การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบต่างชนิด

นายนัฐพล บุญภินนท์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PATTERN FORMATION FOR HETEROGENOUS MULTI-ROBOT SYSTEMS

Mr.Nuttapon Boonpinon

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2007

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบต่างชนิด
โดย	นายนัฐพล บุญภินนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. อรรถวิทย์ สุดแสง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร. เฉลิมเอก อินทนากรวิวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. อรรถวิทย์ สุดแสง)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วิษณุ โคตรจรัส)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. วรเศรษฐ สุวรรณิก)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นัฐพล บุญภินนท์: การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบต่างชนิด. (PATTERN FORMATION FOR HETEROGENOUS MULTI-ROBOT SYSTEMS) อาจารย์ที่ปรึกษา : อ.ดร. อรรถวิทย์ สุดแสง, จำนวนหน้า 165 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบการควบคุมการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้แบบต่างชนิด โดยมุ่งเน้นการทำงานแบบกระจายโดยอาศัยข้อมูลท้องถิ่นและใช้การสื่อสารที่จำกัดระยะ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ในสามรูปแบบคือ การจัดเรียงตัวแบบวงกลม การจัดเรียงตัวเป็นกลุ่ม และการกระจายตัวแบบมีข้อจำกัด โดยใช้วิธีควบคุมเชิงพฤติกรรมร่วมกับสนามแรงเสมือนและการคำนวณแผนภาพโวรอนอยแบบท้องถิ่น ซึ่งผลการทดสอบโดยใช้โปรแกรมจำลองเหตุการณ์สามารถสรุปได้ว่า วิธีการจัดเรียงตัวแบบวงกลมที่เสนอสามารถทำงานได้เร็วและมีความถูกต้องมากกว่าวิธีการจัดเรียงตัวแบบวงกลมที่มีอยู่ ส่วนการจัดเรียงตัวเป็นกลุ่ม และการกระจายตัวแบบมีข้อจำกัดสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้เพียงข้อมูลและการสื่อสารท้องถิ่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

สาขาวิชา.....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา ..... 2550 .....

4870340721: MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORD: PATTERN FORMATION / MULTI-ROBOT

NUTTAPON BOONPINON : PATTERN FORMATION FOR HETEROGENOUS MULTI-ROBOT SYSTEMS. THESIS ADVISOR : ATTAWITH SUDSANG, PH.D., 165 pp.

This thesis proposes distributed pattern formation algorithms for multi-robot systems under limited communication. Three different pattern formation problems are addressed in this thesis (1) circular formation, (2) squad formation and (3) constrained coverage. A behavior based control scheme is exploited along with artificial potential field and distributed voronoi diagram computation. The results from simulation show that proposed circular formation algorithm outperforms the best current method. The squad formation and constrained coverage depict good performance even with limited local information and sensing ranges.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ....Computer Engineering.... Student's signature .....
Field of study ...Computer Engineering... Advisor's signature .....
Academic year .....2007.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยการสนับสนุนและคำปรึกษาอันมีค่าจาก อ.ดร.อรรถวิทย์ สุดแสง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งนอกจากจะชี้แนะและให้ความรู้เกี่ยวกับวิทยานิพนธ์แล้ว คำแนะนำของอาจารย์และประสพการณ์ต่างๆ ที่อาจารย์ได้ตั้งใจอบรมสั่งสอนตลอดระยะเวลาการศึกษามีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาศักยภาพของข้าพเจ้า ถ้านับว่าสิ่งใดมีค่าที่สุดในการศึกษาขั้นบัณฑิตศึกษา ข้าพเจ้ามั่นใจอย่างยิ่งว่านั่นคือโอกาสในการพัฒนาตนเองที่อาจารย์ได้มอบให้ตามความสามารถและความถนัดของแต่ละคน ผู้เขียนมีความซาบซึ้งและขอขอบพระคุณอาจารย์มา ณ. ที่นี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย . . . . . ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ . . . . . จ
กิตติกรรมประกาศ . . . . . ฉ
สารบัญ . . . . . ช
สารบัญตาราง . . . . . ฎ
สารบัญรูปภาพ . . . . . ฐ
บทที่

1 บทนำ **1**
1.1 ปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3 สิ่งที่ได้รับจากงานวิจัย 2
1.4 ลำดับเนื้อหาในงานวิจัย 3

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง **4**
2.1 วิธีการควบคุมหุ่นยนต์เชิงพฤติกรรม 4
2.1.1 โครงสร้างแบบซับซัมชั่น (Subsumption Architecture) 6
2.1.2 โครงสร้างแบบมอเตอร์สคีมา (Motor-schema Architecture) 8
2.2 สนามพลังงานศักย์เสมือน (Artificial Potential Field) 9
2.3 แผนภาพโวโรนอย (Voronoi Diagram) 11
2.3.1 นิยามของแผนภาพโวโรนอย 12
2.3.2 การแบ่งสามเหลี่ยมเดลองเน 12
2.3.3 แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล (Centroidal Voronoi Diagram) . . 12
2.3.3.1 คุณสมบัติของแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล 13
2.3.3.2 วิธีการการสร้างแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล 15
2.3.3.3 การประยุกต์แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล 15

3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **17**
3.1 การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีการแบบศูนย์กลาง 17
3.2 การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีการแบบกระจาย 18
3.3 การกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ 26
3.4 การจัดสรรงานของกลุ่มหุ่นยนต์ 34
3.5 การประยุกต์ใช้งานของแผนภาพโวโรนอย 37

4 การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์หลายชนิด **41**

บทที่ หน้า

4.1 บทนำ 41
4.2 ตัวจำลองเหตุการณ์ 41
4.2.1 แบบจำลองของหุ่นยนต์ 42
4.2.1.1 คุณสมบัติทั่วไป 42
4.2.1.2 การรับรู้ 42
4.2.1.3 การเคลื่อนที่ 44
4.2.1.4 การสื่อสาร 45
4.2.2 สิ่งแวดล้อมจำลอง 45
4.2.3 การทำงานของตัวจำลองเหตุการณ์ 47
4.3 การจัดเรียงตัวแบบวงกลม 48
4.3.1 นิยามของปัญหา 48
4.3.2 แนวคิดเบื้องต้นของการจัดเรียงตัวแบบวงกลม 49
4.3.3 สนามพลังงานศักย์เสมือนสำหรับการจัดเรียงตัวแบบวงกลม 49
4.3.3.1 สนามพลังงานศักย์ผลักจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน 51
4.3.3.2 สนามพลังงานศักย์ดูดจากหุ่นยนต์ต่างชนิด 51
4.3.3.3 สนามพลังงานศักย์ผลักจากสิ่งกีดขวาง 53
4.3.4 การประยุกต์ใช้งานสนามพลังงานศักย์เสมือนในการจำลองเหตุการณ์ 55
4.3.5 การเคลื่อนที่พร้อมกับการคงการจัดเรียงตัว 55
4.3.6 การเปรียบเทียบกับวิธีการอ้างอิง 56
4.4 การจัดกลุ่มหุ่นยนต์ 57
4.4.1 นิยามของปัญหา 58
4.4.2 แนวคิดเบื้องต้นของวิธีการจัดกลุ่มหุ่นยนต์ 58
4.4.3 การกระจายตัวและจับกลุ่ม 59
4.4.3.1 การกระจายตัว 61
4.4.3.2 การจับกลุ่ม 65
4.4.4 การกระจายกลุ่ม 66
4.4.5 การประมูลแบบท้องถิ่น 67
4.4.5.1 การแสดงตัวขอรับการนำทาง 68
4.4.5.2 การปรับค่าตารางระยะทาง 69
4.4.5.3 การประมูลแบบท้องถิ่น 72
4.4.6 การเดินทางมารวมกลุ่ม 73
4.5 การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข 74
4.5.1 นิยามของปัญหา 74

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ หน้า

4.5.2 แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข 75
4.5.3 การปรับปรุงตารางระยะทาง 75
4.5.3.1 การปรับปรุงตารางระยะทางแบบท้องถิ่น 76
4.5.3.2 การปรับปรุงตารางระยะทางแบบแลกเปลี่ยน 77
4.5.4 การเคลื่อนที่ตามผู้นำทาง 78
4.5.5 การกระจายตัวในบริเวณ 79
4.5.5.1 การปนเปื้อนและการสลายตัว 79
4.5.5.2 ผนังเสมือนและจุดอันตราย 79

5 ผลการทดลอง 83
5.1 การจัดเรียงตัวแบบวงกลม 83
5.1.1 ผลการเรียงตัวแบบวงกลม 83
5.1.2 ผลของอัตราส่วนของชนิดของหุ่นยนต์ 85
5.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_a และ K_r 87
5.1.3.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_a 87
5.1.3.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_r 88
5.1.4 ผลของการเพิ่มจำนวนชนิดของหุ่นยนต์ 89
5.1.5 ผลของการเคลื่อนที่พร้อมกับการคงการจัดเรียงตัวแบบวงกลม 90
5.1.6 ผลของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมในสามมิติ 91
5.1.7 สรุปผลการทดลองการจัดเรียงตัวแบบวงกลม 92
5.2 การจัดกลุ่ม 94
5.2.1 ผลการจัดกลุ่มของกลุ่มหุ่นยนต์ 94
5.2.2 ผลของค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์ต่อการจัดกลุ่ม 95
5.2.2.1 ผลของค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์ต่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำงาน . . 96
5.2.2.2 ผลของค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์ต่อค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของพื้นที่บริเวณโวโรนอย 97
5.2.3 ผลของจำนวนหุ่นยนต์ต่อการจัดกลุ่ม 98
5.2.4 การครอบคลุมพื้นที่รับรู้ 100
5.2.5 สรุปผลการทดลองการจัดกลุ่มหุ่นยนต์ 100
5.3 การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข 103
5.3.1 ผลการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข 103
5.3.2 ผลของระยะปลอดภัยต่อการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข 104
5.3.3 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอย 108

บทที่ หน้า

5.3.4 ผลของค่าการสลายตัวต่อการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข 110
5.3.5 สรุปผลการทดลองการกระจายแบบมีเงื่อนไข 112

6 บทสรุป **114**
6.1 บทสรุป 114
6.2 แนวทางการประยุกต์ใช้งาน 115
6.3 แนวทางการพัฒนาต่อ 116
6.3.1 การกระจายตัวแบบแบ่งความสำคัญ (Context sensitive coverage) 116
6.3.2 การซ่อมแซมตัวเอง 116
6.3.3 การกระจายตัวในสามมิติ 117
6.3.4 การติดตามวัตถุ 117
รายการอ้างอิง 118

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การอ้างอิงตัวตนในการสื่อสารของกลุ่มหุ่นยนต์ **124**
ก.1 ปัญหาการเชื่อมโยงการรับรู้และการสื่อสาร 124
ก.2 แนวคิดเบื้องต้นของการอ้างอิงตัวตนในการสื่อสารของกลุ่มหุ่นยนต์ 125
ก.2.1 การระบุตัวหุ่นยนต์ที่ต้องการติดต่อด้วย 125
ก.2.2 ส่งข้อมูลขอติดต่อสื่อสาร 126
ก.2.3 หุ่นยนต์ที่ได้รับข้อมูลทำการตัดสินใจ 127
ก.3 ปัญหาของการอ้างอิงตัวตน 127
ก.4 วิธีการอ้างอิงตัวตนด้วยรูปแบบร่วม 129
ก.4.1 การส่งข้อมูลเพื่อขอการติดต่อสื่อสาร 129
ก.4.2 การตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล 130
ก.4.2.1 คำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์รอบข้างจากข้อมูลคำร้องขอติดต่อสื่อสาร 131
ก.4.2.2 คำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์รอบข้างของหุ่นยนต์ที่ได้รับข้อความร้องขอ 132
ก.4.2.3 คำนวณค่าความผิดพลาด 132
ก.5 การทดลอง 138
ก.5.1 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่ไม่มีข้อผิดพลาดทางการวัด 138
ก.5.2 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดระยะทาง 139

บทที่ หน้า

ก.5.3 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดมุม 143
ก.5.4 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการระบุชนิด 145
ก.5.5 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดหลายแบบ 147
ก.6 สรุปผลการทดลอง 147
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 149

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า
2.1 ตัวอย่างพฤติกรรมและค่าความสำคัญที่ใช้ในงานวิจัยการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์ 9
3.1 การจำแนกงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์แบบกระจาย 27
3.2 การจำแนกงานวิจัยเกี่ยวกับการกระจายตัวของหุ่นยนต์แบบกระจาย 33
4.1 ตารางผลการทดลองการจัดเรียงตัวแบบวงกลม 56
4.2 ตารางข้อมูลตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ข้างเคียง 63
4.3 ตารางข้อมูลตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ข้างเคียงที่ผ่านการเรียงแล้ว 63
4.4 ตารางข้อมูลตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ข้างเคียงที่เลือกให้หุ่นยนต์ที่มีระยะห่างน้อยที่สุดเป็นตัวเริ่มต้น 63
4.5 ตัวอย่างตารางระยะทางที่มี $m = 5$ 70
4.6 ตาราง 70
4.7 ตัวอย่างตารางระยะทาง 76
5.1 ตารางผลการทดลองการจัดเรียงตัวแบบวงกลม 85
5.2 ตารางผลการทดลองอัตราส่วนของชนิดของหุ่นยนต์ 87
5.3 ตารางผลการทดลองการจัดกลุ่ม 99
5.4 ตารางแสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ระยะปลอดภัยต่างๆ 106
5.5 ตารางแสดงความผิดพลาดที่ค่าการสลายตัวต่างๆ 111
ก.1 ข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสาร 127
ก.2 ข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสาร 127
ก.3 ข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสาร 130
ก.4 ผลการทดลองวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่ไม่มีข้อผิดพลาดทางการวัด 139
ก.5 ผลการทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดระยะทาง 140
ก.6 ผลการทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดมุม 144
ก.7 ผลการทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการระบุชนิด 146
ก.8 ผลการทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดระยะทาง 147

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ หน้า

2.1 การจัดแบ่งโครงสร้างการควบคุมหุ่นยนต์ 4

2.2 แนวคิดเบื้องต้นของโครงสร้างแบบซับซัมชั่น (ก) โครงสร้างแบบดั้งเดิมของการควบคุมหุ่นยนต์(ข) โครงสร้างของการควบคุมหุ่นยนต์แบบแบ่งพฤติกรรมตามงาน . . 7

2.3 โครงสร้างการจัดลำดับชั้นของพฤติกรรม โดยชั้นที่ 0 คือชั้นที่มีความสำคัญมากที่สุด . 8

2.4 โครงสร้างวิธีการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบมอเตอร์สคีมา 9

2.5 ตัวอย่างโครงสร้างการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบมอร์เตอร์สคีมา 10

2.6 ตัวอย่างแผนภาพโวโรนอย (ก) แผนภาพโวโรนอยที่มีจุดกำเหนิด 2 จุด(ข) แผนภาพโวโรนอยที่มีจุดกำเหนิด 3 จุด (ข) แผนภาพโวโรนอยที่มีจุดกำเหนิด 50 จุด (ข) แผนภาพโวโรนอยที่มีจุดกำเหนิด 100 จุด 13

2.7 การแบ่งสามเหลี่ยมเดลองเน (ก) การแบ่งสามเหลี่ยมเดลองเนที่มีจุดกำเหนิด 3 จุด(ข) การแบ่งสามเหลี่ยมเดลองเนที่มีจุดกำเหนิด 50 จุด 14

2.8 แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลที่ประกอบด้วยจุดสองกำเนิดสองจุด 14

2.9 แสดงผลการทำงานของวิธีการของ Lloyd (ก) เมื่อเริ่มการทำงาน (ข) เมื่อสิ้นสุดการทำงาน 16

3.1 ระบบเครื่องหมายจราจรอัจฉริยะของ (ก) เครื่องหมายจราจรที่ติดตั้งหุ่นยนต์ขนาดเล็กไว้ภายใน (ข) การเคลื่อนที่ของกลุ่มเครื่องหมายจราจร 19

3.2 ภาพฝูงนกจำลองจากงานวิจัยของ Reynolds 20

3.3 รูปแบบการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ที่เสนอโดย Balch และ Arkin 21

3.4 การอ้างอิงตำแหน่งหุ่นยนต์ (ก) อ้างอิงจากหุ่นยนต์สองตัว ($l-l$) (ข) อ้างอิงจากหุ่นยนต์ตัวเดียว($l-\psi$) 21

3.5 จุดยึดเกาะแบบต่างๆ ในงานวิจัยของ Balch และ Hybinette 23

3.6 การเรียงตัวของหุ่นยนต์เทียบกับหุ่นยนต์ผู้นำ (ก) แบบมีหุ่นยนต์ผู้ตามอยู่สองด้าน (ข) แบบมีหุ่นยนต์ผู้ตามอยู่ด้านเดียว 24

3.7 หน่วยเล็กที่สุดของหกเหลี่ยมที่ได้จากการจัดเรียงโดยอาศัยหลักการฟิสิกส์เสมือน . . . 25

3.8 รูปแบบการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ตามนิยามของ Gage (ก) การกระจายแบบครอบคลุม(ข) การกระจายแบบกำแพง (ค) การกระจายแบบกวาด 28

3.9 ตัวอย่างการเลือกทิศทางของหุ่นยนต์จากงานวิจัยของ Winfield 30

3.10 วิธีการกระจายกลุ่มหุ่นยนต์จากงานวิจัยของ Tan และคณะ (ก) การเคลื่อนที่ไปยังจุดศูนย์กลางมวลบริเวณโวโรนอย(ข) การสร้างบริเวณโวโรนอยในกรณีที่มีสิ่งกีดขวาง 32

3.11 โครงสร้าง ALLIANCE 35

3.12 วิธีการจัดสรรงานสำหรับกลุ่มหุ่นยนต์โดยอาศัยกลไกตลาด (ก) ตัวอย่างโครงสร้างของหุ่นยนต์ในกลุ่ม(ข) ตัวอย่างโครงสร้างของกลุ่มหุ่นยนต์ 36

รูปที่ หน้า

3.13 โครงสร้างของแผนภาพโวโรนอยที่พบในธรรมชาติ (ก) โครงสร้างของฟองสบู่ในภาชนะปิด (ข) โครงสร้างของปีกแมลงปอ 38
3.14 ผลการทดลองการบีบอัดรูปภาพ (ก)ภาพต้นแบบความละเอียด 8 บิท (ข) ภาพที่ถูกบีบอัดด้วยวิธีมอนติคาร์โลความละเอียด 3 บิท (ค) ภาพที่ถูกบีบอัดด้วยวิธีแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลความละเอียด 3 บิท (ง) ภาพที่ถูกบีบอัดด้วยวิธีแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลและผ่านขั้นตอนการไดเทอร์ริ่ง (Dithering) ความละเอียด 3 บิท 39
3.15 พฤติกรรมการขุดหลุมวางไข่ของปลา mouthbreeder (Tilapia mossambica) 40
4.1 การรับรู้สิ่งกีดขวาง 43
4.2 แบบจำลองของหุ่นยนต์ในการจำลองเหตุการณ์ 44
4.3 การเร่งความเร็วและการลดความเร็วของหุ่นยนต์ 45
4.4 การเร่งความเร็วและการลดความเร็วของหุ่นยนต์ในการจำลองเหตุการณ์ 46
4.5 แบบจำลองของสิ่งแวดล้อมในการจำลองเหตุการณ์ 46
4.6 การทำงานของตัวจำลองเหตุการณ์ 47
4.7 แนวคิดเบื้องต้นของวิธีการจัดเรียงตัวแบบวงกลม 50
4.8 ลักษณะของแรงผลักที่กระทำต่อหุ่นยนต์ 52
4.9 ลักษณะของแรงดูดที่กระทำต่อหุ่นยนต์ 53
4.10 แรงกระทำต่อหุ่นยนต์ที่เกิดจากสิ่งกีดขวาง 54
4.11 แนวคิดเบื้องต้นของการจัดกลุ่มหุ่นยนต์ 59
4.12 ตัวอย่างการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) การกระจายแบบสุ่ม(ข) การกระจายที่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน 60
4.13 การจับตัวของหุ่นยนต์ (ก) ก่อนการจับตัวหุ่นยนต์กำลังเดินทางอย่างเป็นอิสระต่อกัน(ข) หุ่นยนต์เคลื่อนที่มารวมตัวกัน 60
4.14 แนวคิดของการสร้างบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่น 62
4.15 การหาตำแหน่งหุ่นยนต์ตัวอื่น 62
4.16 การจับกลุ่มของหุ่นยนต์ (ก) การตรวจพบ(ข) การให้หมายเลขกลุ่ม (ค) การเคลื่อนที่เข้ากลุ่ม 65
4.17 แนวคิดของการประมูลแบบท้องถิ่น (ก) แสดงกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบและการสื่อสารระหว่างกลุ่ม(ข) แสดงการประมูลและผู้ชนะประมูล 68
4.18 การคำนวณตำแหน่งสัมพัทธ์ 72
4.19 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อพบสิ่งกีดขวาง 74
4.20 แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข 76
4.21 แนวคิดของการปนเปื้อนและการสลายตัว(ก)เมื่อหุ่นยนต์อยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้อง(ข) เมื่อหุ่นยนต์เริ่มเข้าสู่บริเวณที่ถูกต้อง (ค) เมื่อหุ่นยนต์เวลาผ่านไปจนการปนเปื้อนสลายตัวหมด 80

รูปที่ หน้า

4.22 แนวคิดของผนังเสมือน โดยมองจากมุมมองของหุ่นยนต์ชนิดที่ 0 81
5.1 ผลการเรียงตัวแบบวงกลม (ก) ที่เวลาเริ่มต้น (ข) ที่เวลา 50 หน่วย (ค) ที่เวลา 100 หน่วย (ง)ที่เวลา 200 หน่วย 84
5.2 ผลการเรียงตัวแบบวงกลม (ก) ที่เวลา 200 หน่วย (ข) ที่เวลา 900 หน่วย 85
5.3 แสดงความเร็วรวมของกลุ่มหุ่นยนต์ 86
5.4 ผลของอัตราส่วนของชนิดของหุ่นยนต์ (ก) 20:40 (ข) 10:50 86
5.5 แสดงความสัมพันธ์ของ K_a และเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มหุ่นยนต์ที่จำนวน 40 ,60 ,80 และ 100 88
5.6 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_a (ก) $K_a = 0.01$ (ข) $K_a = 0.03$ 88
5.7 แสดงความสัมพันธ์ของ K_r และเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มหุ่นยนต์ที่จำนวน 40 ,60 ,80 และ 100 89
5.8 ผลของการเปลี่ยนจำนวนชนิดของหุ่นยนต์ (ก) 3 ชนิด (ข) 4 ชนิด 90
5.9 ผลของการเคลื่อนที่พร้อมกับการคงการจัดเรียงตัวแบบวงกลม (ก) ที่เวลา 160 (ข) ที่เวลา 1200 หน่วย (ค) ที่เวลา 2200 หน่วย (ง)ที่เวลา 5000 หน่วย 91
5.10 ผลของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมในสามมิติ 92
5.11 ผลการจัดกลุ่มของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) ที่เวลาเริ่มต้น (ข) ที่เวลา 50 หน่วย (ค) ที่เวลา 100 หน่วย (ง)ที่เวลา 150 หน่วย (ต)ที่เวลา 200 หน่วย (ฉ)ที่เวลา 300 หน่วย . 95
5.12 ความสัมพันธ์ของจำนวนกลุ่มที่มีสมาชิกครบกับเวลา 96
5.13 ความสัมพันธ์ของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยกับเวลา 96
5.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำงาน 97
5.15 ความสัมพันธ์ของความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์กับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอย 98
5.16 ความสัมพันธ์ของจำนวนหุ่นยนต์กับเวลาที่ใช้ในการทำงาน 99
5.17 ความสัมพันธ์ของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยกับจำนวนหุ่นยนต์ 100
5.18 ความสัมพันธ์ของบริเวณที่ตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ครอบคลุมกับเวลา 101
5.19 แสดงพื้นที่การรับรู้ของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) ที่เวลา 50 หน่วย (ข) ที่เวลา 75 หน่วย (ค) ที่เวลา 100 หน่วย (ง)ที่เวลา 150 หน่วย (ต)ที่เวลา 300 หน่วย (ฉ)ที่เวลา 400 หน่วย 102
5.20 แสดงพื้นที่การรับรู้ของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) ที่เวลาเริ่มต้น (ข) ที่เวลา 50 หน่วย (ค) ที่เวลา 100 หน่วย (ง)ที่เวลา 150 หน่วย (จ)ที่เวลา 300 หน่วย (ฉ)ที่เวลา 400 หน่วย 104
5.21 ความสัมพันธ์ของจำนวนหุ่นยนต์ที่อยู่มีตำแหน่งถูกต้องกับเวลา 105
5.22 พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ซึ่งประกอบด้วยสามบริเวณย่อย 105
5.23 แสดงการทำงานของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) ที่เวลาเริ่มต้น (ข) ที่เวลา 100 หน่วย (ค) ที่เวลา 200 หน่วย (ง)ที่เวลา 400 หน่วย 106

รูปที่ หน้า

5.24 แสดงผลของระยะปลอดภัยต่อการทำงานของวิธีการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข (ก) ระยะปลอดภัย 0 หน่วย (ข) ระยะปลอดภัย 5 หน่วย (ค) ระยะปลอดภัย 10 หน่วย (ง)ระยะปลอดภัย 15 หน่วย (จ)ระยะปลอดภัย 20 หน่วย (ฉ)ระยะปลอดภัย 25 หน่วย 107
5.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดกับระยะปลอดภัย 108
5.26 แสดงพื้นที่โวโรนอย ณ เวลาต่างๆ (ก) เวลา 100 หน่วย (ข) เวลา 200 หน่วย (ค) เวลา 300 หน่วย (ง) เวลา 500 หน่วย 109
5.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยกับเวลา . . 110
5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายตัวกับความผิดพลาด 111
ก.1 แสดงปัญหาการเชื่อมโยงการรับรู้และการสื่อสาร (ก) การรับรู้ของหุ่นยนต์(ข) การสื่อสารของหุ่นยนต์ 124
ก.2 การระบุตัวหุ่นยนต์ที่ต้องการติดต่อด้วย 126
ก.3 กรณีที่อาจเกิดความกำกวมในการตัดสินใจของหุ่นยนต์เป้าหมาย 128
ก.4 ตัวอย่างการอ้างอิงตัวตนด้วยรูปแบบร่วม 129
ก.5 การทดลองวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่ไม่มีข้อผิดพลาดทางการวัด 139
ก.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าความผิดพลาดเฉลี่ย 141
ก.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าร้อยละความถูกต้อง 141
ก.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ย 142
ก.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาด 143
ก.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดมุมกับค่าร้อยละความถูกต้อง 144
ก.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ย 145
ก.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการระบุชนิดกับค่าร้อยละความถูกต้อง 146

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหา

ในปัจจุบันการใช้งานหุ่นยนต์หลายตัวทำงานร่วมกันเริ่มเข้ามามีบทบาทในการใช้งานทั้งงานทางด้านการวิจัยและการใช้งานจริงมากขึ้นอย่างชัดเจนทั้งนี้เนื่องมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีที่ทำให้สามารถผลิตหุ่นยนต์ที่ไม่ซับซ้อนได้ง่ายและราคาถูก จึงเป็นไปได้ที่จะนำหุ่นยนต์ขนาดเล็กจำนวนมาก ตั้งแต่ร้อยถึงพันตัวมาทำงานร่วมกันในงานหนึ่งๆ การใช้งานหุ่นยนต์หลายตัวร่วมกันนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้หุ่นยนต์ตัวเดียวมีข้อดีหลายประการกล่าวคือ [1] กลุ่มหุ่นยนต์ที่ทำงานร่วมกันสามารถทำงานได้หลากหลายประเภทกว่าการใช้หุ่นยนต์ตัวเดียวตัวอย่างเช่นการเคลื่อนย้ายของที่มีขนาดใหญ่มากๆ อาจเกินความสามารถของหุ่นยนต์ตัวเดียวจะทำงานได้ นอกจากนี้การใช้หุ่นยนต์หลายตัวทำงานร่วมกันยังเพิ่มความทนทานต่อความผิดพลาดเพราะเมื่อ หุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวเกิดปัญหาหุ่นยนต์ที่เหลือจะสามารถทำงานที่ได้รับมอบหมายให้เสร็จได้ ความสามารถเช่นนี้จำเป็นอย่างมากในงานที่ต้องการความทนทานต่อความผิดพลาดหรืองานที่มีความเสี่ยงสูง เช่นการใช้ในการค้นหาและกู้ภัยเป็นต้น ความคุ้มค่ากับงบประมาณก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สนับสนุนการใช้งานของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวเพราะการสร้างหุ่นยนต์ที่ซับซ้อนนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการสร้างกลุ่มหุ่นยนต์ที่ไม่ซับซ้อนอย่างมีนัยสำคัญ

การใช้งานของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวทำให้เกิดประเด็นการศึกษาวิจัยใหม่ๆ เพื่อแก้ปัญหาที่โดยปกติแล้วไม่เกิดขึ้นกับระบบหุ่นยนต์ที่ใช้หุ่นยนต์ตัวเดียว เช่นการแบ่งงานระหว่างกลุ่ม การติดต่อสื่อสารระหว่างกลุ่ม และการจัดสรรทรัพยากรระหว่างกลุ่มเป็นต้น การจัดเรียงตัวก็เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการใช้งานกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัว [2, 3, 4] และยังเป็นปัญหาที่มีความสำคัญมากสำหรับกลุ่มหุ่นยนต์แบบหลายตัว เนื่องจากงานบางประเภทจำเป็นต้องให้หุ่นยนต์จัดเรียงกันเป็นรูปทรงเฉพาะเช่นการค้นหากับระเบิด[5] หรือการร่วมกันเคลื่อนย้ายวัตถุขนาดใหญ่โดยอาศัยการล้อมจับ[6] การนิยามของการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์นั้นได้มีการกล่าวถึงไว้ในงานวิจัยหลายชิ้น [2, 3] ซึ่งส่วนใหญ่จะมีความหมายร่วมกันคือ การประสานงานการเคลื่อนที่ระหว่างกลุ่มของหุ่นยนต์และรักษารูปแบบนั้นระหว่างการเคลื่อนที่ของกลุ่มหุ่นยนต์

การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์นั้นจะเป็นงานที่ไม่ซับซ้อนเลยหากหุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่มรู้ตำแหน่งสัมบูรณ์ของตัวเองและการสื่อสารระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์สามารถทำได้โดยไม่มีข้อจำกัดด้านปริมาณการสื่อสารระหว่างกลุ่มและระยะทางในการสื่อสาร หากสมมุติฐานข้างต้นนี้เป็นจริงแล้ว หุ่นยนต์แต่ละตัวก็เพียงแต่เคลื่อนตัวไปยังตำแหน่งที่ได้ระบุเอาไว้ล่วงหน้าเท่านั้น อย่างไรก็ตามข้อสมมุติฐานนี้ไม่สามารถเป็นจริงได้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากระยะทางในการรับรู้ของหุ่นยนต์ถูก

จำกัดด้วยคุณลักษณะของตัวรับรู้แต่ละแบบ รวมถึงการสื่อสารในการใช้งานจริงนั้นระยะการสื่อสารอาจถูกจำกัดด้วยกำลังส่งของอุปกรณ์สื่อสารหรือภูมิประเทศ และเมื่อนำหุ่นยนต์มาทำงานด้วยกันเป็นจำนวนมาก การที่จะส่งข้อมูลถึงทุกตัวด้วยการส่งซ้ำต่อไปเรื่อยๆ (flooding) จะไม่สามารถทำได้เพราะแบนด์วิดท์ของการสื่อสารมีจำกัด

การจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์เป็นพฤติกรรมแบบภาพรวม (global behavior) เนื่องจากการวัดประสิทธิภาพของการจัดเรียงตัวนั้นต้องทำที่ระดับของกลุ่มไม่สามารถสรุปได้จากข้อมูลของหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งในกลุ่ม ตัวอย่างเช่นถ้าต้องการจัดเรียงหุ่นยนต์ 100 ตัวเป็นวงกลม การวัดคุณสมบัติความเป็นวงกลมนั้นต้องทำโดยผู้สังเกตุที่อยู่ภายนอกและมองกลับมายังกลุ่มหุ่นยนต์ การวัดนี้ไม่สามารถทำได้โดยการอาศัยข้อมูลจากหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งหรือบางส่วนของกลุ่ม การเป็นพฤติกรรมแบบภาพรวมของการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์ทำให้การจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์เป็นปัญหาที่ซับซ้อนเพราะหุ่นยนต์แต่ละตัวต้องทำงานโดยอาศัยเพียงข้อมูลท้องถิ่นและการติดต่อสื่อสารที่จำกัดเพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพในระดับกลุ่มซึ่งเป็นประสิทธิภาพแบบภาพรวม (global performance)

งานวิจัยด้านการจัดการทำงานร่วมกันของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวมีการกล่าวถึงการใช้ประโยชน์จากความต่างชนิดกันของหุ่นยนต์ โดยเฉพาะงานวิจัยทางด้านการจัดสรรงานและสภาปัตยกรรมกลุ่ม[7, 8, 9, 10, 11] แต่สำหรับงานทางด้านการจัดเรียงตัวกันของกลุ่มหุ่นยนต์ความแตกต่างของหุ่นยนต์แต่ละตัวมักถูกมองเป็นอุปสรรคที่จำเป็นต้องมีการรองรับเป็นรายกรณีไปหรือมีการรับรู้ถึงความแตกต่างในการทำงานแต่ยังไม่มีการนำความแตกต่างของหุ่นยนต์ในกลุ่มมาใช้ให้เป็นประโยชน์ [12, 13]และคุณสมบัติเกี่ยวกับความแตกต่างกันของหุ่นยนต์นั้นเป็นคุณสมบัติที่มักจะรับรู้ได้ง่ายจากหุ่นยนต์ที่เป็นสมาชิกของกลุ่ม จึงทำให้เกิดแนวคิดในวิทยานิพนธ์นี้คือการนำความแตกต่างของกลุ่มหนยนต์มาใช้ให้เป็นประโยชน์ในการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัว

วิทยานิพนธ์นี้เสนอแนวคิดของการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบต่างชนิดมาใช้กับปัญหาการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์สามปัญหาคือ (1.) การเรียงตัวแบบวงกลม , (2.) การจัดกลุ่ม และ (3.) การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อออกแบบวิธีการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์หลายชนิดภายใต้ข้อจำกัดต่างๆ

1.3 สิ่งที่ได้รับจากงานวิจัย

ผลการออกแบบวิธีการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์หลายชนิดซึ่งคือวิธีการในการจัดเรียงตัวที่เป็นแบบกระจาย และสามารถบรรลุเป้าหมายได้โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีการจัดเรียงที่มีอยู่ในปัจจุบัน

1.4 ลำดับเนื้อหาในงานวิจัย

ลำดับเนื้อหาในรายงานฉบับนี้แบ่งออกเป็นส่วนต่างๆดังนี้

- บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย การควบคุมเชิงพฤติกรรมที่นำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมพฤติกรรมของหุ่นยนต์ในการจัดเรียงตัว , สนามแรงเสมือนซึ่งเป็นวิธีการที่นำมาใช้กับการจัดเรียงตัวแบบวงกลม และ แผนภาพโวโรนอยซึ่งนำมาประยุกต์ใช้ในการกระจายตัวของหุ่นยนต์ในปัญหาของการจัดกลุ่มและการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข
- บทที่ 3 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งประกอบด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดเรียงตัวกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีการแบบศูนย์กลาง, งานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดเรียงตัวกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีการแบบกระจาย , งานวิจัยที่เกี่ยวกับการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์, งานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดสรรงานของกลุ่มหุ่นยนต์ และ งานวิจัยที่เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งานของแผนภาพโวรอนอย
- บทที่ 4 กล่าวถึงสมมุติฐานและแบบจำลองของการจำลองเหตุการณ์ และเสนอวิธีการสำหรับการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบหลายชนิด โดยแแบ่งเนื้อหาตามปัญหาย่อยคือ (1.) การเรียงตัวแบบวงกลม , (2.) การจัดกลุ่ม และ (3.) การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข
- บทที่ 5 กล่าวถึงผลการทดลองและการสรุปผลการทดลองโดยแบ่งเนื้อหาตามปัญหาย่อย
- บทที่ 6 สรุปการทำงานของการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบหลายชนิด รวมทั้งข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

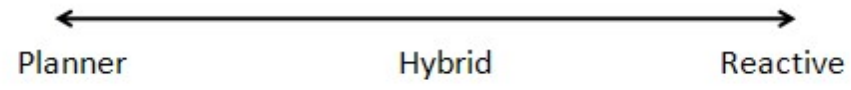
ในปัญหาทั้งสามที่เสนอได้มีนำวิธีการต่างๆ มาใช้ในการแก้ปัญหาซึ่งประกอบด้วย

1. **วิธีการควบคุมหุ่นยนต์เชิงพฤติกรรม** นำมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถมีพฤติกรรมหลายอย่างในเงื่อนไขที่ต่างกัน
2. **สนามพลังงานศักย์เสมือน** นำมาใช้ในการกระจายตัวของหุ่นยนต์และในการควบคุมการเคลื่อนที่
3. **แผนภาพโวโรนอย**นำมาใช้ในการกระจายตัวของหุ่นยนต์

2.1 วิธีการควบคุมหุ่นยนต์เชิงพฤติกรรม

หุ่นยนต์คือจักรกลที่ใช้ในการทำงานแทนมนุษย์ นั่นคือใช้ข้อมูลที่มีกระทำการเพื่อให้เกิดผลสำเร็จตามจุดมุ่งหมายของงาน นั่นหมายความว่าหุ่นยนต์ต้องประมวลผลข้อมูลที่ได้รับอาทิ ข้อมูลระยะทาง, ภาพถ่าย หรือตำแหน่ง เพื่อนำไปสู่การเลือกการกระทำที่เหมาะสม เช่นเลือกเส้นทางการเดิน เพื่อให้บรรลุเป้าย ตามจุดประสงค์ของงาน การประมวลผลดังกล่าวนี้อาจจะเหมือนการทำงานที่ไม่ซับซ้อนในกรณีตัวอย่าง แต่ในความเป็นจริงแล้วหุ่นยนต์ต้องทำงานตามจุดมุ่งหมายที่มีหลายจุดมุ่งหมายย่อย และมีข้อมูลจากตัวรับรู้หลากหลายชนิด การเลือกความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่รับรู้และการกระทำจึงเป็นงานที่ซับซ้อน ปัญหาการเลือกความสัมพันธ์นี่เองที่เป็นที่มาของการศึกษาด้านการควบคุม เพื่อให้ได้การกระทำที่เหมาะสมที่สุดสำหรับข้อมูลที่ได้รับในเวลาหนึ่งๆ

วิธีการควบคุมหุ่นยนต์นั้นเป็นหัวข้อหนึ่งที่ได้รับความสนใจมากในการวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์ ถ้าเราทำการแบ่งแยกประเภทของการควบคุมตามโครงสร้างการทำงาน จะแบ่งออกได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1: การจัดแบ่งโครงสร้างการควบคุมหุ่นยนต์

โดยในด้านหนึ่งคือด้านที่เป็นแบบการวางแผน (Planner) เป็นวิธีที่ใช้การควบคุมแบบรวม

ศูนย์ในการรวบรวมข้อมูลจากตัวรับรู้และประมวลผลเพื่อทำการสั่งงาน ตัวอย่างงานวิจัยในหมวดนี้คือ [14, 15] ซึ่งวิธีการนี้จำต้องมีข้อมูลแบบจำลองของพื้นที่ทำงานอย่างชัดเจนเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่าถูกต้อง ส่วนในอีกด้านหนึ่งของแผนผังคือการทำงานแบบโต้ตอบ (Reactive) วิธีการนี้เป็นการใช้กฎอย่างง่ายเชื่อมโยงข้อมูลจากตัวรับรู้ไปเป็นการกระทำทางตัวขับเคลื่อนเลย งานวิจัยที่อยู่ในหมวดนี้ได้แก่ [16, 17] และในส่วนที่อยู่ระหว่างการควบคุมทั้งสองวิธีนี้คือ การควบคุมแบบผสมผสาน (Hybrid Control) ซึ่งการควบคุมแบบผสมผสานเป็นการผนวกการควบคุมทั้งสองแบบที่กล่าวไว้ข้างต้นมีการใช้ตัวควบคุมแบบศูนย์กลางในการวางแผนงานระดับสูงเช่นการเดินทางไปยังเป้าหมาย ส่วนงานในระดับล่างเช่นการหลบหลีกสิ่งกีดขวางจะทำโดยใช้การควบคุมแบบโต้ตอบ ตัวอย่างงานวิจัยประเภทนี้ได้แก่ [18] วิธีการควบคุมทั้งสามวิธีมีข้อดีข้อเสียต่างกันกล่าวคือ การควบคุมแบบการวางแผนนั้นต้องการข้อมูลของพื้นที่การทำงานทั้งหมดโดยละเอียดเพื่อใช้ในการวางแผนซึ่งข้อมูลนี้มักจะหาได้ยากในสภาวะการทำงานจริง ส่วนข้อดีคือที่วิธีนี้รับประกันการหาวิธีที่ดีที่สุดได้ถ้าวิธีนั้นมีอยู่ ส่วนการทำงานแบบโต้ตอบนั้นมีข้อดีคือใช้ทรัพยากรในการทำงานน้อยและไม่ซับซ้อน ส่วนข้อเสียคือหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานที่ซับซ้อนมากได้ ส่วนวิธีการแบบผสมผสานนั้นเป็นวิธีการที่ผสมผสานการควบคุมแบบวางแผนและการควบคุมแบบโต้ตอบ ซึ่งมีข้อดีคือความสามารถที่เพิ่มขึ้นในการตอบโต้กับสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับการควบคุมแบบวางแผนและมีความสามารถในการแก้ปัญหาที่มากขึ้นเมื่อเทียบกับการควบแบบโต้ตอบ ส่วนข้อเสียคือ มีความต้องการข้อมูลของสิ่งแวดล้อมมากขึ้นและทำให้ต้องใช้ทรัพยากรในการทำงานมากขึ้น

