ได้มานอกจากจะเป็นข้อมูลของคนที่ต้องการติดตามแล้ว อาจประกอบด้วยข้อมูลของสิ่งอื่นๆด้วย ซึ่งจะถูกกำหนดให้เป็นสิ่งกีดขวางในระบบ หุ่นยนต์จึงควรเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายและหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางต่างๆ

สำหรับการเคลื่อนที่แบบตามคนของหุ่นยนต์นั้น โดยปกติคนจะเลือกเส้นทางเดินที่หลีกเลี่ยงการชนหรือปะทะกับสิ่งกีดขวางด้วยตนเองอยู่แล้ว ดังนั้นหากหุ่นยนต์เลือกเส้นทางเช่นเดียวกับคน แล้วคนมีการเดินหลบหลีกสิ่งกีดขวาง หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่และหลบหลีกสิ่งกีดขวางนั้นไปในตัวเช่นกัน

แต่ในกรณีที่หุ่นยนต์เดินเคียงข้างไปกับคน แม้ว่าคนจะเลือกเส้นทางที่หลบหลีกสิ่งกีดขวาง แต่หุ่นยนต์ไม่ได้เคลื่อนที่ด้วยเส้นทางเดียวกันกับคน หุ่นยนต์จึงต้องมีวิธีการหลบหลีกสิ่งกีดขวางต่างหากด้วย แต่เนื่องจากการใช้ Kinect (ซึ่งมีขอบเขตการรับรู้ค่อนข้างแคบ)บนหุ่นยนต์ทำให้เกิดข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ที่หุ่นยนต์คือ หุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่เร็วได้เพราะจะทำให้คนอยู่นอกขอบเขตของ Kinect ดังนั้นถ้าหุ่นยนต์หมุนตัวหรือเคลื่อนที่เพื่อหลบสิ่งกีดขวางในขณะที่ต้องพยายามเดินข้างคนไปพร้อมๆกันด้วย ย่อมทำให้เกิดการทำงานที่ผิดพลาด วิธีการที่นำเสนอคือ เมื่อหุ่นยนต์พบว่าสิ่งกีดขวางที่เป็นอุปสรรคต่อการเดินข้างคนภายในบริเวณหรือที่ระยะห่างหนึ่งๆ หุ่นยนต์จะทำการเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ให้เป็นการเดินทางตามคนแทน (รูปที่ 4.18) เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งและไม่มีสิ่งกีดขวางอยู่ตามเงื่อนไขข้างต้น หุ่นยนต์จะปรับกลับมาเป็นการเดินเคียงข้างคนเช่นเดิม (รูปที่ 4.19)



รูปที่ 4.18 แสดงสถานการณ์ที่หุ่นยนต์เปลี่ยนจากการเดินข้างคนเป็นเดินตามคน วงกลมแทนสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 4.19 แสดงสถานการณ์ที่หุ้นยนต์เปลี่ยนจากการเดินตามคนเป็นเงินข้างคน

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

สำหรับการทดลอง จะประกอบไปด้วย 3 การทดลองหลักได้แก่ การทดลองการติดตามคนด้วยการติดตามขา เพื่อวัดประสิทธิภาพของวิธีการและแบบจำลองของคนที่น่าเสนอ, การนำทางหุ่นยนต์เพื่อทดสอบการสั่งการหุ่นยนต์ จากนำสถานะของคนที่ได้ไปคำนวณ และการทดลองทั้งระบบ

#### 5.1 อุปกรณ์

##### 5.1.1 Microsoft Kinect for Xbox 360 (Kinect)

Kinect เป็นอุปกรณ์รับรู้การเคลื่อนไหวที่ใช้ต่อพ่วงเข้ากับเครื่องเล่นเกม Xbox 360 ของ Microsoft ซึ่งประกอบไปด้วย กล้อง RGB อุปกรณ์รับรู้ความลึก และแผงไมโครโฟน สามารถนำมาใช้งานร่วมกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้ด้วยการต่อผ่าน usb Kinect มีคุณสมบัติดังนี้

- ความละเอียดภาพสีและภาพความลึก 640 x 480 พิกเซล
- ระบบรับภาพสีและภาพความลึกทำงานบนความถี่ 30 เฟรมต่อวินาที
- มีช่วงของมุมมอง (Field of view) ในแนวนอนประมาณ 57 องศา และประมาณ 43 องศาในแนวตั้ง
- ช่วงความยาวที่สามารถรับรู้ความลึก คือประมาณ 1.2 – 3.5 เมตร



รูปที่ 5.1 แสดงการติดตั้ง Kinect กับหุ่นยนต์โดยทำมุม 15° กับเส้นแนวตั้งของพื้น

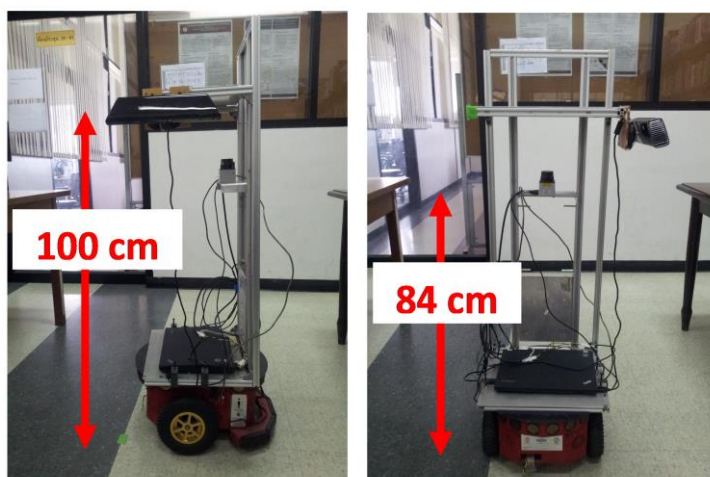


### 5.1.2 Laser range finder (LRF)

LRF ที่ใช้ในการทดลองเป็นของบริษัท Hokuyo รุ่น URG-04 มีระยะการวัด 0.06 ถึง 4 เมตร มุมมองการวัด 240 องศา ความละเอียดเชิงมุม 0.36 องศา จำนวนข้อมูล 683 จุด LRF จะถูกติดตั้งบนหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการติดตามคนเมื่อหุ่นยนต์เดินตามคน และใช้ค้นหาสิ่งกีดขวางเมื่อหุ่นยนต์เดินข้างคน

### 5.1.3 หุ่นยนต์ทดลอง

หุ่นยนต์ที่นำมาใช้ทดลองในงานวิจัยชิ้นนี้ เป็นหุ่นยนต์แบบสองล้อขับ (Differential-drive) รุ่น Pioneer 3-DX[50] โดยทำการต่อเติมโครงอะลูมิเนียมให้สามารถวางอุปกรณ์ต่างๆได้ รัศมีของหุ่นยนต์ประมาณ 25 เซนติเมตร มีลักษณะดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 โครงสร้างอะลูมิเนียมและการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆบนหุ่นยนต์

## 5.2 สถานที่

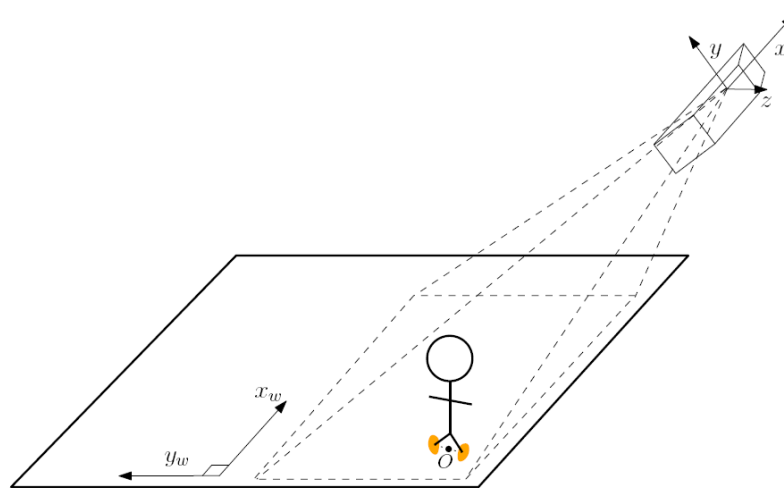
โถงหน้าลิฟต์ชั้น 20 อาคารเจริญวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (รูปที่ 5.3)