การควบคุมเชิงพฤติกรรมนั้นนามคำนิยามของ Mataric [19] หมายถึง สาขาหนึ่งของวิทยาการหุ่นยนต์ที่เชื่อมโยง ปัญญาประดิษฐ์, วิศวกรรมศาสตร์ และ Cognitive Sciece เข้าด้วยกัน จุดมุ่งหมายของการควบคุมเชิงพฤติกรรมคือ 1. เพื่อพัฒนาวิธีการในการควบคุมระบบประดิษฐ์ตั้งแต่หุ่นยนต์ไปจนถึงซอฟต์แวร์เอเจนต์ 2. เพื่อใช้แบบจำลองของระบบหุ่นยนต์ในการจำลองและเข้าใจระบบทางชีววิทยาตั้งแต่สิ่งมีชีวิตไปจนถึงมนุษย์

วิธีการควบคุมเชิงพฤติกรรมนั้นถ้าจัดแบ่งตามการแบ่งในรูปที่ 2.1 แล้วการควบคุมเชิงพฤติกรรมนั้นอยู่บริเวณกลางของเส้นแบ่งนี้ เนื่องจากไม่มีการใช้ข้อมูลแบบจำลองของพื้นที่แต่ก็มีความซับซ้อนและมีความสามารถมากกว่าการควบคุมแบบโต้ตอบซึ่งเป็นเพียงคู่ของข้อมูลที่ได้รับกับการกระทำ ซึ่งจะเห็นว่าการควบคุมเชิงพฤติกรรมนั้นอยู่ในบริเวณเดียวกับการควบคุมแบบผสมผสานตามการแบ่งนี้ การควบคุมเชิงพฤติกรรมจะต่างกับการควบคุมแบบผสมผสานในแง่ที่ว่าการควบคุมเชิงพฤติกรรมจะไม่มีการแยกชั้นของการควบคุมว่าการควบคุมนี้เป็นการควบคุมระดับสูงหรือต่ำ ทั้งระบบจะเป็นชั้นเดียวกันคือเป็นพฤติกรรมเหมือนกันหมดแต่ยังสามารถให้ผลเช่นเดียวกับการใช้การควบคุมระดับสูงเนื่องจากการควบคุมระดับสูงนั้นจะถูกเปลี่ยนรูปแบบเป็นพฤติกรรมหลายๆพฤติกรรมที่ทำงานพร้อมกัน [19]

โครงสร้างของการควบคุมเชิงพฤติกรรมนั้นจะประกอบด้วย พฤติกรรมและตัวเลือกพฤติกรรม พฤติกรรมจะเป็นพฤติกรรมที่ไม่ซับซ้อนและทำงานไปพร้อมกันไม่ใช่ทำงานแบบเรียงลำดับ การ

ออกเชิงพฤติกรรมเหล่านี้สามารถทำแยกเป็นรายพฤติกรรมไปและนำมาเพิ่มเข้าสู่ระบบได้ โดยการออกแบบระบบควบคุมเชิงพฤติกรรมนั้นจะเป็นการออกแบบจากล่างขึ้นบน (Bottom-up method) คือออกเชิงพฤติกรรมย่อยทีละชิ้นและเพิ่มเข้าไปในระบบให้มีความสอดคล้องกัน ซึ่งจะเป็นวิธีการแบบวางแผนและแบบผสมผสานซึ่งจะใช้การออกแบบแบบจากบนลงล่าง พฤติกรรมแต่ละพฤติกรรมจะทำงานตามการกระตุ้นจากสองแหล่งคือการกระตุ้นจากภายในและการกระตุ้นจากภายนอก การกระตุ้นจากภายในเกิดได้จากสถานะของหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนไปหรือผลของพฤติกรรมอื่นๆที่ส่งผลมายังพฤติกรรมนั้น ส่วนการกระตุ้นจากภายนอกเกิดจากรับข้อมูลเข้ามาด้วยตัวรับรู้ต่างๆ อาทิ โซน่าร์ กล้อง หรือตัววัดระยะข้อมูลเหล่านี้จะสามารถเป็นตัวกระตุ้นของพฤติกรรมได้เช่นกัน ทุกพฤติกรรมจะทำงานไปพร้อมกันในลักษณะขนานกันไปและผลลัพธ์ของแต่ละพฤติกรรมก็จะเข้าสู่ตัวเลือกพฤติกรรม ตัวเลือกพฤติกรรมจะทำการเลือกพฤติกรรมตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ เช่น เลือกจากตัวที่มีความสำคัญมากที่สุด หรือเลือกจากผลรวมของทุกพฤติกรรมซึ่งวิธีการเลือกพฤติกรรมนี้จะใช้เป็นตัวแบ่งประเภทของการควบคุมเชิงพฤติกรรมอีกด้วย

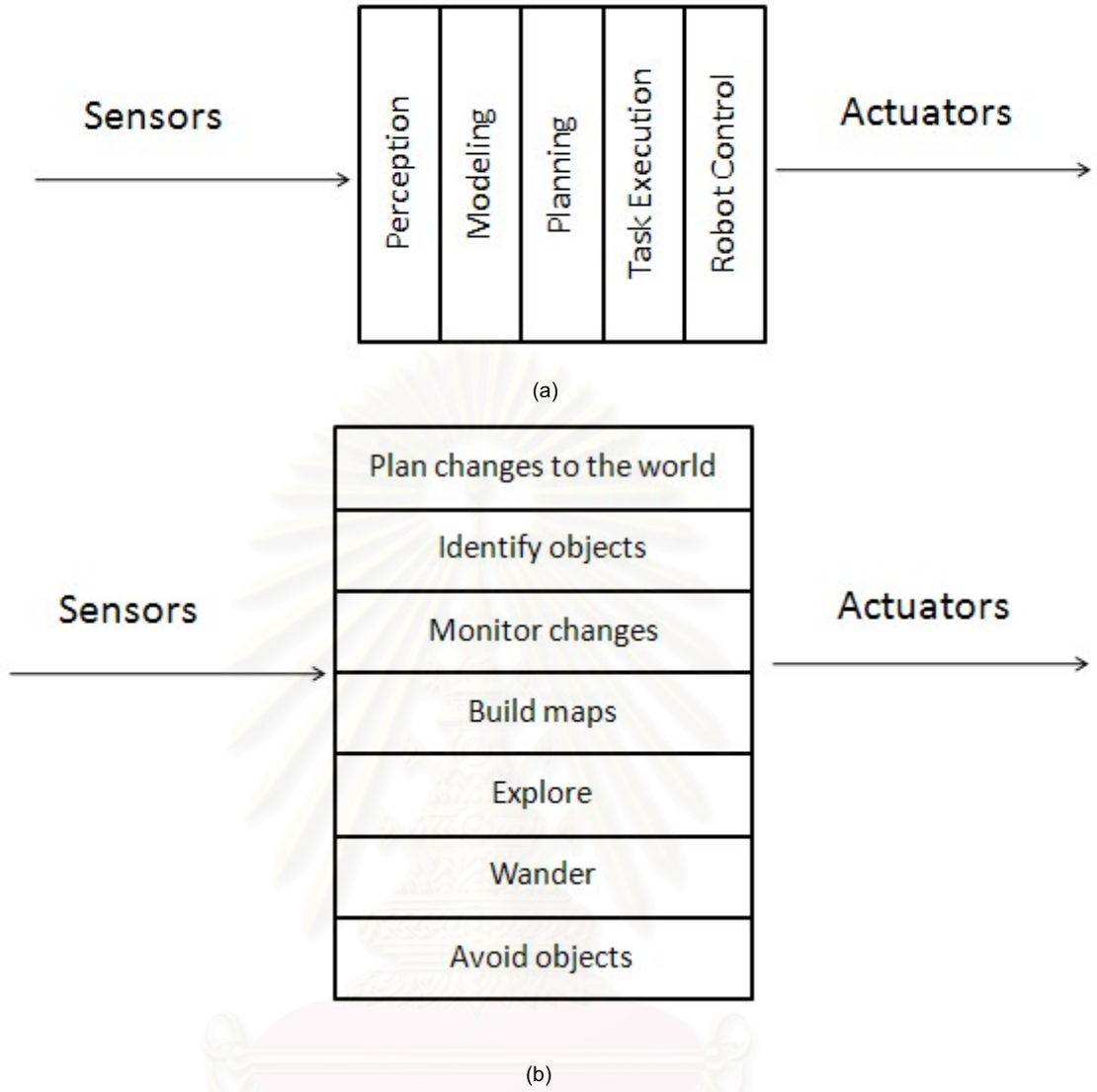
การควบคุมเชิงพฤติกรรมสามารถแบ่งย่อยได้เป็น โครงแบบสร้างซับซัมชั่น (Subsumption Architecture) และโครงสร้างแบบมอเตอร์สคีมา (Motor-schema Architecture)

2.1.1 โครงสร้างแบบซับซัมชั่น (Subsumption Architecture)

โครงสร้างแบบซับซัมชั่นได้รับการเสนอโดย Brooks [20] ซึ่งนับว่าเป็นงานที่เป็นรากฐานของการควบคุมเชิงพฤติกรรม โดยงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการของโครงสร้างแบบซับซัมชั่นพร้อมกับอ้างอิงถึงการทดลองกับหุ่นยนต์จริงหลายแบบ แนวคิดเบื้องต้นของโครงสร้างแบบซับซัมชั่นเป็นไปตามรูปที่ 2.2 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแนวคิดจากการที่พัฒนาหุ่นยนต์จากส่วนประกอยย่อยๆ เป็นรายหน้าที่มาประกอบกันเป็นการพัฒนาหุ่นยนต์ที่ประกอบด้วยพฤติกรรมสำหรับงานต่างๆมาประกอบกันขึ้น

ในการออกแบบโครงสร้างแบบซับซัมชั่นนั้นได้กล่าวถึงสมมุติฐานที่เป็นที่มาของโครงสร้างแบบซับซัมชั่นนั่นคือ

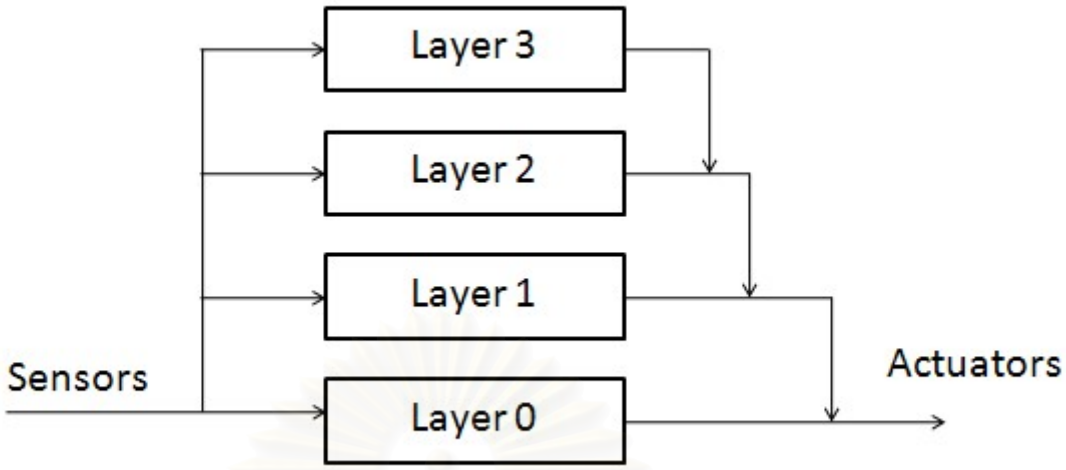
- งานที่ซับซ้อนและใช้ประโยชน์ได้ไม่จำเป็นต้องมาจากระบบที่ซับซ้อนฯ
- ระบบต่างๆควรจะมีความเรียบง่ายให้มากที่สุดเพื่อประโยชน์สองอย่าง 1. เมื่อสร้างระบบที่ซับซ้อนส่วนที่สำคัญคือการเชื่อมต่อระบบย่อยๆเข้าด้วยกันและเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระบบย่อยการเชื่อมต่อต่างๆจำต้องมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งสิ้นเปลืองเวลา 2. ถ้ามีส่วนใดของระบบถูกออกแบบมาเพื่อจัดการกับปัญหาย่อยใดปัญหาหนึ่งเป็นกรณีพิเศษจะทำให้เสถียรภาพการทำงานของทั้งระบบลดลง
- โลกจริงไม่ใช่เป็นโลกของสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตในการทดลองของงานวิจัยนี้จึงไม่มีการสร้างสภาวะแวดล้อมพิเศษให้หุ่นยนต์ทำงาน แต่นำหุ่นยนต์มาทำงานในสภาพการ



รูปที่ 2.2: แนวคิดเบื้องต้นของโครงสร้างแบบซับซัมชั่น (ก) โครงสร้างแบบดั้งเดิมของการควบคุมหุ่นยนต์(ข) โครงสร้างของการควบคุมหุ่นยนต์แบบแบ่งพฤติกรรมตามงาน

ใช้งานปกติที่มีมนุษย์เป็นส่วนหนึ่งของสิ่งแวดล้อมด้วย

จากการที่ Brooks ได้เสนอให้ใช้การแบ่งงานออกมาเป็นพฤติกรรมที่อ้างอิงตามงานแทนที่การแบ่งตามหน้าที่ของส่วนต่างๆของหุ่นยนต์นำไปสู่ปัญหาต่อไปที่ว่าเราจะเลือกพฤติกรรมใดของหุ่นยนต์มาสั่งการหุ่นยนต์ Brooks ได้เสนอแนวคิดเกี่ยวกับพฤติกรรมที่เป็นชั้นว่า พฤติกรรมจะมีความสำคัญต่างกันตามลำดับชั้นดังแสดงในรูปที่ 2.3 เมื่อพฤติกรรมที่มีความสำคัญมากกว่าอยู่ในสถานะให้ผลลัพธ์จะระงับผลลัพธ์ของพฤติกรรมที่มีความสำคัญน้อยกว่านี่จึงเป็นที่มาของชื่อโครงสร้างแบบซับซัมชั่นเพราะว่าพฤติกรรมที่มีความสำคัญมากกว่าจะทำการรวม (Subsume) พฤติกรรมที่มีความสำคัญน้อยกว่า

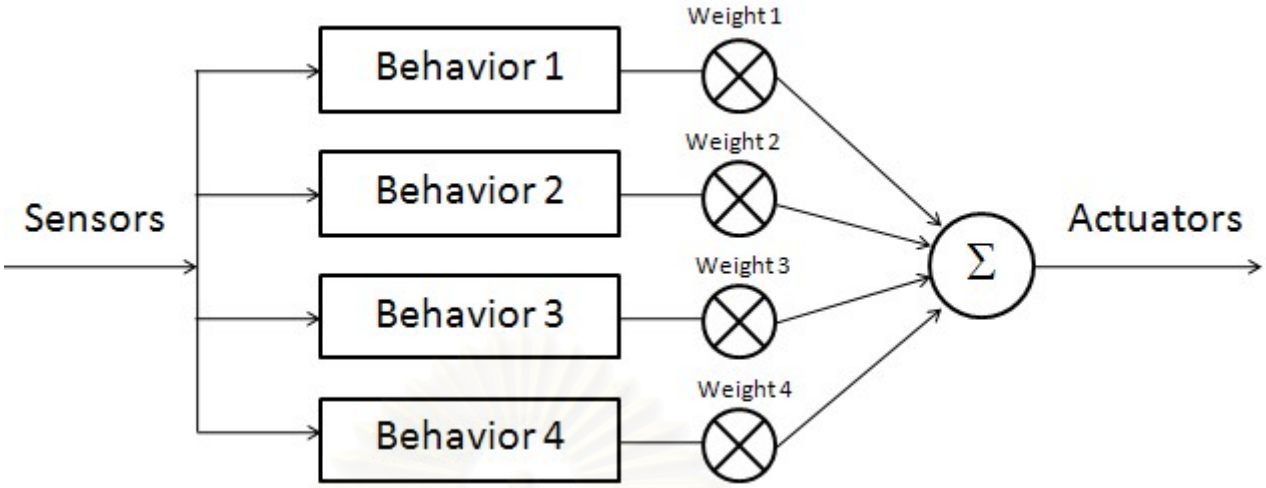


รูปที่ 2.3: โครงสร้างการจัดลำดับชั้นของพฤติกรรม โดยชั้นที่ 0 คือชั้นที่มีความสำคัญมากที่สุด

2.1.2 โครงสร้างแบบมอเตอร์สคีมา (Motor-schema Architecture)

นอกจากโครงสร้างแบบซับซัมชั่นที่เป็นที่นิยมแล้วอีกโครงสร้างที่เป็นการควบคุมเชิงพฤติกรรมที่มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางคือโครงสร้างแบบมอเตอร์สคีมา ที่เพิ่มความสามารถให้กับโครงสร้างแบบซับซัมชั่น กล่าวคือโครงสร้างแบบมอเตอร์สคีมานั้นไม่ได้เลือกเพียงพฤติกรรมเดียวมาเป็นผลลัพธ์ที่สั่งการหุ่นยนต์ แต่วิธีการนี้ใช้ผลรวมของหลายพฤติกรรมที่อยู่ในสถานะทำงาน ณ ขณะนั้นมาเป็นผลลัพธ์ ด้วยการทำงานเช่นนี้ทำให้ผู้ออกแบบพฤติกรรมมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นในการออกแบบพฤติกรรมย่อยที่จะสร้างพฤติกรรมรวมที่ซับซ้อนยิ่งขึ้นเช่นหุ่นยนต์จะสามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางไปพร้อมกับเดินทางเข้าหาเป้าหมายไปด้วย วิธีการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบมอเตอร์สคีมามีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.4

วิธีการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบมอเตอร์สคีมามีหลักการทำงานเช่นเดียวกับการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบซับซัมชั่น นั่นคือพฤติกรรมแต่ละอันจะทำงานอย่างเป็นอิสระต่อกันและทำงานไปพร้อมกันในลักษณะขนานกัน พฤติกรรมนี้จะเป็นพฤติกรรมย่อยที่มีความซับซ้อนน้อยซึ่งผลลัพธ์ของพฤติกรรมจะเป็นสัญญาณที่จะไปควบคุมหุ่นยนต์เช่น สัญญาณควบคุมทิศทางของการขับเคลื่อนเป็นต้น และผลลัพธ์ของพฤติกรรมเหล่านี้ของวิธีการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบมอเตอร์สคีมาจะผ่านตัวปรับค่าน้ำหนักความสำคัญดังแสดงเป็นรูปวงกลมที่ภายในเป็นเครื่องหมายกากบาทในรูปที่ 2.4 ตัวปรับค่าน้ำหนักนี้จะเป็นตัวกำหนดว่าผลลัพธ์ของพฤติกรรมใดจะมีผลต่อผลลัพธ์สุดท้ายมากเพียงใด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการปรับความสำคัญของพฤติกรรมว่าพฤติกรรมใดควรจะมีความสำคัญกว่าพฤติกรรมอื่น ซึ่งความสามารถนี้จะทำให้ผู้ออกแบบพฤติกรรมสามารถสร้างพฤติกรรมเป้าหมายได้หลากหลายขึ้น หลังจากสัญญาณควบคุมจากพฤติกรรมต่างๆได้ผ่านตัวปรับค่าน้ำหนักแล้วจะถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อเป็นสัญญาณที่จะไปสั่งงานหุ่นยนต์ต่อไป



รูปที่ 2.4: โครงสร้างวิธีการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบมอเตอร์สคีมา

ตัวอย่างของงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์ที่ใช้วิธีการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบมอเตอร์สคีมาได้แก้งานวิจัยของ Balch และ Arkin [21] ซึ่งพฤติกรรมของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยพฤติกรรมและความสำคัญดังตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.1: ตัวอย่างพฤติกรรมและค่าความสำคัญที่ใช้ในงานวิจัยการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์

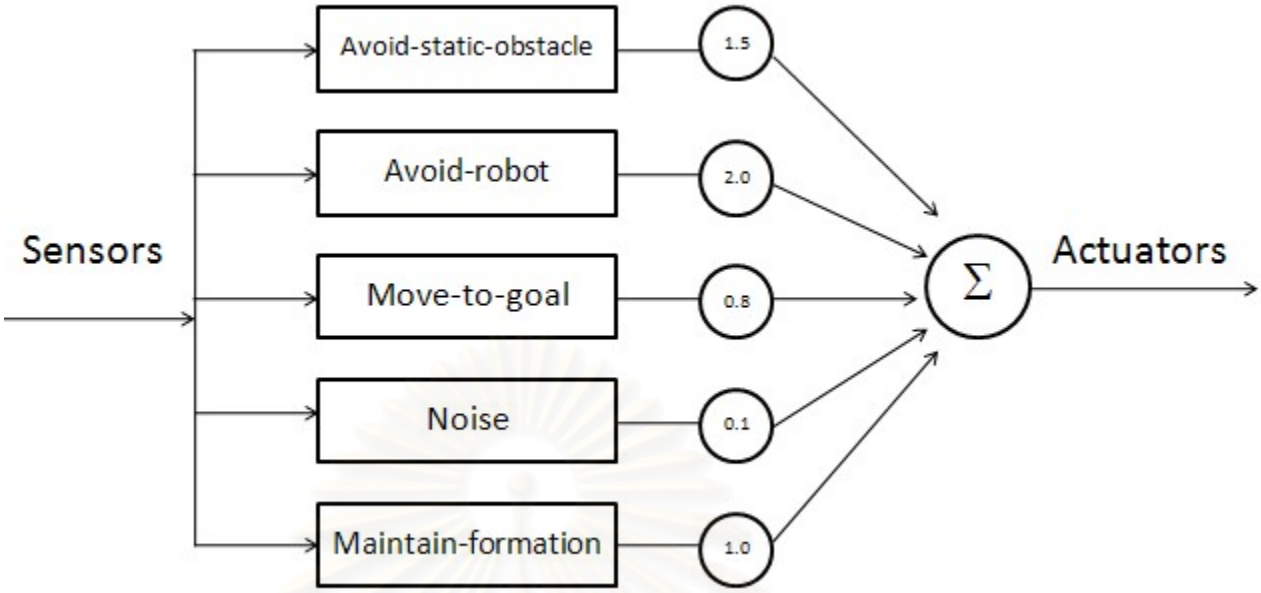
พฤติกรรม	ค่าความสำคัญ
avoid-static-obstacle	1.5
avoid-robot	2.0
move-to-goal	0.8
noise	0.1
maintain-formation	1.0

นอกจากนี้ค่าความสำคัญที่ใช้ในการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบมอร์เตอร์สคีมายังสามารถปรับได้ด้วยการเรียนรู้ดังกล่าวถึงใน [22]

2.2 สนามพลังงานศักย์เสมือน (Artificial Potential Field)

สนามพลังงานศักย์เสมือน (Artificial Potential Field) เป็นวิธีที่นิยมใช้มากในการนำทางหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ Khatib เป็นผู้เสนอวิธีการนี้ในงานวิจัยเกี่ยวกับการหลบหลีกสิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์ [23] หลังจากนั้นมาวิธีการของสนามพลังงานศักย์เสมือนได้ถูกนำมาใช้ทั้งในการนำทางหุ่นยนต์ การกระจายตัวของหุ่นยนต์ [24]การจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์ [25] อย่างกว้างขวาง

ในสนามพลังงานศักย์เสมือน จุดทุกจุดในพื้นที่การทำงานจะได้รับผลจากแรง F ซึ่งเป็นเกรเดียนต์ลบของ สนามพลังงานศักย์ U



รูปที่ 2.5: ตัวอย่างโครงสร้างการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบมอร์เตอร์สคีมา

$$F = -\nabla U$$

ในสนามพลังงานศักย์เสมือนจะมีแรงอยู่สองชนิดคือแรงผลักและแรงดูด ดังนั้น

$$U = U_{att} + U_{rep}$$

โดย U_{att} แทนสนามพลังงานศักย์ดูด และ U_{rep} แทนสนามพลังงานศักย์ผลักจะได้ว่า

$$F = F_{att} + F_{rep}$$

โดย F_{att} แทนแรงดูด และ F_{rep} แทนแรงผลัก

พิจารณาสนามของแรงผลักที่เกิดจากสิ่งกีดขวางสนามพลังงานศักย์ผลักนี้จะมีลักษณะเหมือนกับสนามของไฟฟ้าสถิตย์ที่จะผลักประจุชนิดเหมือนกันให้ห่างออกไปซึ่งฟังก์ชั่นของสนามพลังงานศักย์นี้และอนุพันธ์ของมันต้อเป็นฟังก์ชั่งต่อเนื่อง สนามพลังงานศักย์ผลักนี้ Khatib ได้เสนอไว้ดังนี้

$$U_{rep}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_r(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0})^2 & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho > \rho_0 \end{cases}$$

โดย k_r แทนค่าคงที่ของสนามพลังงานศักย์ผลัก ρ แทนระยะระหว่างหุ่นยนต์กับสิ่งกีดขวาง

และ ρ_0 แทนระยะทางที่สิ่งกีดขวางจะส่งผลต่อหุ่นยนต์

จะได้แรงที่กระทำต่อจุดใดๆ ในพื้นที่การทำงานเป็นดังนี้

$$F_{rep} = -\nabla U_{rep} = \begin{cases} k_r(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0})\frac{1}{\rho^2}\frac{\delta\rho}{\delta x} & \text{if } \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho > \rho_0 \end{cases}$$

นอกจากสนามพลังงานศักย์ผลักแล้วสนามพลังงานศักย์อีกประเภทหนึ่งคือสนามพลังงานศักย์ดูดซึ่งโดยปกติแล้วจะเป็นสนามพลังงานศักย์ของเป้าหมายของหุ่นยนต์ที่จะใช้เพื่อนำทางหุ่นยนต์ไปยังเป้าหมาย ซึ่งสนามพลังงานศักย์นี้อธิบายได้ดังนี้

$$U_{att}(x) = \frac{1}{2}k_a|x - x_{goal}|^2$$

โดย k_a คือค่าคงที่ของสนามพลังงานศักย์ดูดและ x คือเวคเตอร์ตำแหน่งของหุ่นยนต์ x_{goal} คือเวคเตอร์ตำแหน่งของเป้าหมาย ซึ่งจากสนามพลังงานศักย์ดูดนี้จะได้แรงดูดที่กระทำยังจุดต่างๆ ในพื้นที่การทำงานเป็นดังนี้

$$F_{att}(x) = -\nabla U_{att} = -k_a|x - x_{goal}|$$

จะเห็นได้จากสมการว่าแรงผลักของสิ่งกีดขวางจะกระทำต่อหุ่นยนต์ในเมื่อหุ่นยนต์อยู่ใกล้กับสิ่งกีดขวางตามระยะทางที่กำหนดไว้ แต่แรงที่เป็นแรงดูดจากเป้าหมายของหุ่นยนต์จะส่งผลกับหุ่นยนต์ไม่ว่าจะอยู่ที่ใดของพื้นที่การทำงาน

วิธีการแบบแบบสนามพลังงานศักย์เสมือนของ Khatib สามารถนำมาใช้งานในการนำทางหุ่นยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาที่เกิดจากการเกิด local minima ขึ้นได้ซึ่งอาจจะทำให้หุ่นยนต์ไปไม่ถึงเป้าหมายเนื่องจากเข้าสู่บริเวณที่มีแรงกระทำทั้งแรงผลักและแรงดูดหักล้างกันหมด ซึ่งปัญหานี้ได้ทำให้เกิดงานวิจัยเกี่ยวกับการแก้ปัญหา local minima อีกมากมายในภายหลัง

2.3 แผนภาพโวโรนอย (Voronoi Diagram)

แผนภาพโวโรนอยหรืออีกชื่อหนึ่งคือการแบ่งแบบดิริชเลท(Dirichlet tessellation)คือการแบ่งพื้นที่ที่ประกอบด้วยจุดกำเหนิด n จุดโดยที่การแบ่งพื้นที่นี้จะทำให้เกิดรูปหลายเหลี่ยมที่ทุกจุดในรูปหลายเหลี่ยมอยู่ใกล้กับจุดกำดหนิดที่อยู่ภายในรูปหลายเหลี่ยมรูปนั้นมากกว่าจุดกำเหนิด

ของรูปหลายเหลี่ยมรูปอื่น

2.3.1 นิยามของแผนภาพโวโรนอย

ให้พื้นที่ S ประกอบด้วยเซทของจุด P โดยที่ P โดย $P = p_1, p_2, ..., p_n$ เป็นจุดในระนาบยูคลิเดียนสองมิติ จุดใน P จะเรียกว่าจุดกำหนิด (site) เราสามารถแบ่ง S ออกเป็นพื้นที่ย่อยที่เป็นรูปหลายเหลี่ยมแบบคอนเวกซ์โดยที่รูปหลายเหลี่ยมแต่ละรูปจะมีจุดใน P อยู่ภายในได้เพียงจุดเดียวและจุดที่อยู่ใกล้ p_i มากกว่าจุดอื่นๆใน P จะถูกรวบรวมอยู่ในรูปหลายเหลี่ยมนี้ทั้งหมด เราเรียกรูปหลายเหลี่ยมที่มีจุด p_i อยู่ภายในว่าบริเวณโวโรนอยของ p_i และเขียนแทนด้วย $V(p_i)$ ซึ่งจะได้ว่า

$$V(p_i) = \{x || p_i - x| \leq |p_j - x|; \forall i \neq j \wedge i, j \in P\}$$

ตัวอย่างของแผนภาพโวโรนอยแสดงในรูปที่ 2.6

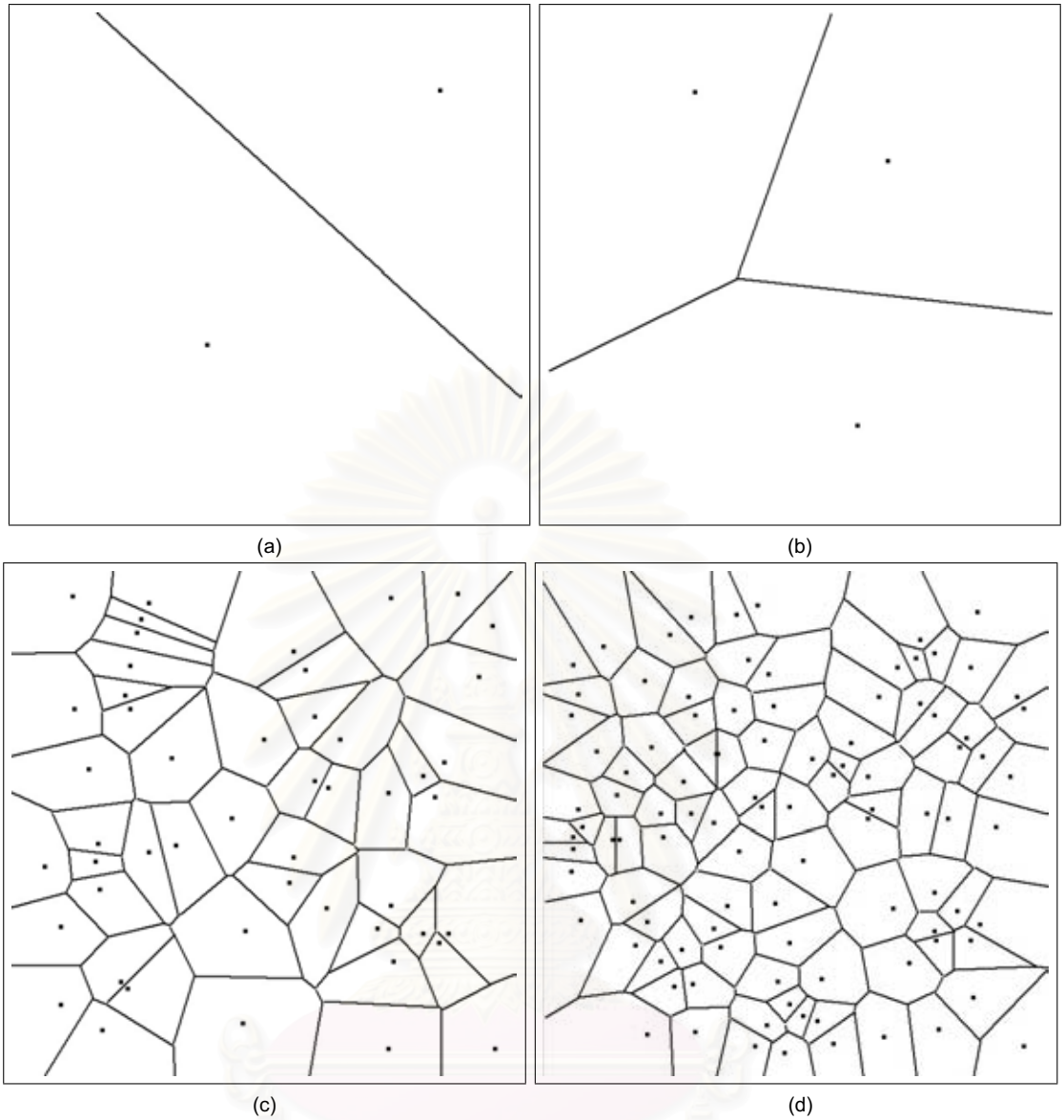
2.3.2 การแบ่งสามเหลี่ยมเดลองเน

การแบ่งสามเหลี่ยมเดอลองเนเป็นกราฟคู่กัน (dual graph) ของแผนภาพโวโรนอย โดยการแบ่งสามเหลี่ยมเดอลองเนมีนิยามดังนี้

ให้พื้นที่ S ประกอบด้วยเซทของจุด P โดยที่ P โดย $P = p_1, p_2, ..., p_n$ เป็นจุดในระนาบยูคลิเดียนสองมิติ การแบ่งสามเหลี่ยมเดอลองเน $D_t(P)$ คือการที่แบ่ง Sออกเป็นสามเหลี่ยม โดยที่ไม่มีจุดใดๆ ใน P อยู่ในวงกลมล้อม (circumcircle) ของสามเหลี่ยมใดๆใน $D_t(P)$ รูปของการแบ่งสามเหลี่ยมเดอลองเนแสดงในรูปที่ 2.7

2.3.3 แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล (Centroidal Voronoi Diagram)

แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลหรือ Centroidal Voronoi Diagram นั้นคือแผนภาพโวโรนอยที่มีลักษณะพิเศษกล่าวคือมีจุดกำเนิดของแต่ละบริเวณโวโรนอยเป็นจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยนั้นด้วย แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลอย่างง่ายแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นแผนภาพแบบโวโรนอยภายในพื้นที่สี่เหลี่ยมจตุรัสที่มีจุดกำเนิดโวโรนอยสองจุด จะเห็นได้อย่างชัดเจนจากรูปว่าจุดจุดกำเนิดนี้เป็นจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยด้วย คุณสมบัติของแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลมีดังนี้



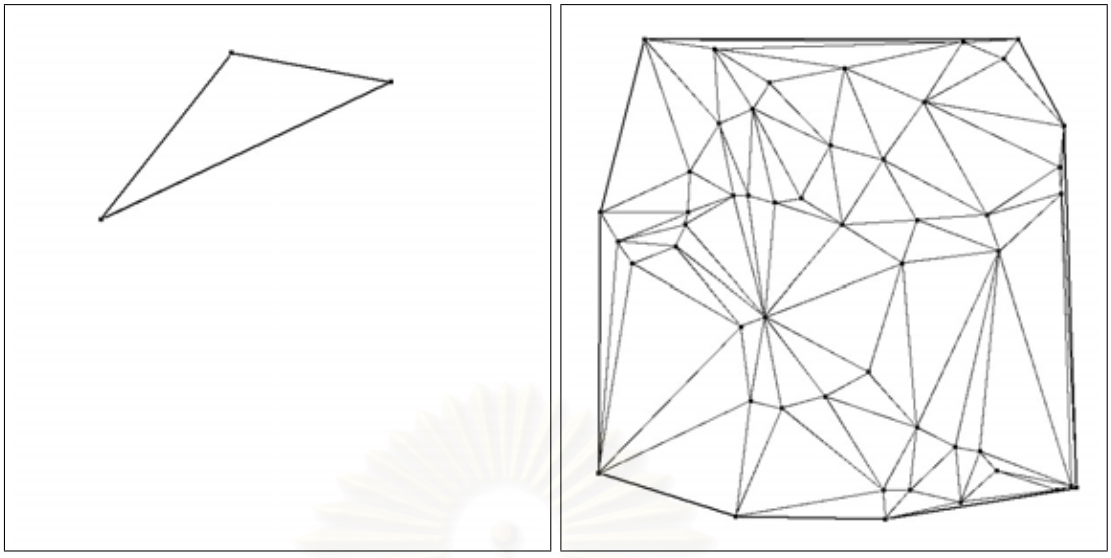
รูปที่ 2.6: ตัวอย่างแผนภาพโวโรนอย (ก) แผนภาพโวโรนอยที่มีจุดกำเหนิด 2 จุด(ข) แผนภาพโวโรนอยที่มีจุดกำเหนิด 3 จุด (ข) แผนภาพโวโรนอยที่มีจุดกำเหนิด 50 จุด (ข) แผนภาพโวโรนอยที่มีจุดกำเหนิด 100 จุด

2.3.3.1 คุณสมบัติของแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล

ให้ $V(p_i)$ แทนบริเวณโวโรนอยที่มีจุด p_i เป็นจุดกำเนิดและให้ $z_{centroid}(i)$ คือจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยที่มีจุด p_i เป็นจุดกำเนิด จะได้

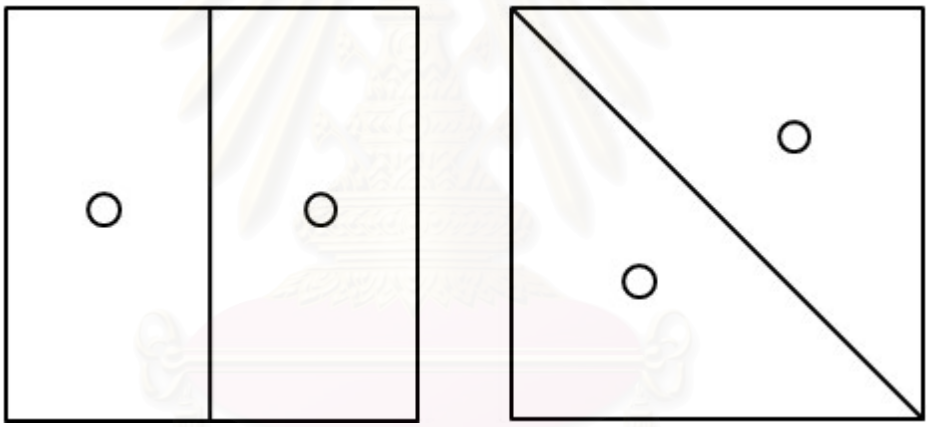
$$z_{centroid}(i) = \frac{\int_{V(p_i)} x\rho(x)dx}{\int_{V(p_i)} \rho(x)dx}$$

สำหรับทุก $i, i = 1, ..., n$ โดย n แทนจำนวนจุดกำเนิด ρ คือฟังก์ชั่นความหนาแน่น และ x



(a) (b)

รูปที่ 2.7: การแบ่งสามเหลี่ยมเดลองเน (ก) การแบ่งสามเหลี่ยมเดลองเนที่มีจุดกำเหนิด 3 จุด(ข) การแบ่งสามเหลี่ยมเดลองเนที่มีจุดกำเหนิด 50 จุด



รูปที่ 2.8: แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลที่ประกอบด้วยจุดสองกำเนิดสองจุด

คือตำแหน่งในระนาบสองมิติ

แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลคือแผนภาพที่ประกอบด้วย จุดกำเนิด $p_i, i = 1, ..., n$ โดยที่

$$z_{centroid}(i) = p_(i), \qquad i = 1, ..., n$$

ซึ่งก็คือแผนภาพโวโรนอยที่มีจุดกำเนิดอยู่มี่เดียวกับจุดศูนย์กลางมวลนั่นเอง

แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลมีคุณสมบัติสำคัญที่ได้มีการนำมาประยุกต์ใช้งาน

อย่างมากคือการเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด กล่าวคือแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลจะทำให้ผลรวมของระยะทางมาจากจุดทุกจุดมายังจุดกำเนิดของบริเวณโวโรนอยที่ตนเองอยู่ต่ำที่สุด ซึ่งคือทำให้ค่าของ $\int x\rho(x)|p_i - x|^2$ โดยที่ p_i เป็นจุดกำเนิดของบริเวณโวโรนอยที่ครอบคลุมจุด x มีค่าต่ำที่สุด คุณสมบัตินี้กล่าวในอีกแง่หนึ่งคือจุดกำเนิดโวโรนอยนี้เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดสำหรับทุกจุดในบริเวณโวโรนอยของตัวมันเอง

2.3.3.2 วิธีการการสร้างแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล

วิธีการรสร้างแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลที่ได้มีการกล่าวถึงมากที่สุดวิธีหนึ่งคือขั้นตอนวิธีของ Lloyd [26] ที่ใช้การหาค่าจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยและเลื่อนตำแหน่งจุดกำเนิดของโวโรนอยไปยังตำแหน่งที่คำนวณได้ และและทำซ้ำไปเรื่อยๆ ขั้นตอนวิธีของ Lloyd สามารถธิบายได้ดัง Algorithm ที่ 1

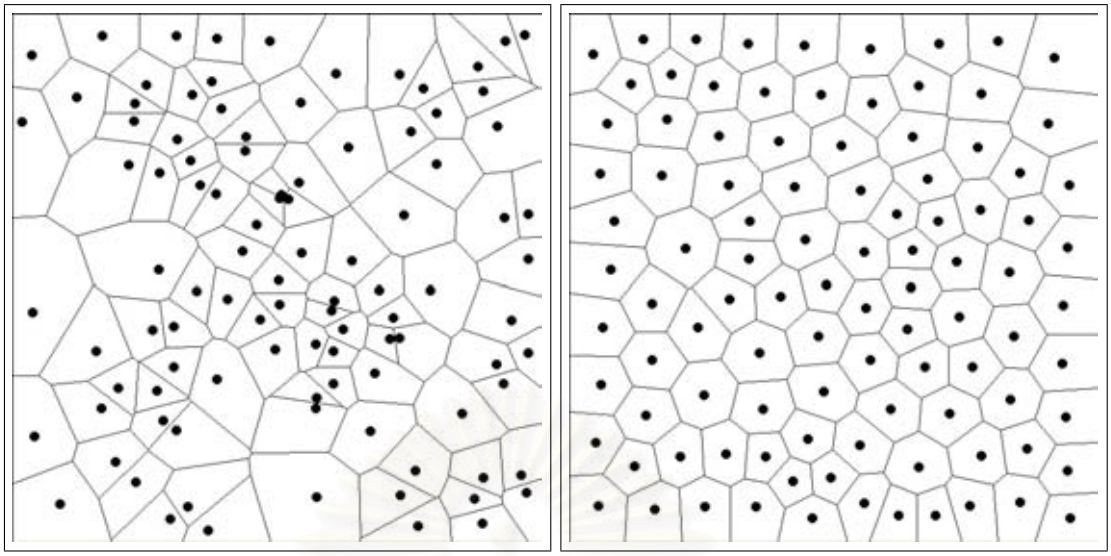
Algorithm 1 Lloyd 's algorithm

```
1: randomly initialize p_i on 2-D plane
2: while ( p_i ≠ z_centroid(i)) do
3:       compute voronoi region V(p_i)
4:       target = centroid(V(p_i))
5:       p_i = target
6: }
```

วิธีการของ Lloyd นั้นเริ่มต้นจากการมีจุดกำเนิดที่วางแบบสุ่มบนพื้นที่และค่อยๆเปลี่ยนตำแหน่งนี้ไปเรื่อยๆจนจุดกำเนิดมีค่าเท่ากับจุดศูนย์กลางของบริเวณโวโรนอยนั้น ซึ่งการทำงานวิธีการนี้จะลู่เข้าสู่เงื่อนไขจบอย่างช้าๆ ซึ่งในการทำงานจริงแล้วจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของระบบตัวเลขที่เลือกใช้ ยิ่งความละเอียดของตัวเลขที่ใช้มากเท่าไหร่วิธีการของ Lloyd จะให้ตำแหน่งสุดท้ายที่มีค่าของ $\int x\rho(x)|p_i - x|^2$ น้อยเท่านั้น ผลของการทำงานของวิธีการของ Lloyd ที่มีจุดกำเนิดโวโรนอยจำนวน 100 จุดแสดงในรูปที่ 2.9

2.3.3.3 การประยุกต์แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล

แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลเมื่อพิจารณาในแง่ของการจัดวางจุดกำเนิดของโวโรนอยแล้วจะเป็นการจัดวางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการหาจุดที่เป็นตัวแทนในบริเวณหนึ่งๆ ในกรณีสมมุติถ้าเมืองหนึ่งมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความหนาแน่นของประชากรเท่ากันทั้งเมือง การวางตู้ไปรษณีย์ที่จะทำให้ชาวเมืองเดินทางน้อยที่สุดเพื่อมาส่งจดหมาย จะเป็นตำแหน่งของจุดกำเนิดของแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลที่มีจำนวนจุดกำเนิดเท่ากับจำนวนตู้ไปรษณีย์ที่จะจัดวางและมีขอบคือขอบเขตของเมือง ถึงแม้ว่าเมืองนี้อาจจะมีความหนาแน่นของประชากรไม่เท่ากันกราก็สามารถนำเอาค่าของฟังก์ชั่นความหนาแน่นของประชากรมาใช้ในการคำนวณแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล เพื่อให้จุดกำเนิดที่เป็นผลลัพธ์ทำให้ชาวเมืองเดินทางไปส่งจดหมายเป็นระยะทางโดยเฉลี่ยสั้นที่สุด ปัญหาลักษณะนี้เรียกว่าปัญหาการจัดวางที่เหมาะสมที่สุด (Optimal placement) ซึ่งมักจะมีการใช้งานในการวิจัยเชิงปฏิบัติการ เช่นการวางแผนการจัดวางจุด



(a) (b)

รูปที่ 2.9: แสดงผลการทำงานของวิธีการของ Lloyd (ก) เมื่อเริ่มการทำงาน (ข) เมื่อสิ้นสุดการทำงาน

ขนส่งสินค้า หรือจุดกระจายสินค้าเป็นต้น

รายละเอียดเพิ่มเติมของการประยุกต์ใช้แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลจะกล่าวถึงในบทที่ 3.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยทางด้านกลุ่มหุ่นยนต์และการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์มีจำนวนมาก เพื่อความเป็นระเบียบของเนื้อหาจึงได้แบ่งส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องออกเป็น 5 หัวข้อย่อยตามความเกี่ยวข้องกับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ดังต่อไปนี้

- การจัดเรียงตัวกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีการแบบศูนย์กลาง
- การจัดเรียงตัวกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีการแบบกระจาย
- การกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์
- การจัดสรรงานของกลุ่มหุ่นยนต์
- การประยุกต์ใช้งานของแผนภาพโวรอนอย

3.1 การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีการแบบศูนย์กลาง

แม้ว่าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอวิธีการจัดกลุ่มหุ่นยนต์แบบกระจาย แต่การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบศูนย์กลางสามารถให้แนวคิด การเปรียบเทียบความเหมาะสมและแนวทางการเลือกใช้วิธีการจัดกลุ่มหุ่นยนต์ได้อย่างดี ในงานวิจัยยุคเริ่มแรกของการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ [27] ได้เสนอวิธีการแบบสองขั้นตอนสำหรับการจัดเรียงตัวและนำทางกลุ่มหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง โดยที่การคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แต่ละตัวจะถูกคำนวณไว้ล่วงหน้าจากข้อมูลสภาพแวดล้อมเท่าที่มีอยู่ด้วยตัววางแผนแบบครอบคลุม (global planner) วิถีการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้จะถูกส่งไปยังหุ่นยนต์แต่ละตัวในกลุ่ม ระหว่างการเคลื่อนที่หุ่นยนต์แต่ละตัวในกลุ่มจะทำการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง ด้วยวิธีการหลบหลีกสิ่งกีดขวางแบบท้องถิ่น (local obstacle avoidance) โดยการหลบหลีกสิ่งกีดขวางนั้นจะทำที่หุ่นยนต์แต่ละตัวและไม่มีการติดต่อสื่อสารระหว่างกัน จะเห็นได้ว่าวิธีนี้หุ่นยนต์มีการประสานงานกันน้อยมาก กล่าวคือการประสานงานกันของหุ่นยนต์เกิดมาจากการสั่งการของตัววางแผนแบบครอบคลุมเท่านั้น ไม่มีการประสานงานกันเองในกลุ่มหุ่นยนต์

ในงานวิจัยของ Farritor และ Goddard [28] แสดงถึงประโยชน์ของการใช้งานการการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบรวมศูนย์ในการใช้งานระบบเครื่องหมายจราจรอัจฉริยะดังแสดงในรูปที่ 3.1 ระบบนี้จะช่วยลดความเสี่ยงของคนงานที่ต้องทำงานบนถนนเรื่องการวางและเคลื่อนย้ายเครื่องหมายจราจร ประกอบกับเพิ่มความสามารถของเครื่องหมายจราจรในการเคลื่อนที่ด้วยตัวเอง

กรณีพื้นที่การทำงานมีการเปลี่ยนแปลง ระบบนี้ประกอบด้วยเครื่องหมายจราจร (กรวยยาง) ที่ภายในมีระบบขับเคลื่อนและระบบสื่อสาร และหน่วยควบคุมซึ่งจะถูกติดตั้งอยู่บนรถบรรทุกขนาดเล็กที่ใช้ในการขนส่งอุปกรณ์ หน่วยควบคุมจะติดตั้งตัวรับรู้ระยะทางแบบเลเซอร์เพื่อวัดระยะทางจากหน่วยบังคับไปยังเครื่องหมายจราจรแต่ละอัน หลังจากนั้นหน่วยควบคุมจะทำการคำนวณวิถีสำหรับการเดินทางของเครื่องหมายจราจรแต่ละหน่วย ระบบจะวนซ้ำการคำนวณและส่งข้อมูลนี้จนกว่าเครื่องหมายจราจรจะเข้าประจำที่ครบทุกอัน ในส่วนของเครื่องหมายจรจรแต่ละหน่วยจะรับคำสั่งจากหน่วยควบคุมเป็นระยะและทิศทางในการเคลื่อนที่ และเพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาดเครื่องหมายจราจรแต่ละตัวจะมีการตรวจสอบกับหน่วยควบคุมเป็นระยะ ถ้าเครื่องหมายตัวใดไม่ได้รับสัญญาณตอบกลับแสดงว่าอาจจะเกิดการผิดพลาดและวิ่งออกนอกเส้นทางเครื่องหมายอันนั้นจะหยุดทำงานทันที ในทางตรงกันข้ามหน่วยควบคุมจะคอยวัดระยะและตำแหน่งของเครื่องหมายจราจรในกลุ่มอยู่เสมอ เมื่อมีเครื่องหมายอันใดออกนอกเส้นทางจะทำการปิดการทำงานของเครื่องหมายอันนั้น จะเห็นได้ว่าการที่เลือกใช้วิธีการจัดเรียงตัวแบบศูนย์กลางนั้นเหมาะสำหรับงานนี้อย่างมาก เพราะเครื่องหมายจราจรอาจเสียหายได้ง่ายจากการใช้งานจึงจำเป็นจะต้องทำให้เครื่องหมายแต่ละชิ้นมีราคาถูกที่สุดเพื่อไม่ให้เป็นอุปสรรคต่อการจัดหาตัวใหม่มาทดแทนเพราะเครื่องหมายแต่ละอันมีเพียงระบบขับเคลื่อนและสื่อสารเท่านั้น ไม่มีตัวรับรู้ราคาแพง ประกอบกับการใช้หน่วยควบคุมหลักสามารถทำได้เนื่องจากต้องใช้รถในการขนย้ายเครื่องหมาย

การจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์แบบศูนย์กลางยังเป็นที่นิยมใช้ในการแข่งขันฟุตบอลหุ่นยนต์ (Robocup)[29] ซึ่งเป็นการแข่งขันของหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติ ระหว่างทีมของหุ่นยนต์สองทีมในกีฬาฟุตบอลย่อส่วน เหตุที่การจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์แบบศูนย์กลางได้รับความนิยม [30, 31, 32]เพราะมีการใช้กล้องเพื่อรับภาพจากสนามแข่งขันมาทำการประมวลผล ทำให้สามารถทราบตำแหน่งของหุ่นยนต์ทุกตัวในทีมได้อย่างแน่นอน จะเห็นได้ว่าข้อมูลแบบครอบคลุมของสนามสามารถรับรู้ได้ และการสื่อสารไปยังหุ่นยนต์แต่ละตัวก็มีระยะไม่มากสามารถกระจายข้อมูลไปถึงหุ่นยนต์ทุกตัวได้ทันที จึงทำให้เหมาะสมกับการใช้การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบศูนย์กลาง

3.2 การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีการแบบกระจาย

สำหรับการใช้งานที่การสื่อสารไม่สามารถประกันได้ว่าครอบคลุมพื้นที่ทำงานทั้งหมด หรือข้อมูลแบบครอบคลุมที่แน่นอนไม่สามารถหาได้ วิธีการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบกระจายถูกนำมาใช้แก้ปัญหานี้ งานวิจัยที่น่าสนใจด้านการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีแบบกระจายมีดังนี้

งานวิจัยของ Reynolds [33, 34] เป็นงานวิจัยชิ้นแรกที่เกี่ยวกับการจัดเรียงตัว แม้ว่างานวิจัยชิ้นนี้ไม่เกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์โดยตรง แต่ถือว่าเป็นรากฐานของแนวคิดการจัดเรียงตัวด้วยวิธีแบบกระจาย ในการศึกษาชิ้นนี้ทำเพื่อสร้างวิธีการที่จะเลียนแบบพฤติกรรมการบินของนก ดังภาพ 3.2 เพื่อนำมาสร้างภาพเคลื่อนไหวจำลองของแบบจำลองสามมิติที่เรียกว่า "Boid" พฤติกรรมกลุ่มของ Boid เกิดจากการรวมกันของพฤติกรรมที่ไม่ซับซ้อนใน

(a)

(b)

รูปที่ 3.1: ระบบเครื่องหมายจราจรอัจฉริยะของ (ก) เครื่องหมายจราจรที่ติดตั้งหุ่นยนต์ขนาดเล็กไว้ภายใน (ข) การเคลื่อนที่ของกลุ่มเครื่องหมายจราจร

Boid แต่ละตัวซึ่งทำงานเป็นอิสระต่อกัน พฤติกรรมเหล่านี้ประกอบด้วย การแยกตัว นกจำลองแต่ละตัวจะพยายามหลีกเลี่ยงบริเณที่มีประชากรหนาแน่นอยู่แล้ว การอยู่เป็นฝูง นกจำลองแต่ละตัวจะพยายามเกาะติดกับฝูงไม่อยู่ไกลจากฝูงมาก และสุดท้ายคือการจัดเรียง นกจำลองแต่ละตัวจะพยายามบินไปในทิศทางเดียวกับที่ฝูงนกจำลองทั้งหมด พฤติกรรมเหล่านี้จะผสานรวมกันที่ระดับหน่วยและจะก่อให้เกิดพฤติกรรมกลุ่มคือการบินเป็นกลุ่มของนกจำลองที่คล้ายนกจริงในระดับกลุ่ม หลังจากนั้นพฤติกรรมการหลบหลีกสิ่งกีดขวางและการเข้าสู้เป้าหมายถูกเพิ่มในแบบจำลองของ Boid เพื่อเพิ่มความสามารถในการทำงานให้สมจริงยิ่งขึ้น วิธีการนี้มีการประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายในชื่อเรียกที่ว่า ภาพเคลื่อนไหวเชิงพฤติกรรรม (Behavioral animation) ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนไหวของฝูงนกเพนกวินที่เดินผ่านถนนเมืองก็อธแทมในภาพยนตร์เรื่องแบทแมนรีเทิร์น[35]

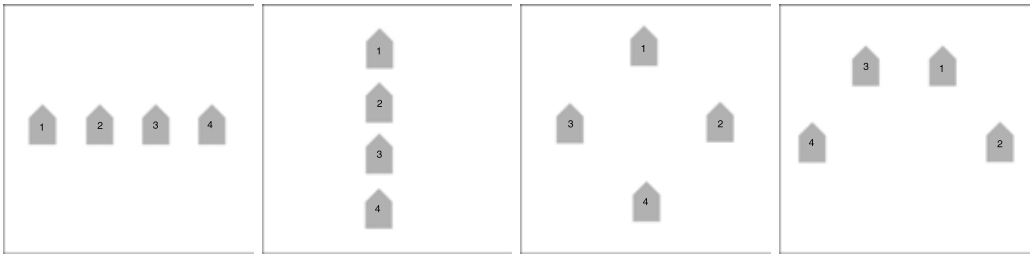
งานวิจัยของ Parker [36] เสนอการเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์เป็นเส้นตรง ในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงความสมดุลของการควบคุมแบบครอบคลุม (Global control) และการควบคุมแบบท้องถิ่น (local control) งานวิจัยนี้ใช้วิธีการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบ Subsumption โดยหุ่นยนต์จำลองแต่ละตัวจะถูกกำหนดให้รักษาระยะที่กำหนดไว้ก่อนกับหุ่นยนต์ตัวอื่น ส่วนหุ่นยนต์ผู้นำไม่

จำเป็นต้องรักษาตำแหน่งเทียบกับตัวอื่นเพราะถือว่าเป็นหุ่นยนต์ที่ทำหน้าที่นำทางหุ่นยนต์ตัวอื่น กล่าวคือ การควบคุมการเคลื่อนที่ของทั้งกลุ่มหุ่นยนต์จะทำโดยการควบคุมหุ่นยนต์ผู้นำ หุ่นยนต์ตัวอื่น ในกลุ่มจะปรับตำแหน่งและรักษาตำแหน่งเทียบกับหุ่นยนต์ผู้นำเอง Parker ได้เสนอว่าสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบได้โดยอาศัยข้อมูลแบบครอบคลุมร่วมกับการควบคุมแบบท้องถิ่น เป็นที่น่าสังเกตว่า ในงานนี้มีการกำหนดหุ่นยนต์ที่ทำหน้าที่เป็นผู้นำจึงอาจก่อให้เกิดปัญหาจุดรวมความผิดพลาด (single point of failure) ได้และทำให้ความสามารถของการเพิ่มจำนวนหุ่นยนต์ในกลุ่ม (scalability)ลดลงอีกด้วย

หลังจากนั้น Balch และ Arkin [21] ได้เสนอการใช้การควบคุมเชิงพฤติกรรมซึ่งใช้วิธีการแบบ motor schema ควบคุมการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์และเสนอวิธีการจัดเรียงตัวเพิ่มขึ้น คือ การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบแถว (line formation) การจัดเรียงของกลุ่มหุ่นยนต์ตัวแบบสดมภ์ (column formation) การจัดเรียงของกลุ่มหุ่นยนต์ตัวแบบข้าวหลามตัด (diamond formation) การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบลิ่ม (wedge formation) ดังภาพ 3.3

ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้ชั้นของพฤติกรรมหลายชั้นมารวมเข้าด้วยกัน โดยชั้นพฤติกรรมแต่ละชั้นมีลำดับความสำคัญแตกต่างกัน ค่าความสำคัญของพฤติกรรมนั้นสามารถปรับระดับได้เพื่อให้พฤติกรรมใดมีความเด่นหรือด้อยตามความต้องการ ผลที่ออกมาควบคุมหุ่นยนต์นั้น ได้จากการรวมผลลัพธ์ของพฤติกรรมแต่ละชั้นที่ตอบสนองต่อสภาวะปัจจุบันของหุ่นยนต์ ผ่านการปรับค่าความสำคัญและนำมารวมเข้าด้วยกัน ผลลัพธ์นี้จึงเป็นตัวแทนของพฤติกรรมต่างๆที่ตอบสนองต่อสภาวะปัจจุบันของหุ่นยนต์ เมื่อเทียบกับวิธีการของ Parker [36]แล้ววิธีการนี้มีความยืดหยุ่นมากกว่า เพราะผลลัพธ์ที่ออกมาควบคุมหุ่นยนต์นั้นมาจากการรวมกันจากหลายพฤติกรรมแทนที่จะมาจากพฤติกรรมที่มีความสำคัญสูงสุดเพียงชนิดเดียว ความยืดหยุ่นนี้ทำให้ผู้ออกแบบสามารถสร้างพฤติกรรมหุ่นยนต์ได้หลากหลายและสะดวกยิ่งขึ้น ชั้นของพฤติกรรมในงานวิจัยของ Balch และ Arkin ประกอบด้วย การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง การหลบหลีกหุ่นยนต์ตัวอื่น การเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมาย การเคลื่อนที่แบบสุ่ม และการรักษาการจัดเรียงตัว งานวิจัยชิ้นนี้ได้เสนอการอ้างอิง

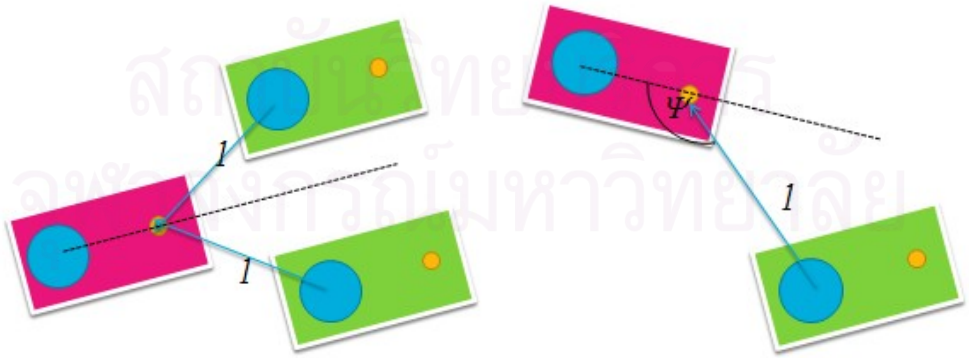
รูปที่ 3.2: ภาพฝูงนกจำลองจากงานวิจัยของ Reynolds



รูปที่ 3.3: รูปแบบการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ที่เสนอโดย Balch และ Arkin

ตำแหน่งสำหรับการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์สามรูปแบบคือ อ้างอิงจากศูนย์กลาง (unit-center) หุ่นยนต์แต่ละตัวจะอ้างอิงตำแหน่งของตนในรูปขบวนจากตำแหน่งเฉลี่ยของหุ่นยนต์ทุกตัวในการจัดเรียงตัว อ้างอิงจากผู้นำ (leader reference) หุ่นยนต์แต่ละตัวในกลุ่มจะอ้างอิงตำแหน่งเทียบกับหุ่นยนต์ที่เป็นผู้นำฝูง และสุดท้ายการอ้างอิงหุ่นยนต์ตัวใกล้เคียง (neighbor refernce) หุ่นยนต์แต่ละตัวจะอ้างอิงตำแหน่งของตนเองเทียบกับเพื่อนบ้านที่อยู่ติดกัน วิธีการนี้ทดลองในหุ่นยนต์สองประเภทคือหุ่นยนต์วิจัยที่สามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง และ ยานยนต์หุ้มเกราะที่ขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติ ผลการทดลองประสบความสำเร็จแต่อย่างไรก็ตามสำหรับการอ้างอิงตำแหน่งหุ่นยนต์จากศูนย์กลางของกลุ่มหุ่นยนต์นั้นจะทำให้เกิดการสื่อสารข้อมูลจำนวนมากในกลุ่มเมื่อมีหุ่นยนต์จำนวนมาก และงานวิจัยนี้หุ่นยนต์แต่ละตัวมีตำแหน่งเฉพาะตัวในการจัดเรียงตัว หากมีความเสียหายเกิดขึ้นจะไม่มีหุ่นยนต์ตัวอื่นมาแทนที่ได้

ในงานวิจัยของ Desai [37] ใช้ทฤษฎีกราฟในการกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างหุ่นยนต์ในกลุ่ม วิธีการนี้ยังสามารถทำการเปลี่ยนรูปทรงของการจัดเรียงตัวและทำการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง วิธีการนี้ทำงานโดยหุ่นยนต์แต่ละตัวจะมีอ้างอิงกับหุ่นยนต์ตัวอื่นในทีมอยู่สองลักษณะคือ อ้างอิงระยะกับหุ่นยนต์ที่เป็นจุดอ้างอิงสองตัว ($l-l$) และ การอ้างอิงมุมกับระยะทางและหุ่นยนต์ที่เป็นจุดอ้างอิงหนึ่งตัว ($l-\psi$) ดังรูป 3.4



(a) (b)

รูปที่ 3.4: การอ้างอิงตำแหน่งหุ่นยนต์ (ก) อ้างอิงจากหุ่นยนต์สองตัว ($l-l$) (ข) อ้างอิงจากหุ่นยนต์ตัวเดียว($l-\psi$)

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้กราฟแบบมีทิศทางแทนความสัมพันธ์ผู้นำและผู้ตามของหุ่นยนต์ในกลุ่ม

ความสัมพันธ์ระหว่างหุ่นยนต์ในกลุ่มจะถูกแทนด้วยเมทริกซ์ความสัมพันธ์ (Adjacency matrix) การเปลี่ยนตำแหน่งการจัดเรียงตัวจะทำโดยการใส่การดำเนินการลงกับเมทริกซ์ความสัมพันธ์ให้กลายเป็นเมทริกซ์ความสัมพันธ์ที่ต้องการ ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกส่งไปยังหุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่มเพื่อให้เคลื่อนไปสู่การจัดเรียงตัวที่ต้องการ งานวิจัยชิ้นมีส่วนสำคัญต่อการนำวิธีการทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แต่งานวิจัยชิ้นนี้ไม่ได้กล่าวถึงการควบคุมการจีดเรียงตัวของหุ่นยนต์ในกลุ่ม

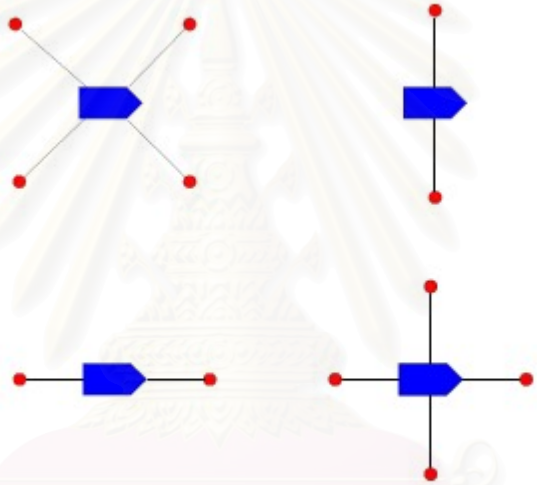
ประเด็นด้านความมีเสถียรภาพของการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ได้นำเสนอในงานวิจัย [38] ซึ่งใช้วิธีการของทฤษฎีกราฟในการควบคุม วิธีการนี้ให้ค่าความสิ้นเปลืองของการใช้ตัวรับรู้ เช่น มุมการหมุนของกล้องที่ต้องหมุนไป การเปลี่ยนกราฟควบคุมของกลุ่มหุ่นยนต์ทำได้โดยการกระจายคำขอเปลี่ยนตำแหน่งไปยังหุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่ม และหุ่นยนต์แต่ละตัวจะทำการคำนวณตำแหน่งใหม่ของตนเอง งานวิจัยนี้ได้ทดลองบนหุ่นยนต์สี่ขา AIBO เรียงตัวเป็นรูปสามเหลี่ยมและข้าวหลามตัด

ในงานวิจัยของ [25] นำวิธีการของสนามแรงเสมือนมาใช้กับการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์และการนำทางของกลุ่มหุ่นยนต์ โดยเน้นให้การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์สามารถทำการเคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ และพยายามคงการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ไว้ดังเดิม จากนั้นจะกลับมาเหมือนเดิมหลังผ่านสิ่งกีดขวางไปแล้ว งานวิจัยชิ้นนี้ได้แบ่งแรงออกเป็นสามชนิด คือแรงที่ใช้ในการจัดเรียงตัว,แรงที่ใช้ในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางและแรงที่ใช้ในการเข้าสู่เป้าหมาย สนามแรงที่ใช้ในการจัดเรียงตัวจะมีทิศทางพุ่งเข้าหาจุดศูนย์กลางของจุดที่หุ่นยนต์ตัวนั้นควรจะอยู่ และมีความแรงมากขึ้นเป็นเชิงเส้นตามระยะทาง ส่วนแรงจากสิ่งกีดขวางจะเป็นแรงผลักและจะมีขนาดมากขึ้นเมื่อระยะทางลดลง ส่วนแรงที่เป็นผลมาจากเป้าหมายนั้นเป็นแรงดูดและมีขนาดมากขึ้นตามระยะทางที่ห่างเป้าหมาย แรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์ทั้งหมด เป็นผลรวมของแรงที่มาจากทั้งสามแรงซึ่งจะแปลเป็น ความเร็วและทิศทางของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อีกทีหนึ่ง วิธีการที่คล้ายคลึงกับวิธีนี้มีการเสนอใน[39] แต่งานวิจัยชิ้นนั้นไม่ได้กล่าวถึงการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง

Sugihara และ Suzuki[40] ได้เสนอวิธีการแบบกระจายที่จะจัดเรียงกลุ่มหุ่นยนต์ให้เป็นรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ เช่น เส้นตรงและวงกลมซึ่งแต่ละรูปทรงจะมีวิธีการจัดเรียงที่ต่างกัน อาทิเช่น การจัดเรียงเป็นรูปวงกลม ทำได้โดยให้หุ่นยนต์ทุกตัวหาระยะห่างระหว่างตัวเองและหุ่นยนต์ตัวอื่นทุกตัวในพื้นที่ทำงานถ้าระยะห่างระหว่างตัวเองกับหุ่นยนต์ที่อยู่ไกลที่สุดห่างมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าหาหุ่นยนต์ที่ไกลสุดตัวนั้นแต่ถ้าระยะทางระหว่างตัวเองกับหุ่นยนต์ที่อยู่ไกลที่สุดห่างน้อยกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากหุ่นยนต์ตัวที่ใกล้ที่สุด วิธีการนี้เสนอว่าจำเป็นต้องรู้ข้อมูลหุ่นยนต์ทุกตัวในพื้นที่ทำงานซึ่งเป็นไปได้ยากและอาจจะไม่สามารถใช้ในการทำงานจริงเนื่องจากข้อจำกัดทางด้านตัวรับรู้และการสื่อสาร

Balch และ Hybinette [41] ได้เสนอการจัดเรียงตัวด้วยวิธีการที่คล้ายกับพันธะโคเวเลนต์ระหว่างโมเลกุล ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้หุ่นยนต์จะมีจุดยึดเกาะ (attachment site) เพื่อใช้จุดยึดเกาะ

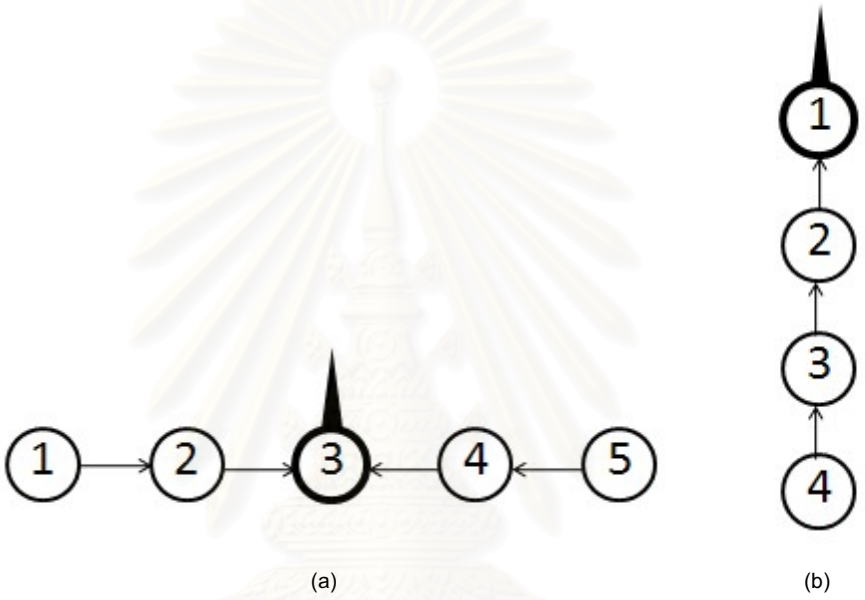
ในการเชื่อมต่อกับหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ และหุ่นยนต์จะเชื่อมต่อกันที่จุดยึดเกาะเท่านั้น งานวิจัยนี้จุดยึดเกาะมีอยู่สี่ลักษณะคือ + -- X และ I ดังรูป โดยหุ่นยนต์จะอยู่ตรงกลางของจุดยึดเกาะของตน หุ่นยนต์แต่ละตัวจะนำจุดยึดเกาะของตนไปเชื่อมกับจุดยึดเกาะของตัวใกล้เคียงทำให้เกิดโครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น วิธีการนี้เราสามารถสร้างโครงสร้างที่ซับซ้อนได้ด้วยส่วนประกอบที่ไม่ซับซ้อนเพียงไม่กี่แบบ วิธีการนี้ใช้การควบคุมแบบ Motor schema ในการสั่งการหุ่นยนต์ โดยแต่ละ schema จะสร้างผลลัพธ์เป็นทิศทางที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป และขนาดของผลลัพธ์จะแสดงความสำคัญ ผลลัพธ์ที่ได้จากการรวมจะเป็นการสั่งงานการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แต่เนื่องจากจุดยึดเกาะของหุ่นยนต์นั้นคงที่จึงไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบการจัดเรียงตัวระหว่างการทำงานได้ อีกทั้งในการศึกษาชิ้นนี้ไม่ได้ระบุว่ามีการเลือกเกาะกับตัวใดโดยเฉพาะเจาะจงหรือไม่เพื่อให้สามารถควบคุมรูปร่างตามต้องการ



รูปที่ 3.5: จุดยึดเกาะแบบต่างๆ ในงานวิจัยของ Balch และ Hybinette

งานวิจัยของ Fredslund [42] นำเสนอวิธีการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ในรูปแบบวิธีการทั่วไปและใช้เฉพาะข้อมูลที่เป็นข้อมูลท้องถิ่นเท่านั้น งานวิจัยชิ้นนี้มีแนวคิดที่จะสร้างพฤติกรรมการจัดเรียงตัวโดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลตำแหน่งละทิศทางของหุ่นยนต์ทุกตัวในพื้นที่ทำงาน วิธีการนี้ทำงานโดยกำหนดเลขประจำตัวที่ไม่ซ้ำกันให้กับหุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่มและเมื่อหุ่นยนต์เริ่มทำงาน หุ่นยนต์จะกระจายข้อมูลเลขประจำตัวของตนไปยังหุ่นยนต์ทุกตัวที่เริ่มทำให้หุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่มทราบจำนวนและหมายเลขของหุ่นยนต์ที่มาเข้าร่วมกลุ่ม หุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งในกลุ่มจะถูกกำหนดให้เป็นผู้นำกลุ่มผู้นำกลุ่มจะกระจายข้อมูลของการเรียงตัวดังนั้นหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ จะทราบข้อมูลหมายเลขประจำตัวของหุ่นยนต์ผู้นำ หุ่นยนต์ที่เป็นหุ่นยนต์ผู้นำจะแบ่งออกเป็นสองประเภท ดังแสดงในรูปที่ 3.6 คือ หุ่นยนต์ผู้นำแบบสองด้านคือมีหุ่นยนต์ผู้ตามอยู่ทั้งสองด้านของตัวเอง และหุ่นยนต์ผู้นำแบบด้านเดียวคือจะมีหุ่นยนต์ผู้ตามอยู่เพียงด้านเดียว หุ่นยนต์ที่หมาย

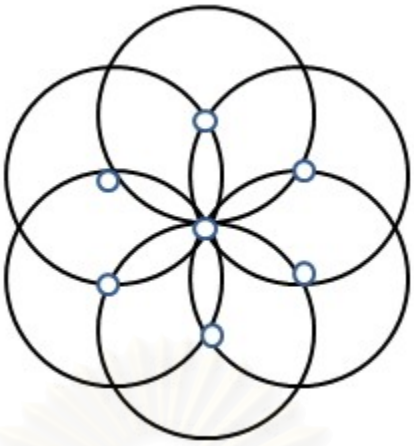
เลขน้อยกว่าหุ่นยนต์ตัวกลางจะเข้ามาเป็นสมาชิกของการจัดเรียงตัวทางด้านซ้ายของหุ่นยนต์ผู้นำ โดยหุ่นยนต์จะอ้างอิงกับหุ่นยนต์ที่หมายเลขน้อยที่สุดที่มากกว่าตัวมันเอง และหุ่นยนต์เลขหมายมากกว่าหุ่นยนต์ผู้นำจะมาเป็นสมาชิกของการจัดเรียงตัวทางด้านขวาของหุ่นยนต์ผู้นำ โดยหุ่นยนต์ที่จะอ้างอิงกับหุ่นยนต์ที่หมายเลขมากที่สุดที่น้อยกว่าตัวมันเอง สำหรับหุ่นยนต์ผู้นำจะมีหมายเลขน้อยที่สุดแล้วหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ จะเรียงต่อกันตามลำดับเลขหมาย อย่างไรก็ตามวิธีการนี้แม้ว่าจะเสนอเป็นวิธีการทั่วไปแต่ยังมีข้อจำกัดด้านการทำงานกล่าวคือสามารถจัดเรียงตัวกันเป็นรูปคอนเวกซ์ (convex) เท่านั้น และแม้จะเสนอว่าเป็นการทำงานที่ใช้ข้อมูลท้องถิ่นเท่านั้น แต่การใช้การกระจาย (Broadcast) นั้นทำให้ความสามารถในการเพิ่มหุ่นยนต์จำนวนมาก (scalability) ลดลง



รูปที่ 3.6: การเรียงตัวของหุ่นยนต์เทียบกับหุ่นยนต์ผู้นำ (ก) แบบมีหุ่นยนต์ผู้ตามอยู่สองด้าน (ข) แบบมีหุ่นยนต์ผู้ตามอยู่ด้านเดียว

ในงานวิจัยของ Spears [43] ได้นำเสนอการใช้หลักการฟิสิกส์เสมือน (artificial physics) โดยเน้นในการควบคุมกลุ่มหุ่นยนต์จำนวนมาก มีความทนทานต่อความผิดพลาดและสามารถซ่อมแซมตัวเองได้ วิธีการนี้ใช้หลักการของแรงดึงดูดระหว่างมวลโดยจะพยายามรักษาระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ไว้เป็นค่าคงที่เท่ากับรัศมีที่กำหนด์ ถ้าหุ่นยนต์เข้าใกล้กับหุ่นยนต์ตัวเองโดยมีระยะห่างน้อยกว่าระยะห่างที่กำหนด แรงดึงดูดระหว่างมวลจะมีทิศทางผลักหุ่นยนต์ทั้งสองออกจากกัน ในทางกลับกัน ถ้าหุ่นยนต์อยู่ห่างจกระยะที่กำหนดไว้หุ่นยนต์จะมีแรงดึงดูดระหว่างกันโดยความสัมพันธ์ของแรงนิยาม สมการ $F = Gm_i m_j / r^2$ งานวิจัยชิ้นนี้สามารถสร้างรูปหกเหลี่ยมซึ่งอาศัยหลักการฟิสิกส์เสมือนดังแสดง หน่วยเล็กที่สุดของหกเหลี่ยมจากวิธีการนี้แสดงในรูปที่ 3.7

ในงานวิจัยของ Barfoot และ Clark [44] ได้เสนอวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ของกลุ่มหุ่นยนต์ ขณะที่ยังรักษารูปแบบของการกลุ่มไว้ นอกจากนี้ยังได้คำนึงถึงความยืดหยุ่นของการจัดเรียงตัวด้วย ในงานวิจัยชิ้นนี้ประเด็นหลักคือการสร้างสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แต่ละ



รูปที่ 3.7: หน่วยเล็กที่สุดของหกเหลี่ยมที่ได้จากการจัดเรียงโดยอาศัยหลักการฟิสิกส์เสมือน

ตัว

จะเห็นได้ว่างานวิจัยเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบกระจายนั้นได้รับความนิยมมากและมีแนวโน้มจะได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในอนาคต ทั้งนี้เนื่องจาก ระบบนี้ใกล้เคียงกับการใช้งานจริงมากกว่าระบบที่เป็นการรวมศูนย์ทั้งทางด้านการทนทานต่อความผิดพลาด ความสามารถในการใช้งานกับหุ่นยนต์จำนวนมาก ความสามารถในการใช้งานกับข้อมูลท้องถิ่นและการสื่อสารท้องถิ่น ถึงแม้งานวิจัยเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบกระจายนั้นจะมีอยู่เป็นจำนวนมาก เราสามารถแยกแยะงานวิจัยเหล่านี้ได้ด้วยคุณลักษณะบางอย่างอาทิ