รูปที่ 5.3 บริเวณที่ใช้ในการทดลอง

### 5.3 การทดลองการติดตามคนด้วยวิธีการติดตามเท้าของคน

วิธีการติดตามคนและแบบจำลองของคนที่น่าเสนอ สนใจสถานะของเท้าได้แก่ ตำแหน่งและทิศทางการวางตัวของเท้า ดังนั้นการวัดประสิทธิภาพของการติดตามคนนี้ จะเป็นการวัดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางการวางตัวของเท้าที่ระบบสามารถตรวจจับได้เทียบกับข้อมูล ground truth ในการทดลองนี้จะกำหนดให้หุ่นยนต์อยู่กับที่ และให้ผู้ทดลองเดินผ่านด้านข้างหุ่นยนต์ในบริเวณที่อุปกรณ์ Kinect ครอบคลุม (รูปที่ 5.4) ในการทดลองจะกำหนดค่าความแปรปรวนร่วม  $Q$  และ  $R$  ใน Kalman filter มีค่าเป็น  $10^{-1}$  การทดลองจะประกอบด้วยการทดลองย่อย 4 การทดลอง ดังนี้



รูปที่ 5.4 แสดงภาพรวมการทดลองการติดตามคนด้วยวิธีการติดตามเท้า

#### 5.3.1 การทดลองการตรวจจับตำแหน่งของเท้า

ในการทดลองนี้ จะให้ผู้ทดลองเดินตามเส้นทางที่กำหนดไว้ได้แก่ ทิศ  $-10^\circ$ ,  $0^\circ$  และ  $10^\circ$  เทียบกับแกน  $x$  ของ Kinect และทำการติดแถบผ้าสีไว้ที่เท้าทั้ง 2 ข้างของผู้เดิน โดยติดให้อยู่ในช่วงความสูงจากพื้นช่วงเดียวกับเท้าของคน ระบบจะหาตำแหน่ง centroid ของกลุ่มสีของแถบผ้าเพื่อมาใช้แทนตำแหน่งของแถบผ้าทั้งสอง (รูปที่ 5.5) และแปลงจากพิกัดในภาพสีให้กลายเป็นพิกัด 3 มิติของ Kinect จากนั้นจึง project บนระนาบ  $xy$  บนโลก ถัดมาจึงคำนวณหาความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเท้าแต่ละข้าง

#### ผลการทดลอง

ทิศทางการเดิน	เท้าซ้าย		เท้าขวา	
	Mean rms error(มิลลิเมตร)	Sd(มิลลิเมตร)	Mean rms error(มิลลิเมตร)	Sd(มิลลิเมตร)
$-10^\circ$	42.0	59.7	2.6	2.5
$0^\circ$	15.5	22.3	2.2	1.2

10°	20.3	17.5	2.7	1.3
-----	------	------	-----	-----

ตารางที่ 5.1 แสดงผลทดลองการตรวจจับตำแหน่งของเท้าเทียบกับตำแหน่งของแถบผ้าสี



รูปที่ 5.5 (ซ้าย) ภาพสีที่ได้จาก Kinect (ขวา) ภาพที่ได้จากการคัดกรองเฉพาะสีของแถบผ้า

จากตารางที่ 5.1 จะพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเท้าซ้ายจะมีค่าสูงกว่าเท้าขวาอย่างชัดเจน ซึ่งอาจเกิดจากการที่กำหนดให้ตำแหน่งของคนอยู่ทางด้านซ้ายของหุ่นยนต์ ทำให้ Kinect อยู่ในตำแหน่งที่สามารถเห็นเท้าขวาได้มากกว่าเท้าซ้าย จึงส่งผลให้ตำแหน่งเท้าซ้ายคลาดเคลื่อนมากกว่า

### 5.3.2 การทดลองการติดตามตำแหน่งของคน

การทดลองนี้จะเปรียบเทียบตำแหน่งของคนที่คำนวณได้จากตำแหน่งของเท้าทั้ง 2 ข้าง กับตำแหน่งของคนที่ได้จาก LRF ที่ติดตามคนจากข้อมูลช่วงลำตัวของคน

#### ผลการทดลอง

ทิศทางการเดิน	Mean rms error(มิลลิเมตร)	Sd(มิลลิเมตร)
-10°	28.7	24.7
0°	14.5	14.5
10°	25.0	5.9

ตารางที่ 5.2 แสดงผลการทดลองการติดตามตำแหน่งของคนเทียบกับตำแหน่งของคนที่ได้จาก LRF

จากตารางที่ 5.2 เห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าประมาณ 3 เซนติเมตร แม้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเท้าซ้ายจะมีค่าสูง แต่เมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับตำแหน่งเท้าขวาแล้ว ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงมา ซึ่งถ้านำค่านี้ไปพิจารณากับตำแหน่งของคนแล้ว พบว่า หากตำแหน่งของคนที่จุดศูนย์กลางตัวมีความคลาดเคลื่อนไป 3 เซนติเมตร ตำแหน่งนั้นจะยังอยู่ในบริเวณตัวคน ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานมากนัก ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองนี้จึงอยู่ในช่วงที่รับได้

### 5.3.3 การทดลองการตรวจจับทิศทางการวางตัวของเท้า

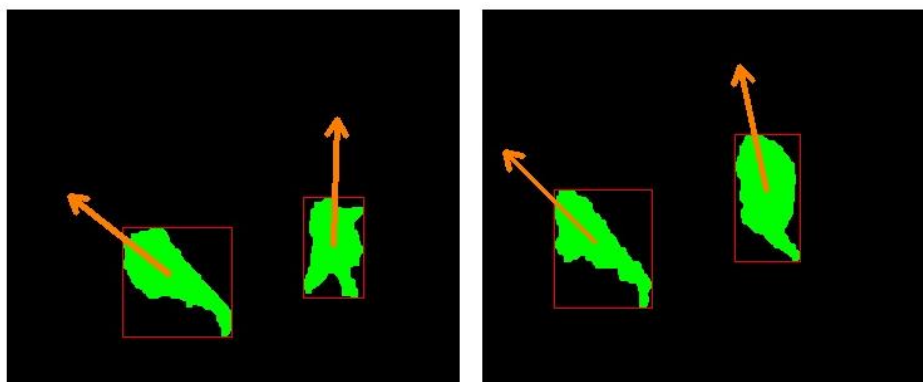
การทดลองนี้จะทำการเปรียบเทียบทิศทางการวางตัวของเท้าที่ระบบตรวจจับกับการวางตัวจริงๆของเท้าจากการเดิน 3 ทิศทาง พื้นรองเท้าของผู้ทดลองจะถูกทาสีน้ำ เมื่อผู้ทดลองเดินไปบนแผ่นพลาสติก รอยเท้าจะปรากฏขึ้นตามเส้นทางการเดิน จากนั้นทำการวัดทิศทางการวางตัวของรอยเท้าและเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากระบบและคำนวณความคลาดเคลื่อน ผู้ทดลองจะเดินทิศทางละ 5 รอบ แต่ละรอบจะมีข้อมูลของเท้าประมาณ 5-6 รอยเท้า