- **การจำแนกหุ่นยนต์** การจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์บางวิธีการใช้การกำหนดหมายเลขประจำตัวแบบตายตัวให้กับหุ่นยนต์และกำหนดจตำแหน่งของหุ่นยนต์นั้น เราเรียกการจำแนกหุ่นยนต์แบบนี้ว่า การจำแนกแบบหมายเลข งานวิจัยที่อาศัยการจำแนกแบบหมายเลขได้แก่ [21, 42, 37] ส่วนอีกวิธีการหนึ่งคือการที่หุ่นยนต์มารวมตัวกันเป็นการจัดเรียงตัวโดยไม่มีการกำหนดหมายเลขมาก่อนโดยถือเสมือนว่าหุ่นยนต์ทุกตัวเหมือนกันหมด วิธีการนี้เรียกว่าการจำแนกแบบไม่เจาะจง งานวิจัยที่อาศัยการจำแนกแบบไม่เจาะจงได้แก่ [41, 40] การใช้การจำแนกแบบหมายเลขเปิดโอกาสให้สามารถมีการจัดเรียงตัวที่ซับซ้อน ส่วนการจำแนกแบบไม่เจาะจงนั้นมีข้อดี คือ สามารถใช้งานกับหุ่นยนต์จำนวนมากและสามารถซ่อมแซมการจัดเรียงตัวเองได้
- **การติดต่อสื่อสาร** สำหรับการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์แบบกระจายตัวนั้นหมายความว่าไม่มีหน่วยกลางในการประมวลผลและรู้ข้อมูลทุกอย่างเกี่ยวกับกลุ่มหุ่นยนต์และพื้นที่ทำงาน ดังนั้นจึงต้องมีการติดต่อสื่อสารกันเพื่อให้ได้ข้อมูลของหุ่นยนต์ตัวอื่นในกลุ่ม การสื่อสารงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์นั้นแบ่งออกเป็นการติดต่อสื่อสารแบบกระจาย (Broadcasting) การสื่อสารแบบนี้หุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่มสามารถติดต่อถึงกันหมด งานวิจัย

ที่ใช้การติดต่อสื่อสารแบบกระจายได้แก่ [42, 37] และ [21]ในส่วนที่ใช้การอ้างอิงแบบ unit-center และ leader-reference การติดต่อสื่อสารแบบท้องถิ่นคือการที่หุ่นยนต์แต่ละตัวสามารถติดต่อได้เฉพาะเพื่อนบ้านตัวใกล้เคียงที่อยู่ในระยะการสื่อสารเท่านั้น และไม่ใช่การส่งต่อข้อมูล (flooding) งานวิจัยในกลุ่มนี้ได้แก่ [21]ในส่วนที่ใช้การอ้างอิงแบบ neighbor-reference แบบสุดท้ายคือการใช้การรับรู้ (sensing) การใช้การรับรู้ถือเป็นการสื่อสารโดยนัยเพราะหุ่นยนต์แต่ละตัวจะสามารถทราบตำแหน่งหรือข้อมูลเบื้องต้นของหุ่นยนต์ตัวอื่นๆได้ จากข้อมูลจากตัวรับรู้ของหุ่นยนต์เอง วิธีการนี้ไม่อาศัยช่องทางการสื่อสาร จึงเหมาะมากกับการใช้งานกับกลุ่มหุ่นยนต์จำนวนมาก งานวิจัยประเภทนี้ได้แก่ [43, 41, 40, 33, 34]

- **การอ้างอิงตำแหน่ง** การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์เพื่อให้เกิดการเรียงตัวในภาพรวมแล้ว หุ่นยนต์แต่ละตัวจำเป็นต้องรู้ตำแหน่งว่าตนเองควรจะอยู่ตรงไหนของการจัดเรียง การอ้างอิงตำแหน่งสามารถแบ่งออกได้เป็น การอ้างอิงตำแหน่งกับผู้นำ งานวิจัยนี้ได้แก่ [21, 36] การอ้างอิงตำแหน่งเพื่อนบ้านใกล้เคียง งานวิจัยนี้ได้แก่ [21, 42, 25] และแบบสุดท้ายคือไม่มีการอ้างอิงตำแหน่ง คืออาศัยการจัดเรียงตัวเกิดจากพฤติกรรมร่วม (emergent behavior) งานวิจัยนี้ได้แก่ [43, 40, 41]
- **รูปร่างที่ได้จากการจัดเรียงตัว** งานวิจัยที่กล่าวมา บางชิ้นเป็นการจัดเรียงตัวเป็นรูปเรขาคณิตแบบใดแบบหนึ่งที่เฉพาะเจาะจง บางงานวิจัยศึกษาการสร้างรูปใดๆ สำหรับงานวิจัยที่เป็นประเภทรูปร่างเฉพาะได้แก่ [36, 21, 40, 41] และงานวิจัยที่เป็นรูปร่างทั่วไปได้แก่งานวิจัยใน [42, 44, 37, 38]

หากใช้การจัดลำดับข้างต้นจะสามารถจำแนกงานวิจัยที่กล่าวถึงในหัวข้อตามการแบ่งข้างต้นและจากการจำแนกของ [4] ได้ดังตารางที่ 3.1

3.3 การกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์

การกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์อาจถือเป็นการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์แบบหนึ่ง คือมีรูปแบบกลุ่มที่พยายามครอบคลุมพื้นที่ทำงานให้มากที่สุดโดยมีบริเวณที่ทับซ้อนกันให้น้อยที่สุด เนื่องด้วยประโยชน์การใช้งานของการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์มีมาก ดังนั้นทำให้การวิจัยหัวข้อนี้น่าสนใจเป็นอย่างมาก จึงแยกส่วนของการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ออกจากการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์เพื่อแสดงลักษณะเฉพาะตัวของการกระจายตัวในกลุ่มหุ่นยนต์ที่จะนำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

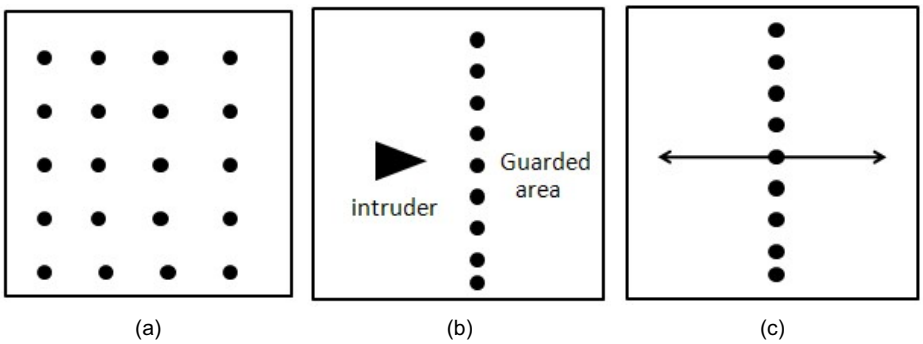
คำว่าการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์เกิดขึ้นเป็นครั้งแรกในงานวิจัยของ Gage [45] ซึ่งได้เสนอการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการควบคุมกลุ่มหุ่นยนต์ที่ไม่ซับซ้อนและสามารถใช้งานได้จริงในหุ่นยนต์ราคาไม่แพงและสามารถทดแทนได้ง่ายเพื่อใช้ในงานทางด้านการทหาร ซึ่งงานชิ้นนี้ได้เสนอการประยุกต์ใช้ในการเก็บกู้กับระเบิด หรือการวางกับระเบิดใหม่ในสนามรบ งานวิจัยนี้ Gageแบ่งประเภทของการกระจายตัวเป็น สามประเภทคือ

ตารางที่ 3.1: การจำแนกงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์แบบกระจาย

วิธีการ	การจำแนกหุ่นยนต์	การติดต่อสื่อสาร	การอ้างอิงตำแหน่ง	รูปร่างที่ได้
Reynolds[33, 34]	ไม่เจาะจง	ใช้การรับรู้	ไม่มี	รูปร่างเฉพาะ (ฝูงนก)
Parker [36]	หมายเลข	แบบกระจาย	อ้างอิงผู้นำ	รูปร่างเฉพาะ (เส้นตรง)
Balch และ Arkin [21]	หมายเลข	แบบกระจาย แบบท้องถิ่น	อ้างอิงผู้นำและ เพื่อนบ้านใกล้เคียง	รูปร่างเฉพาะ (แถว สดมภ์ ข้าวหลามตัด ลิ่ม)
Desai [37]	หมายเลข	แบบกระจาย	เพื่อนบ้านใกล้เคียง	รูปร่างทั่วไป
kaminka [38]	หมายเลข	แบบกระจาย	เพื่อนบ้านใกล้เคียง	รูปร่างทั่วไป
Schneider [25]	หมายเลข	ใช้การรับรู้	เพื่อนบ้านใกล้เคียง	รูปร่างทั่วไป
Sugihara และ Suzuki [40]	ไม่เจาะจง	ใช้การรับรู้	ไม่มี	รูปร่างเฉพาะ
Balch และ Hybinette [41]	ไม่เจาะจง	ใช้การรับรู้	ไม่มี	รูปร่างเฉพาะ
Fredslund [42]	หมายเลข	ใช้การกระจาย	เพื่อนบ้านใกล้เคียง	รูปร่างทั่วไป
Spears [43]	ไม่เจาะจง	ใช้การรับรู้	ไม่มี	รูปร่างเฉพาะ
Barfoot และ Clark [44]	หมายเลข	ใช้การกระจาย	เพื่อนบ้านใกล้เคียง	รูปร่างทั่วไป

การกระจายแบบครอบคลุม (blanket coverage) การกระจายแบบกำแพง (barrier coverage) และการกระจายแบบกวาด (sweep coverage) ดังรูปที่ 3.8 โดยการกระจายแบบครอบคลุม หมายถึง การที่หุ่นยนต์ทุกตัวกระจายตัวกันออกไปโดยให้มีพื้นที่ที่ครอบคลุมมากที่สุดและทับซ้อนกันน้อยที่สุด โดยที่จุดสิ้นสุดของวิธีการนี้หุ่นยนต์จะอยู่นิ่งในพื้นที่ของตัวเอง การกระจายแบบกำแพง หมายถึง การที่หุ่นยนต์กระจายตัวกันเพื่อพยายามลดความน่าจะเป็นเมื่อมีผู้บุกรุกผ่านเข้าไปยังพื้นที่ที่กำหนด การกระจายแบบนี้ที่จุดสิ้นสุดของกระบวนการ หุ่นยนต์ทุกตัวจะหยุดนิ่งเช่นกัน และการกระจายแบบกวาด คือ การที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เพื่อครอบคลุมพื้นที่ กรณีนี้จะเหมือนกับกรณีของการกระจายแบบกำแพงซึ่งมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา

งานวิจัยของ Howard และคณะ [24] ได้เสนอปัญหาของการจัดวางเครือข่ายตัวรับรู้แบบ



รูปที่ 3.8: รูปแบบการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ตามนิยามของ Gage (ก) การกระจายแบบครอบคลุม(ข) การกระจายแบบกำแพง (ค) การกระจายแบบกวาด

เคลื่อนที่ (mobile sensor network) ในพื้นที่ที่ไม่ทราบข้อมูลล่วงหน้า โดยเสนอวิธีการจัดวางด้วยตัวเอง (self-deploy) เพื่อให้เหมาะกับสถานการณ์การใช้งานกับสภาพแวดล้อมที่อันตราย เครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ อาจถูกส่งไปทางอากาศหรือส่งเข้าไปเป็นกลุ่มจากจุดที่ปลอดภัย หลังจากที่เครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ถูกปล่อยแล้วจะต้องกระจายตัวเพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่ตัวรับรู้นั้นๆ ทำงานอยู่ โดยไม่อาศัยข้อมูลเบื้องต้นของพื้นที่ทำงานและไม่อาศัยการระบุตำแหน่งของเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้แต่ละตัว งานวิจัยของ Howard และคณะเสนอการประยุกต์ใช้วิธีการสนามแรงเสมือน [23] โดยให้เครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้แต่ละตัวนั้นออกแรงผลักกับเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ตัวอื่นๆ ความสัมพันธ์ของแรงเป็นไปตามสมการของสนามแรงเสมือน ส่วนสิ่งแวดล้อมจะออกแรงผลักต่อเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ตัวนั้นๆ ด้วยเช่นกัน และเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้แต่ละตัวจะเคลื่อนที่ไปตามผลลัพธ์ของแรงที่กระทำต่อตัวมัน เมื่อเวลาผ่านไประบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลจลน์ คือ มีแรงกระทำต่อเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ ก่อให้เกิดขนาดของผลลัพธ์แรงนั้นใกล้เคียงศูนย์ การทดลองของ Howard และคณะทำโดยการใช้ตัวจำลองเหตุการณ์ Player/Stage [46] ประกอบด้วยเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้จำนวน 100 ตัวในพื้นที่ที่ซับซ้อน ผลการวิจัยพบว่าเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้สามารถจัดวางตัวเองอย่างรวดเร็วและครอบคลุมพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่เริ่มต้นสิบเท่า อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้ไม่ได้กล่าวถึงการจำกัดระยะของการรับรู้ของเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้แต่ละตัว ซึ่งอาจจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของการกระจายตัวได้

วิธีที่คล้ายคลึงกัน เสนอโดย Zou [14] ซึ่งใช้วิธีของแรงเสมือน (Virtual Force Algorithm , VFA) ในการกระจายเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ โดยจุดมุ่งหมายของงานวิจัยชิ้นนี้คือการกระจายเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ให้ทั่วบริเวณภายใต้ข้อจำกัดบางอย่าง เช่น ขนาดของพื้นที่ที่คาบเกี่ยวกัน โดยต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายของการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ซึ่งใช้การผสมกันของแรงดูดและแรงผลัก วิธีการนี้ผู้นำกลุ่มจะคำนวณตำแหน่งที่เหมาะสมแก่ตัวรับรู้ด้วยการหาแรงลัพธ์ที่ได้จากการรวมแรงดูดและผลักที่กระทำต่อตัวรับรู้แต่ละตัวในกลุ่ม วิธีการนี้จะคำนวณเส้นทางของตัวรับรู้ที่ต้องเดินทางล่วงหน้าจนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่พอใจ เมื่อได้ผลลัพธ์ที่ต้องการแล้วผู้นำกลุ่มจะทำการสั่งให้กลุ่มของเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้เคลื่อนที่ไปยัง

ตำแหน่งที่คำนวณไว้ แม้ว่าวิธีการ VFA จะมีคุณสมบัติการทำงานแบบกระจายแต่งานวิจัยชิ้นนี้ได้ละทิ้งคุณสมบัตินี้ด้วยการใช้การคำนวณเส้นทาง โดยผู้นำกลุ่มและสั่งงานจากผู้นำกลุ่มให้เริ่มการเคลื่อนที่ ซึ่งสิ่งนี้จะลดความสามารถในการใช้งานกับตัวรับรู้ลงจำนวนมากเนื่องด้วยขีดจำกัดทางการคำนวณของผู้นำกลุ่มและ ความสามารถในการสื่อสารถึงตัวรับรู้ทุกตัวเป็นไปได้ยากสำหรับการใช้งานจริง

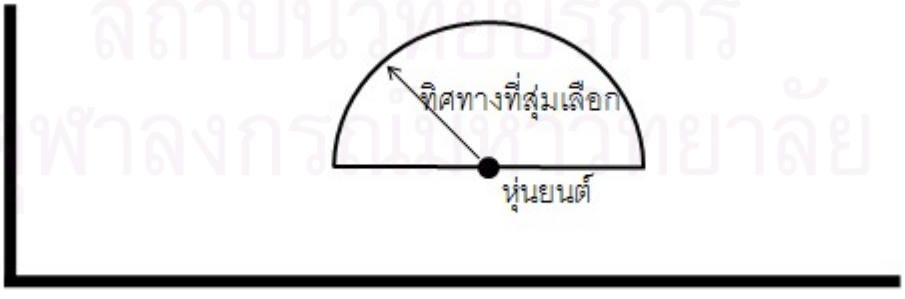
งานวิจัยของ Batalin และ Sukhatme [47] ได้เสนอวิธีการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ด้วยวิธีแบบท้องถิ่นซึ่งไม่อาศัยข้อมูลครอบคลุมที่มีมาก่อน และไม่อาศัยการระบุตำแหน่ง งานวิจัยนี้เสนอวิธีการที่เรียกว่าการกระจายแบบท้องถิ่น (local dispersion) ใช้วิธีการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบโครงสร้าง Subsumption พฤติกรรมประกอบตามลำดับความสำคัญจากมากไปน้อย การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง การสังเกต และการเคลื่อนที่ พฤติกรรมการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปในทางตรงกันข้ามกับสิ่งกีดขวางหรือหุ่นยนต์ตัวอื่นที่สังเกตได้ พฤติกรรมการสังเกตคือหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อหาบริเวณพื้นที่ว่างมากที่สุด พฤติกรรมนี้จะทำงานเป็นระยะ ตลอดช่วงการทำงานของหุ่นยนต์ ส่วนพฤติกรรมการเคลื่อนที่ คือ การเคลื่อนหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งซึ่งหาจากพฤติกรรมสำรวจ วิธีการนี้ยังนำเสนอวิธีเพิ่มประสิทธภาพการทำงานโดยใช้การสื่อสารระยะใกล้เพื่อจัดกลุ่มย่อยและคำนวณตำแหน่งร่วมกัน การทดลองทำด้วยการจำลองเหตุกาณ์โดยใช้ตัวจำลองเหตุการณ์ Player/Stage ซึ่งทำการทดลองกลับหุ่นยนต์ 3-9 ตัวในสภาพแวดล้อมที่ไม่ซับซ้อน งานวิจัยนี้ไม่ได้แสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีการการทำงานกับหุ่นยนต์จำนวนมากหรือผลกระทบกับพื้นที่การทำงานที่ซับซ้อนต่อการกระจายตัวของหุ่นยนต์

Pearce และคณะ [48] ได้เสนอวิธีการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ขนาดเล็ก อาศัยการควบคุมจากหุ่นยนต์ตัวหลัก งานวิจัยชิ้นนี้แสดงความเป็นไปได้ในการใช้วิธีการแบบศูนย์กลางการควบคุมการกระจายของกลุ่มหุ่นยนต์สำหรับใช้งานจริง งานวิจัยนี้ใช้หุ่นยนต์ตัวหลักร่วมกับหุ่นยนต์ขนาดเล็กที่รับคำสั่งจากหุ่นยนต์ตัวหลัก หุ่นยนต์ตัวหลักมีการติดตั้งตัวรับรู้ที่สามารถระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ขนาดเล็กในกลุ่ม ณ ที่นี้คือ กล้องติดตั้งด้านบน หุ่นยนต์ตัวหลักจะทำการคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขนาดเล็กแต่ละตัวและส่งคำสั่งผ่านช่องทางการสื่อสาร ในที่นี้คือระบบวิทยุ วิธีการคำนวณตำแหน่งที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือฟีโรโมนเสมือน ซึ่งได้รับแนวคิดจากการใช้ฟีโรโมนในการสื่อสารของแมลง แต่จะคำนวณในทางกลับกันคือฟีโรโมนสำหรับงานวิจัยนี้จะผลักหุ่นยนต์ออก ไม่ให้เข้าใกล้ความเข้มของฟีโรโมน ณ จุดใดๆนั้นบนพื้นที่ทำงาน จะคำนวณจากผลรวมของฟีโรโมนจากแหล่งต่างๆในพื้นที่ทำงานโดยความเข้มข้นของฟีโรโมนจะมีความสัมพันธ์ผกผันกับระยะระหว่างจุดกำเหนิดฟีโรโมนและจุดตรวจวัด วิธีการนี้ได้ทำการทดลองกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ตัวหลักหนึ่งตัวร่วมกับหุ่นยนต์ขนาดเล็กอีกสี่ตัว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้สามารถกระจายหุ่นยนต์อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยของ Howard และคณะ [49] ได้เสนอวิธีการจัดวางเครือข่าย ด้วยการวางเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้แบบเป็นลำดับ (incremental deployment) มีการจัดวางด้วยตนเองโดยจัดวางทีละตัวและไม่อาศัยข้อมูลของพื้นที่การทำงานล่วงหน้า มีวิธีการคือ เครือข่ายตัวรับรู้แบบ

เคลื่อนที่ได้แต่ละตัวจะมีสถานะการทำงานสามสถานะ คือ รอคอย กำลังทำงาน และ จัดวางเสร็จสิ้น เมื่อเริ่มต้นเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ทั้งหมดจะถูกจัดวางในตำแหน่งเริ่มต้นและสถานะการทำงานจะถูกตั้งให้เป็น รอคอย มีเพียงหนึ่งตัวเท่านั้นที่ถูกตั้งสถานะเป็น จัดวางเสร็จสิ้น เพื่อทำหน้าที่เป็นเสมือนสมอจุดเริ่มต้นของการจัดวางทั้งหมด ข้อมูลจากเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้อยู่ในสถานะ จัดวางเสร็จสิ้นจะถูกนำมารวมกับข้อมูลเบื้องต้นของแผนที่เพื่อใช้ในการนำทางเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ตัวอื่นๆ เมื่อทำการคำนวณพื้นที่ให้เหมาะสมกับการจัดวางหุ่นยนต์ตัวถัดไป จึงจะคำนวณเส้นทางของเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ซึ่งจะใช้ในการเดินทางโดยคำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดระหว่างตำแหน่งของเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ซึ่งมีสถานะเป็นรอคอยที่ถูกเลือก ไปยังปลายทางซึ่งคำนวณได้เมื่อเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดตามวิธีการของ Dijkstra แล้วหุ่นยนต์ทุกตัวที่อยู่ในวิถีนั้นจะถูกกำหนดสถานะเป็นกำลังทำงานและกำหนดเป้าหมายเป็นตำแหน่งของเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ตัวถัดไป ผลลัพธ์คือเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ทั้งหมดที่อยู่ในเส้นทางไปยังตำแหน่งใหม่ของการจัดวาง จะเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งใหม่โดยเคลื่อนที่ลักษณะคล้ายกับการเคลื่อนทั้งเส้นคือเป็นการย้ายเครือข่ายตัวรับรู้แบบเคลื่อนที่ได้ทีละตัวตลอดเส้นทางเข้าสู่ตำแหน่งใหม่ วิธีการนี้ใช้การเคลื่อนที่ซึ่งอาศัยการระบุตำแหน่งดังนั้นอาจเป็นข้อจำกัดสำหรับการใช้งานกับหุ่นยนต์ที่ไม่ทราบตำแหน่งของตนเอง อย่างไรก็ตาม Howard และคณะได้เสนอวิธีการแก้ปัญหานี้โดยใช้การอ้างอิงตำแหน่งจากเพื่อนบ้านในงานวิจัยอีกชิ้นหนึ่ง [50]

งานวิจัยของ [51] ได้เสนอการสร้างเครือข่ายเฉพาะกิจเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลจากกลุ่มหุ่นยนต์ และส่วนหนึ่งของงานวิจัยชิ้นนี้ได้เสนอการกระจายตัวกลุ่มหุ่นยนต์ในพื้นที่แบบปิด โดยมีวิธีการทำงานดังนี้ เมื่อเริ่มต้นหุ่นยนต์ทั้งหมดเริ่มต้นจากมุมใดมุมหนึ่งของพื้นที่ทำงานซึ่งเป็นพื้นที่ปิดมีขอบ หุ่นยนต์จะเลือกเดินทางในทิศทางแบบสุ่มจากทิศทางในครึ่งวงกลมที่มีทิศทางตรงข้ามกับขอบของพื้นที่ทำงานที่อยู่ใกล้สุดซึ่งสามารถมองเห็น ดังรูป 3.9 ผลลัพธ์จากวิธีการนี้คือ หุ่นยนต์จะกระจายตัวทั่วพื้นที่ทำงานแต่ไม่มีความสม่ำเสมอเนื่องจากการเคลื่อนที่เกิดจากการสุ่มเท่านั้น



รูปที่ 3.9: ตัวอย่างการเลือกทิศทางของหุ่นยนต์จากงานวิจัยของ Winfield

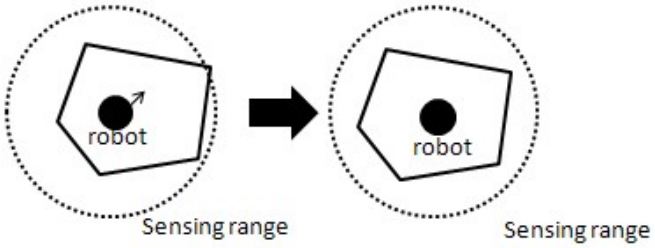
นอกจากวิธีการที่กล่าวมาแล้ว การนำการคำนวณแผนภาพโวโรนอยมาใช้ในการกระจายกลุ่มหุ่นยนต์ ตัวอย่างของงานที่ใช้แผนภาพโวโรนอยได้แก่งานวิจัยของ Cortes และคณะ [52] งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการแบบการไต่เกรเดียนต์โดยพยายามหาการกระจายตำแหน่งที่ได้ค่าเหมาะสม

ที่สุดสำหรับการครอบคลุมและการรับรู้ข้อมูลของหุ่นยนต์ ในงานวิจัยนี้สามารถสร้างรูปร่างเรขาคณิตจากการเรียงตัวของหุ่นยนต์ได้จากการปรับปลี่ยนสมการที่ใช้ในการไต่เกรเดียนต์

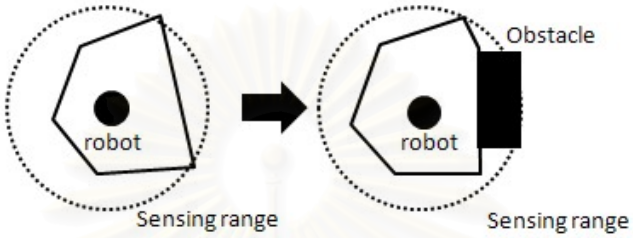
Tan และคณะ [53] เสนอวิธีการใช้แผนภาพโวโรนอยและการสร้างสามเหลี่ยมเดลองเน (Delaunay Triangulation)ในการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ วิธีนี้ใช้การสร้างสามเหลี่ยมเดลองเนระหว่างหุ่นยนต์ที่เป็นเพื่อนบ้านซึ่งมีระยะห่างกันไม่เกินหนึ่งช่วงการสื่อสาร หลังจากที่ได้สามเหลี่ยมเดลองเนแล้วจะทำการแปลงให้เป็นกราฟแบบคู่กัน (dual graph) นั่นคือแผนภาพโวโรนอย วิธีการนี้ขยายพื้นที่ในการครอบคลุมของหุ่นยนต์แต่ละตัวโดยการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่เป็นจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยนั้น (voronoi regoin) ซึ่งสามารถหาได้จากผลเฉลี่ยของจุดยอดของบริเวณโวโรนอยที่หุ่นยนต์ตัวนั้นอยู่ ดังรูปที่ 3.12 (ก) เมื่อหุ่นยนต์ตัวหนึ่งขยับจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของบริเวณโวโรนอยที่หุ่นยนต์ตัวนั้นอยู่และแผนภาพโวโรนอยทั้งหมด ซึ่งจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลบริเวณโวโรนอยอื่น และทำให้หุ่นยนต์ตัวอื่นปรับตำแหน่งต่อเนื่องกัน เมื่อเวลาผ่านไปหุ่นยนต์ทั้งหมดจะเข้าสู่สภาพสมดุลโดยอยู่ในจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยของตนเองทั้งหมด นอกจากหุ่นยนต์เพื่อนบ้านแล้วสิ่งกีดขวางยังมีผลต่อบริเวณโวโรนอยของหุ่นยนต์ด้วย กล่าวคือด้าน ของสิ่งกีดขวางที่อยู่ในรัศมีการรับรู้จะกลายเป็นด้านหนึ่งของบริเวณโวโรนอยของหุ่นยนต์ตัวนั้นดังรูปที่ 3.12 (ข) วิธีการนี้ใช้การหาเพื่อนบ้านที่มีระยะห่างกันไม่เกินหนึ่งช่วงการสื่อสารซึ่งในความเป็นจริงแล้วเพื่อนบ้านที่อยู่ในระยะดังกล่าวอาจไม่เพียงพอต่อการสร้างแผนภาพโวโรนอยที่สมบูรณ์สำหรับทั้งกลุ่ม จะเป็นได้แต่เพียงบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นของหุ่นยนต์แต่ละตัวเท่านั้น และการที่งานวิจัยนี้ใช้เส้นเชื่อมโยงการสื่อสารระหว่างเพื่อนบ้านซึ่งมีระยะห่างกันไม่เกินหนึ่งช่วงการสื่อสารเป็นด้านของสามเหลี่ยมเดอลองเนเลยนั้นจึงไม่เป็นจริงสำหรับทุกกรณี

งานวิจัยของ Dhillon และคณะ [15] ได้เสนอวิธีการจัดวางเครื่อข่ายตัวรับรู้ในรูปแบบของกริด กล่าวคือวิธีการนี้ต้องการวางตัวรับรู้ให้น้อยที่สุดเพื่อสามารถครอบคลุมจุดของกริดทุกจุดในพื้นที่ทำงานทั้งพื้นที่มีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวาง ทุกกริดสามารถถูกตรวจจับได้ด้วยความมั่นใจตามค่าที่กำหนด การทำงานเป็นวิธีการแบบละโมบ กล่าวคือ สร้างเมทริกซ์ของความน่าจะเป็นในการตรวจจับความผิดพลาดของตัวรับรู้ ณ ตำแหน่งต่างๆของกริดขนาดเท่ากับ $m \times n$ โดย m, n แทนความกว้างและยาวของพื้นที่กริดตามลำดับ เริ่มต้นให้ค่าเมทริกซ์เท่ากับ 1 คือไม่มีตัวรับรู้ โอกาสตรวจจับความผิดพลาดจึงเท่ากับ 1 หลังจากนั้นเลือกวางตัวรับรู้ทีละตัวโดยจุดที่วางในแต่ละจุด คือ จุดที่มีโอกาสตรวจจับกริดอื่นๆผิดพลาดน้อยที่สุด วนการทำงานอย่างนี้จนกว่าจะได้ความมั่นใจตามค่าที่กำหนดหรือจำนวนตัวรับรู้ที่ใช้เกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ ซึ่งวิธีการนี้ยังทำงานโดยการที่ถือว่าตัวรับรู้ทุกตัวทำงานเป็นอิสระต่อกันในกรณีที่ตรวจจับเป้าหมายพบจากตัวรับรู้มากกว่าหนึ่งตัวไม่ได้ทำให้ความมั่นใจในการตรวจจับบริเวณนั้นเพิ่มขึ้น จึงยังไม่ใกล้เคียงความเป็นจริงของการใช้งานตัวรับรู้ วิธีการนี้เป็นวิธีแบบศูนย์กลางคือคำนวณตำแหน่งการจัดวางก่อนแล้วจึงนำตัวรับรู้ไปจัดวาง ซึ่งอาจจะเกิดอุปสรรคในการใช้งานจริงเนื่องจากขาดข้อมูลที่แน่นอน

งานวิจัยของ Wang และคณะ[54] ได้เสนอการกระจายตัวของตัวรับรู้สามวิธีคือ การใช้



(a)



(b)

รูปที่ 3.10: วิธีการกระจายกลุ่มหุ่นยนต์จากงานวิจัยของ Tan และคณะ (ก) การเคลื่อนที่ไปยังจุดศูนย์กลางมวลบริเวณโวโรนอย(ข) การสร้างบริเวณโวโรนอยในกรณีที่มีสิ่งกีดขวาง

แผนภาพโวโรนอย การใช้วิธีการแบบเวคเตอร์ และวิธีการแบบ MiniMax วิธีการใช้แผนภาพโวโรนอย การเคลื่อนที่เข้าหาจุดไกลสุดของบริเวณโวโรนอยที่ตัวรับรู้ตัวนั้นอยู่ จะเห็นได้ว่าวิธีนี้เป็นวิธีแบบละโมบคือพยายามเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นที่ว่างอยู่ขนาดใหญ่สุดที่มองเห็นในบริเวณโวโรนอยของตนเอง วิธีการแบบเวคเตอร์เป็นวิธีที่ใกล้เคียงกับการใช้สนามแรงเสมือนกล่าวคือมีแรงแผลักจากหุ่นยนต์ที่อยู่รอบข้างและขอบของพื้นที่ทำงาน หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามแรงลัพธ์นี้ แรงเป็นไปตามสมการ $d_{avg} - d(s_i - s_j)$ โดย d_{avg} แทนระยะทางเฉลี่ยระหว่างตัวรับรู้สองตัว และ $d(s_i - s_j)$ แทนระยะทางระหว่างตัวรับรู้ที่ i และ j ส่วนวิธีสุดท้ายคือ Minimax หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งบริเวณของโวโรนอยอันเดิม และตำแหน่งนั้นมีนะยะทางไปยังจุดยอดที่ไกลสุดของบริเวณของโวโรนอยนั้นน้อยที่สุด

จะเห็นได้ว่างานวิจัยเกี่ยวกับการะจายตัวของหุ่นยนต์มีจำนวนมากและหลากหลายวิธี ซึ่งสามารถแยกย่อยตามวิธีการทำงานได้ดังนี้

- **รูปแบบการทำงาน** วิธีการกระจายตัวของหุ่นยนต์สามารถแบ่งการทำงานออกเป็นสองประเภท คือ การทำงานแบบรวมศูนย์ซึ่งได้แก่ [15, 48]และการทำงานแบบกระจาย เช่นใน [54]
- **การใช้ข้อมูล** วิธีการกระจายตัวของหุ่นยนต์สามารถแบ่งตามการใช้ข้อมูลเป็นสองประเภท คือ การใช้ข้อมูลท้องถิ่นซึ่งเป็นข้อมูลที่สังเกตุได้จากหุ่นยนต์หรือตัวรับรู้ตัวเท่านั้น งานวิจัยที่ใช้วิธีอาทิ [24, 47] ส่วนอีกประเภท คือ การใช้ข้อมูลแบบครอบคลุมซึ่งหมายถึงการรับรู้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งของหุ่นยนต์หรือตัวรับรู้ตัวอื่นทั้งหมดในพื้นที่ทำงาน งานวิจัยประเภท

นี้ได้แก่ [15]

- **การสื่อสาร** วิธีการกระจายตัวของหุ่นยนต์สามารถแบ่งตามลักษณะการสื่อสารคือ การใช้การสื่อสารแบบครอบคลุม การใช้การสื่อสารแบบท้องถิ่น และการใช้การรับรู้ การใช้การสื่อสารแบบครอบคลุม คือ การที่มีสมมุติฐานว่าหุ่นยนต์หรือตัวรับรู้สามารถติดต่อถึงกันทุกตัวในพื้นที่การทำงาน งานวิจัยที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ [14] อีกวิธีหนึ่ง คือ การติดต่อแบบท้องถิ่นซึ่งได้แก่ [47] และการใช้การรับรู้เพียงอย่างเดียวได้แก่ [24] เป็นต้น

เมื่อนำหลักเกณฑ์การแยกประเภทที่กล่าวข้างต้นมาใช้กับงานวิจัยที่นำเสนอ จะสามารถแยกแยะได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2: การจำแนกงานวิจัยเกี่ยวกับการกระจายตัวของหุ่นยนต์แบบกระจาย

งานวิจัย	วิธีการที่ใช้	รูปแบบการทำงาน	การใช้ข้อมูล	การสื่อสาร
Howard[24]	สนามแรงเสมือน	แบบกระจาย	ท้องถิ่น	ใช้การรับรู้
Zou[14]	VFA	แบบรวมศูนย์	ครอบคลุม	ครอบคลุม
Batalin[47]	Subsumption	แบบกระจาย	ท้องถิ่น	ใช้การรับรู้และแบบท้องถิ่น
Pearce [48]	ฟีโรโมนเสมือน	แบบรวมศูนย์	ครอบคลุม	แบบครอบคลุม
Howard[49]	Incremental	แบบรวมศูนย์	ครอบคลุม	แบบท้องถิ่น
Winfield[51]	การสุ่มแบบมีเงื่อนไข	แบบกระจาย	ท้องถิ่น	ใช้การรับรู้
Cortes[52]	การไต่เกรเดียนต์	แบบกระจาย	ไม่มี	ใช้การรับรู้
Tan[53]	โวโรนอย	แบบกระจาย	ไม่มี	ใช้การรับรู้
Dhillon[15]	กริด	แบบรวมศูนย์	แบบครอบคลุม	แบบครอบคลุม
Wang [54]	เวคเตอร์โวโรนอย MiniMax	แบบกระจาย	แบบท้องถิ่น	ใช้การรับรู้

นอกจากงานวิจัยข้างต้นถ้าแบ่งแยกตามนิยมของ Gage [45] แล้วคือการกระจายตัวแบบครอบคลุม (Blanket Coverage) ยังมีงานวิจัยของ Rekleitisและคณะ [55] ที่เป็นการกระจายตัวแบบกวาด (sweep coverage) ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้น่าสนใจ คือ มีการกำหนดข้อจำกัดทางด้านการ

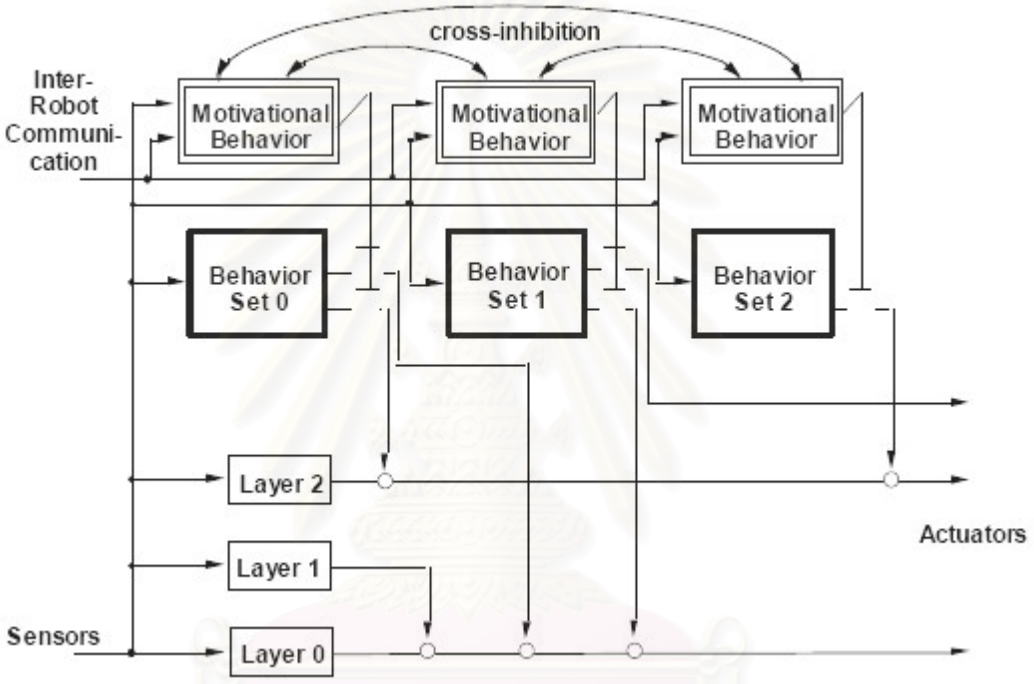
สื่อสารให้สามารถใช้ได้เพียงการสื่อสารแบบเส้นสายตา (lineof sight) ในงานวิจัยชิ้นนี้มีเป้าหมายคือต้องการให้กลุ่มหุ่นยนต์ทำการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณทำงานที่มีสิ่งกีดขวางรวมอยู่ด้วย โดยทุกจุดในพื้นที่การทำงานต้องมีหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งเคยเคลื่อนที่ผ่านบริเวณนั้น งานวิจัยชิ้นนี้ใช้วิธีการแบ่งพื้นที่แบบบูสโตรฟีดอน (Boustrophedon decomposition) หุ่นยนต์จะทำการกวาดพื้นที่จากซ้ายไปขวา และเคลื่อนที่ในแนวขึ้นลงเมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบจุดวิกฤติ (Critical Point) หุ่นยนต์จะทำการแบ่งกลุ่มเป็นสองกลุ่มเท่าๆกันเพื่อแยกกันกวาดบริเวณทั้งสองด้านของจุดวิกฤติ

3.4 การจัดสรรงานของกลุ่มหุ่นยนต์

การจัดสรรงานของกลุ่มหุ่นยนต์มีความกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ในประเด็นของปัญหาการจัดกลุ่ม ถ้าพิจารณาการจัดกลุ่ม กลุ่มที่สมบูรณ์หนึ่งกลุ่มจะประกอบด้วยสมาชิกซึ่งมาจากตำแหน่งต่างๆกัน การที่จะเลือกตัวใดมารวมกันให้กลายเป็นกลุ่มที่สมบูรณ์นั้นจะต้องพิจารณาต้นทุนของการเดินทางเพื่อให้การเดินทางมารวมกันนั้นใช้ต้นทุนต่ำที่สุด นั่นหมายความว่า การเดินทางไปรวมกลุ่มเป็นทรัพยากรที่มีอยู่จำกัดจำต้องจัดสรรการใช้งานให้เหมาะสม จึงจำเป็นต้องมีการเลือกแบ่งการเดินทางที่เหมาะสมไปยังหุ่นยนต์ตัวที่เหมาะสม ปัญหานี้จึงมีลักษณะสอดคล้องกับปัญหาการจัดสรรงานของกลุ่มหุ่นยนต์

ปัญหาการจัดสรรงานของกลุ่มหุ่นยนต์ที่จะนำมากล่าวถึง ณ ที่นี้จะเป็นประเภทการจัดสรรงานแบบตั้งใจ (intentional cooperation) ไม่ใช่การเกิดขึ้นเองจากพฤติกรรมกลุ่ม (emergent behavior) ซึ่งหนึ่งในงานวิจัยแรกๆ เกี่ยวกับการจัดสรรงานของกลุ่มหุ่นยนต์คืองานของ Parker [56] ซึ่งเสนอโครงสร้างที่เรียกว่า ALLIANCE ใช้เป็นรูปแบบของการประสานงานกันภายในกลุ่มหุ่นยนต์ให้มีความทนทานต่อความผิดพลาด โดยเป็นระบบที่มีโครงสร้างแบบกระจายและทำงานด้วยวิธีการเชิงพฤติกรรม งานวิจัยชิ้นนี้มุ่งแก้ปัญหาการแบ่งงานที่มีความเกี่ยวข้องกันบางส่วนและสามารถแบ่งย่อยให้กับกลุ่มหุ่นยนต์แบบต่างชนิด สามารถใช้งานได้จริงที่ความผิดพลาดและข้อบกพร่องอาจเกิดขึ้นในตัวหุ่นยนต์หรือการสื่อสาร โครงสร้าง ALLIANCE เป็นดังรูปที่ 3.11 ซึ่งแสดงถึงการประยุกต์ใช้แนวคิดของการควบคุมแบบพฤติกรรมจากระบบหุ่นยนต์ตัวเดียวสู่ระบบกลุ่มหุ่นยนต์ ในขั้นแรก หุ่นยนต์ทุกตัวจะมีพฤติกรรมที่เรียกว่า "พฤติกรรมแรงจูงใจ" ซึ่งเป็นพฤติกรรมลักษณะภายในของหุ่นยนต์ว่าหุ่นยนต์ตัวนั้นๆพร้อมที่จะทำงานชิ้นนั้นหรือไม่ โดยพฤติกรรมแรงบันดาลใจประกอบด้วยสองตัวแปรคือ การยอมรับ (Acquiescence) ความไม่อดทน(Impatience) โดยการยอมรับนั้นคือการที่หุ่นยนต์ตัวหนึ่งได้รับการจัดสรรงานแล้วและเมื่อเวลาผ่านไปมีหุ่นยนต์ตัวอื่นเข้ามาทำงานจะทำให้การยอมรับของหุ่นยนต์ตัวนั้นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อถึงจุดหนึ่งหุ่นยนต์ตัวนั้นจะล้มเลิกความพยายามที่จะทำงานนั้นให้สำเร็จเพื่อรอรับงานใหม่ที่อาจจะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า ในทางตรงกันข้ามความไม่อดทนคือการที่หุ่นยนต์ตัวนั้นพบกับสถานการณ์ที่หุ่นยนต์ตัวอื่นไม่สามารถทำงานให้บรรลุเป้าหมายได้ ซึ่งค่านี้จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆและจะเพิ่มน้ำหนักของการที่หุ่นยนต์จะเข้าไปร่วมในงานที่เพื่อนร่วมกลุ่มทำอยู่ ตัวอย่างเช่น หากมีหุ่นยนต์สองตัวคือ ก และ ข มีความสามารถในการขนย้ายกล่องเช่นเดียวกัน และทั้งสองได้รับคำอธิบายเกี่ยวกับงานชิ้นนี้มา หุ่นยนต์ ก ได้รับเลือกให้ทำงานตราบใดที่หุ่นยนต์ ก ยังทำงานไม่สำเร็จค่าความไม่อดทนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

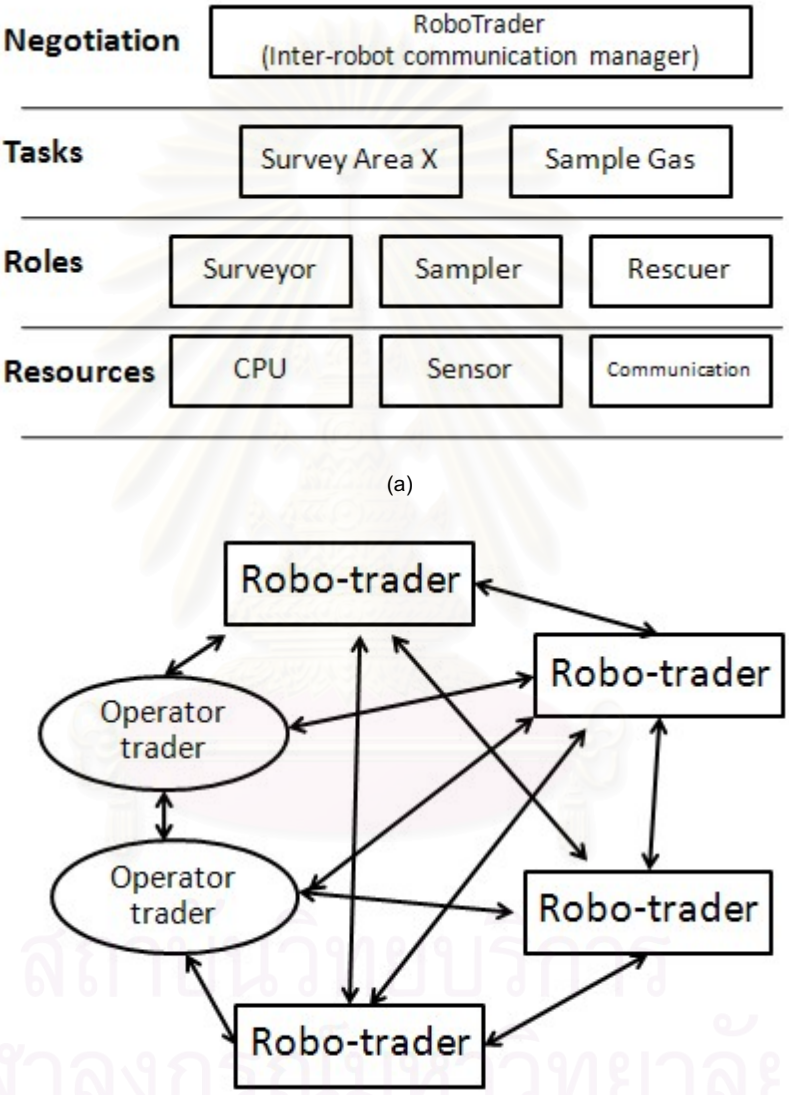
จนถึงจุดหนึ่งที่หุ่นยนต์ ข จะเข้าทำงานแทนหุ่นยนต์ ก แม้ว่าหุ่นยนต์ ก จะพยายามทำงานอยู่ก็ตาม กล่าวโดยสรุปคือ ความยอมรับสะท้อนถึงความจริงที่ว่าตัวหุ่นยนต์เอง อาจจะมีการทำงานผิดพลาดในขณะที่ความไม่อดทนสะท้อนโอกาสที่หุ่นยนต์ตัวอื่นจะมีความผิดพลาด ในส่วนของการเลือกให้หุ่นยนต์ตัวไหนทำงานเลือกการสื่อสารกันระหว่างหุ่นยนต์เพื่อหาหุ่นยนต์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานนั้นๆ โดยนับเอาค่าแรงจูงใจทั้งสองมาเป็นส่วนหนึ่งในการเลือกหุ่นยนต์ให้ทำงานด้วย งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทดลองการจำลองงานการเก็บวัตถุอันตรายซึ่งใช้หุ่นยนต์สามตัวและทดลองทั้งสภาวะที่หุ่นยนต์ทั้งสามตัวทำงานได้อย่างสมบูรณ์และในกรณีที่มีหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งทำงานไม่ได้



รูปที่ 3.11: โครงสร้าง ALLIANCE

งานวิจัยของ Dias [57] กล่าวถึงการจัดสรรงานสำหรับกลุ่มหุ่นยนต์โดยอาศัยหลักการของกลไกตลาดดังแสดงรูปที่ โดยกลุ่มหุ่นยนต์ทั้งหมดคือระบบเศรษฐกิจที่มีเป้าหมายเพื่อทำงานที่ได้รับมอบหมายให้สำเร็จโดยใช้ราคาต่ำที่สุดซึ่งราคาต่ำที่สุด คือการใช้ทรัพยากรต่ำที่สุดด้วยเช่นกัน และหุ่นยนต์แต่ละตัวเปรียบเสมือนกับผู้ซื้อผู้ขายในระบบเศรษฐกิจที่จะกระทำการเพื่อประโยชน์คือกำไรสูงสุดของตน นอกจากนั้นหุ่นยนต์แต่ละตัวยังสามารถติดต่อสื่อสารอันเองเพื่อทำการแลกเปลี่ยนสินค้าและบริการ ภายใต้ความพอใจของทั้งสองฝ่าย วิธีการนี้ใช้การประมูลเป็นหลักในการทำงานจะถูกแบ่งเป็นงานย่อยๆและส่งให้หุ่นยนต์ในกลุ่มประมูล หุ่นยนต์แต่ละตัวในกลุ่มจะพยายามทำกำไรให้ได้มากที่สุดจากการประมูลงานและหุ่นยนต์แต่ละตัวมีต้นทุนของงานที่ตัวมันเองทราบอยู่ก่อนแล้ว หุ่นยนต์แต่ละตัวจะพยายามประมูลสู้ราคากันจากราคาที่สูงไปยังราคาที่ต่ำ ตามราคาที่ตนยอมรับได้คือราคาที่ไม่ทำให้ตนเองขาดทุน และเมื่อหุ่นยนต์ประมูลงานมาได้แล้วก็จะนำงานนั้นไปลงมือทำอีกทีหนึ่ง นอกจากนี้หุ่นยนต์ยังสามารถนำงานไปประมูลเพื่อหาผู้รับเหมามาทำต่อแทนตนเองได้อีกด้วย ส่วนผู้รับประมูลนั้นแม้จะเป็นหุ่นยนต์เพียงตัวเดียวที่ทำหน้าที่รับประมูล

แต่วิธีการนี้ได้เสนอว่า หน้าที่ของผู้รับประมูลนี้สามารถทำได้โดยหุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่มเมื่อผู้รับประมูลเกิดทำงานไม่ได้ก็จะเลือกผู้รับประมูลใหม่มาทำหน้าที่แทน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ไม่มีสมมุติฐานเกี่ยวกับการสื่อสารว่าเป็นการสื่อสารแบบท้องถิ่นหรือการสื่อสารแบบครอบคลุม โดยให้ความสนใจเพียงว่าการสื่อสารสามารถมาถึงผู้รับประมูลได้โดยวิธีการใดวิธีการหนึ่งขึ้นอยู่กับการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้ยังไม่ปรากฏว่าวิธีการนี้ใช้ขั้นตอนใดในการเลือกหุ่นยนต์มาทำหน้าที่ผู้ประมูล



รูปที่ 3.12: วิธีการจัดสรรงานสำหรับกลุ่มหุ่นยนต์โดยอาศัยกลไกตลาด (ก) ตัวอย่างโครงสร้างของหุ่นยนต์ในกลุ่ม(ข) ตัวอย่างโครงสร้างของกลุ่มหุ่นยนต์

งานวิจัยของ Gerkey และ Mataric ได้เสนอการวิธีการใกล้เคียงกัน กล่าวคือ เสนอวิธีการประมูลเพื่อใช้ในการจัดสรรงานระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์ เป็นวิธีการแบบที่มีการตกลงกัน (Negotiation based method) งานวิจัยชิ้นนี้เสนอโครงสร้างที่เรียกว่า MURDOCH เพื่อทำการจัดสรรงาน

สำหรับกลุ่มหุ่นยนต์ ใช้แบบจำลองของการตีพิมพ์และสมัครสมาชิก (publish/subscribe) และใช้วิธีการติดต่อสื่อสารแบบเครือข่ายสัญญา (Contract Net Protocol) [58] โครงสร้าง MURDOCH มีการทำงานดังนี้ ขั้นแรกคือเมื่อได้รับงานจากผู้ควบคุมหุ่นยนต์แล้ว หุ่นยนต์จะทำการประกาศงานที่ได้รับโดยจะระบุถึงงานที่ต้องทำและทรัพยากรที่ต้องใช้ไว้ในข้อความ นอกจากนั้นข้อความยังมีข้อมูลเกี่ยวกับการวัดประสิทธิภาพด้วย เนื่องจากหุ่นยนต์ที่สามารถทำงานตามที่ได้รับมอบหมายอาจมีมากกว่าหนึ่งตัวและเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นมาตรฐานเดียวกัน จึงต้องใส่เงื่อนไขการวัดประสิทธิภาพในข้อความที่ประกาศด้วย หลังจากประกาศแล้วหุ่นยนต์แต่ละตัวจะส่งคะแนนที่ได้จากเงื่อนไขการวัดประสิทธิภาพมาประมูลเพื่อให้ได้งานนั้นๆ หลังจากเวลาผ่านไปตามที่กำหนดหุ่นยนต์ตัวที่เริ่มประมูลจะทำการปิดประมูลโดยประกาศการปิดประมูลไปยังหุ่นยนต์ที่ร่วมอยู่ในกลุ่มและหุ่นยนต์ตัวที่ชนะการประมูลจะได้รับงานชิ้นที่ประมูลไปทำภายใต้ระยะเวลาที่กำหนด และหุ่นยนต์ตัวที่เปิดประมูลจะคอยตรวจสอบสถานะของงาน ถ้าหากว่าหุ่นยนต์ตัวนั้นทำงานไม่สำเร็จก็จะทำการเปิดประมูลงานนั้นใหม่อีกครั้งหนึ่ง และถ้าหุ่นยนต์ตัวที่ได้รับงานไปทำงานไม่สำเร็จตามเวลาหุ่นยนต์ตัวนั้นจะทำการขอต่ออายุสัญญาไปยังหุ่นยนต์ตัวที่เปิดประมูลซึ่งจะได้รับการต่ออายุหรือไม่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของหุ่นยนต์ตัวที่เปิดประมูล

3.5 การประยุกต์ใช้งานของแผนภาพโวโรนอย

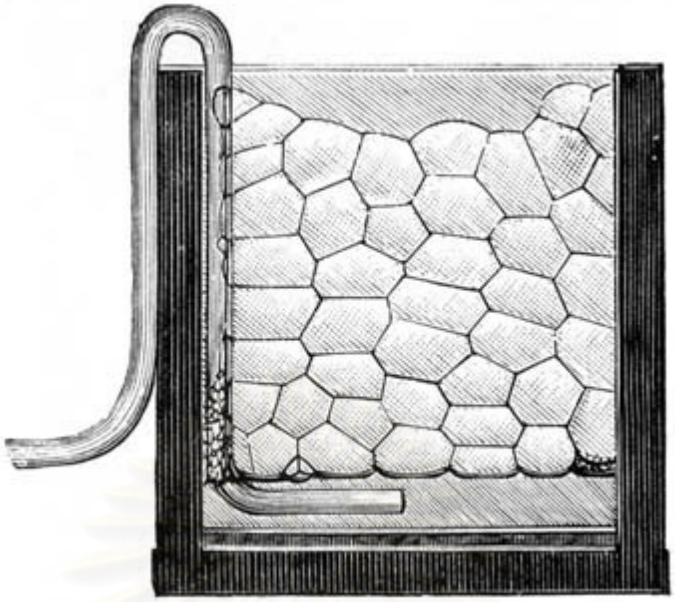
การใช้งานของแผนภาพโวโรนอยเกิดขึ้นอย่างกว้างขวางในหลายวงการเริ่มจากงานทางด้านคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวกับเรขาคณิตไปจนถึงงานด้านชีววิทยา นอกจากนั้นโครงสร้างของแผนภาพโวโรนอยยังเป็นโครงสร้างที่พบบ่อยได้ในธรรมชาติดังแสดงในรูปที่ 3.13 [1] [2] คุณสมบัติและรายละเอียดของแผนภาพโวโรนอยโดยละเอียดจะกล่าวถึงใน 2

ในงานวิจัยของ Du และคณะ [61] เสนอการใช้แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล (Centroidal Veronoi Diagram) ในงานต่างๆ อาทิเช่น การบีบอัดข้อมูลของภาพ การบีบอัดข้อมูลภาพ ซึ่งเป็นการลดความละเอียดของภาพจากภาพที่มีขนาดบิทสีสูงมาเป็นภาพที่มีขนาดบิทสีน้อยลง วิธีการคือถ้าให้ภาพปลายทางมีสีจำนวน k สี ถ้าเรารู้สีปลายทางอยู่แล้วเช่นในกรณีของภาพที่มีตารางสีมาตรฐานวิธีการเลือกสีปลายทาง z ให้สัมพันธ์กับสีของภาพจริงคือการเลือกสีปลายทางใกล้เคียงกับสีต้นทางมากที่สุด ในอีกแง่หนึ่งคือการหาว่า y อยู่ในบริเวณโวโรนอยของ z ตัวใด แต่ถ้าเราไม่ต้องจำกัดอยู่แค่ตารางสีที่กำหนดไว้ล่วงหน้า เราสามารถเลือกสีที่จะมาเป็นสีปลายทางให้เหมาะสมได้ โดยสีปลายทางที่เหมาะสมคือสีที่มีคุณสมบัติที่จะทำให้ค่าของ

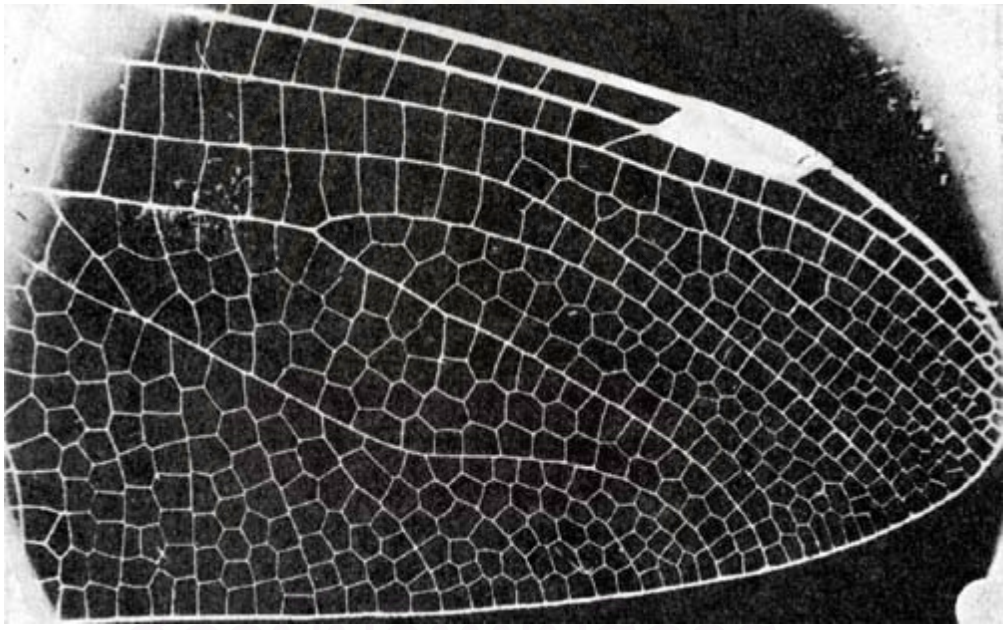
$$\sum_{i=1}^{k} \sum_{y_j \in V_i} \rho(y_j)|y_j - z_i|^2$$

ต่ำที่สุด โดยที่ y แทนสีในภาพจริง $\rho(y)$ แทนฟังก์ชั่นความหนาแน่นของสี y ในภาพจริง z คือสีที่เลือกมาเป็นสีของตารางสีในภาพปลายทาง k คือจำนวนสีปลายทาง และ V_i คือบริเวณโวโร

[1] ภาพจาก Soap-Bubbles: Their Colours and the Forces Which Mold Them , C. V. Boys [59]
[2] ภาพจาก On Growth and Form , D'Arcy Wentworth Thompson [60]



(a)



(b)

รูปที่ 3.13: โครงสร้างของแผนภาพโวโรนอยที่พบในธรรมชาติ (ก) โครงสร้างของฟองสบู่ในภาชนะปิด (ข) โครงสร้างของปีกแมลงปอ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอยของ i Du เสนอว่าการทำให้ค่าของสมการข้างต้นต่ำสุดคือการเลือก z_i ที่ทำให้เกิด V_i ที่เป็นบริเวณโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลเมื่อเทียบกับ $\rho(y)$ ผลของวิธีการนี้แสดงในรูปที่ 3.14

งานวิจัยของ Barlow [62] เกี่ยวกับพฤติกรรมของปลา mouthbreeder (Tilapia mossambica) โดยศึกษาพฤติกรรมการรักษาอาณาเขตของปลาตัวผู้โดยเริ่มศึกษาจากการปล่อยปลาลงไปในบ่อกลางแจ้งที่ทรายก้นบ่อมีการเกลี่ยสม่ำเสมอกัน หลังจากให้ปลาอาศัยอยู่ระยะหนึ่งจะปรากฏผลดังแสดงในรูปที่ 3.15 ปลาตัวผู้ซึ่งคือปลาสีดำขนาดใหญ่ในภาพจะทำการขุดพื้นบ่อเป็นหลุม

รูปที่ 3.14: ผลการทดลองการบีบอัดรูปภาพ (ก)ภาพต้นแบบความละเอียด 8 บิท (ข) ภาพที่ถูกบีบอัดด้วยวิธีมอนติคาร์โลความละเอียด 3 บิท (ค) ภาพที่ถูกบีบอัดด้วยวิธีแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลความละเอียด 3 บิท (ง) ภาพที่ถูกบีบอัดด้วยวิธีแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลและผ่านขั้นตอนการไดเทอร์ริ่ง (Dithering) ความละเอียด 3 บิท

ตื้นๆเพื่อเตรียมสำหรับการวางไข่ การขุดจะทำให้ทรายที่ขุดออกมาปรากฏเป็นสันขนาดเล็กดังปรากฏในรูปเป็นรูปหกเหลี่ยมรอบปลาตัวผู้ ในการศึกษานี้ Barlow สรุปว่าปลาชนิดนี้มีการแบ่งอาณาเขตกันเป็นรูปหกเหลี่ยม แต่ต่อมาได้นำรูปถ่ายจากงานวิจัยของ Barlow มาทำการวิเคราะห์ [63, 61]และพบว่าอาณาเขตของบ่อทรายนั้นใกล้เคียงกับแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลมาก

ในงานวิจัยของ [64] ได้เสนอการแผนภาพโวโรนอยในการแยกกลุ่มวัตถุสองชนิดออกจากกันด้วยหุ่นยนต์สองตัวที่เชื่อมกันด้วยเชื่อก การแยกวัตถุออกจากกันทำได้โดยใช้เชือกวนรอบกลุ่มวัตถุที่มีชนิดเดียวกันและดึงออกมรวมกัน วิธีการที่เสนอคือการสร้างแผนภาพโวโรนอยของวัตถุทั้งหมดในพื้นที่การทำงานขึ้นมา และเลือกเฉพาะเส้นขอบของบริเวณโวโรนอยที่แบ่งระหว่างวัตถุที่ต่างชนิดกันมาต่อเชื่อมกันเพื่อสร้างเป็น เส้นทางการแบ่งแยก เมื่อได้เส้นทางการแบ่งแยกแล้งหุ่นยนต์ทั้งสองตัวจะเริ่มจากจุดเริ่มต้นเดียวกันโดยให้หุ่นยนต์ตัวหนึ่งเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการแบ่งแยกเพื่อให้เชือกที่อยู่ระหว่างหุ่นยนต์ทั้งสองล้อมวัตถุที่มีชนิดเดียวกัน จากนั้นหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เพื่อดึงวัตถุชนิดที่โดนล้อมออกมา

รูปที่ 3.15: พฤติกรรมการขุดหลุมวางไข่ของปลา mouthbreeder (Tilapia mossambica)

นอกจากงานวิจัยเกี่ยวกับแผนภาพโวโรนอยที่กล่าวไปแล้ว ยังมีการประยุกต์ใช้แผนภาพโวโรนอยอีกมากซึ่งสามารถหารายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน [65] ส่วนงานที่เฉพาะเจาะจงเกี่ยวกับการใช้แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลสามารถหารายละเอียดเพิ่มเติมได้ใน [61]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์หลายชนิด

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะอธิบายขั้นตอนวิธีแบบกระจายในการควบคุมหุ่นยนต์แต่ละตัว โดยขั้นตอนวิธีเหล่านี้จะมีการทำงานอยู่ที่หุ่นยนต์ทุกตัวและสามารถติดต่อสื่อสารเพื่อทำงานร่วมกันได้ วิธีที่พัฒนาขึ้นจะนำมาใช้แก้ปัญหาทั้งสามที่ได้เสนอไว้ อันประกอบด้วย (1) การเรียงตัวแบบวงกลม, (2) การจัดกลุ่ม และ (3) การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข ซึ่งการทดลองการทำงานของวิธีการต่างๆ จะทำโดยอาศัยตัวจำลองเหตุการณ์ซึ่งมีหน้าที่จำลองพื้นที่การทำงาน และพฤติกรรมของหุ่นยนต์ให้สามารถมองเห็นและวัดผลได้ในเชิงตัวเลข การจำลองเหตุการณ์นั้นจำเป็นต้องมีเงื่อนไขที่ชัดเจนทั้งในด้านข้อมูลที่รับรู้, การควบคุมหุ่นและข้อจำกัดต่างๆ เพื่อให้สามารถนำผลการทดลองมาใช้อ้างอิงและเปรียบเทียบได้อย่างถูกต้อง เนื้อหาที่จะเสนอในบทนี้มีดังนี้

- 4.2 ตัวจำลองเหตุการณ์
- 4.3การจัดเรียงตัวแบบวงกลม
- 4.4การจัดกลุ่มหุ่นยนต์
- 4.5การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

4.2 ตัวจำลองเหตุการณ์

การทดสอบของวิธีการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ในที่นี้ ทำการทดลองในตัวจำลองเหตุการณ์ที่สร้างขึ้น เพื่อให้สะดวกต่อการกำหนดค่าและสังเกตพฤติกรรมของหุ่นยนต์โดยไม่ต้องสร้างหุ่นยนต์จริงขึ้นมา ตัวจำลองเหตุการณ์จะเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการเปรียบเทียบการทำงานของวิธีการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ที่ออกแบบขึ้นเพราะสามารถทดสอบวิธีการที่ต่างกันภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกันได้อย่างสมบูรณ์และสามารถทำซ้ำได้โดยสะดวก ในการทำงานของตัวจำลองเหตุการณ์ในระบบหุ่นยนต์หลายตัวนั้นต่างกับการจำลองเหตุการณ์สำหรับหุ่นยนต์ตัวเดียวอยู่หลายประการ กล่าวคือ ระบบหุ่นยนต์หลายตัวนั้นต้องทำการจำลองเหตุการณ์ในลักษณะขนานกันไปโดยอาศัยการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ตัวเดียวที่ทำงานไปพร้อมๆกัน ทุกตัว ในขณะที่การจำลองเหตุการณ์ของหุ่นยนต์ตัวเดียวนั้นมีเพียงการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์เพียงตัวเดียวที่ต้องคำนวณจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้การทำงานแบบขนานแต่อย่างใด ข้อแตกต่างอีกข้อหนึ่งคือการทำงานของหุ่นยนต์หลายตัวอาจจะมีการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ซึ่งเป็นส่วนที่เกิดขึ้นมาเนื่องจากความจำเป็นในการทำงานร่วมกัน

ส่วนประกอบหลักของตัวจำลองเหตุการณ์คือแบบจำลองของหุ่นยนต์ซึ่งประกอบด้วยข้อจำกัด, ข้อมูลที่รับรู้และการกระทำของหุ่นยนต์ และส่วนของสิ่งแวดล้อมจำลองซึ่งก็คือพื้นที่ที่กำหนดให้หุ่นยนต์จำลองการทำงาน พื้นที่นี้จะประกอบด้วยสิ่งกีดขวางลักษณะต่างๆ และขอบเขตของพื้นที่การทำงาน ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

4.2.1 แบบจำลองของหุ่นยนต์

แบบจำลองของหุ่นยนต์คือข้อจำกัด และคุณสมบัติต่างๆของหุ่นยนต์จำลองที่ใช้ในการจำลองเหตุการณ์ การใช้แบบจำลองหุ่นยนต์ทำให้สามารถทำการทดลองเพื่อทดสอบวิธีการต่างๆ ได้โดยมีข้อจำกัดและคุณสมบัติเดียวกันตามที่กำหนดไว้ในแบบจำลองของหุ่นยนต์

แบบจำลองของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองนี้จะสามารถแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆ คือ

- **คุณสมบัติทั่วไป** กล่าวถึงคุณสมับติประจำตัวของหุ่นยนต์แต่ละตัว
- **การรับรู้** กล่าวถึงลักษณะและประเภทข้อข้อมูลที่หุ่นยนต์จำลองรับรู้
- **การเคลื่อนที่** กล่าวถึงวิธีการและข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จำลอง

4.2.1.1 คุณสมบัติทั่วไป

เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการใช้งานกลุ่มหุ่นยนต์หลายชนิด หุ่นยนต์จำลองจึงถูกแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ตามไปด้วย หุ่นยนต์จำลองทุกตัวจะถูกกำหนดชนิดตั้งแต่ก่อนการจำลองเหตุการณ์จะเริ่มขึ้น และชนิดของหุ่นยนต์เป็นคุณสมบัติประจำตัวของหุ่นยนต์ที่จะไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการจำลองเหตุการณ์

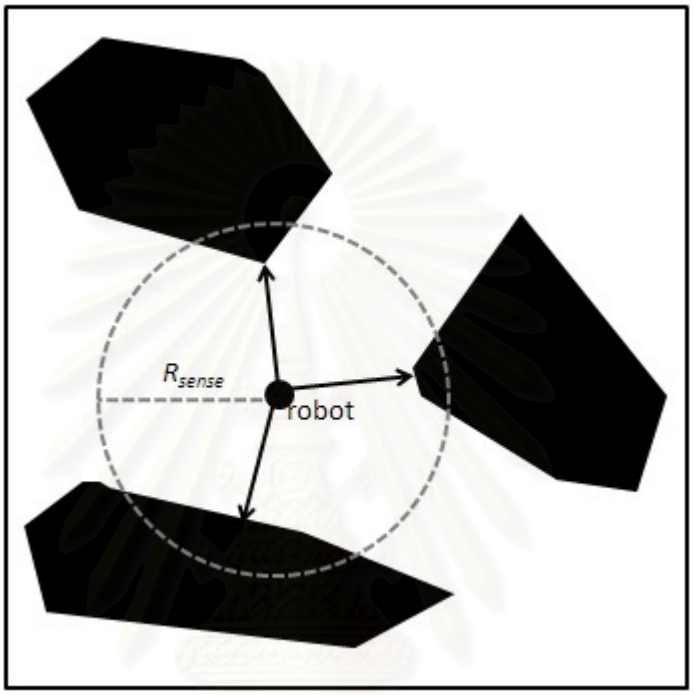
การแทนที่หุ่นยนต์ หมายถึงการกำหนดรูปแบบของหุ่นยนต์ที่จะนำไปใช้ในสิ่งแวดล้อมจำลองว่ามีมิติของขนาดเป็นอย่างไร เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ต้องการศึกษาผลของหุ่นยนต์จำนวนมากจึงแทนที่หุ่นยนต์ด้วยจุดซึ่งไม่มีขนาดในพื้นที่การทำงานเพื่อความสะดวกในการทดลอง เนื่องจากในการทำงานจริงหุ่นยนต์เหล่านี้มักจะมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่การทำงาน ผลของขนาดของหุ่นยนต์จึงสามารถละเลยได้

4.2.1.2 การรับรู้

หุ่นยนต์ทำงานโดยใช้ข้อมูลจากการรับรู้ เช่นเดียวกับที่มนุษย์ทำงานต่างๆโดยอาศัยประสาทสัมผัส ซึ่งข้อมูลจากการรับรู้นี้มีได้หลากหลายประเภท เช่น ภาพถ่าย ระยะ หรือการวัดมุม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ระบุประเภทของข้อมูลที่หุ่นยนต์จำลองรับรู้เพื่อความชัดเจนของการจำลองเหตุการณ์ แต่การรับรู้นั้นมีข้อจำกัดอันเกิดมาจากหลายปัจจัย อาทิ มนุษย์ไม่สามารถมองเห็นในที่มืดได้ หรือหุ่นยนต์ที่นำทางด้วยอัลตราโซนิคจะไม่สามารถรับรู้การมีอยู่ของวัตถุที่อ่อนนุ่มได้ ข้อจำกัดของ

การรับรู้จึงเป็นเรื่องที่ต้องพิจารณา เพื่อให้หุ่นยนต์จำลองมีการทำงานที่เป็นไปได้ในโลกจริง การรับรู้ของหุ่นยนต์จำลองในที่นี้ประกอบด้วย

การรับรู้สิ่งกีดขวาง หุ่นยนต์จำลองสามารถรับรู้สิ่งกีดขวางได้ ภายในรัศมีการรับรู้ R_{sense} จากจุดศูนย์กลางของหุ่นยนต์ ในรูปแบบของระยะทางที่ใกล้ที่สุดและมุมของเวคเตอร์ระยะทางนั้นไปยังสิ่งกีดขวางทุกชิ้นที่อยู่ในรัศมีการรับรู้ การรับรู้สิ่งกีดขวางของหุ่นยนต์เป็นไปดังรูปที่ 4.1



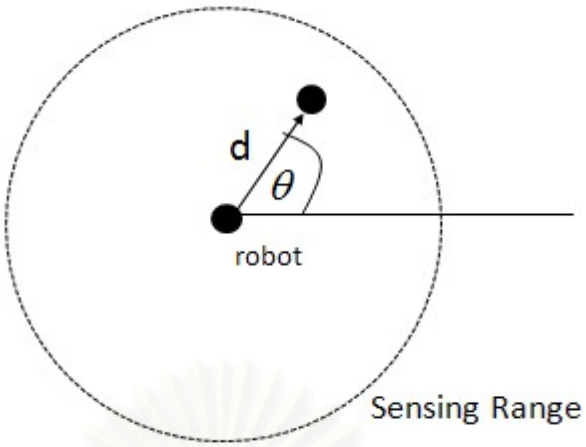
รูปที่ 4.1: การรับรู้สิ่งกีดขวาง

การรับรู้ขอบเขตของพื้นที่การทำงาน ในวิทยานิพนธ์นี้เราสมมุติให้หุ่นยนต์ทำงานในพื้นที่การทำงานที่มีขอบเขตชัดเจน ซึ่งขอบเขตนี้หุ่นยนต์จะสามารถรับรู้ได้ในลักษณะเดียวกันกับการรับรู้สิ่งกีดขวาง

การรับรู้หุ่นยนต์ หุ่นยนต์จำลองสามารถรับรู้หุ่นยนต์ตัวอื่นได้ ภายในรัศมีการรับรู้ R_{sense} จากจุดศูนย์กลางของหุ่นยนต์ โดยสามารถรับรู้ระยะทาง และทิศทางไปยังหุ่นยนต์ทุกตัวที่อยู่ในรัศมีการรับรู้ R_{sense} นอกจากระยะทางและทิศทางแล้วหุ่นยนต์จำลองยังสามารถระบุชนิดของหุ่นยนต์ที่อยู่ในระยะการรับรู้ได้อีกด้วย การรับรู้หุ่นยนต์เป็นไปตามรูปที่ 4.2

การรับรู้ทิศทาง หุ่นยนต์จำลองในการจำลองเหตุการณ์นี้สมมุติให้มีการติดตั้งตัวรับรู้ทิศทาง (compass sensor) ไว้ซึ่งตัวรับรู้ทิศทางนี้สามารถระบุทิศทางการวางตัวของหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับพื้นที่การทำงานได้ การรับรู้ทิศทางนี้จะมีประโยชน์ในการอ้างอิงตำแหน่งของหุ่นยนต์ในลักษณะการอ้างอิงมุมซึ่งจะกล่าวต่อไปในภาคผนวกที่ ก

จากข้อมูลการรับรู้ข้างต้นจะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์มีลักษณะการทำงานที่เป็นแบบท้องถิ่นคือไม่



รูปที่ 4.2: แบบจำลองของหุ่นยนต์ในการจำลองเหตุการณ์

อาศัยสมมุติฐานที่ว่ามีตัวรับรู้ที่สามารถรับรู้สถานะของหุ่นยนต์และสิ่งแวดล้อมทั้งหมดในพื้นที่การทำงานได้ และแม้ว่าจะมีการใช้ทิศทางในการทำงานนี้จะเป็นคุณสมบัติที่มีลักษณะแบบภาพรวม แต่ค่านี้สามารถหาได้จากตัวหุ่นยนต์ด้วยตัวรับรู้ทิศทางซึ่งเราอาจถือได้ว่าเป็นข้อมูลท้องถิ่นชนิดหนึ่ง ในการประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์จริงการหาทิศทางนี้ทำได้โดยเข็มทิศอิเลกทรอนิกส์ซึ่งทำงานโดยการตรวจวัดความเข้มสนามแม่เหล็กโลก

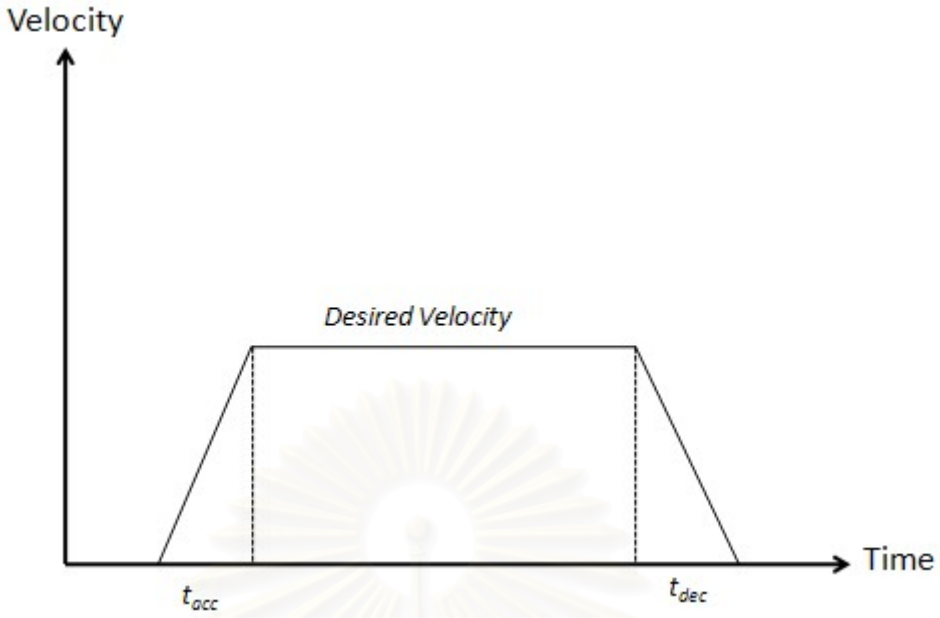
4.2.1.3 การเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดอย่างหนึ่งของหุ่นยนต์ และเพื่อให้สะดวกในการทดลองการเคลื่อนที่นั้นต้องอยู่ภายใต้ข้อจำกัด เช่นหุ่นยนต์จะต้องไม่เคลื่อนที่เร็วเกินไป ข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ในหุ่นยนต์จำลองของการจำลองเหตุการณ์นี้เป็นดังนี้

รูปแบบการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์จำลองนี้จะเคลื่อนที่ในลักษณะหลายทิศทาง โดยหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆได้โดยไม่ต้องมีการหมุนหรือการเลี้ยว การเคลื่อนที่ลักษณะนี้เป็นแบบเดียวกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบโฮโลโนมิค (holonomic) คือสามารถเลื่อนตัวเองไปได้เพื่อไปยังจุดหมาย 360 องศารอบตัว

ความเร็ว เนื่องจากหุ่นยนต์จริงนั้นมีความเร็วในการทำงานที่จำกัด แบบจำลองหุ่นยนต์นี้จึงได้มีการกำหนดความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์เอาไว้ด้วยเพื่อให้หุ่นยนต์จำลองมีข้อจำกัดเช่นเดียวกับหุ่นยนต์ในโลกจริง ความเร็วสูงสุดนี้จะคงที่ตลอดการจำลองเหตุการณ์

การสั่งงานการเคลื่อนที่นี้ใช้การสั่งการเป็นความเร็ว โดยถือว่าหุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วให้เป็นไปตามคำสั่งได้ทันที โดยไม่มีช่วงเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็ว ซึ่งในโลกจริงแล้วการเคลื่อนที่ต้องมีช่วงเวลาที่หุ่นยนต์ใช้เร่งความเร็วหรือลดความเร็วให้เป็นไปตามคำสั่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3: การเร่งความเร็วและการลดความเร็วของหุ่นยนต์

ในรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าหากหุ่นยนต์ต้องการเพิ่มความเร็วจากหยุดนิ่งไปสู่ความเร็วต้องการ จะมีเวลาที่ต้องใช้ในการเร่งความเร็ว หุ่นยนต์จะเร่งความเร็วไปถึงความเร็วที่ต้องการช้าหรือเร็วขึ้นอยู่อัตราเร่งของหุ่นยนตื ในทางกลับกัน ถ้าหุ่นยนต์ได้รับคำสั่งให้ลดความเร็วจนหยุดนิ่งหุ่นยนต์จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาในการลดความเร็วด้วยเช่นกัน แต่ในที่นี้เราถือว่าหุ่นยนต์เป็นหุ่นยนต์ขนาดเล็กมีมวลไม่มาก และมีกำลังพอที่จะเปลี่ยนแปลงความเร็วไปเป็นความเร็วที่ต้องการได้ในเวลาที่สั้นมาก จนสามารถละเลยเวลานี้ได้ ดังนั้นในแบบจำลองของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะถือว่าหุ่นยนต์มีความเร็วตามที่สั่งงานไปทันที ดังแสดงในรูปที่ 4.4