#### ผลการทดลอง

ทิศทางการเดิน	เท้าซ้าย		เท้าขวา	
	Mean rms error(องศา)	Sd(องศา)	Mean rms error(องศา)	Sd(องศา)
-10°	14.3	10.2	14.0	14.4
0°	16.6	13.9	9.2	5.7
10°	15.4	15.2	15.6	12.6

ตารางที่ 5.3 แสดงผลการทดลองการตรวจจับทิศทางการวางตัวของเท้าเทียบกับการวางตัวของรอยเท้า

จากผลการทดลองใน ตารางที่ 5.3 จะเห็นได้ว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนของมุมอยู่ที่อย่างน้อยประมาณ 10° และมีค่า sd ส่วนใหญ่อย่างน้อย 10° เนื่องจากเมื่อผู้ทดลองเดินไปยังตำแหน่งต่างๆ Kinect จะรับรู้ข้อมูลความลึกของเท้าได้แตกต่างกัน ซึ่งทำให้ลักษณะของภาพเท้าที่ได้มีความแตกต่างและส่งผลกระทบต่อการคำนวณทิศทางการวางตัวของเท้า โดยเฉพาะบริเวณที่ใกล้เคียงตำแหน่งที่ให้เริ่มต้นเดิน ดังนั้นจึงเปลี่ยนให้ตำแหน่งเริ่มต้นของการเดินเลื่อนขึ้นไปให้ใกล้เคียงแกน  $X$  ของกรอบอ้างอิงของหุ่นยนต์ เพื่อให้สอดคล้องกับตำแหน่งระหว่างคนกับหุ่นยนต์เมื่อหุ่นยนต์เดินเคียงข้างคน และมีสมมุติฐานว่าระบบจะมีการรับรู้ข้อมูลเท้าได้ดีขึ้น (รูปที่ 5.6)



รูปที่ 5.6 ภาพเท้าคนที่ Kinect รับรู้ได้ เมื่อคนยืนหันไปทิศทาง 10° (ซ้าย) ที่ตำแหน่งเริ่มต้น (ขวา) ที่ตำแหน่งข้างหุ่นยนต์

ทิศทางการเดิน	เท้าซ้าย		เท้าขวา	
	Mean rms error(องศา)	Sd(องศา)	Mean rms error(องศา)	Sd(องศา)
-10°	9.4	4.8	6.8	5.8
0°	12.0	4.7	12.5	6.8
10°	13.7	8.2	12.6	4.5

ตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองการตรวจจับทิศทางการวางตัวของเท้าเทียบกับการวางตัวของรอยเท้าเมื่อเคลื่อนจุดเริ่มต้นขึ้นมาให้เท่าตำแหน่งของหุ่นยนต์

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเดินในทิศ -10° มีค่าลดลงมาก ในขณะที่ค่าในการเดินทิศอื่นมีความใกล้เคียงเดิมคือต่างจากค่าในตารางที่ 5.3 ประมาณ 2-3° แต่ค่า sd ส่วนใหญ่ลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 5-6° ซึ่งการที่ความคลาดเคลื่อนในทิศ -10° ลดลงมาก อาจเป็นเพราะ Kinect สามารถรับรู้ข้อมูลเท้าที่ตำแหน่งข้างหุ่นยนต์ได้ดีขึ้น คือเท้ามีการวางตัวที่ทำให้ Kinect มองเห็นได้ดีขึ้น ในขณะที่การเดินในทิศทางอื่นๆที่ตำแหน่งข้างหุ่นยนต์ ไม่ได้ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดลงอย่างชัดเจนนัก แต่ทำให้ค่า sd ลดลง ซึ่งหมายถึงทิศทางที่ระบบคำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นในแต่ละรอบ

#### 5.3.4 การทดลองการติดตามทิศทางการเคลื่อนที่

การทดลองนี้จะเปรียบเทียบทิศทางการเคลื่อนที่ของคนที่คำนวณได้จากทิศทางการวางตัวของเท้าทั้ง 2 ข้างกับทิศทางการเดินจริงทั้ง 3 ทิศ โดยมีการทดลอง 2 ชุดเช่นเดียวกับใน 5.3.3 คือการเดินจากจุดเริ่มต้น และการเดินจากตำแหน่งข้างหุ่นยนต์ จากการทดลองที่แล้ว พบว่า การหาทิศทางของเท้ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 10° ซึ่งส่งผลกระทบต่อการคำนวณตำแหน่งเป้าหมายของหุ่นยนต์มาก ดังนั้นในการทดลองนี้ จะมีการปรับค่าทิศทางของเท้าที่ได้จากการติดตามคน โดยทิศทางของเท้าแต่ละข้างจะปรับในทิศตามเข็มนาฬิกา 10° จากนั้นจึงนำไปคำนวณหาทิศทางการเดินของคน

#### ผลการทดลอง

ทิศทางการเดิน	Mean rms error(องศา)	Sd(องศา)
-10°	9.4	9.4
0°	12.9	8.4
10°	16.2	8.3

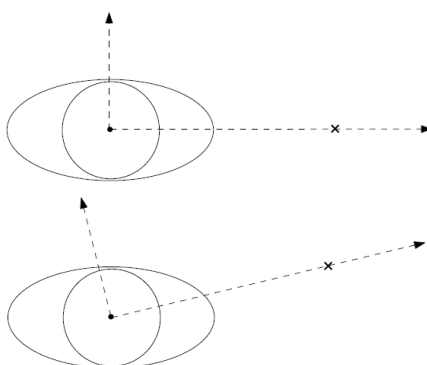
ตารางที่ 5.5 แสดงผลการทดลองการตรวจจับทิศทางการเคลื่อนที่ของคนเทียบกับทิศทางการเดิน

ทิศทางการเดิน	Mean rms error(องศา)	Sd(องศา)
-10°	6.1	4.7
0°	15.3	8.0
10°	15.2	6.1

ตารางที่ 5.6 แสดงผลการทดลองการตรวจจับทิศทางเคลื่อนที่ของคนเทียบกับทิศทางเดินเมื่อเลื่อนจุดเริ่มต้นขึ้นมาให้เท่าตำแหน่งของหุ่นยนต์

จากตารางที่ 5.6 จะเห็นได้ว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเดินในทิศ  $-10^\circ$  มีค่าลดลงมาก เมื่อเทียบกับผลในตารางที่ 5.5 ในขณะที่ค่าในการเดินทิศอื่นมีความใกล้เคียงเดิม แต่ค่า sd ลดลงเล็กน้อยในทำนองเดียวกับการทดลองที่แล้ว แสดงว่าการเลื่อนตำแหน่งเริ่มต้นของการเดินทำให้ทิศทางที่คำนวณได้ในแต่ละครั้งมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้นเช่นกัน

ค่าความคลาดเคลื่อนของทิศทางเคลื่อนที่ของคนมีผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มากกว่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง กล่าวคือตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนตามผลการทดลองจากตารางที่ 5.2 ยังคงเป็นตำแหน่งที่อยู่ในช่วงของตัวคน แต่ความคลาดเคลื่อนตามตารางที่ 5.6 แม้มีค่าสูงสุดเพียง  $15^\circ$  โดยประมาณ แต่ก็ทำให้สถานะเป้าหมายทั้งตำแหน่งและทิศทางคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเป้าหมายที่ควรจะเป็นไปไม่น้อย ซึ่งอาจทำให้การทำงานที่ผิดพลาดได้ (รูปที่ 5.7)



รูปที่ 5.7 แสดงความผิดพลาดของตำแหน่งเป้าหมายเมื่อทิศทางเคลื่อนที่ของคนคลาดเคลื่อนไป  $15^\circ$