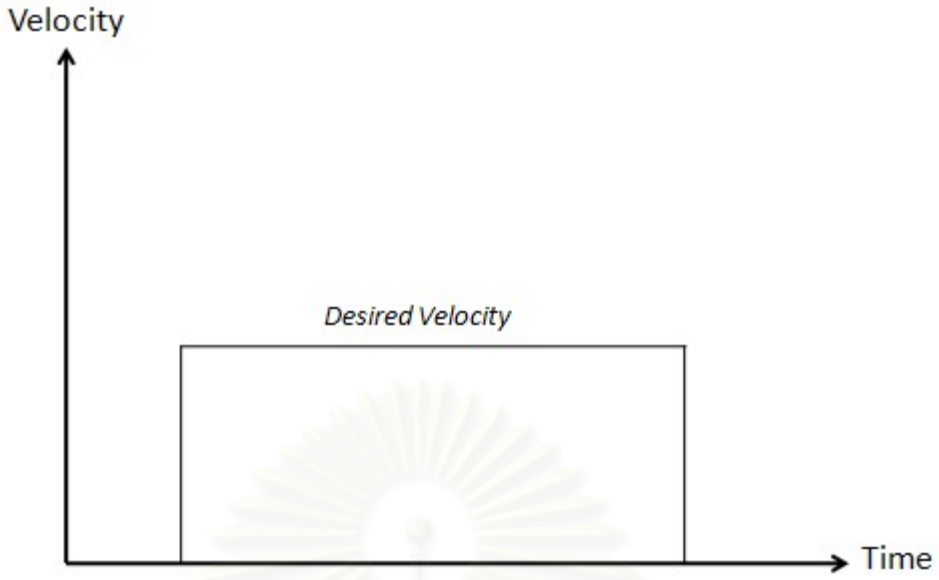
4.2.1.4 การสื่อสาร

ในวิทยานิพนธ์นี้มีการใช้การสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ โดยการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์นี้จะต้องอยู่ภายใต้ระยะของการสื่อสาร R_{com} หุ่นยนต์ที่อยู่ห่างกันเป็นระยะน้อยกว่า R_{com} จะสามารถติดต่อสื่อสารระหว่างกันได้

4.2.2 สิ่งแวดล้อมจำลอง

ในการจำลองเหตุกาณ์หุ่นยนต์จำลองจะทำงานอยู่ในสภาพแวดล้อมลำลองดังแสดงในรูปที่ 4.5ซึ่งมีคุณสมบัติและสมมุติฐานดังต่อไปนี้

ขอบเขต พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์เป็นพื้นที่ปิดมีผนังล้อมรอบ หุ่นยนต์จะรับรู้ว่าผนังเป็นสิ่งกีดขวางชิ้นหนึ่ง และขอบเขตนี้จะคงที่ตลอดการทำงาน



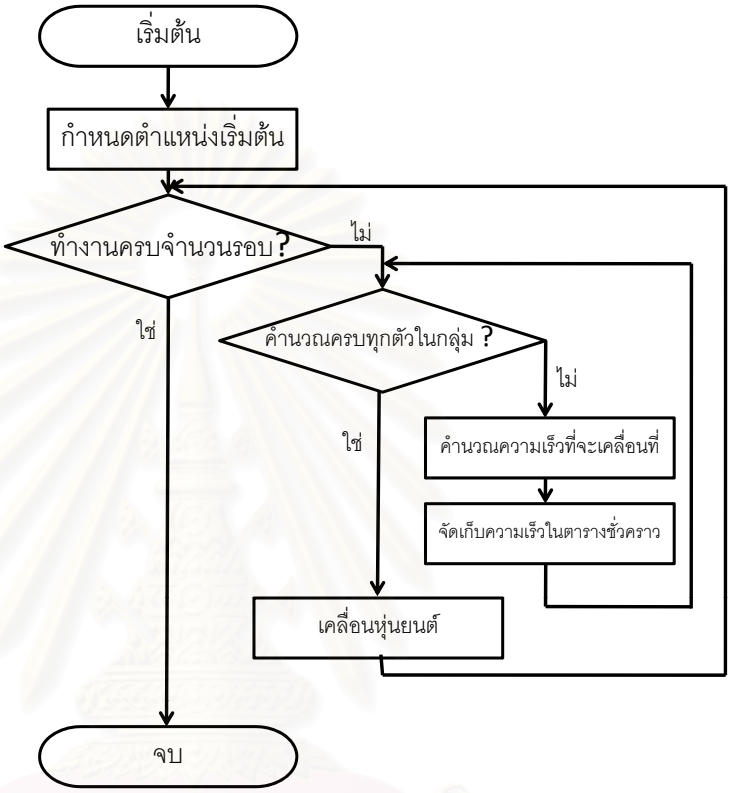
รูปที่ 4.4: การเร่งความเร็วและการลดความเร็วของหุ่นยนต์ในการจำลองเหตุการณ์

รูปที่ 4.5: แบบจำลองของสิ่งแวดล้อมในการจำลองเหตุการณ์

สิ่งกีดขวาง สิ่งกีดขวางในพื้นที่การทำงานจะถูกแทนที่ด้วยรูปหลายเหลี่ยม ซึ่งหุ่นยนต์จะสามารถรับรู้ได้จากตัวรับรู้ในหุ่นยนต์ สิ่งกีดขวางในการทดลองจะถือว่าอยู่นิ่งเมื่อเทียบกับพื้นที่การทำงาน

4.2.3 การทำงานของตัวจำลองเหตุการณ์

ตัวจำลองเหตุการณ์นี้ได้พัฒนาขึ้นด้วยภาษา C++ และใช้ไลบรารี LEDA ในการคำนวณทางเราขาคณิต ขั้นตอนการทำงานของการจำลองเหตุการณ์เป็นไปตามรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6: การทำงานของตัวจำลองเหตุการณ์

ในแผนผังการทำงานของการจำลองเหตุการณ์ที่แสดงในรูปที่ 4.6 การทำงานจะเริ่มด้วย **การจัดวางตำแหน่งของหุ่นยนต์** ในขั้นตอนนี้ตัวจำลองเหตุการณ์จะกำหนดชนิดและตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์ทุกตัวในพื้นที่การทำงาน การจัดวางตำแหน่งสามารถเป็นได้ทั้งการจัดวางแบบสุ่ม หรือการจัดวางที่มีการวางแผนเอาไว้ก่อนก็ได้ หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการจำลองเหตุการณ์ จะเห็นได้ว่าประกอบด้วยการทำงานแบบวนรอบ สองชั้น ชั้นแรกคือการวนเพื่อทำการทดลองแต่ละขั้น โดยจะทำการทดลองเป็นจำนวนกี่ขั้นนั้นสามารถตั้งค่าได้ ในการวนรอบในเป็นการคำนวณของหุ่นยนต์แต่ละตัว ในขั้นตอน **คำนวณความเร็วที่จะเคลื่อนที่** เป็นหัวใจหลักในการทำงาน ในขั้นตอนนี้หุ่นยนต์จะทำการคำนวณข้อมูลที่ได้รับจากตัวรับรู้ ,ข้อมูลที่หุ่นยนต์เก็บไว้ และข้อมูลจากการติดต่อกับหุ่นยนต์ตัวอื่น ๆ ด้วยวิธีการควบคุมที่ได้พัฒนาขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้คือความเร็วที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยความเร็วที่จะสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่นั้นจะถูกจำกัดอยู่ไม่ให้เกินความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อได้ความเร็วที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่แล้วจะยังไม่ส่งไปทำงานทันที เนื่องจากหากหุ่นยนต์ทำการเคลื่อนที่ในขณะนั้นเลยจะส่งผลกับหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ ที่

ยังไม่ได้ทำการการคำนวณ ทำให้การทำงานไม่เป็นแบบขนานกัน จึงมีขั้นตอนของการ **จัดเก็บความเร็วของหุ่นยนต์** เพื่อที่จะเก็บข้อมูลของความเร็วที่หุ่นยนต์ต้องการเคลื่อนที่ไว้ก่อน รอจนกว่าจะคำนวณเสร็จสิ้นแล้วจึงทำการเคลื่อนหุ่นยนต์ทุกตัวพร้อมกันในคราวเดียว ในขั้นตอนของ **การเคลื่อนหุ่นยนต์**

4.3 การจัดเรียงตัวแบบวงกลม

การจัดเรียงตัวเป็นวงกลมของกลุ่มหุ่นยนต์เป็นปัญหาที่ซับซ้อน เนื่องจากธรรมชาติความเป็นพฤติกรรมแบบภาพรวมของวงกลม ที่จะสรุปความเป็นวงกลมได้จากมุมมองของผู้สังเกตที่มองเห็นหุ่นยนต์ทั้งหมดเท่านั้น และข้อจำกัดเกี่ยวกับข้อมูลที่หุ่นยนต์ทราบในขณะทำงานว่าเป็นข้อมูลเพียงแบบท้องถิ่น การจัดเรียงตัวแบบวงกลมจึงเป็นตัวแทนที่เหมาะสมของปัญหาการจัดเรียงตัวในแง่ของ การสร้างประสิทธิภาพแบบภาพรวมด้วยข้อมูลแบบท้องถิ่น

วิธีการที่เป็นที่รู้จักในการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์เป็นวงกลมคืองานวิจัยของ Sugihara และ Suzuki [40] ซึ่งจะใช้เป็นตัวเปรียบเทียบของวิธีการจัดเรียงตัวแบบวงกลมในวิทยานิพนธ์นี้ ในวิธีการของ Sugihara และ Suzuki หากหุ่นยนต์เพื่อนบ้านที่ไกลที่สุดอยู่ห่างจากตัวเองแล้ว หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เข้าหาหุ่นยนต์ตัวนั้น มิฉะนั้นแล้วจะเคลื่อนที่ออกห่างจากหุ่นยนต์ตัวที่ใกล้ที่สุด ในเรื่องการจัดเรียงตัวแบบวงกลมแบ่งเนื้อหาออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

- 4.3.1 นิยามของปัญหา
- 4.3.2 แนวคิดเบื้องต้นของการจัดเรียงตัวแบบวงกลม
- 4.3.3 สนามพลังงานศักย์เสมือนสำหรับการจัดเรียงตัวแบบวงกลม
- 4.3.4 การประยุกต์ใช้งานสนามพลังงานศักย์เสมือนในการจำลองเหตุการณ์
- 4.4.6 การเคลื่อนที่พร้อมกับการคงการจัดเรียงตัว
- 4.3.6 การเปรียบเทียบกับวิธีการอ้างอิง

4.3.1 นิยามของปัญหา

ในปัญหาการจัดเรียงตัวแบบวงกลม กลุ่มหุ่นยนต์จะเริ่มจากตำแหน่งแบบสุ่มบนพื้นที่การทำงาน และที่เมื่อเวลาผ่านไป หุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่มารวมตัวกันเป็นวงกลมขนาดคงที่เพียงวงเดียว ที่หุ่นยนต์ทุกตัวอยู่ภายในวงกลมนั้น โดยหุ่นยนต์จะกระจายตัวอยู่ภายในวงกลมดังกล่าว ในปัญหานี้ต้องการเพียงแต่ให้หุ่นยนต์มาสร้างกลุ่มรูปวงกลมเท่านั้น ขนาดของวงกลมอยู่นอกเหนือการพิจารณาความสำเร็จของการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

ให้กลุ่มของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ R ในพื้นที่การทำงาน W ประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ N ตัว โดย $R = \{r_1, r_2, ..., r_n\}$ ซึ่งหุ่นยนต์แต่ละตัวจะมีตัวรับรู้ที่มีพื้นที่การรับรู้

ที่เป็นรูปวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางที่หุ่นยนต์แต่และตัวและมีรัศมีเท่ากับ R_{sense} ปัญหาของการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์คือการที่หุ่นยนต์มารวมกลุ่มกันโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ (x_cen, y_cen) การจัดเรียงตัวจะเป็นวงกลมก็ต่อเมื่อระยะทางจากจุดศูนย์กลางไปยังหุ่นยนต์ที่อยู่บนขอบของการเรียงตัว มีระยะทางเท่าๆกัน และหุ่นยนต์ที่เหลืออยู่ภายในบริเวณขอบดังกล่าวนี้

4.3.2 แนวคิดเบื้องต้นของการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

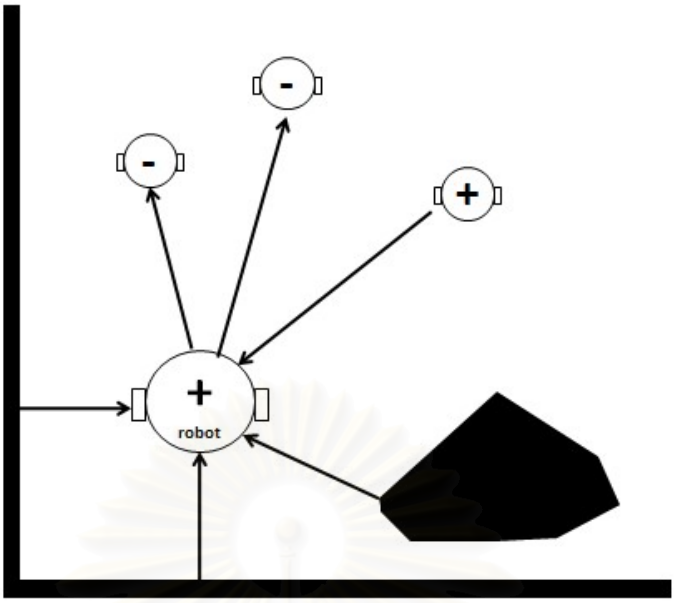
จากที่กล่าวมาแล้วว่าคุณสมบัติความเป็นวงกลมนั้นเป็นคุณสมบัติแบบภาพรวม แต่การทำงานของกลุ่มหุ่นยนต์ที่เราสนใจต้องใช้เพียงข้อมูลท้องถิ่นและเป็นการทำงานแบบกระจาย ไม่ใช่การทำงานแบบรวมศูนย์ แม้ปัญหานี้จะซับซ้อน แต่ในธรรมชาติโครงสร้างคล้ายวงกลมนั้นเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากธรรมชาติของความสมดุของรูปวงกลมหรือทรงกลม จึงทำให้เกิดแนวคิดที่จะประยุกต์ใช้วิธีการที่เลียนแบบธรรมชาติมาใช้ในการสร้างการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

การแก้ปัญหาการจัดเรียงตัวแบบวงกลมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้วิธีการที่ดัดแปลงมาจากวิธีการสนามพลังงานศักย์เสมือน [23] ซึ่งวิธีการสนามพลังงานศักย์เสมือนนี้จะกำหนดให้หุ่นยนต์เป็นเสมือนประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะเป็นไปตามแรงที่กระทำต่อประจุไฟฟ้านั้น การกำหนดพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะกระทำผ่านการปรับค่าคงที่ และรูปแบบสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงดังกล่าว วิธีจัดเรียงตัวแบบวงกลมนี้เกิดขึ้นจากสมมุติฐานที่ว่า หากให้หุ่นยนต์มีการผลักและดูดกันเองภายในกลุ่มหุ่นยนต์โดยให้หุ่นยนต์แต่ละชนิดออกแรงต่างกันตามวิธีของสนามพลังงานศักย์ น่าจะทำให้กลุ่มหุ่นยนต์เข้าสู่รูปร่างสมดุลที่มีความเสถียรเช่นวงกลมได้

วิธีการที่ใช้ในการจัดเรียงตัวแบบวงกลมนี้ จะกำหนดให้หุ่นยนต์แต่ละตัวได้รับผลจากแรงจากสามแหล่งคือ หุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน, หุ่นยนต์ต่างชนิด และสิ่งกีดขวาง หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามขนาดและทิศทางของแรงลัพธที่ได้จากการรวมแรงจากสามแหล่งนี้ แรงจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกันนั้นจะเป็นแรงผลัก เพื่อให้หุ่นยนต์ชนิดเดียวกันไม่เข้าใกล้กัน และแรงผลักนี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อหุ่นยนต์เข้าใกล้กัน เพื่อไม่ให้หุ่นยนต์ชนิดเดียวกันอยู่ใกล้กันมากขึ้น ส่วนแรงจากหุ่นยนต์ต่างชนิดจะเป็นแรงดูดเพื่อรวบรวมกลุ่มหุ่นยนต์ไว้ด้วยกัน ในส่วนสุดท้ายคือแรงจากสิ่งกีดขวางซึ่งเป็นแรงผลักเพื่อป้องกันไม่ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ชนกับสิ่งกีดขวาง แนวคิดของแรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์ตัวหนึ่งๆเป็นไปตามรูปที่ 4.7

4.3.3 สนามพลังงานศักย์เสมือนสำหรับการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

จากแนวคิดเบื้องต้นของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตัวใดๆ จะเกิดจากผลของแรงลัพธ์ของแรงผลักจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน ,แรงดูดจากหุ่นยนต์ต่างชนิด และแรงผลักจากสิ่งกีดขวาง นั่นหมายความว่าเราสามารถสร้างสนามพลังงานศักย์ลัพธ์ที่เกิดจากสนามพลังงานศักย์ย่อยสามสนามเพื่อให้เกิดแรงทั้งสามชนิดดังกล่าวกระทำต่อหุ่นยนต์ โดยที่



รูปที่ 4.7: แนวคิดเบื้องต้นของวิธีการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

หุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่มหุ่นยนต์ R จะได้รับผลจากแรง F ซึ่งเป็นเกรเดียนต์ลบของ สนามพลังงานศักย์ U

$$F = -\nabla U$$

ในสนามพลังงานศักย์เสมือนที่ใช้สำหรับการจัดเรียงตัวแบบวงกลมของกลุ่มหุ่นยนต์จะประกอบด้วยสนามพลังงานศักย์ดูดจากหุ่นยนต์ตัวอื่น สนามพลังงานศักย์ผลักจากหุ่นยนต์ตัวอื่น และสนามพลังงานศักย์ผลักจากสิ่งกีดขวาง

$$U = U_{att} + U_{rep} + U_{obstacle}$$

โดย U_{att} แทนสนามพลังงานศักย์ดูดจากหุ่นยนต์ต่างชนิด U_{rep} แทนสนามพลังงานศักย์ผลักจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน $U_{obstacle}$ แทนสนามพลังงานศักย์ผลักจากสิ่งกีดขวาง จะได้แรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์ตัวหนึ่งๆเป็น

$$F = F_{att} + F_{rep} + F_{obstacle}$$

โดย F_{att} แทนแรงดูดจากหุ่นยนต์ต่างชนิด F_{rep} แทนแรงผลักจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน $F_{obstacle}$ แทนแรงผลักจากสิ่งกีดขวาง

สนามพลังงานศักย์แต่ละสนามจะอธิบายอยู่ในหัวข้อต่างๆ ดังนี้

- 4.3.3.1 สนามพลังงานศักย์ผลักจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน

- 4.3.3.2 สนามพลังงานศักย์ดูดจากหุ่นยนต์ต่างชนิด
- 4.3.3.3 สนามพลังงานศักย์ผลักจากสิ่งกีดขวาง

4.3.3.1 สนามพลังงานศักย์ผลักจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน

ในการจัดเรียงตัวแบบวงกลมของกลุ่มหุ่นยนต์นี้ นิยามสนามพลังงานศักย์ผลักจากหุ่นยนต์ตัวอื่นใน W ที่กระทำต่อหุ่นยนต์ตัวที่ i ให้เป็นสนามพลังงานศักย์ที่เป็นผลจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกันที่อยู่ภายในระยะการรับรู้ R_{sense} ดังนี้

$$Urep = \begin{cases} k_{rep} \sum_{\substack{r \in Rs(i) \\ r \neq r_i}} \frac{1}{|r - r_i|} & \text{if } |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| \leq R_{sense} \\ 0 & \text{if } |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| > R_{sense} \end{cases}$$

ซึ่ง

$$Rs(i) = \{r \in R | type(i) = type(r)\}$$

จากสนามพลังงานศักย์ผลักจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน จะได้ว่าแรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์ที่เราสนใจอันเกิดมาจากสนามพลังงานศักย์ผลัก F_{rep} ที่กระทำต่อหุ่นยนต์ตัวที่ i เป็นดังนี้

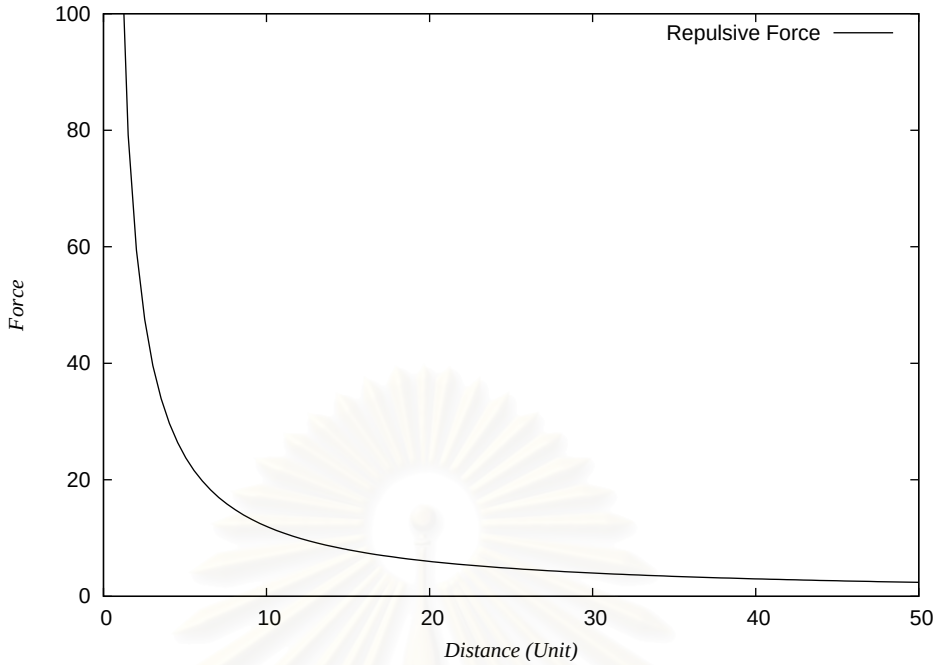
$$F_{rep}(i) = \begin{cases} -k_{rep} \sum_{\substack{r \in Rs(i) \\ r \neq r_i}} \frac{1}{|r - r_i|^2} \cdot \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r_i}}{|r - r_i|} & \text{if } |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| \leq R_{sense} \\ 0 & \text{if } |\mathbf{r} - \mathbf{r}_i| > R_{sense} \end{cases}$$

โดย $\mathbf{r} - \mathbf{r_i}$ คือเวคเตอร์ที่มีจุดเริ่มต้นที่ตำแหน่งของ r และสิ้นสุดที่ r_i

จากพฤติกรรมของแรง F_{rep} ที่แสดงในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าแรงนี้จะมีขนาดมากขึ้นเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าใกล้กันเพื่อพยายามป้องกันไม่ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าใกล้กันและจะมีขนาดที่ลดลงเมื่อหุ่นยนต์ห่างกันมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดคือแรงจะกระทำต่อหุ่นยนต์ที่อยู่ในระยะตัวรับรู้ของหุ่นยนต์เท่านั้น

4.3.3.2 สนามพลังงานศักย์ดูดจากหุ่นยนต์ต่างชนิด

สนามพลังงานศักย์ดูดจากหุ่นยนต์ต่างชนิดในพื้นที่การทำงาน W ที่กระทำต่อหุ่นยนต์ตัวที่ i นิยามดังนี้



รูปที่ 4.8: ลักษณะของแรงผลักที่กระทำต่อหุ่นยนต์

$$Uatt = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{att}\sum_{\substack{r\in Rd(i)\\ r\neq r_i}}|r-r_i|^2 & \text{if } |\mathbf{r}-\mathbf{r}_i| \leq R_{sense} \\ 0 & \text{if } |\mathbf{r}-\mathbf{r}_i| > R_{sense} \end{cases}$$

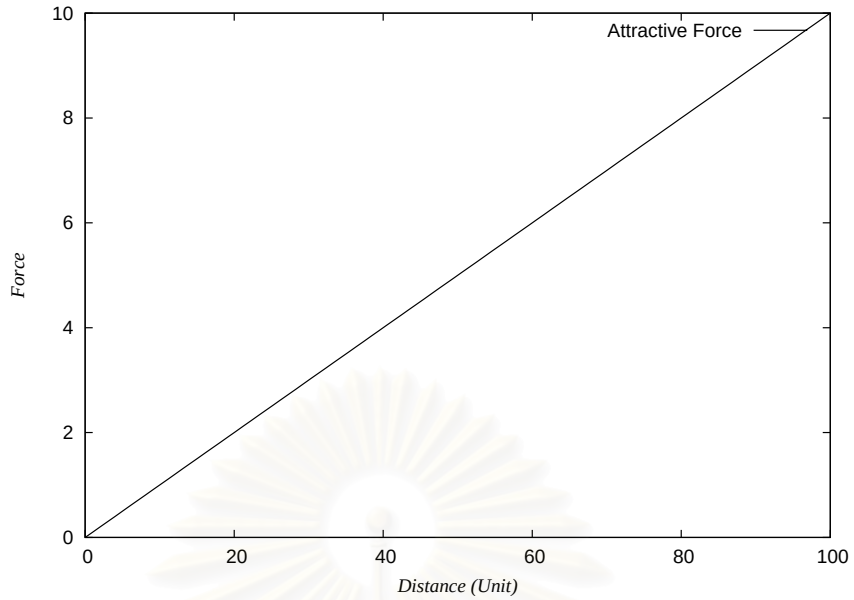
ซึ่ง

$$Rd(i) = \{r \in R | type(i) \neq type(r)\}$$

จะได้ว่า F_{att} ที่กระทำต่อหุ่นยนต์ตัวที่ i เป็นดังนี้

$$F_{att}(i) = \begin{cases} k_{att}\sum_{\substack{r\in Rd(i)\\ r\neq r_i}}|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i| & \text{if } |\mathbf{r}-\mathbf{r}_i| \leq R_{sense} \\ 0 & \text{if } |\mathbf{r}-\mathbf{r}_i| > R_{sense} \end{cases}$$

จะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงดูดที่กระทำต่อหุ่นยนต์จะเป็นไปในลักษณะที่ว่าถ้าหุ่นยนต์อยู่ไกลจะได้รับแรงดึงดูดมากกว่าหุ่นยนต์ที่อยู่ใกล้กัน ถ้ามองในแง่ของหุ่นยนต์จริงจะเห็นได้ว่าเมื่อหุ่นยนต์ยังอยู่ไกลกันสามารถวิ่งมาด้วยความเร็วได้ และเมื่อเข้าใกล้ก็ควรจะชลอความเร็วลงเพื่อไม่ให้เลยเป้าหมาย แรงดูดที่กระทำต่อหุ่นยนต์มีลักษณะเป็นเชิงเส้นเมื่อเทียบกับระยะทาง



รูปที่ 4.9: ลักษณะของแรงดูดที่กระทำต่อหุ่นยนต์

4.3.3.3 สนามพลังงานศักย์ผลักจากสิ่งกีดขวาง

สนามพลังงานศักย์ผลักจากสิ่งกีดขวางใน W ที่กระทำต่อหุ่นยนต์ตัวที่ i นิยามดังนี้

$$U_{obstacle}(i) = \begin{cases} k_{obstacle} \sum_{o \in O(i)} \frac{1}{|o - r_i|} & \text{if } |o - r_i| \leq R_{sense} \\ 0 & \text{if } |o - r_i| > R_{sense} \end{cases}$$

ซึ่ง

$$O(i) = \{o = \{x, y\} \in \eta | |o - r_i| \leq |p - r_i|; \forall p \in \eta, \forall \eta \in Obstacles\}$$

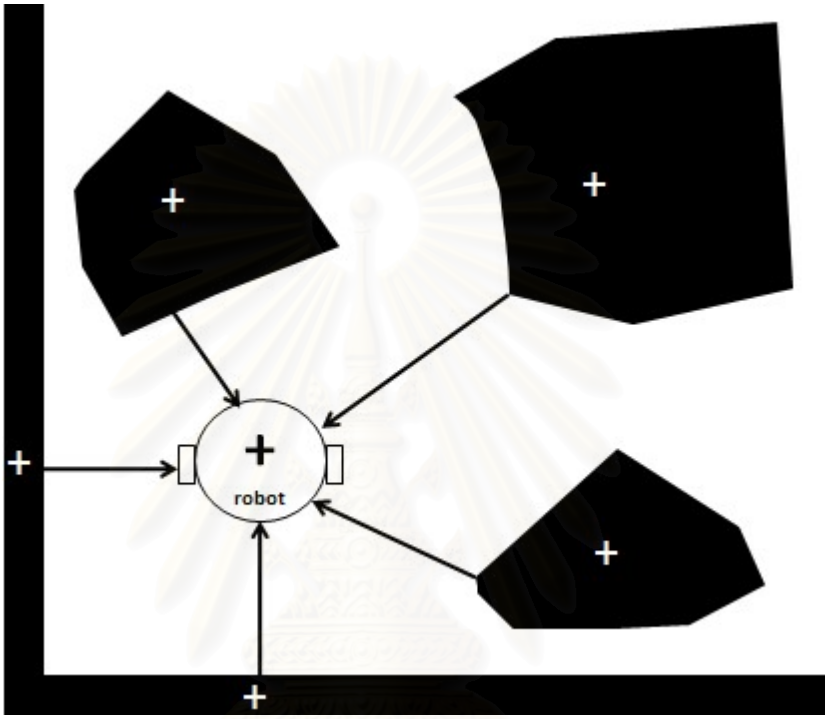
โดย $Obstacles$ คือเซทของสิ่งกีดขวางที่เป็นรูปหลายเหลี่ยมทั้งหมดใน W สิ่งกีดขวางในที่นี้รวมถึงขอบเขตของ W ด้วย

จะได้ว่า $F_{obstacle}$ ที่กระทำต่อหุ่นยนต์ตัวที่ i เป็นดังนี้

$$F_{obstacle}(i) = \begin{cases} -k_{obstacle} \sum_{o \in O(i)} \frac{1}{|o - r_i|^2} \cdot \frac{\mathbf{o} - \mathbf{r_i}}{|o - r_i|} & \text{if } |o - r_i| \leq R_{sense} \\ 0 & \text{if } |o - r_i| > R_{sense} \end{cases}$$

โดย $\mathbf{o} - \mathbf{r_i}$ คือเวคเตอร์ที่มีจุดเริ่มต้นที่ตำแหน่งของ o และสิ้นสุดที่ r_i

จะเห็นได้ว่าลักษณะของแรงผลักจากสิ่งกีดขวางจะคล้ายกับการที่มีหุ่นยนต์ชนิดเดียวกันอยู่ ณ. จุดที่ใกล้หุ่นยนต์มากที่สุดของสิ่งกีดขวางนั้นๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์ในวิธีนี้จึงมีลักษณะที่จะมีค่ามากขึ้นเมื่อหุ่นยนต์เข้าใกล้สิ่งกีดขวางและมีค่าน้อยลงเมื่อหุ่นยนต์ห่างสิ่งกีดขวางออกไป จะเห็นได้ว่าการออกแบบแรงที่มีลักษณะเช่นนี้มีผลดีต่อหุ่นยนต์ คือเมื่อหุ่นยนต์เข้าใกล้สิ่งกีดขวางมาก แรงที่เกิดจากสิ่งกีดขวางนั้นจะมีมากจนสามารถทำให้หุ่นยนต์ไม่เคลื่อนที่มาชนสิ่งกีดขวาง ซึ่งเป็นการป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นได้อีกทางหนึ่ง



รูปที่ 4.10: แรงกระทำต่อหุ่นยนต์ที่เกิดจากสิ่งกีดขวาง

จากแรงทั้งสามที่กล่าวไปข้างต้นหุ่นยนต์แต่ละตัวจะเคลื่อนที่ตามแรงลักพธ์ที่เกิดจากผลรวมของแรงทั้งสามนี้ ซึ่งคือ

$$F = F_{att} + F_{rep} + F_{obstacle}$$

ซึ่งจะได้ว่า หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามทิศทางของแรงลัพธ์นี้ด้วยความเร็วไม่เกินความเร็วสูงสุดที่กำหนดไว้ V_{limit}

$$V = \begin{cases} F & \text{if } |F| \leq V_{limit} \\ \frac{V_{limit} * F}{|F|} & \text{if } |F| > V_{limit} \end{cases}$$

ขั้นตอนวิธีที่ได้เสนอสามารถนำไปใช้ได้ทั้งกับหุ่นยนต์ในสองมิติและสามมิติ โดยการทำงานในสามมิติสามารถใช้การอ้างอิงตำแหน่งในพิกัดสามมิติมาใช้ในการคำนวณได้เลย โดยที่ไม่จำเป็นต้องปรับเปลี่ยนขั้นตอนวิธีแต่อย่างใด

4.3.4 การประยุกต์ใช้งานสนามพลังงานศักย์เสมือนในการจำลองเหตุการณ์

เพื่อให้ได้ขั้นตอนวิธีที่ไม่ซับซ้อนและเหมาะสมกับการนำไปใช้ในหุ่นยนต์ขนาดเล็กที่ทรัพยากรมีจำกัด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ประยุกต์วิธีการที่ได้กล่าวใน 4.3.3 เพื่อให้เหมาะกับการจำลองเหตุการณ์โดยมีรายละเอียดดังขั้นตอนวิธีที่ 2

Algorithm 2 CircularFormation

1: $v = 0$
2: for each robot i being sensed
3: if the type of robot i is different from *my type*
4: then $v = v + K_a * \mathbf{r_i}$
5: else $v = v - K_r \frac{\mathbf{r_i}}{|r_i|^2})$
6: $\}$
7: if $|v| > V_{limit}$
8: $v = V_{limit} * \frac{v}{|v|}$
9: if $|v| < V_{min}$
10: then $v = 0$
11: execute velocity command v

ในขั้นตอนวิธีที่ 2 แสดงขั้นตอนวิธีควบคุมหุ่นยนต์ที่จะบรรจุอยู่ในหุ่นยนต์แต่ละตัวในกลุ่มหุ่นยนต์ โดยขั้นตอนวิธีนี้จะเหมือนกันหมดในหุ่นยนต์แต่ละตัว พฤติกรรมที่หุ่นยนต์จัดเรียงตัวกันเป็นวงกลมจึงเรียกได้ว่าเป็นพฤติกรรมกลุ่ม (Collective behavior)เพราะเกิดจากพฤติกกรรมง่ายๆของหน่วยย่อย รวมกันมาเป็นพฤติกรรมของกลุ่ม หุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่มจะคำนวณความเร็วของตนเองและเคลื่อนที่ไปตามนั้น ในที่นี้จะเห็นว่าในขั้นตอนวิธีที่เสนอนั้น ได้ให้ค่าแรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์แปลงไปเป็นความเร็ว แทนที่จะเป็นความเร่ง เนื่องจากเราให้หุ่นยนต์มีความเร่งเพียงพอที่จะเปลี่ยนความเร็วเท่าใดก็ได้ในทันที และมีมวลน้อยพอที่จะสามารถละเลยได้

หุ่นยนต์จะทำการคำนวณข้อมูลจากหุ่นยนต์ตัวอื่นๆทุกตัวที่อยู่ในรัศมีการรับรู้ โดยขั้นตอนหลักอยู่ในบรรทัดที่ 3 และ 4 คือเสมือนว่าหุ่นยนต์ได้รับแรงดูดถ้าหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่กำลังพิจารณามีชนิดเดียวกับตัวมันเอง และเสมือนว่าได้รับแรงดูดถ้าหุ่นยนต์เพื่อนบ้านมีชนิดต่างจากตัวมันเอง ส่วนในบรรทัดที่ 7 - 9 เป็นการจำกัดความเร็วไม่ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็วสูงสุด

4.3.5 การเคลื่อนที่พร้อมกับการคงการจัดเรียงตัว

วิธีนี้นอกจากจะสามารถใช้เพื่อการจัดเรียงตัวแบบวงกลมแบบอยู่นิ่งแล้วยังสามารถนำกลุ่มหุ่นยนต์รูปวงกลมนี้เดินทางได้โดยสามารถคงรูปร่างวงกลมไว้ได้ รวมทั้งในกรณีที่ต้องเคลื่อนที่ผ่านกลุ่มของสิ่งกีดขวาง กลุ่มหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนผ่านกลุ่มของสิ่งกีดขวางโดยเปลี่ยนรูปร่างไป และเมื่อผ่านสิ่งกีดขวางออกมาแล้วหุ่นยนต์จะกลับเป็นรูปร่างเดิม

วิธีนี้กล่าวโดยย่อคือให้หุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งไม่ได้ทำตามแรงที่กระทำต่อตัวมัน แต่กลับเคลื่อนที่ในทางที่ต้องการซึ่งคือทิศทางที่ต้องการให้ทั้งกลุ่มหุ่นยนต์เคลื่อนไป หุ่นยนต์ที่ไม่เปลี่ยนแปลง

ตามแรงที่กระทำต่อตัวมันและมีการเคลื่อนที่ที่แน่นอนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของกลุ่มหุ่นยนต์ ทำให้การควบคุมหุ่นยนต์เพียงตัวเดียวสามารถมีผลต่อการทำงานของหุ่นยนต์ทั้งกลุ่มได้ ดังแสดงในขั้นตอนวิธีที่ 3

Algorithm 3 MovingCircularFormation

1: $\{r_i$ is distance between robot and $robot_i\}$
2: $\{r_o$ is distance between robot and $obstacle_o\}$
3: $v = 0$
4: for each robot i being sensed
5: if the type of robot i is different from *my type*
6: then $v = v + K_a * r_i$
7: else $v = v - K_r \frac{\mathbf{r_i}}{|r_i|^2})$
8: $\}$
9: for each obstacle o being sensed
10: $v = v + K_a * r_o$
11: $\}$
12: if $|v| > V_{limit}$
13: $v = V_{limit} * \frac{v}{|v|}$
14: if $|v| < V_{min}$
15: then $v = 0$
16: if not guidingRobot
17: then execute velocity command v
18: else $v = V_{desired}$

4.3.6 การเปรียบเทียบกับวิธีการอ้างอิง

วิธีการจัดเรียงตัวที่ได้เสนอไปนั้นมีความแตกต่างกับวิธีการอ้างอิงของ Sugihara และ Suzuki ในหลายส่วน ซึ่งข้อเปรียบเทียบระหว่างวิธีการที่เสนอกับวิธีการอ้างอิงสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1: ตารางผลการทดลองการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

ข้อเปรียบเทียบ	วิธีการที่พัฒนาขึ้น	วิธีการของ Sugihara และ Suzuki
รูปแบบการทำงาน	แบบกระจาย	แบบกระจาย
ระยะการรับรู้ของหุ่นยนต์	จำกัด	ไม่จำกัด
ความสามารถในการแยกแยะชนิดของหุ่นยนต์	ต้องการ	ไม่ต้องการ
การกำหนดขนาดของวงกลม	ผ่านค่า K_{att} และ K_{rep}	โดยตรง

วิธีการที่เสนอนั้นไม่จำเป็นต้องใช้การมองเห็นหุ่นยนต์ทั้งหมดในพื้นที่การทำงาน ซึ่งทำให้การประยุกต์ใช้งานจริงนั้นเป็นไปได้ ต่างกับวิธีอ้างอิงที่ต้องการข้อมูลของหุ่นยนต์ทุกตัวในพื้นที่การทำงาน อย่างไรก็ตามวิธีการที่เสนอต้องการความสามารถในการแยกแยะประเภทของหุ่นยนต์ ซึ่งในการทำงานจริงแล้วอาจจะเป็นการแยกแยะสีของหุ่นยนต์ ซึ่งต่างกับวิธีการอ้างอิงที่หุ่นยนต์ทุกตัวมีลักษณะเหมือนกันที่ไม่ต้องการส่วนการแยกแยะดังกล่าว ส่วนการกำหนดขนาดของวงกลมนั้น เนื่องจากวิธีการอ้างอิงมีการพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางไปด้วยในขณะทำงานการควบคุม ขนาดของวงกลมจึงปรับได้จากค่าของเส้นผ่านศูนย์กลางที่ใช้ในการคำนวณได้โดยตรง ส่วนวิธีที่พัฒนาขึ้นนั้นเป็นพฤติกรรมกลุ่ม (collective behavior) การควบคุมเส้นผ่านศูนย์กลางสามารถทำได้

โดยทางอ้อ คือ การเปลี่ยนค่าตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของหุ่นยนต์แต่ละตัว ซึ่งในที่นี้คือ K_{att} และ K_{rep} การเพิ่มหรือลดค่าคงที่ทั้งสองตัวนี้จะส่งผลต่อขนาดของวงกลมดังจะกล่าวถึงต่อไปในบทที่ 5.1.3