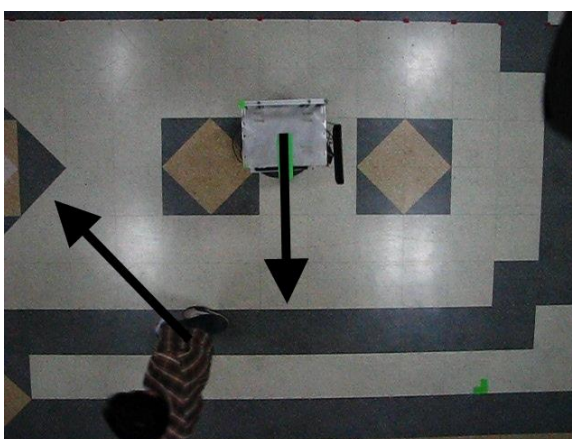
#### 5.4 การทดลองการนำทางหุ่นยนต์

สิ่งสำคัญของวิธีการนำทางหุ่นยนต์ที่นำเสนอคือ การที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังสถานะเป้าหมาย ดังนั้นการวัดผลของการนำทางหุ่นยนต์คือ การวัดค่าผิดพลาดของสถานะปัจจุบันคือ ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ กับสถานะเป้าหมายของหุ่นยนต์ กล้องวิดีโอจะถูกติดตั้งไว้บนเพดานและชี้ลงด้านล่างที่เป็นพื้นที่ทดลอง ซึ่งมีพื้นเป็นตารางขนาด  $30 \times 30$  เซนติเมตร ภาพที่ได้ครอบคลุมความกว้าง 8 ช่อง ยาว 12 ช่อง พื้นี่ประมาณ 8.6 ตารางเมตร ตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ ณ เวลาหนึ่งๆ จะถูกคำนวณหาความคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่ควรจะเป็น (รูปที่ 5.9 แสดงการทดลองหุ่นยนต์เดินตามคน แสดงการทดลอง)

การหาสถานะของคนและหุ่นยนต์ในการทดลองนี้ ทำได้โดยการพิจารณาพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นตาราง หากส่วนคนหรือหุ่นยนต์อยู่บนแผ่นกระเบื้องใดมากที่สุด ให้ถือว่ากระเบื้องนั้นแทนตำแหน่ง ในส่วนของการหาทิศทาง จะหาได้จากทิศทางการหันของหุ่นยนต์ที่ได้จากภาพ

ในการทดลองการเดินตาม กำหนดให้ตำแหน่งเป้าหมายของหุ่นยนต์อยู่ด้านหลังของคน โดยหันทิศทางเข้าหาตำแหน่งของคนและมีระยะห่าง 100 เซนติเมตร (ประมาณ 3-4 แผ่นกระเบื้อง) ส่วนการเดินเคียงข้าง กำหนดให้ตำแหน่งเป้าหมายของหุ่นยนต์อยู่ทางด้านขวาของคน ทิศทางหันไปทิศเดียวกับคนและอยู่ห่างออกไป 60 เซนติเมตร (ประมาณ 2 แผ่นกระเบื้อง)

การเปรียบเทียบค่าสถานะ จะทำโดยการสุ่มตัวอย่างในการเคลื่อนที่น้อย ซึ่งในที่นี้หมายถึง ช่วงเวลาที่หุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนจนกระทั่งหยุดเคลื่อน โดยการทดลองหนึ่งรอบ จะประกอบด้วยเคลื่อนที่น้อยหลายครั้ง การสุ่มตัวอย่างจะทำทุกๆ 60 เฟรมโดยประมาณ (เนื่องจากกล้องวิดีโอที่ติดบนเพดานบันทึกภาพได้ที่อัตรา 30 เฟรมต่อวินาที ดังนั้นการสุ่มตัวอย่างจะเกิดขึ้นทุกๆ 2 วินาทีโดยประมาณ)



รูปที่ 5.8 แสดงเวกเตอร์แทนทิศทางการหันของหุ่นยนต์และคน

#### ผลการทดลอง

Mean position error(เซนติเมตร)	16.8
Mean direction error (องศา)	13.0

ตารางที่ 5.7 แสดงผลการวัดค่าเมื่อหุ่นยนต์เดินตามคน

Mean position error(เซนติเมตร)	29.2
Mean direction error(องศา)	21.6

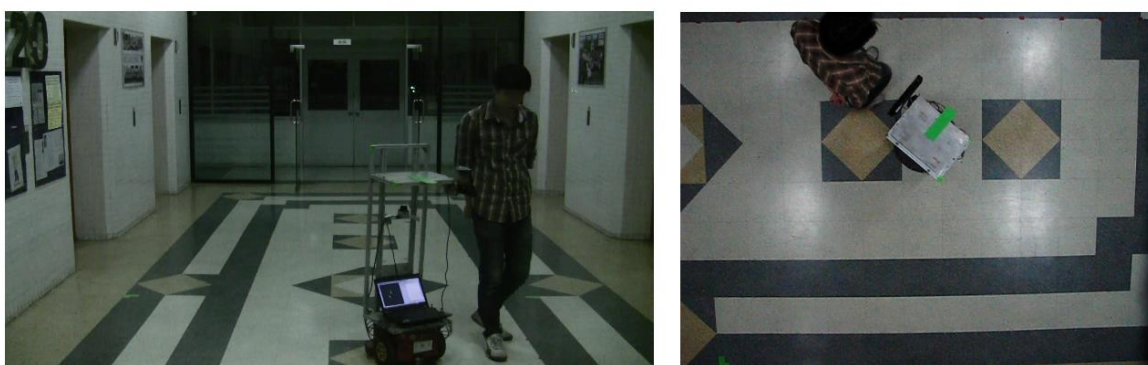
ตารางที่ 5.8 แสดงผลการวัดค่าเมื่อหุ่นยนต์เดินเคียงข้างคน

จากตารางที่ 5.7 พบว่า ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่คลาดเคลื่อนไปเมื่อเดินตามคนมีค่าประมาณ 17 เซนติเมตร และทิศทางคลาดเคลื่อนไปประมาณ  $13^{\circ}$  เมื่อพิจารณาตำแหน่งและมุมมองของหุ่นยนต์ในการเดินตามแล้ว ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบน้อยต่อการทำงานของหุ่นยนต์



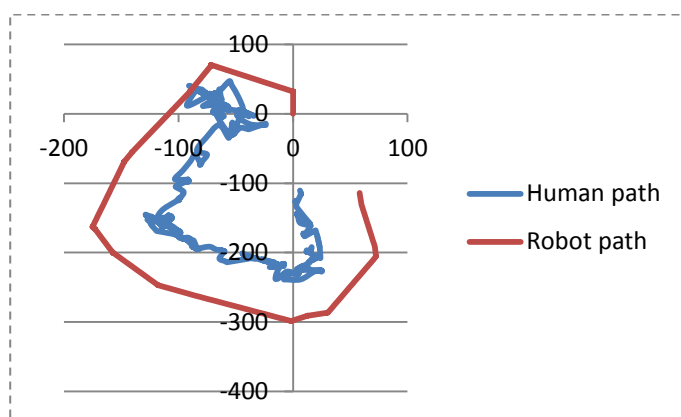
รูปที่ 5.9 แสดงการทดลองหุ่นยนต์เดินตามคน

ผลการทดลองในตารางที่ 5.8 แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของสถานะหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับสถานะเป้าหมาย ซึ่งมีค่าประมาณ 30 เซนติเมตร และ  $22^{\circ}$  ในความเป็นจริงแล้วความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ย แต่ในบางช่วงเกิดความคลาดเคลื่อนมากโดยเฉพาะความคลาดเคลื่อนของทิศทาง ซึ่งเกิดจากการที่หุ่นยนต์หยุดอยู่กับที่ในขณะที่ผู้ทดลองพยายามเดินไปในทิศทางต่างๆ ซึ่งการที่หุ่นยนต์หยุดอยู่กับที่อาจเกิดจากการที่ Kinect รับข้อมูลเข้าได้สมบูรณ์ ทั้งการรับข้อมูลเข้าได้ข้างเดียว การรับข้อมูลไม่เต็มทำให้การทิศทางของเท้าผิดพลาด หรือการที่คนเดินออกนอกขอบเขตการรับรู้ข้อมูลของ Kinect (รูปที่ 5.11-รูปที่ 5.12 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของคนและหุ่นยนต์)

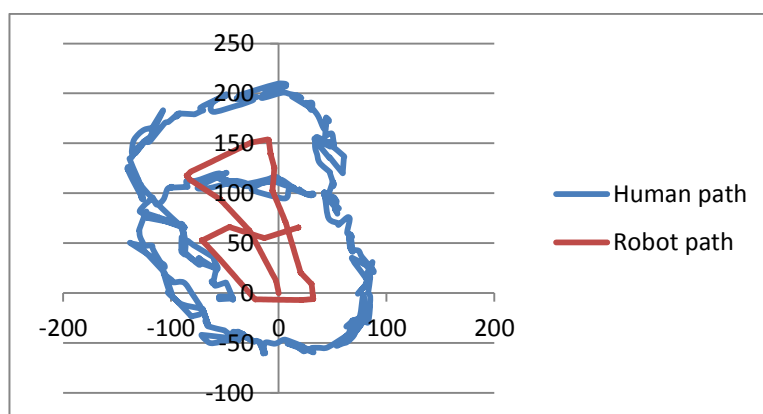


รูปที่ 5.10 แสดงการทดลองหุ่นยนต์เดินข้าง





รูปที่ 5.11 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของคน (เส้นสีฟ้า)และหุ่นยนต์(เส้นสีแดง)เมื่อทดลองการเดินข้างคนของหุ่นยนต์ (หน่วยเป็นเซนติเมตร)



รูปที่ 5.12 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของคน (เส้นสีฟ้า)และหุ่นยนต์(เส้นสีแดง)เมื่อทดลองการเดินข้างคนของหุ่นยนต์

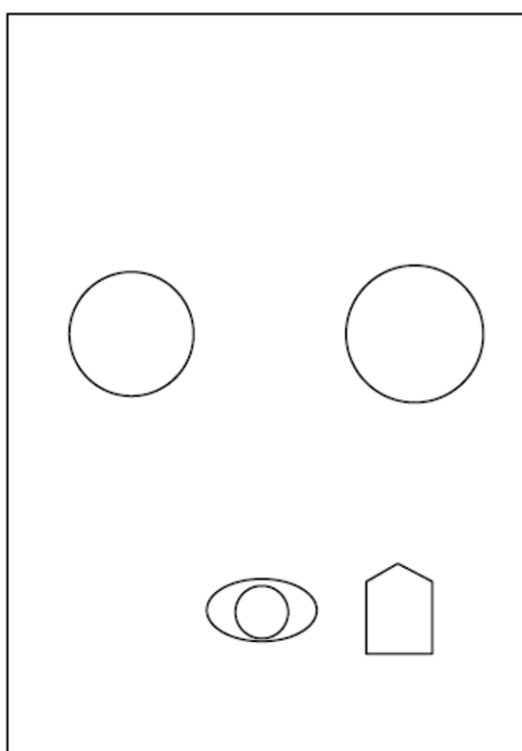
### 5.5 การทดลองทั้งระบบ

การทดลองนี้จะให้หุ่นยนต์ทำงานครบทุกการเคลื่อนที่ได้แก่ การเดินข้าง การเดินตาม และการเปลี่ยนระหว่าง การเดินข้างและเดินตาม โดยวางสิ่งกีดขวาง 2 อย่าง 3 รูปแบบในบริเวณทดลอง แบบที่ 1 (รูปที่ 5.13-รูปที่ 5.14) วางสิ่งกีดขวางที่ระยะความลึกเดียวกันโดยเว้นระยะตรงกลาง และให้ผู้ทดลองเดินผ่านบริเวณที่ว่างตรงกลาง แบบที่ 2 (รูปที่ 5.15-รูปที่ 5.16) วางสิ่งกีดขวางในแนวเดียวกันแต่มีระยะความลึกห่างกัน และให้ผู้ทดลองเดินขนานไปกับแนวของสิ่งกีดขวางทั้งสอง และแบบที่ 3 (รูปที่ 5.17-รูปที่ 5.18) วางสิ่งกีดขวางคล้ายแบบที่ 2 แต่ลดระยะห่างลงมา และผู้ทดลองเดินแบบเดียวกับ แบบที่ 2 เช่นกัน

## ผลการทดลอง

รูปแบบ	Mean distance to obstacle(มิลลิเมตร)	Min distance to obstacle(มิลลิเมตร)	เวลา(วินาที)
1	344.8	2513.9	211.2
2	400.2	2393.2	195.3
3	381.7	2270.2	85.0

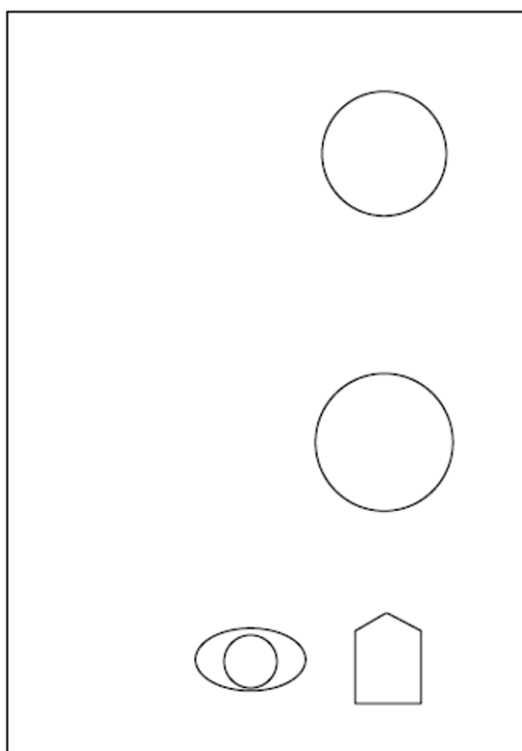
ตารางที่ 5.9 แสดงผลการวัดค่าเมื่อหุ่นยนต์ทำงานทั้งระบบ



รูปที่ 5.13 แผนผังการทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 1



รูปที่ 5.14 การทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 1



รูปที่ 5.15 แผนผังการทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 2



รูปที่ 5.16 การทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 2

จากการทดลองพบว่า เมื่อทดลองในแบบที่ 1 เริ่มต้นหุ่นยนต์จะเดินเคียงข้างผู้ทดลองไประยะหนึ่ง จากนั้นหุ่นยนต์จะเปลี่ยนเป็นเดินตามผู้ทดลองผ่านช่องว่างระหว่างสิ่งกีดขวาง เมื่อผู้ทดลองเดินผ่านช่องไปสักพัก หุ่นยนต์ก็เปลี่ยนกลับมาเป็นเดินข้างผู้ทดลอง และเมื่อผู้ทดลองเดินย้อนกลับมาทางเดิม หุ่นยนต์ก็มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนเช่นเดียวกับขาไป

ในส่วนการทดลองแบบที่ 2 เริ่มต้นหุ่นยนต์จะเดินเคียงข้างผู้ทดลองไประยะหนึ่ง จากนั้นหุ่นยนต์จะเปลี่ยนเป็นเดินตามผู้ทดลอง เมื่อผู้ทดลองเดินผ่านสิ่งกีดขวางมาระยะหนึ่ง หุ่นยนต์ทำการเปลี่ยนมาเป็นเดินข้างผู้ทดลอง ถัดมาเมื่อผู้ทดลองเดินเข้าไปสิ่งกีดขวางที่สอง หุ่นยนต์ก็เปลี่ยนมาเป็นเดินตามผู้ทดลอง และเปลี่ยนกลับเป็นเดินข้างเช่นเดิม