4.4 การจัดกลุ่มหุ่นยนต์

ปัญหาการจัดกลุ่มหุ่นยนต์คือ การจัดให้หุ่นยนต์มารวมกันเป็นกลุ่มย่อยซึ่งแต่ละกลุ่มมีหุ่นยนต์ครบทุกชนิดตามที่กำหนดไว้ เช่นกลุ่มหุ่นยนต์สำรวจ อาจจะประกอบด้วยหุ่นยนต์เก็บตัวอย่าง ,หุ่นยนต์สื่อสารทางไกล และหุ่นยนต์ถ่ายภาพรอบทิศทางเป็นต้น และหลังจากที่กลุ่มหุ่นยนต์มีสมาชิกครบแล้ว ให้กลุ่มหุ่นยนต์นั้นกระจายตัวเพื่อครอบคลุมพื้นที่การทำงาน ในปัญหาการจัดกลุ่มหุ่นยนต์นี้ งานส่วนสำคัญส่วนหนึ่งคือการจัดให้กลุ่มหุ่นยนต์มีสมาชิกครบจำนวนที่กำหนดไว้ เนื่องจากในสภาพการทำงานอาจจะไม่มีหุ่นยนต์ครบทุกชนิดอยู่ในบริเวณที่สามารถรับรู้ได้ของหุ่นยนต์ การที่หุ่นยนต์ตัวนั้นจะมีสมาชิกครบทุกชนิดได้ต้องอาศัยข้อมูลจากหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ เพื่อวางแผนการเคลื่อนที่มายังตำแหน่งที่เหมาะสม ปัญหานี้ใกล้เคียงกับปัญหาการจัดสรรงานของกลุ่มหุ่นยนต์ เนื่องจากต้องจัดสรรตำแหน่งที่เหมาะสมให้กับหุ่นยนต์ที่เหมาะสมในแง่ของระยะทางการเดินทาง

การจัดกลุ่มหุ่นยนต์นี้อาจนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายอาทิเช่น ในการตรวจสอบสภาพอากาศในบริเวณที่เกิดสารเคมีรั่วไหล การส่งหุ่นยนต์ที่มีตัวรับรู้ก๊าซทุกชนิดเข้าไปอาจไม่ใช่วิธีการที่เป็นไปได้ การส่งหุ่นยนต์ซึ่งมีตัวรับรู้ก๊าซตัวละชนิด และเมื่อเข้าถึงพื้นที่ทำงานจะทำการรวมตัวกันเพื่อให้ได้ค่าของก๊าซทุกชนิดที่จุดเดียวกัน หรือในกรณีของการใช้ในงานกู้ภัยอาจจะจำเป็นต้องมีหุ่นยนต์หลายชนิดทำงานร่วมกัน เช่นหุ่นยนต์ที่ทำหน้าที่สำรวจและค้นหาผู้รอดชีวิต หุ่นยนต์ที่ทำหน้าที่รื้อถอนซากอาคาร และหุ่นยนต์ที่ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับผู้ควบคุม ซึ่งการแยกหน้าที่เหล่านี้จะเพิ่มโอกาสการอยู่รอดให้กับหุ่นยนต์

เนื้อหาในบทของการจัดกลุ่มหุ่นยนต์แบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังนี้

- 4.4.1 นิยามของปัญหา
- 4.4.2 แนวคิดเบื้องต้นของการจัดกลุ่มหุ่นยนต์
- 4.4.3 การกระจายตัวและการจับกลุ่ม
- 4.4.4 การกระจายกลุ่ม
- 4.4.5 การประมูลแบบกระจาย
- 4.4.6 การเดินทางมารวมกลุ่ม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.1 นิยามของปัญหา

ปัญหาของการจัดกลุ่มหุ่นยนต์เริ่มจาก มีกลุ่มของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้กระจายแบบสุ่มอยู่ในในพื้นที่การทำงาน โดยกลุ่มของหุ่นยนต์ ประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ n ตัวคือ $\{r_1, r_2, ..., r_n\}$ กลุ่มหุ่นยนต์เหล่านี้ทุกตัวจะมีชนิดกำกับ ชนิดของหุ่นยนต์จะมีทั้งหมด m ชนิด

การจัดกลุ่มหุ่นยนต์คือการจัดให้หุ่นยนต์ทั้งหมดให้เป็นกลุ่มย่อยๆ โดยแต่ละกลุ่มย่อยมีสมาชิกครบทั้ง m ชนิดและมีสมาชิกชนิดละหนึ่งตัวเท่านั้น กลุ่มที่มีสมาชิกครบแล้วนั้นต้องกระจายตัวให้ทั่วพื้นที่การทำงาน โดยพยายามให้มีพื้นที่ครอบครองของกลุ่มหุ่นยนต์แต่ละกลุ่มใกล้เคียงกันที่สุด

4.4.2 แนวคิดเบื้องต้นของวิธีการจัดกลุ่มหุ่นยนต์

ปัญหาการจัดกลุ่มหุ่นยนต์ประกอบด้วยการทำงานสองอย่างไปด้วยกันคือ การจัดหุ่นยนต์ให้ครบกลุ่ม และการกระจายกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบแล้ว เมื่อพิจารณาในการทำงานจริงแล้วการจัดหุ่นยนต์ให้ครบกลุ่มนั้นจะเกิดขึ้นเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกที่หุ่นยนต์สามารถมองเห็นกันเองและมารวมตัวกันจนเป็นกลุ่มที่สมบูรณ์ และช่วงที่สองคือเมื่อหุ่นยนต์ไม่สามารถมองเห็นหุ่นยนต์ครบชนิดได้ภายในระยะการรับรู้ แต่อาศัยกลไลการนำทางเพื่อนำทางมาสร้างกลุ่มที่สมบูรณ์ ส่วนการกระจายตัวของกลุ่มห่นยนต์ที่มีสมาชิกครบจะเกิดขึ้นตลอดเวลา และจะมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อมีกลุ่มที่มีสมาชิกครบเกิดขึ้นใหม่

ดังนั้นเราจะสามารถแบ่งการทำงานของการจัดกลุ่มหุ่นยนต์ออกตามหน้าที่การทำงานได้ดังนี้ ในช่วงแรกหุ่นยนต์จะพยายามจัดกลุ่มให้เกิดกลุ่มที่มีสมาชิกครบโดยอาศัยข้อมูลจากตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ การทำงานส่วนนี้อธิบายไว้ใน **กระจายตัวและจับกลุ่ม** เมื่อมีกลุ่มที่มีสมาชิกครบแล้วเกิดขึ้น กลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบนั้นต้องกระจายตัวให้ครอบคลุมพื้นที่การทำงาน การทำงานในส่วนนี้อธิบายไว้ใน**กระจายกลุ่ม** และเมื่อเวลาผ่านไปโอกาสที่หุ่นยนต์จะสามารถสร้างกลุ่มที่มีสมาชิกครบได้ด้วยการรับรู้ของตัวเองจะน้อยลง จึงต้องมีการนำทางให้หุ่นยนต์มาพบกันที่จุดนัดพบ การเลือกจุดนัดพบนี้อาศัย **การประมูลแบบกระจาย**ระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบ หลังจากที่ได้ผู้ชนะการประมูลแล้วจะต้องเดินทางมายังจุดนัดพบ ซึ่งการทำงานส่วนนี้อธิบายไว้ใน **เดินทางมารวมกลุ่ม**

แนวคิดเบื้องต้นของการจัดกลุ่มหุ่นยนต์เป็นดังแสดงในรูปที่ 4.11

1. **กระจายตัวและจับกลุ่ม** หุ่นยนต์ทุกตัวจะพยายามกระจายตัวให้ทั่วพื้นที่การทำงาน โดยจะเป็นการกระจายที่เทียบกับหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน และเมื่อหุ่นยนต์มาอยู่รวมกันภายในระยะ $R_{grouping}$ แล้วหุ่นยนต์จะทำการเคลื่อนที่เข้าหากัน เพื่อรวมตัวกันเป็นกลุ่มที่มีสมาชิกครบ

รูปที่ 4.11: แนวคิดเบื้องต้นของการจัดกลุ่มหุ่นยนต์

2. **กระจายกลุ่ม** กลุ่มที่มีสมาชิกครบแล้วจะทำการกระจายตัวโดยเทียบกับกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบด้วยกัน
3. **การประมูลแบบกระจาย** เมื่อเวลาผ่านไป หุ่นยนต์ที่ไม่มีกลุ่มจะแสดงตัวว่าขอการนำทางจากกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบแล้ว เพื่อให้การเดินทางของหุ่นยนต์ไปรวมตัวนั้นสั้นที่สุด กลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบ จะทำการประมูลเพื่อขอเป็นจุดนัดพบของหุ่นยนต์ที่แสดงตัวขอการนำทาง
4. **เดินทางมารวมกลุ่ม** หุ่นยนต์ที่ได้รับคำสั่งจากกลุ่มหุ่นยนต์ที่ชนะการประมูลจะเดินทางมาตามตำแหน่งอ้างอิงที่ได้รับ

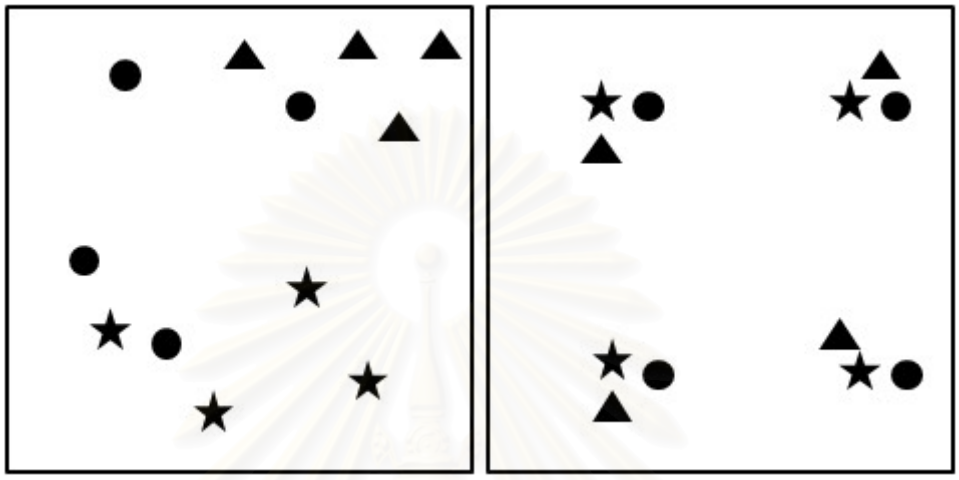
แม้รูปที่ 4.11 คำอธิบายข้างต้นจะแสดงเป็นการทำงานแบบลำดับเพื่อความสะดวกในการอ้างอิง แต่การทำงานจริงแล้วกลุ่มหุ่นยนต์มีการทำงานแบบขนานและไม่อาศัยการจัดการจากศูนย์กลาง (Asynchronous) ดังจะอธิบายในหัวข้อต่อๆ ไป

4.4.3 การกระจายตัวและจับกลุ่ม

การกระจายตัวและจับกลุ่มนั้นมีเป้าหมายเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถรวมตัวเป็นกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบได้มากที่สุดโดยไม่ต้องใช้การสื่อสาร กระบวนการนี้มีขั้นตอนสำคัญอยู่สองขั้นตอน คือ การกระจายตัวเพื่อเพิ่มโอกาสสำเร็จในการรวมเป็นกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบ และการจัดกลุ่มซึ่งเกิดเมื่อมีหุ่นยนต์ครบทุกชนิดอยู่ในระยะที่กำหนด

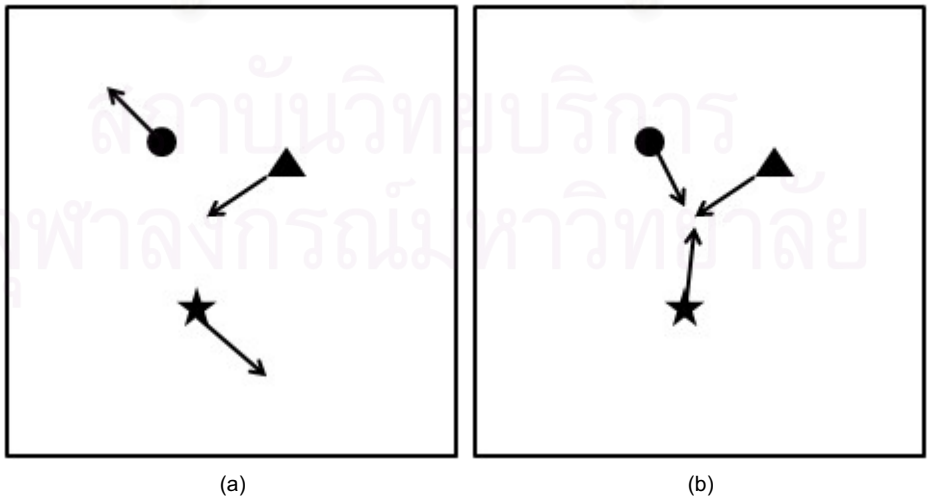
ในช่วงเริ่มต้นของการทำงานของกลุ่มหุ่นยนต์ หุ่นยนต์ทุกตัวจะอยู่ในสถานะภาพยังไม่เป็นสมาชิกของกลุ่มใดคือยังเป็นหุ่นยนต์ที่เป็นอิสระจากกลุ่มอยู่ และเราจะสมมุติว่าหุ่นยนต์เริ่มต้นจากภาวะเริ่มต้นที่ไม่ทราบมาก่อน หุ่นยนต์อาจเริ่มต้นทำงานโดยอยู่ใกล้กับสมาชิกตัวอื่นๆอยู่แล้ว หรือหุ่นยนต์อาจจะเริ่มต้นจากสภาพที่หุ่นยนต์แต่ละชนิดถูกแยกจากกันอย่างสิ้นเชิง เนื่องจากเราไม่รู้ข้อมูลสภาพการเริ่มต้นของหุ่นยนต์ จึงต้องมีการทำให้หุ่นยนต์เข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมกับ

การจับกลุ่ม พิจารณารูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าในภาพ (ข) ซึ่งเป็นการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของหุ่นยนต์แต่ละชนิด หุ่นยนต์จะอยู่ในสภาพที่อยู่ใกล้กับหุ่นยนต์ชนิดอื่นๆ ซึ่งคือสภาพที่เหมาะสมต่อการจับกลุ่ม วิธีการนี้จึงตั้งสมมุติฐานไว้ว่า สภาพการที่เหมาะสมสำหรับการจับกลุ่มของหุ่นยนต์คือ สภาพที่หุ่นยนต์แต่ละกลุ่มมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอในพื้นที่การทำงานเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน รายละเอียดเกี่ยวกับการกระจายตัวนี้อธิบายใน 4.4.3.1



รูปที่ 4.12: ตัวอย่างการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) การกระจายแบบสุ่ม(ข) การกระจายที่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน

ระหว่างการกระจายตัวนั้นหุ่นยนต์แต่ละตัวย่อมมีการเคลื่อนที่ ซึ่งขณะเคลื่อนที่นั้นมีโอกาสที่หุ่นยนต์จะพบกับหุ่นยนต์ชนิดอื่นๆ และ ณ ขณะใดๆอาจจะมีหุ่นยนต์ที่อยู่ใน R_{sense} ครบ m ชนิด เมื่อมีเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นหุ่นยนต์ควรจะจับตัวกันเป็นกลุ่มเพื่อให้เกิดกลุ่มที่ครบชนิดได้เร็วขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องเริ่มการจับตัวจากกการกระจายที่เสร็จสิ้นเสมอไป ดังแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13: การจับตัวของหุ่นยนต์ (ก) ก่อนการจับตัวหุ่นยนต์กำลังเดินทางอย่างเป็นอิสระต่อกัน(ข) หุ่นยนต์เคลื่อนที่มารวมตัวกัน

การรวมตัวนั้นทำได้โดยให้หุ่นยนต์ที่พบหุ่นยนต์ร่วมกลุ่มครบทุกชนิดส่งสัญญาณไปยังหุ่นยนต์ที่มันตรวจพบเพื่อกำหนดหมายเลขกลุ่มให้กับหุ่นยนต์เหล่านั้น เมื่อหุ่นยนต์กลุ่มเดียวกันพบกันจะทำการเคลื่อนที่เข้าหากัน รายละเอียดเกี่ยวกับการรวมกลุ่มนี้อธิบายใน 4.4.3.2

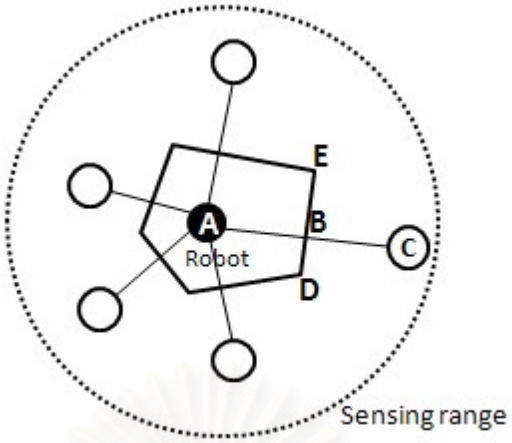
หากพิจารณาโดยละเอียดจะพบว่า การที่หุ่นยนต์ตรวจพบหุ่นยนต์ร่วมกลุ่มครบทุกชนิดและส่งสัญญาณไปยังหุ่นยนต์เหล่านั้นเพื่อกำหนดหมายเลขนั้น ไม่สามารถทำได้ดดยตรงเนื่องจากข้อจำกัดด้านการรับรู้ของหุ่นยนต์ หุ่นยนต์จะรับรู้เพียงว่ามีหุ่นยนต์ตัวใด ชนิดใด อยู่ห่างจากตัวมันเองเป็นระยะทางและมุมเท่าใด หุ่นยนต์จะไม่สามารถว่าหุ่นยนต์ที่ตัวมันเองสามารถรับรูได้นั้นเป็นหุ่นยนต์หมายเลขใด เราจึงไม่สามารถสร้างการสื่อสารแบบหนึ่งต่อหนึ่งระหว่างหุ่นยนต์คู่หนึ่งๆได้เพื่อส่งข้อมูลแบบเฉพาะเจาะจง เช่นหมายเลขกลุ่มเป็นต้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอแนวคิดที่จะแก้ไขปัญหาการติดต่อสื่อสารดังกล่าวนี้ ด้วยวิธีที่เรียกว่า การอ้างอิงแบบย้อนกลับ ดังแสดงรายละเอียดยไว้ใน ก วิธีการนี้จะอาศัยว่าหุ่นยนต์มีพิกัดอ้างอิงทิศทางเดียวกัน หุ่นยนต์จะส่งข้อมูลพร้อมตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ตนเองต้องการจะติดต่อด้วย หากหุ่นยนต์ที่ได้รับข้อมูลนั้นพบว่า ผู้ส่งอยู่ในทิศทางที่สัมพันธ์กับข้อมูลที่ส่งมาก็จะถือว่าผู้ส่งต้องการจะสื่อสารกับตน

4.4.3.1 การกระจายตัว

จากคุณสมบัติของแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลที่จะทำให้พื้นที่ของบริเวณโวโรนอยแต่ละบริเวณมีขนาดเท่าๆกัน ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 2.3.3.1 ซึ่งเข้ากับลักษณะการกระจายของหุ่นยนต์โดยที่ต้องการให้หุ่นยนต์แต่ละชนิดมีพื้นที่ที่ครอบครองใกล้เคียงกันจึงเหมาะสมที่จะนำเอาแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลมาใช้ในการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ ข้อแตกต่างของการใช้แผนภาพโวโรนอยในการคำนวณทั่วไปกับการใช้ในหุ่นยนต์มีข้อแตกต่างที่สำคัญคือหุ่นยนต์ไม่มีข้อมูลของหุ่นยนต์ตัวอื่นๆทั้งหมดในพื้นที่ทำงาน ประกอบกับในวิทยานิพนธ์นี้เสนอการทำงานของหุ่นยนต์แบบกระจายจึงทำให้วิธีการทั่วไปที่ใช้ในการหาแผนภาพโวโรนอยนำมาประยุกต์ใช้ไม่ได้

แม้ว่าจะไม่สามารถหาแผนภาพโวโรนอยของหุ่นยนต์ทั้งหมดได้แต่หากพิจารณาเฉพาะหุ่นยนต์ตัวหนึ่งๆจะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์ต้องการเพียงตำแหน่งของศูนย์กลางมวลของบริเวณที่ตัวมันเองอยู่เท่านั้นข้อมูลของบริเวณโวโรนอยอื่นๆไม่มีความจำเป็นสำหรับงานของหุ่นยนต์ตัวนั้นแต่อย่างใด เราจึงสามารถสร้างบริเวณโวโรนอยของหุ่นยนต์นั้นจากข้อมูลท้องถิ่นของหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ของตนเองได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.14

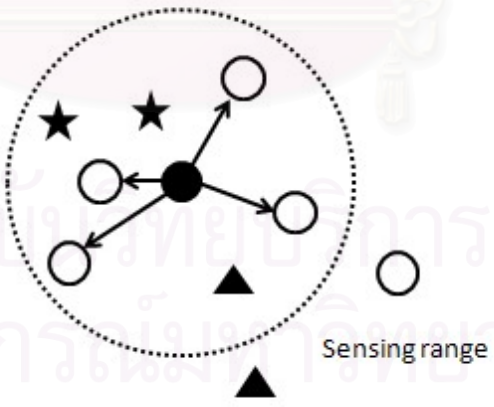
การสร้างบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นทำได้โดย การสร้างเส้นแบ่งครึ่งที่ตั้งฉากเส้นเชื่อมระหว่างหุ่นยนต์ที่สนใจกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านทุกตัว พิจารณาที่จุดตัดของเส้นเหล่านี้ ว่ามีระยะทางจากจุดนี้ไปยังตำแหน่งของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านที่เป็นต้นกำเนิดของเส้นที่ก่อให้เกิดจุดตัด ใกล้กว่าระยะทางไปยังจุดอื่นๆ ถ้าเงื่อนไขนี้เป็นจริง จุดตัดนี้จะเป็นจุดยอดของบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นของหุ่นยนต์ตัวที่เราสนใจ



รูปที่ 4.14: แนวคิดของการสร้างบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่น

การสร้างบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นนี้จะพิจารณาเพื่อนบ้านที่เป็นหุ่นยนต์ชนิดเดียวกันเท่านั้น เนื่องจากเรามีจุดประสงค์ที่จะให้หุ่นยนต์กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน

1. หาตำแหน่งหุ่นยนต์ตัวอื่น หุ่นยนต์จะทำการตรวจสอบโดยรอบว่ามีหุ่นยนต์ชนิดเดียวกับตนเองอยู่ใน R_{sense} ของตัวเอง อยู่ในตำแหน่งใดและระยะเท่าใดบ้างเพื่อนำไปใช้ในขั้นตอนต่อๆไป ดังแสดงในรูปที่ 4.15และตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.15: การหาตำแหน่งหุ่นยนต์ตัวอื่น

2. จัดเรียงตำแหน่งตามมุม ในการสร้างบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นนั้นต้องใช้ข้อมูลของหุ่นยนต์ข้างเคียงที่เรียงกันตามค่าของมุมที่ทำกับหุ่นยนต์ตัวนั้น การเรียงนี้จะเป็นการเรียงตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ได้ขอให้มีทิศทางเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การเรียงทวนเข็มนาฬิกาจะได้ตารางตำแหน่งของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเป็นดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2: ตารางข้อมูลตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ข้างเคียง

x	y	θ
2	2	45°
-3	0	180°
3	0	0°
-2	-2	225°

ตารางที่ 4.3: ตารางข้อมูลตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ข้างเคียงที่ผ่านการเรียงแล้ว

x	y	θ
3	0	0°
2	2	45°
-3	0	180°
-2	-2	225°

3. เลือกหุ่นยนต์ตัวที่ใกล้ที่สุด เพื่อใช้เป็นตัวเริ่มในการหาบริเวณโวโรนอย เพราะหุ่นยนต์ตัวที่อยู่ใกล้ที่สุดย่อมทำให้เกิดขอบของโวโรนอยเสมอ และจัดเรียงตารางให้เริ่มต้นด้วยหุ่นยนต์ตัวที่ระยะห่างน้อยที่สุด ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4: ตารางข้อมูลตำแหน่งเชิงสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ข้างเคียงที่เลือกให้หุ่นยนต์ที่มีระยะห่างน้อยที่สุดเป็นตัวเริ่มต้น

x	y	θ
2	2	45°
-3	0	180°
-2	-2	225°
3	0	0°

4. สร้างและตรวจสอบขอบของบริเวณโวโรนอย ลากเส้นตรงที่ตั้งฉากกับเส้นเชื่อมจากหุ่นยนต์ตัวที่สนใจไปยังหุ่นยนต์ตัวแรก เพื่อเป็นเส้นขอบแรกของบริเวณโวโรนอยนี้และให้เส้นขอบนี้เป็นเส้นขอบที่กำลังทำงาน ลากเส้นตรงที่ตั้งฉากกับเส้นเชื่อมจากหุ่นยนต์ตัวที่สนใจไปยังหุ่นยนต์ตัวถัดไปในตาราง ถ้าจุดที่เส้นตรงนี้ตัดกับเส้นขอบที่กำลังทำงานและระยะจากจุดตัดนี้ใกล้กับหุ่นยนต์ตัวที่สนใจมากกว่าหุ่นยนต์ตัวข้างเคียงทั้งหมด ให้เพิ่มจุดนี้เป็นจุดยอดหนึ่งของบริเวณโวโรนอย และให้เส้นตรงที่สร้างขึ้นมากลายเป็นเส้นขอบที่กำลังทำงานแทนเส้นเดิม แต่ถ้าจุดตัดไม่เป็นไปตามเงื่อนไขนี้ให้ข้ามไปพิจารณาหุ่นยนต์ตัวต่อไปในตาราง และทำอย่างนี้ต่อไปกับหุ่นยนต์ข้างเคียงตัวอื่นๆไปเรื่อยๆ จนหมดตาราง

วิธีการสร้างบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นเป็นไปตามขั้นตอนวิธีที่ 4

จากขั้นตอนวิธีที่ 4 ขั้นตอน scanForSameType คือการหาตำแหน่งของหุ่นยนต์ชนิดเดียวกันที่อยู่ภายในระยะการรับรู้ของหุ่นยนต์ตัวที่เราสนใจ เพื่อจะนำมาเป็นเพื่อนบ้านโวโรนอยเพื่อใช้คำนวณบริเวณโวโรนอยต่อไป ขั้นตอน sortByAngle คือการจัดเรียงเพื่อนบ้านโวโรนอยตามมุมที่เทียบกับหุ่นยนต์ที่เราสนใจ ขั้นตอน normalDivider คือการสร้างเส้นแบ่งครึ่งที่ตั้งฉากกับเส้น

เชื่อมระหว่างหุ่นยนต์ตัวที่สนใจกับเพื่อนบ้านโวโรนอย ขั้นตอนในบรรทัดที่ 6 - 10 คือการคัดเลือกว่าจุดตัดใดมีคุณสมบัติการเป็นจุดยอดของบริเวณโวโรนอย คุณสมบัติที่ว่านั้นก็คือจุดในบริเวณโวโรนอยต้องใกล้กับจุดกำเนิดของบริเวณนั้นมากกว่าเพื่อนบ้านโวโรนอยตัวอื่นดังแสดงในบรรทัดที่ 8

เมื่อได้บริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นสำหรับหุ่นยนต์ที่สนใจจากขั้นตอนที่ 4 จะนำไปใช้ต่อเพื่อคำนวณตำแหน่งสำหรับการกระจายตัวของหุ่นยนต์ เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของบริเวณโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลที่เสนอไปในบทที่ 2.3.3 จะเห็นได้ว่าหากให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปอยู่ณ บริเวณที่เป็นจุดกำเนิดของบริเวณโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลโดยที่ให้เพื่อนบ้านโวโรนอยที่ใช้ในการคำเป็นหุ่นยนต์ที่มีชนิดเดียวกับหุ่นยนต์ที่เราสนใจ จะทำให้หุ่นยนต์มีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอเทียบกับหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน การสร้างแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลสามารถทำได้ตามวิธีการของ Lloyd ดังแสดงใน 2.3.3.2 กล่าวคือ ทำการคำนวณจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอย แล้วเคลื่อนจุดกำเนิดโวโรนอยไปยังจุดที่คำนวณได้ไปยังจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยที่คำนวณได้ และจะกระทำขั้นตอนนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ จุดกำเนิดที่ว่านี้เทียบได้กับหุ่นยนต์ตัวที่เราสนใจนั่นเอง

ดังนั้นในขั้นตอนการทำงานต่อไป หุ่นยนต์จะคำนวณจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นของตนเอง เพื่อใช้เป็นจุดหมายในการเคลื่อนที่ และทำซ้ำไปเรื่อยๆ ดังแสดงในขั้นตอนวิธีที่ 5

จากขั้นตอนวิธีที่ 5 $voronoiVertex$ คือเซทของจุดยอดบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นที่คำนวณไว้ในขั้นตอนวิธีที่ 4 และการหาจุดศูนย์กลางมวลที่กล่าวถึงในบรรทัดที่ 2 คือ การหาค่าเฉลี่ยของตำแหน่งจุดใน $voronoiVertex$ จะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีนี้จะทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นของหุ่นยนต์ตัวนั้นๆ ซึ่งคือการกระจายแบบ

Algorithm 4 LocalVoronoi

```
1: voronoiVertex = ∅
2: neigborRobotList = scanForSameType(thisRobot)
3: sortByAngle(neigborRobotList)
4: shiftMinDistanceToHead(neigborRobotList)
5: activeLine = normalDivider(neigborRobotList[1],thisRobot)
6: for each robot r in neigborRobotList
7:     inersectionPoint = intersect(activeLine,normalDivider(r, thisRobot))
8:     if (intersectionPoint) closet to thisRobot than other robot then
9:         voronoiVertex.append(intersectionPoint)
10: }
```

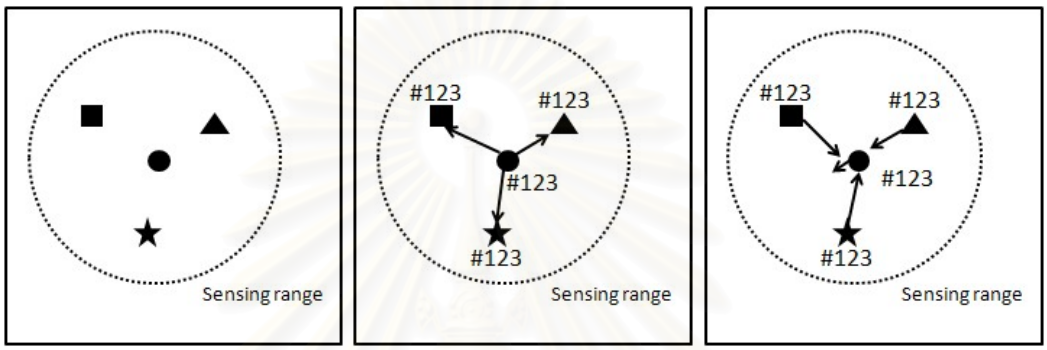
Algorithm 5 IndividualSpread

```
1: while (true) do
2:     target = centroid(voronoiVertex)
3:     move thisRobot to target
4: }
```

สม่ำเสมอดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.4.3.2 การจับกลุ่ม

เมื่อหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งตรวจพบว่ามีสมาชิกครบที่จะสร้างกลุ่มได้หุ่นยนต์ตัวนั้นจะทำการส่งหมายที่สุ่มขึ้นมาไปยังหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ ที่จะเป็นสมาชิกกลุ่ม หมายเลขสุ่มนี้จะถูกใช้เป็นหมายเลขกลุ่ม ซึ่งหุ่นยนต์ที่อยู่กลุ่มเดียวกันจะเคลื่อนที่เข้าหากันเสมือนว่ามีแรงดูดระหว่างกัน ขั้นตอนการจับกลุ่มแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16: การจับกลุ่มของหุ่นยนต์ (ก) การตรวจพบ(ข) การให้หมายเลขกลุ่ม (ค) การเคลื่อนที่เข้ากลุ่ม

การทำงานของการจับกลุ่มจึงสามารถแบ่งได้เป็นสองส่วนหลักๆ คือ การให้หมายเลขกลุ่มและการรวมกลุ่ม

การให้หมายเลขกลุ่มมีการทำงานดังขั้นตอนวิธีที่ 6 กล่าวคือ บรรทัดที่ 1-2 คือการสร้างตารางของเพื่อนบ้านหุ่นยนต์แต่ละประเภทไว้ก่อน แล้วกำหนดให้สมาชิกทุกตัวเป็นค่าว่างเปล่า บรรทัดที่ 3 - 5 เป็นการหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดแต่ละชนิด การหาเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุดนั้นต้องอยู่ในระยะการรับรู้ของหุ่นยนต์ด้วย หากตารางเพื่อนบ้านของหุ่นยนต์มีสมาชิกครบทุกประเภท ให้ทำการส่งหมายเลขกลุ่มไปยังหุ่นยนต์ทุกตัวที่อยู่ในตารางเพื่อนบ้านดังแสดงในบรรทัดที่ 6 - 12 และให้ค่ากลุ่มของตัวหุ่นยนต์นั้นเป็นหมายเลขเดียวกันด้วย

Algorithm 6 Grouping

```
1: neighborRobots = array size of m type
2: initialize all neighborRobots members to NULL
3: for all t in Type
4:       neighborRobots[t]= findClosetNeighborOfType(t)
5: }
6: groupNo = random()
7: if complete(neighborRobots) then
8:       set thisRobot group number to groupNo
9:       for all robot r in neighborRobot do
10:            set r group number to groupNo
11:      }
12: }
```

ขั้นตอนวิธีการจับกลุ่มจะเป็นดังขั้นตอนวิธีที่ 7 กล่าวคือ หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปตามแรงดูดจากหุ่นยนต์ที่มีหมายเลขกลุ่มเดียวกัน

Algorithm 7 Grouping

$v = 0$
for each robot i being sensed
    groupNo of robot i is the same as $myGroupNo$ then
        $v = v + K_a * r_i$
}
if $|v| > V_{limit}$
    $v = V_{limit} * \frac{v}{|v|}$
if $|v| < V_{min}$
    then $v = 0$

4.4.4 การกระจายกลุ่ม

หลังจากหุ่นยนต์ที่มีหมายเลขกลุ่มเดียวกันเคลื่อนที่เข้ารวมกันเข้าใกล้กันมากกว่ารัศมีกลุ่มแล้ว จะถือว่าหุ่นยนต์เหล่านั้นเป็นกลุ่มเดียวกันอย่างสมบูรณ์สามารถทำหน้าที่ที่ได้รับมอบหมายได้ การเคลื่อนที่จะเคลื่อนที่ไปพร้อมกันทั้งกลุ่มเสมือนว่าเป็นหุ่นยนต์ตัวเดียวกัน ดังนั้น การกระจายกลุ่มนี้จะมีลักษณะคล้ายกับการกระจายหุ่นยนต์แต่ละตัวมาก กล่าวคือ แทนที่การเคลื่อนที่จะเป็นการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อิสระก็จะเป็นการเคลื่อนที่ของกลุ่มหุ่นยนต์แทน

การทำงานของการกระจายกลุ่มหุ่นยนต์จึงคล้ายคลึงกับการทำงานของการกระจายหุ่นยนต์ไปด้วย ซึ่งวิธีการทำงานของการกระจายกลุ่มหุ่นยนต์อธิบายได้ดังนี้ กลุ่มหุ่นยนต์แต่ละกลุ่มจะสร้างบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นของตนเองขึ้นมา จากนั้นจึงเคลื่อนที่ไปยังจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยนั้น ทำซ้ำไปเรื่อยๆ ตามวิธีการของ Lloyd การกระจายกลุ่มหุ่นยนต์จึงสามารถแบ่งการทำงานได้เป็นสองส่วนคือการหาบริเวณโวโรนอยของกลุ่มหุ่นยนต์ดังแสดงในขั้นตอนวิธีที่ 8 และการเคลื่อนที่ของกลุ่มหุ่นยนต์ดังแสดงในขั้นตอนวิธีที่ 9

Algorithm 8 LocalVoronoi

$voronoiVertex$ = ∅
$neigborGroupList$ = scanGroup($thisGroup$)
sortByAngle($neigborGroupList$)
shiftMinDistanceToHead($neigborGroupList$)
$activeLine$ = normalDivider($neigborGroupList[1]$,$thisGroup$)
for each group g in $neigborGroupList$
    $inersectionPoint$ = intersect($activeLine$,normalDivider($g, thisGroup$))
    if ($intersectionPoint$) closet to $thisGroup$ than other group then
        $voronoiVertex$.append($intersectionPoint$)
}

Algorithm 9 IndividualSpread

while (true) do
    $target$ = centroid($voronoiVertex$)
    move $thisGroup$ to $target$
}

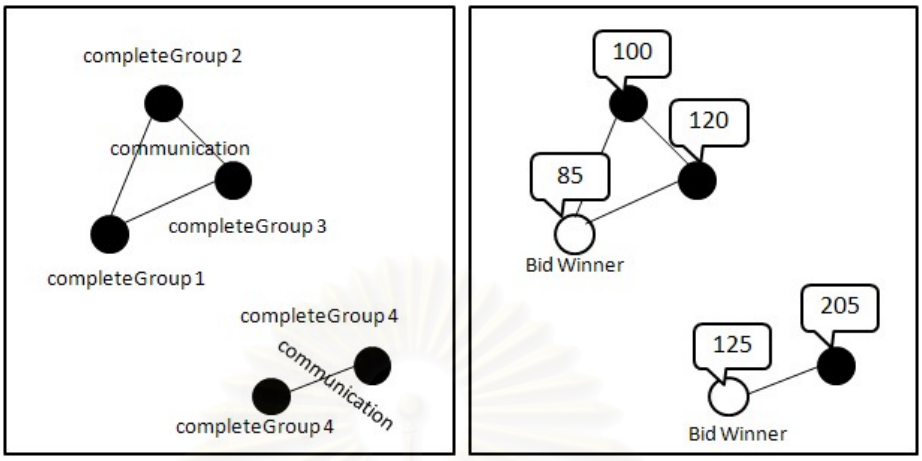
4.4.5 การประมูลแบบท้องถิ่น

การประมูลแบบท้องถิ่นจะเกิดอยู่เสมอในขณะที่กลุ่มหุ่นยนต์ทำงานอยู่ เพื่อให้หุ่นยนต์ที่ยังไม่มีกลุ่มสามารถหากลุ่มได้และเดินทางน้อยที่สุด ซึ่งการประมูลแบบท้องถิ่นคือการประมูลกันระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบแล้ว ว่ากลุ่มใดจะสามารถเป็นจุดนัดพบของหุ่นยนต์ที่ยังไม่มีกลุ่มให้มารวมเป็นกลุ่มได้หนึ่งกลุ่มโดยหุ่นยนต์แต่ละตัวเดินทางน้อยที่สุด หุ่นยนต์ที่ยังไม่มีกลุ่มที่ต้องการจะใช้การนำทางจากกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบแล้วต้องแสดงตัวว่าต้องการการนำทางจึงจะเข้ามาอยู่ในการพิจารณาประมูล การที่กลุ่มหุ่นยนต์ใดจะชนะประมูลได้ต้องมีหุ่นยนต์ครบทุกชนิดและระยะทางรวมเพื่อให้หุ่นยนต์ทุกชนิด เดินทางมารวมตัวกันนั้นสั้นที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มหุ่นยนต์อื่น

แนวคิดเบื้องต้นของการประมูลแบบท้องถิ่นเป็นดังรูปที่ 4.17 กล่าวคือกลุ่มหุ่นยนต์จะทำการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกันว่าระยะทางสั้นที่สุดที่จะให้หุ่นยนต์ที่ไม่มีกลุ่มมารวมกันที่ตำแหน่งของกลุ่มหุ่นยนต์นั้นเป็นเท่าใด จะเห็นได้ว่าข้อมูลระยะทางสั้นที่สุดที่จะให้หุ่นยนต์ที่ไม่มีกลุ่มมารวมกันของแต่ละกลุ่มนั้นเป็นข้อมูลสำคัญในการประมูล หากข้อมูลนี้เป็นข้อมูลท้องถิ่นของกลุ่มหุ่นยนต์นั้นๆ เท่ากับว่าเราแทบจะไม่ได้ขยายระยะการมองเห็นของหุ่นยนต์แต่ละตัวออกไปเลย ฉะนั้นการจะทำให้ข้อมูลระยะทางสั้นมีประโยชน์จริงๆ แล้ว ต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์ด้วย เพื่อเป็นการขยายระยะการรับรู้และการนำทางของหุ่นยนต์ออกไป เมื่อกลุ่มหุ่นยนต์มีข้อมูลแลกแปลี่ยนมาจากกลุ่มหุ่นยนต์อื่นแล้วจะทำการส่ง ค่าระยะทางสั้นที่สุดที่จะให้หุ่นยนต์ที่ไม่มีกลุ่มมารวมกันของตนเองไปด้วย ซึ่งเปรียบเสมือนการยื่นซองประมูลไปยังหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ การประมูลนี้ไม่มีคนกลางในการประมูลแต่จะอาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์ และสังเกตได้ว่าเราไม่จำเป็นต้องมีการประมูลจากหุ่นยนต์ทุกตัวใช้เพียงการประมูลจากหุ่นยนต์ที่สามารถติดต่อได้ก็เพียงพอแล้ว เนื่องจากลักษณะปัญหาเป็นปัญหาท้องถิ่น กล่าวคือกลุ่มหุ่นยนต์ที่ชนะการประมูลคือกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีระยะทางสั้นที่สุดที่จะให้หุ่นยนต์ซึ่งไม่มีกลุ่มมารวมกันที่ตำแหน่งของกลุ่มหุ่นยนต์นั้น โดยข้อมูลที่ใช้คือข้อมูลที่แลกเปลี่ยนกันระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์ที่สามารถติดต่อกันได้ทั้งหมด แม้จำนวนของกลุ่มหุ่นยนต์ที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้เพื่อทำการประมูลจะมีจำนวนไม่มาก ไม่ได้หมายความว่าผลลัพธ์ที่ได้จะออกมาไม่ดี แต่เป็นไปในทางตรงกันข้าม ยิ่งขนาดของกลุ่มเล็กแสดงว่าระยะทางที่หุ่นยนต์ต้องเดินทางเพื่อมารวมกลุ่มโดยเฉลี่ยจะน้อยตามไปด้วย ซึ่งตรงกับเป้าหมายของการทำงานที่ต้องการให้หุ่นยนต์เดินทางสั้นที่สุดเพื่อมารวมกลุ่มนั่นเอง แนวคิดของการประมูลแบบกระจายไปตามรูปที่ 4.17(ก)