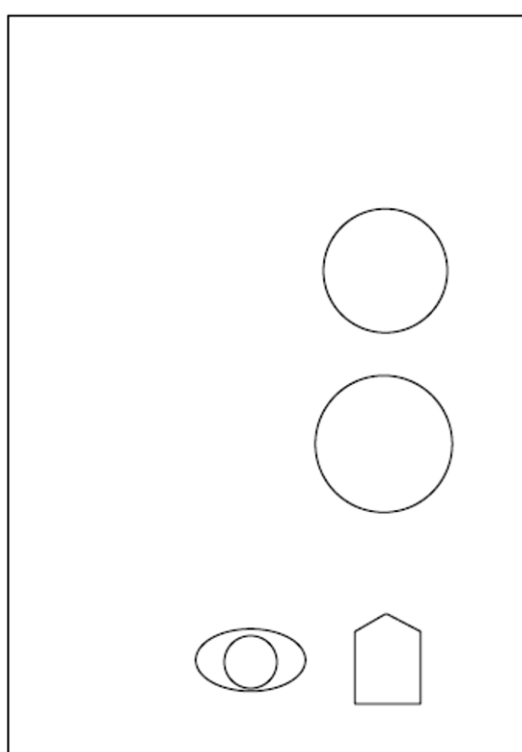
สำหรับการทดลองแบบที่ 3 หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่คล้ายในแบบที่ 2 ยกเว้นเมื่อเคลื่อนที่อยู่ระหว่างสิ่งกีดขวางทั้งสอง กล่าวคือสิ่งกีดขวางทั้งสองมีระยะห่างน้อย ทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถเปลี่ยนกลับเป็นการเดินเคียงข้างได้ หุ่นยนต์จึงรักษาการเคลื่อนที่แบบเดินตามจนกระทั่งผู้ทดลองเดินผ่านสิ่งกีดขวางที่สอง หุ่นยนต์จึงเปลี่ยนกลับมาเป็นเดินเคียงข้างผู้ทดลองได้

ผลการทดลองจากตารางที่ 5.9 พบว่า ระยะห่างจากหุ่นยนต์ถึงสิ่งกีดขวางที่น้อยที่สุดของแต่ละการทดลองมีค่ามากกว่า 30 เซนติเมตร ซึ่งมีค่ามากกว่ารัศมีของหุ่นยนต์ (ประมาณ 25 เซนติเมตร) และระยะห่างโดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 200 เซนติเมตร ซึ่งระยะห่างทั้งสองค่าแสดงให้เห็นว่า หุ่นยนต์มีการเว้นระยะจากสิ่งกีดขวางทำให้ไม่เกิดการชนกันได้

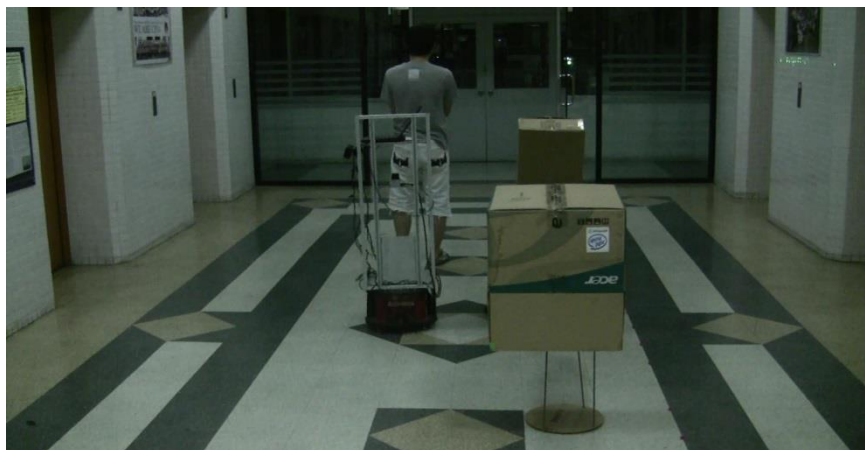
การเดินของผู้ทดลองในการทดลองที่จะทำให้ระบบทำงานได้ ต้องเป็นการเดินที่ช้ากว่าความเร็วในการเดินปกติ (ประมาณ 0.2 เมตรต่อวินาที) เนื่องจาก Kinect รับข้อมูลที่ครอบคลุมบริเวณไม่กว้างนัก นอกจากนี้ต้อง

พยายามไม่ให้เกิดการบังเท้าซ้าย เนื่องจากตำแหน่งที่ติดตั้ง Kinect จะเจอการบังเท้าซ้ายทั้งจากเท้าขวาและกางเกงของผู้ทดลอง การก้าวเท้าที่ทำให้ระบบยังคงทำงานได้ คือเมื่อก้าวเท้าขวาไปแล้วให้พยายามกลับมาที่จังหวะก้าวเท้าซ้ายอย่างรวดเร็ว เนื่องจากมีโอกาสที่เท้าขวาหรือขาขวาจะบังเท้าซ้ายในจังหวะก้าวเท้าขวา

ปัญหาที่พบในการทดลองให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ปัญหาที่เกิดจากผู้ทดลอง ซึ่งประกอบด้วย การเดินที่หลุดจากขอบเขตของ Kinect หรือการที่ขาขวาบังเท้าซ้าย อีกปัญหาหนึ่งที่พบคือพื้นที่บริเวณทดลอง (โถงหน้าลิฟต์ ชั้น 20) มีระดับที่ไม่เท่ากัน ทำให้ในบางตำแหน่ง ระบบจะเจอวัตถุอื่นอยู่บนพื้น ซึ่งจริงๆแล้วเป็นข้อมูลของพื้น ทำให้การติดตามเท้าเกิดความผิดพลาดได้



รูปที่ 5.17 แผนผังการทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 3



รูปที่ 5.18 การทดลองหุ่นยนต์แบบที่ 3

จากผลการทดลองทั้งหมดเหล่านี้ แสดงให้เห็นว่าระบบการนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางสำหรับหุ่นยนต์เดินข้างคน ซึ่งประกอบไปด้วยการติดตามคนจากการติดตามขา และการนำทางหุ่นยนต์ 2 รูปแบบคือเดินข้างและเดินตาม สามารถนำทางให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปพร้อมกับคนได้ในสิ่งแวดล้อมหลายรูปแบบ โดยเมื่อหุ่นยนต์เจอสิ่งกีดขวางที่ทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถเดินเคียงข้างคนได้ หุ่นยนต์จะปรับรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นเดินตามคน และจะเปลี่ยนกลับเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างพอ ระบบที่นำเสนอไม่สามารถทำงานได้ในบางสถานการณ์เช่น มีสิ่งของวางอยู่บนพื้น ซึ่งทำให้การติดตามเท้าผิดพลาด รวมถึงการทำงานในบริเวณที่มีความพลุกพล่าน เช่น มีสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่หรือมีคนอื่นเคลื่อนที่ไปมาในบริเวณที่หุ่นยนต์ทำงาน ซึ่งสถานการณ์ทั้งสองไม่อยู่ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

## บทที่ 6

# สรุปการวิจัยและแนวทางการวิจัยในชั้นถัดไป

### 6.1 สรุปการวิจัย

จากผลการทดลอง จะสามารถสรุปรายละเอียดของวิธีการที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ได้เป็น 2 ส่วนได้แก่

#### 1. การติดตามคนจากการติดตามเท้า

จากการทดลองการติดตามเท้าของคน พบว่า แบบจำลองของคนประกอบไปด้วยเท้าของคน 2 ข้างสามารถสื่อถึงตัวคนทั้งตำแหน่งและทิศทางได้ถ้าคนเดินในท่าทางปกติ คือ ก้าวเท้าไปยังทิศทางเดิน การนำ Kinect ซ้ำลงพื้นเพื่อหาข้อมูลเท้าจากภาพความลึกสามารถหาข้อมูลเท้าได้จริง โดยความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งเท้ามีผลกระทบต่อการระบุตำแหน่งคนน้อย เนื่องจากมีค่าไม่สูงมาก ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนของการระบุทิศทางของคนส่งผลมากกว่า เนื่องจาก Kinect ไม่สามารถรับรู้ข้อมูลได้ทั้งเท้าตลอดเวลา จึงทำให้การความคลาดเคลื่อนระดับหนึ่ง

ข้อจำกัดของวิธีการที่นำเสนอคือ ระบบยังไม่สามารถจัดการถ้าหากบนพื้นที่ที่คนเดินไปมีวัตถุที่รูปร่างหรือขนาดใกล้เคียงเท้า นอกจากนี้ปัญหาสำคัญที่เกิดขึ้นในการติดตามเท้าคือ ข้อมูลการวัดขาดหายไปในช่วงที่เกิดจากเท้าอยู่นอกขอบเขตการรับรู้ของ Kinect หรือเกิดการบังโดยเท้าอีกข้างหนึ่ง (จากสภาพที่กำหนดในการทดลอง จะทำให้เกิดเหตุการณ์เท้าหรือขาขวาวางเท้าซ้าย)

#### 2. การนำทางหุ่นยนต์

จากการทดลองการนำทางหุ่นยนต์พบว่า ในรูปแบบการเดินตามคน หุ่นยนต์สามารถเดินตามคน โดยความคลาดเคลื่อนส่งผลกระทบต่อการทำงานน้อย ในส่วนของการเดินเคียงข้างคน หุ่นยนต์สามารถเดินข้างคนในกรณีที่คนเดินด้วยความเร็วที่ไม่สูงมากนัก และเท้าของคนอยู่ในขอบเขตของ Kinect

### 6.2 แนวทางการวิจัยในชั้นถัดไป

การแก้ไขปัญหการรับรู้ข้อมูลของ Kinect อาจแก้ได้ด้วยหลายแนวทางเช่น การแก้ไขการติดตามเท้าและการประมาณสถานะของเท้า เนื่องจากการเดินที่ทำให้เกิดการบังมักจะเป็นการเดินตรง ซึ่งอาจตั้งสมมุติฐานว่าหากเห็นเท้าไม่ครบ 2 ข้างแสดงว่าคนกำลังเดินตรงไปในทิศทางเดิม ส่วนอีกแนวทางหนึ่งที่เป็นไปได้ คือให้ผู้ทดลองหรือผู้ใช้สวมรองเท้าพิเศษที่มีการฝังเซนเซอร์ที่สามารถรับรู้การเคลื่อนที่ของเท้าได้เช่น Accelerometer เพื่อให้ได้สถานะ

ของเท้าโดยไม่ต้องอาศัยเซนเซอร์รับภาพ แต่ส่งข้อมูลเป็นคลื่นที่ไม่เจอปัญหาของการบังหรือหลุดขอบเขตการรับรู้ของเซนเซอร์ และยังคงใช้แบบจำลองจากเท้า 2 ข้างเช่นเดิม

ในส่วนของกรรนำทางหุ่นยนต์ สามารถปรับค่าคงที่รวมทั้งค่าที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการทำงานเพื่อให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มีความราบเรียบมากขึ้น

จากระบบที่ได้เสนอนั้น เป็นระบบที่สนใจแค่การติดตามคนและการนำทางหุ่นยนต์ โดยไม่สนใจการมีปฏิสัมพันธ์อื่นกับคนที่หุ่นยนต์มีลักษณะการทำงานที่ใกล้ชิดคนเกือบตลอดเวลา ดังนั้นแนวทางการวิจัยในขั้นถัดไปคือการมีปฏิสัมพันธ์อื่นกับคน หรือการพยายามที่จะค้นหาสถานะอื่นๆของคนเพื่อให้หุ่นยนต์นำไปใช้ตัดสินใจทำหรือไม่ทำพฤติกรรมบางอย่างนอกเหนือจากการเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ เพื่อให้คนได้รู้สึกถึงความเป็นธรรมชาติของหุ่นยนต์ได้มากขึ้น



## รายการอ้างอิง

- [1] Asoh, H. et al. Jijo-2: an office robot that communicates and learns. IEEE Intelligent Systems 16 (October 2001): 46 – 55.
- [2] RoboCup @Home « Robocup. [Online]. 2013. Available from: <http://www.robocup.org/robocup-home/>. [2013, March 05]
- [3] Lee, J. H., Tsubouchi, T., Yamamoto, K. and Egawa, S.. People tracking using a robot in motion with laser range finder. In Intelligent Robots and Systems, 2006 IEEE/RSJ International Conference, pp. 2936–2942. 2006.
- [4] Kobilarov, M., Sukhatme, G., Hyams, J. and Batavia, P.. People tracking and following with mobile robot using an omnidirectional camera and a laser. In Robotics and Automation, Proceedings 2006 IEEE International Conference, pp. 557 –562, 2006.
- [5] Chen, Z. and Birchfield, S. T.. Person following with a mobile robot using binocular feature-based tracking. In Intelligent Robots and Systems 2007, IEEE/RSJ International Conference, pp. 815–820, 2007.
- [6] Yoshimi, T. et al. Development of a person following robot with vision based target detection. In Intelligent Robots and Systems 2006, IEEE/RSJ International Conference, pp. 5286–5291, 2006.
- [7] Luo, R. C., Chang, N. W., Lin, S. C. and Wu, S. C.. Human tracking and following using sensor fusion approach for mobile assistive companion robot. In Industrial Electronics, 2009, 35th Annual Conference of IEEE, pp. 2235–2240, 2009.
- [8] Gockley, R., Forlizzi, J., and Simmon, R.. Natural person-following behavior for social robots. In Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, pp. 17–24, 2007.
- [9] Clodic, A. et al. Rackham: An Interactive Robot-Guide. In Robot and Human Interactive Communication 2006, The 15th IEEE International Symposium, pp. 502 –509, 2006.
- [10] Nishimura, S., Takemura, H. and Mizoguchi, H.. Development of attachable modules for robotizing daily items-Person following shopping cart robot. In Robotics and Biomimetics 2007, IEEE International Conference, pp. 1506–1511, 2007.
- [11] Goller, M., Steinhardt, F., Kerscher, T., Zollner, J. M. and Dillmann, R.. Proactive avoidance of moving obstacles for a service robot utilizing a behavior-based control. In Intelligent Robots and System, IEEE/RSJ International Conference, pp. 5984–5989, 2010.

- [12] Prassler, E., Bank, D. and Kluge, B.. Motion coordination between a human and a mobile robot. In Intelligent Robots and Systems 2002, IEEE/RSJ International Conference, pp. 1228–1233, 2002.
- [13] Kobayashi, Y., Kinpara, Y., Shibusawa, T. and Kuno, Y.. Robotic wheelchair based on observations of people using integrated sensors. In Intelligent Robots and Systems 2009, IEEE/RSJ International Conference, pp. 2013–2018, 2009.
- [14] Zajdel, W., Zivkovic, Z. and Krose, B.. Keeping track of humans: Have I seen this person before?. In Robotics and Automation 2005, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference, pp. 2081–2086, 2005.
- [15] Schlegel, C., Illmann, J., Jaberg, H., Schuster, M. and Worz, R.. Vision based person tracking with a mobile robot. In British Machine Vision Conference, pp. 418–427, 1998.
- [16] Kwon, H., Yoon, Y., Park, J. B. and Kak, A. C.. Person tracking with a mobile robot using two uncalibrated independently moving cameras. In Robotics and Automation 2005, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference, pp. 2877–2883, 2005.
- [17] Treptow, A., Cielniak, G. and Duckett, T.. Real-time people tracking for mobile robots using thermal vision. In Robotics and Autonomous Systems 54 (2006): 729–739.
- [18] Bevilacqua, A., Stefano, L. and Azzari, P.. People Tracking Using a Time-of-Flight Depth Sensor. In Video and Signal Based Surveillance 2006, IEEE International Conference, pp. 89–89, 2006.
- [19] Germa, T., Lerasle, F., Ouadah, N., Cadenat, V. and Devy, M.. Vision and RFID-based person tracking in crowds from a mobile robot. In Intelligent Robots and Systems 2009, IEEE/RSJ International Conference, pp. 5591–5596, 2009.
- [20] Topp, E. A., Kragic, D., Jensfelt, P. and Christensen, H. I.. An interactive interface for service robots. In Robotics and Automation 2004, Proceedings 2004 IEEE International Conference, pp. 3469–3474, 2004.
- [21] Glas, D. F., Miyashita, T., Ishiguro, H. and Hagita, N.. Laser tracking of human body motion using adaptive shape modeling. In Intelligent Robots and Systems 2007, IEEE/RSJ International Conference, pp. 602–608, 2007.
- [22] Zhao, H. and Shibasaki, R.. A novel system for tracking pedestrians using multiple single-row laser-range scanners. Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions 35 (2005): 283–291.
- [23] Fod, A., Howard, A. and Mataric, M. A laser-based people tracker. In Robotics and Automation 2002, Proceedings IEEE International Conference on, pp. 3024–3029, 2002.

- [24] Topp, E. A. and Christensen, H. I. Tracking for following and passing persons. In Intelligent Robots and Systems 2005, IEEE/RSJ International Conference, pp. 2321–2327, 2005.
- [25] Schulz, D., Burgard, W., Fox, D. and Cremers, A. B.. Tracking multiple moving targets with a mobile robot using particle filters and statistical data association. In Robotics and Automation, IEEE International Conference, pp. 1665–1670, 2001.
- [26] Kobilarov, M., Sukhatme, G., Hyams, J. and Batavia, P.. People tracking and following with mobile robot using an omnidirectional camera and a laser. In Robotics and Automation 2006, IEEE International Conference, pp. 557–562, 2006.
- [27] Bellotto, N. and Hu, H.. Multisensor-based human detection and tracking for mobile service robots. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions 39 (2009): 167–181.
- [28] Kinect - Xbox.com. [Online]. 2013. Available from: <http://www.xbox.com/en-US/kinect>. [2013, March 07]
- [29] Henry, P., Krainin, M., Herbst, E., Ren, X. and Fox, D.. Rgb-d mapping: Using depth cameras for dense 3d modeling of indoor environments,” in RGB-D: advanced reasoning with depth cameras workshop in conjunction with rss, 2010.
- [30] Huang, A. S. et al. Visual Odometry and Mapping for Autonomous Flight Using an RGB-D Camera. In 15th International Symposium on Robotics Research, 2011.
- [31] Krainin, M., Henry, P., Ren, X. and Fox, D.. Manipulator and object tracking for in-hand 3D object modeling. The International Journal of Robotics Research (2011).
- [32] Kluge, B.. Tracking multiple moving objects in populated, public environments. In Sensor Based Intelligent Robots, pp. 25–38, 2002.
- [33] Ramanan, D., Forsyth, D. A. and A. Zisserman. Strike a pose: Tracking people by finding stylized poses. In Computer Vision and Pattern Recognition 2005, IEEE Computer Society Conference, 2005.
- [34] Carballo, A., Ohya, A. and S. Yuta. Fusion of double layered multiple laser range finders for people detection from a mobile robot. In Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, IEEE International Conference, pp. 677–682, 2008.
- [35] Bellotto, N. and Hu, H.. People tracking with a mobile robot: A comparison of Kalman and particle filters. In Proceedings of the 13th International Conference on Robotics and Applications, pp. 388–393, 2007.
- [36] Lowe, D. G.. Object recognition from local scale-invariant features. In The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 1150–1157, 1999.

- [37] Darrell, T., Gordon, G., Harville, M. and J. Woodfill. Integrated person tracking using stereo, color, and pattern detection. In Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings IEEE Computer Society Conference, pp. 601–608, 1998.
- [38] Welch, G. and Bishop, G. An introduction to the Kalman filter. University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
- [39] ยุทธนา สุทธสุภา. การระบุตำแหน่งและสร้างแผนที่ในสามมิติด้วยกล้องวิดีโอแบบออบนิ. วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- [40] Choset, H., et al. Principles of Robot Motion: Theory, Algorithms, and Implementations. Boston: MIT Press, 2005.
- [41] Robot Platform | Knowledge | Holonomic vs. Non-Holonomic. [Online]. 2013. Available from: [http://www.robotplatform.com/knowledge/Classification\\_of\\_Robots/Holonomic\\_and\\_Non-Holonomic\\_drive.html](http://www.robotplatform.com/knowledge/Classification_of_Robots/Holonomic_and_Non-Holonomic_drive.html). [2013, April 01]
- [42] Ge, S. S. and Cui Y. J. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. Autonomous Robots 13 (2002): 207-222.
- [43] Qixin, C., Yanwen, H. and Jingliang, Z.. An Evolutionary Artificial Potential Field Algorithm for Dynamic Path Planning of Mobile Robot. In Intelligent Robots and Systems, IEEE/RSJ International Conference, pp. 3331–3336, 2006.
- [44] Scanning range finder URG-04LX | Photo sensor | PRODUCTS | HOKUYO AUTOMATIC CO.,LTD. [Online]. 2013. Available: [http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg\\_04lx.html](http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/urg_04lx.html). [2013, March 19]
- [45] Indoor laser measurement technology. [Online]. 2013. Available from: [http://www.sick.com/group/EN/home/products/product\\_portfolio/laser\\_measurement\\_systems/Pages/indoor\\_laser\\_measurement\\_technology.aspx](http://www.sick.com/group/EN/home/products/product_portfolio/laser_measurement_systems/Pages/indoor_laser_measurement_technology.aspx). [2013, March 19]
- [46] Camera Calibration and 3d Reconstruction — opencv v2.1 documentation. [Online]. 2013. Available from: [http://opencv.willowgarage.com/documentation/cpp/camera\\_calibration\\_and\\_3d\\_reconstruction.html](http://opencv.willowgarage.com/documentation/cpp/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html). [2013, May 01]
- [47] Hu, M. K.. Visual pattern recognition by moment invariants. Information Theory, IRE Transactions 8 (February 1962): 179 –187.
- [48] Chaumette, F.. Image moments: a general and useful set of features for visual servoing. Robotics, IEEE Transactions 20 (August 2004): 713 – 723.
- [49] Saito, M., Kitaguchi, K., Kimura, G. and Hashimoto, M.. People detection and tracking from fish-eye image based on probabilistic appearance model. In Proceedings of SICE Annual Conference, pp. 435–440, 2011.

- [50] Adept MobileRobots Pioneer 3-DX (P3DX) differential drive robot for research and education.  
[Online]. 2013. Available from: <http://www.mobilerobots.com/researchrobots/pioneerp3dx.aspx>. [2013, March 19]

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปกรณ์ อรรถนัสชาติ เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม 2531 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553

ได้รับทุนอรรถริยะคืนรังจากภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 - 2554