วิธีการประมูลที่ใช้ในที่นี่ใช้การส่งข้อมูลระยะทางที่หุ่นยนต์ต้องเดินทางเพื่อมารวมกลุ่มของกลุ่มหุ่นยนต์มาแลกเปลี่ยนกัน และจะเกิดผู้ชนะเมื่อกลุ่มหุ่นยนต์นั้นมีสมาชิกครบและค่าระยะทางที่หุ่นยนต์ต้องเดินทางเพื่อมารวมกลุ่มของกลุ่มหุ่นยนต์นั้น เป็นค่าต่ำที่สุดเท่าที่กลุ่มหุ่นยนต์นั้นเคยรับรู้ การที่ระยะดังกล่าวต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าที่กลุ่มหุ่นยนต์เคยแลกเปลี่ยนมา ระยะทางที่หุ่นยนต์ต้องเดินทางเพื่อมารวมกลุ่มนั้นเป็นระยะทางที่ต่ำสุดในกลุ่มหุ่นยนต์ที่สามารถติดต่อกันได้ที่ตัวมันเป็นสมาชิกอยู่ กลุ่มหุ่นยนต์นี้จึงเหมาะสมที่จะเป็นจุดนัดหมายและจะแสดงตัวเป็น

ผู้ชนะประมูลเพื่อส่งสัญญาณไปยังหุ่นยนต์ที่ต้องการให้มารวมกลุ่มต่อไป แนวคิดของการเลือกผู้ชนะประมูลเป็นไปตามรูปที่ 4.17(ข)



รูปที่ 4.17: แนวคิดของการประมูลแบบท้องถิ่น (ก) แสดงกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบและการสื่อสารระหว่างกลุ่ม(ข) แสดงการประมูลและผู้ชนะประมูล

การประมูลแบบท้องถิ่นประกอบด้วยขั้นตอนย่อยดังนี้

- **การแสดงตัวขอรับการนำทาง** หุ่นยนต์ที่ยังไม่มีกลุ่มจะแสดงตัวเพื่อขอรับการนำทางจากกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบแล้ว โดยหุ่นยนต์จะแสดงตัวขอรับการนำทางเมื่อหมด 'ความเชื่อมั่น' ที่จะจับกลุ่มให้สำเร็จด้วยตนเองแล้ว
- **การปรับค่าตารางระยะทาง** ปรับค่าตารางระยะทางที่ไปยังหุ่นยนต์แต่ละชนิดเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเสนอประมูลของกลุ่มหุ่นยนต์ การปรับค่าตารางนี้แบ่งออกเป็นสองส่วนคือการปรับค่าตารางท้องถิ่นที่ใช้การรับรู้ภายในพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ และการปรับค่าตารางแลกเปลี่ยนที่อาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งอาศัยการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับกลุ่มหุ่นยนต์ข้างเคียง
- **การประมูลแบบท้องถิ่น** ทำการประมูลแบบท้องถิ่นเพื่อหากลุ่มหุ่นยนต์ที่ชนะการประมูลมาใช้เป็นจุดนัดหมายของหุ่นยนต์แต่ละชนิดที่จะเดินทางมารวมกัน

4.4.5.1 การแสดงตัวขอรับการนำทาง

เมื่อหุ่นยนต์แต่ละตัวทำงานไป อาจจะเกิดสภาพที่ไม่มีหุ่นยนต์อยู่ในพิสัย R_{sense} ครบจำนวน m ชนิดที่กำหนด ซึ่งกรณีอย่างนี้เกิดขึ้นเสมอโดยเฉพาะเมื่อหุ่นยนต์จับกลุ่มกันได้เกือบครบทุกตัว หุ่นยนต์ที่เหลืออาจอยู่ห่างกันมากจนไม่สามารถจับกลุ่มกันได้ จึงจำเป็นต้องมีการวางแผนการเคลื่อนที่ไปรวมกลุ่ม การวางแผนการเคลื่อนที่นี้ควรจะใช้เมื่อหุ่นยนต์ตัวนั้นไม่มีโอกาสจะจับกลุ่มได้โดยใช้เพียงข้อมูลจากตัวรับรู้ของตนเองเท่านั้น จึงทำให้เกิดปัญหาว่าเมื่อใดควรจะให้หุ่นยนต์ใช้การนำทางหรือควรจะปล่อยให้หุ่นยนต์ทำการกระจายและจัดกลุ่มต่อไป ในวิธีการนี้ได้

เสนอการใช้แนวคิดความมั่นใจของหุ่นยนต์ ถ้าหุ่นยนต์หมดความมั่นใจในการจับกลุ่มด้วยตัวเองแล้ว หุ่นยนต์ตัวนั้นจะแสดงตัวว่าต้องการการนำทางเพื่อให้กลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบแล้วซึ่งทำหน้าที่เสมือนเราท์เตอร์ จัดสรรตำแหน่งจุดนัดหมายที่เหมาะสมเพื่อให้หุ่นยนต์มีกลุ่มที่สมบูรณ์ต่อไป

ความมั่นใจคือความเชื่อว่าตัวหุ่นยนต์เองจะสามารถหากลุ่มได้ ซึ่งค่าความเชื่อมั่นนี้จะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อความมั่นใจลดต่ำกว่าค่า $min_{confidence}$ หุ่นยนต์จะทำการแสดงตัวว่าต้องการการนำทาง ซึ่งค่าความมั่นใจนี้จะเริ่มต้นด้วยค่าสุ่มหรือค่าที่กำหนดไว้ตายตัวก็ได้ การทำงานของ การแสดงตัวขอรับการนำทางเป็นไปตามขั้นตอนวิธีที่ 10

Algorithm 10 RequestNavigation

```
1: confidence = initial conference value
2: while (true) do
3:     confidence- -
4:     if confidence < minConfidence then
5:         needNavigation = true
6:     }
7: }
```

4.4.5.2 การปรับค่าตารางระยะทาง

ตารางระยะทางคือตารางที่ใช้ในการเก็บค่าระยะทางที่สั้นที่สุดของหุ่นยนต์แต่ละชนิดในการเดินทางมายังกลุ่มหุ่นยนต์นี้ วิธีการใช้ตารางระยะทางได้แนวคิดมากจากเวคเตอร์ระยะทางในเครือข่ายคอมพิวเตอร์ [66] ที่ใช้เก็บระยะในการเดินทางของข้อมูลไปยังเราท์เตอร์ตัวต่างๆในเครือข่าย ตารางระยะทางทำให้ทราบว่าหากเราให้กลุ่มหุ่นยนต์นี้เป็นที่นัดหมายหุ่นยนต์จะต้องเดินทางรวมแล้วเป็นระยะทางเท่าใด การเดินทางน้อยที่สุดเป็นคุณสมบัติอันพึงประสงค์ในการจัดกลุ่มหุ่นยนต์เพราะจะทำให้ประหยัดพลังงานของหุ่นยนต์แต่ละตัวในการทำงาน เราจึงใช้ค่าระยะทางนี้เป็นตัวเปรียบเทียบว่าสมควรจะเลือกกลุ่มหุ่นยนต์ใดเป็นจุดนัดพบ เพื่อให้ได้ค่าที่เป็นปัจจุบันและเพื่อเพิ่มขอบเขตความรู้ของกลุ่มหุ่นยนต์ ตารางนี้จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงค่าอยู่เสมอ โดยการปรับปรุงค่าแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ การปรับปรุงค่าท้องถิ่นหมายถึงการปรับปรุงตารางระยะทางด้วยข้อมูลที่สามารถรับรู้ได้จากกลุ่มหุ่นยนต์นั้นๆเอง และการปรับปรุงข้อมูลแบบแลกเปลี่ยนซึ่งคือ การแลกปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์ เนื่องจากหากมองแค่บริเวณท้องถิ่นกลุ่มหุ่นยนต์อาจพบหุ่นยนต์ที่ต้องการการนำทางไม่ครบทุกชนิด การแลกเปลี่ยนข้อมูลกับหุ่นยนต์ตัวอื่นจะทำให้สามารถทราบถึงระยะทางไปยังหุ่นยนต์ชนิดที่มองไม่เห็นด้วยตนเอง แม้กลุ่มหุ่นยนต์จะมีข้อมูลระยะทางไปยังหุ่นยนต์ชนิดหนึ่งอยู่แล้ว แต่ข้อมูลที่ได้จากการแลกเปลี่ยนเพิ่มเติมอาจจะทำให้ได้ระยะทางที่สั้นลง

ตารางระยะทางจะมีข้อมูลแยกตามชนิดของหุ่นยนต์โดยข้อมูลในแต่ละแถวจะเป็นดังนี้

- **ตำแหน่งสัมพัทธ์** เก็บตำแหน่งสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ชนิดนั้นๆ ที่ใกล้ที่สุดเมื่อเทียบกับตำแหน่ง

ของกลุ่มหุ่นยนต์ที่เป็นเจ้าของตารางระยะทาง

- **ระยะทาง** จัดเก็บระยะทางที่สั้นที่สุดไปยังหุ่นยนต์ชนิดนั้นๆ

นอกจากข้อมูลที่แยกตามชนิดของหุ่นยนต์แล้วยังมีข้อมูลที่เป็นข้อมูลสรุปของกลุ่มหุ่นยนต์ดังนี้

- **ระยะทางรวม** เก็บระยะทางรวมที่หุ่นยนต์ทุกชนิดต้องใช้ในการเดินทางมายังกลุ่มหุ่นยนต์นี้
- **ระยะทางรวมต่ำสุด** เก็บระยะทางรวมที่ต่ำที่สุดที่กลุ่มหุ่นยนต์เคยได้รับจากการแลกเปลี่ยนข้อมูล

ตัวอย่างตารางระยะทางเป็นดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5: ตัวอย่างตารางระยะทางที่มี $m = 5$

$\mathbf{type}$	$\mathbf{x_{relative}}$	$\mathbf{y_{relative}}$	Distance	targetRobot
1	120	80	144	8
2	45	45	63	39
3	90	80	120	15
4	100	68	121	12
5	nil	nil	∞	nil
ระยะทางรวม			∞	
ระยะทางรวมต่ำสุด			∞	

การปรับค่าตารางระยะทางสามารถสรุปได้เป็นขั้นตอนดังนี้

1. ให้ค่าเริ่มต้น เมื่อได้กลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบทุกชนิดแล้วต้องทำการให้ค่าเริ่มต้นกับตารางระยะทาง โดยค่าเริ่มต้นคือตารางขนาด m แถวที่ตำแหน่งสัมพัทธ์ทั้งหมดเป็น nil และระยะทางไปยังทุกชนิดใน m เป็นอนันต์ ตารางเริ่มต้นแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6: ตาราง

$\mathbf{type}$	$\mathbf{x_{relative}}$	$\mathbf{y_{relative}}$	Distance	targetRobot
1	nil	nil	∞	nil
2	nil	nil	∞	nil
...	nil	nil	∞	nil
...	nil	nil	∞	nil
m	nil	nil	∞	nil
ระยะทางรวม			∞	
ระยะทางรวมต่ำสุด			∞	

2. ปรับค่าแบบท้องถิ่น

การปรับค่าแบบท้องถิ่นคือการปรับค่าตารางโดยการหาตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่อยู่ภายใน R_{sense} ของกลุ่มหุ่นยนต์นั้น แยกตามชนิดเพื่อหาหุ่นยนต์ที่มีระยะทางใกล้ที่สุดมายังกลุ่มหุ่นยนต์ดังกล่าว โดยจะปรับค่าต่อเมื่อระยะทางไปยังหุ่นยนต์ชนิดนั้นสั้นกว่าระยะทางที่เก็บอยู่ในตารางระยะทาง หากไม่พบหุ่นยนต์ชนิดใดก็ไม่ต้องปรับค่าของตารางสำหรับหุ่นยนต์ชนิดนั้นในแถวนั้น วิธีการปรับค่าแบบท้องถิ่นสามารถอธิบายได้ดัง Algorithm ที่ 11

Algorithm 11 LocalUpdateDistanceArray

```
1: for each robot i of type t being sensed
2:     if the |i − thisGroup| < distanceArray[type(i)].Distance then
3:         distanceArray[type(i)].Distance = |i − thisGroup|
4:         distanceArray[type(i)].x = relative x position of i
5:         distanceArray[type(i)].y = relative y position of i
6: }
```

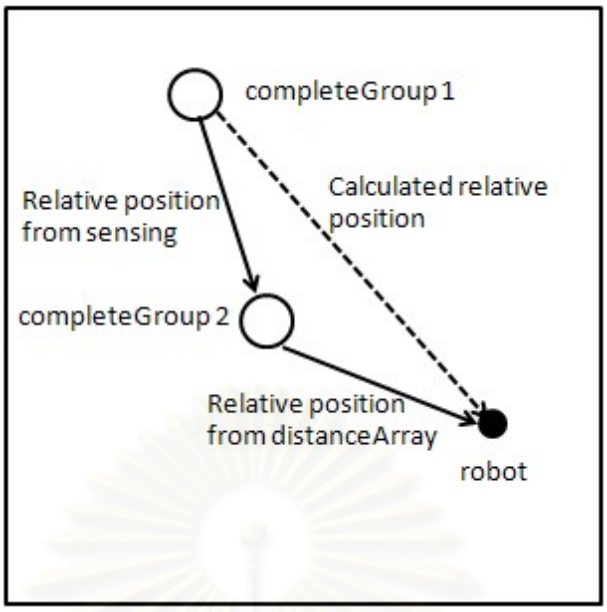
3. ปรับค่าแบบแลกเปลี่ยน

หลังจากที่ปรับค่าแบบท้องถิ่นแล้วตารางระยะทางที่ได้คือตารางระยะทางที่ได้รับการปรับปรุงค่ามาใหม่ สำหรับกลุ่มหุ่นยนต์ไปยังหุ่นยนต์ชนิดต่างๆที่อยู่รอบกลุ่มหุ่นยนต์นั้นในระยะ R_{sense} เพื่อให้ได้ค่าของหุ่นยนต์เป้าหมายที่ห่างออกไปจำต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับกลุ่มหุ่นยนต์อื่น ดังแสดงในขั้นตอนวิธีที่ 12

การปรับค่าแบบแลกเปลี่ยนสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนย่อยได้ดังนี้

- **1. การแลกเปลี่ยนข้อมูลตำแหน่งสัมพัทธ์** กลุ่มหุ่นยนต์จะขอตำแหน่งสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ชนิดที่ต้องการจากเพื่อนบ้าน และกลุ่มหุ่นยนต์เพื่อนบ้านจะส่งตำแหน่งสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ชนิดนั้นการจากตารางระยะทางของตน หากไม่มีก็จะตอบไปว่าไม่มีหุ่นยนต์ชนิดที่ต้องการ
- **2. การคำนวณตำแหน่งสัมพัทธ์** เมื่อได้ข้อมูลตำแหน่งสัมพัทธ์ของกลุ่มหุ่นยนต์เพื่อนบ้านมาแล้ว และตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างกลุ่มตัวหุ่นยนต์กับกลุ่มหุ่นยนต์เพื่อนบ้านสามารถทราบได้จากการรับรู้ของกลุ่มหุ่นยนต์ เราสามารถคำนวณตำแหน่งสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ชนิดที่สนใจที่ได้มาจากกลุ่มหุ่นยนต์เพื่อนบ้านได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.18
- **3. การปรับปรุงค่าของตารางระยะทาง** หากค่าระยะทางที่ได้จากการคำนวณในข้อที่ 2 นั้นสั้นกว่าระยะทางเดิมที่มีอยู่ในตารางระยะทาง ให้ทำการปรับปรุงค่าตำแหน่งสัมพัทธ์ ($x_{relative}$, $y_{relative}$) ให้เป็นตำแหน่งสัมพัทธ์ที่คำนวณได้ในข้อที่ 2 และปรับปรุงระยะทางให้สอดคล้องกัน

หลังจากที่ปรับค่าทีละชนิดจนครบทุกชนิดแล้ว กลุ่มหุ่นยนต์จะคำนวณระยะทางรวม แล้วเปรียบเทียบกับระยะทางรวมต่ำสุดของเพื่อนบ้าน และค่าระยะทางต่ำสุดเดิม หาค่าที่ต่ำสุดมาเป็นค่าของระยะทางรวมต่ำสุดของกลุ่มหุ่นยนต์ การทำงานของการปรับค่าแบบแลกเปลี่ยนเป็นไปตามขั้นตอนวิธีที่ 12



รูปที่ 4.18: การคำนวณตำแหน่งสัมพัทธ์

4.4.5.3 การประมูลแบบท้องถิ่น

การประมูลแบบท้องถิ่นคือการหาระยะทางที่น้อยที่สุดที่จะต้องใช้ในการเดินทางของหุ่นยนต์เป้าหมายว่าควรจะเดินทางมรวมกันที่กลุ่มหุ่นยนต์ใดจึงจะเหมาะสม กลุ่มหุ่นยนต์แต่ละกลุ่มมีข้อมูลตารางระยะทางที่หามาในหัวข้อที่ 4.4.5.2 อยู่แล้วขั้นตอนนี้ก็คือการเลือกกลุ่มที่มีระยะทางรวมต่ำที่สุดออกมา

เนื่องจากระบบนี้เป็นระบบแบบกระจายจึงไม่มีหุ่นยนต์ตัวใดหรือกลุ่มหุ่นยนต์กลุ่มใดทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการประมูล จึงต้องทำการประมูลโดยอาศัยข้อมูลท้องถิ่น และทำการประมูลโดยไม่อาศัยตัวกลาง การประมูลนี้จะเกิดผู้ชนะการประมูลเมื่อ กลุ่มหุ่นยนต์ใด มีค่าระยะทางรวมเท่ากับค่าระยะทางรวมต่ำสุด และค่านั้นไม่ใช่ ∞ ซึ่งหมายความว่า กลุ่มหุ่นยนต์นั้นมีข้อมูล

Algorithm 12 InterchangeUpdateDistanceArray

1: n is neighboring robot group
2: for each t in $Type$
3: $neighborRelativeX$ = $distanceArray_n(t).x$
4: $neighborRelativeY$ = $distanceArray_n(t).y$
5: $robotPos$ = calculateRelativePos(n,$neighborRelativeX$,$neighborRelativeY$)
6: $distance$ = distance($thisGroup$,$robotPos$)
7: if $distance$ < $distanceArray_{thisGroup}(t).distance$ then
8: update x , y to $robotPos$
9: update $distanceArray_{thisGroup}(t).distance$
10: }
11: }
12: calculate $sumDistance$ from $distanceArray$
13: $neighborDistance$ = $distanceArray_n.shortestDistance$
14: $myDistance$ = $distanceArray_{thisGroup}.shortestDistance$
15: $distanceArray_{thisGroup}.shortestDistance$ = findMin($sumDistance$,$neighborDistance$,$myDistance$)

ของหุ่นยนต์ครบทุกชนิดพร้อมที่จะเป็นจุดนัดพบ และมีระยะทางที่หุ่นยนต์เหล่านั้นจะมาพบกันที่กลุ่มหุ่นยนต์นี้ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มหุ่นยนต์ที่เคยแลกเปลี่ยนข้อมูลด้วย

การประมูลแบบท้องถิ่นอธิบายได้ดัง Algorithm 13

Algorithm 13 localBid

```
1: while (true)
2:     if ((min_sum(g) == sumDistance(g)) and (min(g) ≠ ∞)) then
3:         bidWinner(g)
4: }
```

4.4.6 การเดินทางมารวมกลุ่ม

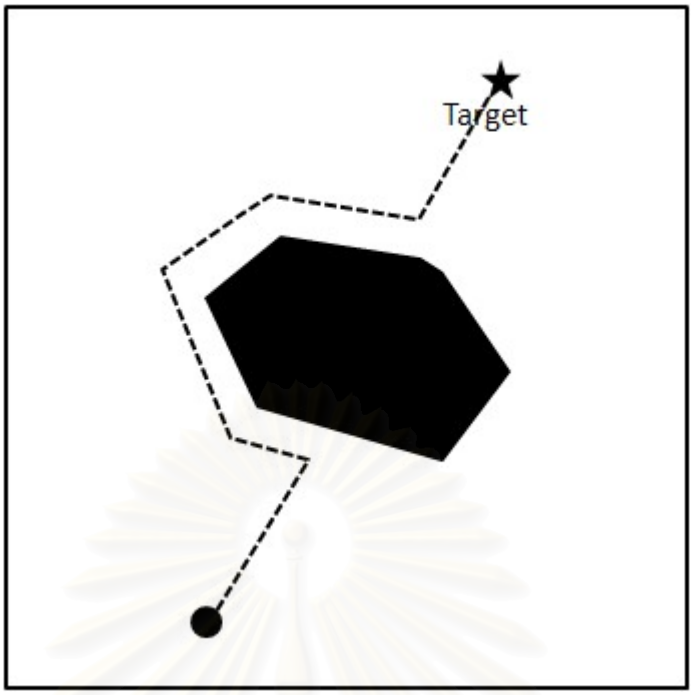
เมื่อมีผู้ชนะการประมูลเกิดขึ้น จะทำการส่งคำสั่งไปยังหุ่นยนต์เป้าหมายที่อยู่ในตารางระยะทางของผู้ชนะประมูลเพื่อให้หุ่นยนต์เหล่านั้นเดินทางมายังจุดนัดพบที่ผู้ชนะประมูล โดยจะส่งผ่านกลุ่มหุ่นยนต์เพื่อนบ้านกลับไปยังหุ่นยนต์เป้าหมาย การส่งนี้แม้จะเป็นการส่งแบบกระจาย (flooding) แต่เป็นการส่งข้อมูลกระจายเฉพาะในกลุ่มที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้เท่านั้น โดยอาศัยการส่งต่อๆกันไปของกลุ่มหุ่นยนต์เพื่อนบ้าน นอกจากจะสั่งการเคลื่อนที่ไปยังหุ่นยนต์เป้าหมายแล้ว ยังจะส่งสัญญาณปิดการประมูล ซึ่งคือการตั้งค่าระยะทางต่ำสุดของกลุ่มหุ่นยนต์ทุกตัว เป็น ∞

คำสั่งที่แจ้งไปยังหุ่นยนต์เป้าหมายให้มายังจุดนัดหมายนั้นประกอบด้วยข้อมูลต่างๆ ดังนี้

- **1. หมายเลขกลุ่ม** กลุ่มหุ่นยนต์จะทำการสุ่มหมายเลขกลุ่มและส่งออกไปให้หุ่นยนต์เป้าหมายที่อยู่ในตารางระยะทาง เพื่อให้หุ่นยนต์เหล่านั้นทราบว่าตนเองเป็นสมาชิกกลุ่มใด หากในระหว่างการเคลื่อนที่หุ่นยนต์พบกับสมาชิกชนิดอื่นๆ ครบทุกชนิดก็จะไม่ทำการรวมตัว ถ้าไม่ใช่หมายเลขกลุ่มเดียวกัน หากมีการรวมกันระหว่างทางเกิดขึ้นด้วย หุ่นยนต์ที่ถูกนำทางไปยังจุดนัดหมายก็จะมีไม่ครบ ทำให้การเดินทางมายังจุดนัดพบสูญเปล่า
- **2. ตำแหน่งสัมพัทธ์** เนื่องจากในตารางระยะทางเราทราบตำแหน่งของหุ่นยนต์เป้าหมาย จึงสามารถคำนวณตำแหน่งสัมพัทธ์จากหุ่นยนต์เป้าหมายในตารางระยะทางกลับมายังกลุ่มหุ่นยนต์ที่เป็นจุดนัดพบได้เช่นกัน ตำแหน่งสัมพัทธ์นี้จะถูกส่งไปให้หุ่นยนต์เป้าหมายแต่ละตัวเพื่อให้เดินทางมายังจุดนัดพบได้

เมื่อหุ่นยนต์ได้รับคำสั่งแล้วจะเดินทางมายังจุดนัดพบ โดยใช้วิธีเสมือนว่าจุดนัดพบนั้นส่งแรงดูดมายังหุ่นยนต์ หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามขนาดและทิศทางของแรงดูดนั้น

ในระหว่างการเดินทางมายังจุดนัดหมายอาจจะพบกับสิ่งกีดขวาง เมื่อหุ่นยนต์พบสิ่งกีดขวางจะพยายามเดินตามขอบของสิ่งกีดขวางในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาจนกว่าหุ่นยนต์จะอยู่ในทิศทางเดิมที่จะไปยังจุดนัดหมายดังแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19: การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อพบสิ่งกีดขวาง

4.5 การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข คือการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีข้อจำกัดคือให้หุ่นยนต์ชนิดหนึ่งต้องการะจายตัวในพื้นที่ ที่เหมาะสมกับตัวเองเท่านั้น เช่นหุ่นยนต์ชนิดที่ 1 จะอยู่ในบริเวณชนิดที่ 1 เท่านั้น โดยหุ่นยนต์เหล่านี้จะไม่ทราบมาก่อนว่าแผนที่ทั้งหมดของพื้นที่การทำงานเป็นอย่างไร มีบริเวณชนิดใด อยู่ตำแหน่งไหนของพื้นที่การทำงานบ้าง ข้อมูลที่หุ่นยนต์รู้มีเพียงพื้นที่ปัจจุบันที่หุ่นยนต์อยู่เป็นพื้นที่ชนิดใด และข้อมูลจากการสื่อสารกับเพื่อนบ้านที่อยู่ภายในระยะการสื่อสารได้ เนื่องจากหุ่นยนต์ไม่ทราบแผนผังของพื้นที่การทำงานมาก่อนและหุ่นยนต์มีเพียงความสามารถในการรับรู้และสื่อสารที่จำกัด ปัญหานี้จึงเป็นตัวอย่างของปัญหาที่แสดงความสำคัญของการใช้ความร่วมมือระหว่างหุ่นยนต์เพื่อทำงานที่ไม่สามารถทำได้ด้วยหุ่นยนต์ตัวเดียวเพียงลำพัง

การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไขสามารถนำไปประยุกต์ได้กับหลายอย่างอาทิเช่น การรักษาความปลอดภัย หุ่นยนต์ที่มีกล้องอาจจะรับผิดชอบใบบริเวณที่สำคญเช่นที่เก็บของมีค่า ส่วนหุ่นยนต์ที่มีเพียงตัวจับความเคลื่อนไหวจะรับผิดชอบบริเวณระเบียงและทางเดิน เป็นต้น

4.5.1 นิยามของปัญหา

ให้กลุ่มของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ในพื้นที่การทำงานประกอบด้วยสมาชิกที่เป็นหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ N ตัวคือ $\{r_1, r_2, ..., r_n\}$ และหุ่นยนต์จะแบ่งออกเป็นชนิด T ต่างๆ โดย $T = \{t_1, t_2, ..., t_m\}$ ในพื้นที่การทำงานจะแบ่งเป็นพื้นที่การทำงานชนิดตาม T การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไขคือการ

กระจายตัวที่ให้ หุ่นยนต์ชนิดที่ t ต้องอยู่ในพื้นที่ชนิดที่ t ด้วยเช่นกัน และหุ่นยนต์ต้องกระจายตัวสม่ำเสมอภายในพื้นที่ชนิดนั้น การกระจายตัวสม่ำเสมอคือหุ่นยนต์แต่ละตัวมีพื้นที่ครอบครองใกล้เคียงกัน

4.5.2 แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

แนวคิดเบื่องต้นเกี่ยวกับการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไขในแต่ละขั้นของการจำลองเหตุการณ์สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 4.20 โดยแนวคิดหลักของการทำงานคือ นำทางหุ่นยนต์ให้ไปยังพื้นที่ที่ถูกต้องและป้องกันไม่ให้หุ่นยนต์ที่อยู่ในพื้นที่ถูกต้องแล้วออกไปยังพืนที่อื่น ภาพรวมของวิธีการเป็นดังนี้ หุ่นยนต์จะทำการปรับปรุงค่าตารางระยะทางของตนเอง ค่าตารางระยะทางนี้ใช้สำหรับช่วยนำทางหุ่นยนต์ที่ยังไม่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้องให้ไปหาบริเวณที่ถูกต้องได้ โดยข้อมูลในตารางจะบอกถึงระยะทางที่น้อยที่สุดเพื่อไปยังบริเวณชนิดต่างๆ หลังจากนั้นถ้าหุ่นยนต์ตัวนั้นยังไม่อยู่ในพื้นที่ที่ถูกต้องก็จะเดินทางตามค่าของการนำทางที่ได้จากหุ่นยนต์ตัวอื่น เมื่อหุ่นยนต์อยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้องจะถือว่าหุ่นยนต์ตัวนั้นมี "การปนเปื้อน" และเมื่อหุ่นยนต์ตัวนั้นเคลื่อนเข้าสู่พื้นที่ที่ถูกต้องการปนเปื้อนจะลดน้อยลงเรื่อยๆ ตามเวลาที่ผ่านไป แต่ในระหว่างที่การปนเปื้อนยังไม่ "สลายตัว" ไปหมดหุ่นยนต์จะยังเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดิมกับที่มันเคลื่อนที่มาก่อนจะเข้าสู่บริเวณที่ถูกต้อง เมื่อการปนเปื้อนสลายตัวไปหมดแล้วหุ่นยนต์จะกระจายตัวในพื้นที่ที่ตนเองรับผิดชอบโดยอาศัยหลักการของแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล

การทำงานของการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไขได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

- 4.5.3 การปรับปรุงตารางระยะทาง
- 4.5.4 การเคลื่อนที่ตามผู้นำทาง
- 4.5.5 การกระจายตัวในบริเวณ

4.5.3 การปรับปรุงตารางระยะทาง

หุ่นยนต์แต่ละตัวจะเดินทางไปยังบริเวณที่ถูกต้องได้โดยอาศัยการช่วยนำทางจากหุ่นยนต์ตัวอื่น การช่วยนำทางนี้จะเป็นเสมือนการขยายความสามารถในการมองเห็นของหุ่นยนต์ด้วยการทำงานร่วมกันของกลุ่มหุ่นยนต์ ตารางระยะทางจะชี้ไปยังตำแหน่งที่เป็นพื้นที่ชนิดต่างๆ ที่ใกล้ที่สุดที่หุ่นยนต์ตัวนั้นทราบ สังเกตุได้ว่าในแบบจำลองหุ่นยนต์ในที่นี้เราให้หุ่นยนต์ รู้ข้อมูลชนิดของพื้นที่เพียงจุดที่หุ่นยนต์อยู่ ดังนั้นตำแหน่งพื้นที่ที่กล่าวถึงก็คือตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่มีชนิดเดียวกับพื้นที่นั้นและอยู่ถูกพื้นที่นั่นเอง

การเก็บข้อมูลการนำทางนี้ใช้ตารางระยะทางที่ได้แนวคิดมาจากเวคเตอร์ระยะทาง เช่นเดียวกับที่เสนอใน 4.4.5.2 ตารางนี้จะเก็บข้อมูลระยะใกล้ที่สุดจากหุ่นยนต์ตัวนั้นๆ ไปยังหุ่นยนต์ชนิดต่างๆ

รูปที่ 4.20: แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

ทั้ง m ที่อยู่ในพื้นที่ที่ถูกต้อง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 ซึ่งการปรับเปลี่ยนค่านั้นจะแบ่งบบอกเป็นสองส่วนคือการปรับเปลี่ยนค่าแบบท้องถิ่นและการปรับเปลี่ยนค่าแบบแลกเปลี่ยน

ข้อแตกต่างของตารางระยะทางที่ใช้ในที่นี้กับที่ใช้ในการจัดกลุ่มคือรูปแบบของข้อมูลภายในตาราง ในที่นี้เราไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลว่าหุ่นยนต์เป้าหมายของเราเป็นหุ่นยนต์หมายเลขอะไร สิ่งที่ต้องการคือตำแหน่งสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ตัวนั้นเท่านั้น เนื่องจากเราต้องการเคลื่อนหุ่นยนต์ไปยังพื้นที่ ไม่ใช่เคลื่อนไปหาหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่ง และข้อมูลในตารางของการกระจายแบบมีเงื่อนไขจะไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับระยะทางรวม เพราะไม่มีความจำเป็นต้องใช้การประมูลใดๆ ในการนำทาง

ตารางที่ 4.7: ตัวอย่างตารางระยะทาง

type	$\mathbf{x_{relative}}$	$\mathbf{y_{relative}}$	Distance
1	$x_{rel}(1)$	$y_{rel}(1)$	$distance(1)$
2	$x_{rel}(2)$	$y_{rel}(2)$	$distance(2)$
...	...	...	...
...	...	...	...
m	$x_{rel}(m)$	$y_{rel}(m)$	$distance(m)$

4.5.3.1 การปรับปรุงตารางระยะทางแบบท้องถิ่น

การปรับค่าแบบท้องถิ่นคือการปรับค่าของตารางโดยการหาตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่อยู่ภายในพื้นที่การรับรู้ R_{sense} ของหุ่นยนต์นั้น โดยแยกตามชนิดเพื่อหาหุ่นยนต์ที่มีระยะทางใกล้ที่สุดมายังหุ่นยนต์ที่สนใจ หากไม่พบหุ่นยนต์ชนิดใดก็ไม่ต้องปรับค่าของตารางระยะทางสำหรับหุ่นยนต์ชนิดนั้นวิธีการปรับค่าแบบท้องถิ่นสามารถอธิบายได้ดัง Algorithm ที่ 14

การทำงานของขั้นตอนวิธีที่ 14 เป็นดังนี้ ในบรรทัดที่ 3 เป็นการพิจารณาว่าหุ่นยนต์ตัวที่พบนั้นอยู่ถูกบริเวณและมีระยะทางน้อยกว่าระยะทางปัจจุบันที่เก็บไว้ในตารางระยะทางหรือไม่ ถ้าใช่ จะทำการปรับปรุงตารางระยะทางดังแสดงในบรรทัดที่ 3,4

4.5.3.2 การปรับปรุงตารางระยะทางแบบแลกเปลี่ยน

หลังจากที่ปรับค่าแบบท้องถิ่นแล้วตารางระยะทางที่ได้คือตารางระยะทางไปยังหุ่นยนต์ชนิดต่างๆที่อยู่รอบหุ่นยนต์ตัวนั้นในระยะ R_{sense} เพื่อให้ได้ค่าของหุ่นยนต์ที่ห่างออกไป จำต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับหุ่นยนต์ตัวอื่นดังแสดงในขั้นตอนวิธีที่ 15

วิธีการปรับปรุงตารางระยะทางแบบแลกเปลี่ยนจะทำการปรับปรุงค่าของตารางระยะทางไปยังหุ่นยนต์ชนิดหนึ่งๆ เมื่อพบว่าระยะทางไปยังหุ่นยนต์ชนิดใดที่ได้รับผ่านทางหุ่นยนต์เพื่อนบ้าน ซึ่งระยะทางนี้ต้องคำนวณตั้งแต่หุ่นยนต์ที่เราสนใจไปยังหุ่นยนต์ชนิดนั้นที่เพื่อนบ้านมองเห็น ถ้าระยะทางนั้นน้อยกว่าระยะทางต่ำสุดที่มีอยู่มีอยู่ในตารางของตนเอง ก็จะทำการปรับปรุงค่าระยะทางและตำแหน่งใกล้สุดของหุ่นยนต์ชนิดนั้นให้เป็นไปตามที่ได้รับมา

จากขั้นตอนวิธีที่ จะเป็นการวนคำนวณสำหรับตารางระยะทางแต่ละแถวจนครบทุกแถว บรรทัดที่ 3 - 4 เป็นการขอข้อมูลจากตารางระยะทางของหุ่นยนต์เพื่อนบ้าน ว่าตำแหน่งห่นยนต์ชนิดนั้นๆ อยู่ในตำแหน่งใดเทียบกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้าน เมื่อเราทราบตำแหน่งสัมพัทธ์ระหว่างหุ่นยนต์เพื่อนบ้านและห่นยนต์ที่เราสนใจแล้ว เราสามารถคำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์เป้าหมายได้ ซึ่งคือขั้นตอนของบรรทัดที่ 5 นั่นเอง และหากระยะทางไปยังหุ่นยนต์เป้าหมายน้อยกว่าระยะทางที่อยู่ในตารางระยะทางของหุ่นยนต์ชนิดนั้น ก็ให้ทำการปรับปุงค่าตารางระยะทางดังแสดงในบรรทัดที่ 8 - 9

Algorithm 14 LocalUpdateDistanceArray

```
1: for each robot i of type t being sensed distance = |thisRobot − i|
2:     if distance < distanceArray.Distance(t)) and (correctArea(i)) then
3:         update x_rel , y_rel to robot i in relative position
4:         distanceArray.Distance(t) = distance
5:     }
6: }
```

Algorithm 15 NeighborUpdateDistanceArray

```
1: n is neighboring robot
2: minDistance = ∞
3: for each t in Type
4:     neighborRelativeX = distanceArray_n(t).x
5:     neighborRelativeY = distanceArray_n(t).y
6:     robotPos = calculateRelativePos(thisRoibot,neighborRelativeX,neighborRelativeY)
7:     distance = distance(thisGroup,robotPos)
8:     if distance < distanceArray_thisGroup(t).distance then
9:         update x , y to robotPos
10:        update distanceArray_thisGroup(t).distance
11:    }
12: }
```

4.5.4 การเคลื่อนที่ตามผู้นำทาง

หากหุ่นยนต์อยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้อง หุ่นยนต์ตัวนั้นจะทำการหาผู้นำทางเพื่อพาไปยังบริเวณที่ถูกต้อง การเคลื่อนที่ตามผู้นำทางเริ่มต้นด้วยการหาผู้นำทางที่จะทำให้หุ่นยนต์เดินทางน้อยที่สุดเพื่อเข้าสู่พื้นที่ที่ถูกต้องแล้วจึงเดินทางไปตามทิศทางนั้น ขั้นตอนการหาผู้นำทางของหุ่นยนต์ตัวหนึ่งๆ เป็นดังขั้นตอนวิธีที่ 16

Algorithm 16 FollowGuide

```
1: minDistance = ∞
2: for all robot r beign sensed
3:     neighborRelativeX = distanceArray_r(myType).x
4:     neighborRelativeY = distanceArray_r(myType).y
5:     robotPos = calculateRelativePos(thisRoibot,neighborRelativeX,neighborRelativeY)
6:     distance = distance(thisGroup,robotPos)
7:     if distance < minDistance then
8:         guidePos = robotPos
9:         minDistance = distance
10:    }
11: }
```

การทำงานของขั้นตอนวิธีที่ 16 เป็นดังนี้ หุ่นยนต์จะสอบถามถึงการแนะนำเว้นทางจากหุ่นยนต์เพื่อนบ้าน ว่าสำหรับควรเดินทางไปทางใด เพื่อให้พบพื้นที่ที่ถูกต้อง หุ่นยนต์จะเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดแล้วเข้าสู่การเคลื่อนที่ตามผู้นำทางต่อไป ในบรรทัดที่ 3 - 4 เป็นการขอข้อมูลจากหุ่นยนต์เพื่อนบ้านว่าระยะทางใกล้สุดไปยังหุ่นยนต์ที่มีชนิดเดียวกับหุ่นยนต์ที่สนใจ ($myType$) ว่าอยู่ตำแหน่งใดสัมพัทธ์กับหุ่นยนต์เพื่อนบ้าน เมื่อได้ตำแหน่งสัมพัทธ์กับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านแล้วจำนำมาคำนวณตำแหน่งสัมพัทธ์กับหุ่นยนต์ที่สนใจ เมื่อได้ตำแหน่งดังกล่าว เราจะทราบระยะทางและสามารถนำมาเปรียบเทียบได้ว่าระยะทางใดต่ำสุด เพื่อที่จะใช้เลือกตำแหน่งหุ่นยนต์เป้าหมายมาเป็นผู้นำทาง ($guidePos$) ซึ่งจะถูกใช้ต่อไปในขั้นตอนของการเคลื่อนที่ตามผู้นำทาง

การเคลื่อนที่ตามผู้นำทางมีวิธีการดังแสดงในขั้นตอนวิธีที่ 17

Algorithm 17 FollowGuide

```
1: r = position vector form i to guidePos
2: v = v + K_a * r
3: if |v| > V_limit
4:     v = V_limit * v/|v|
5: if |v| < V_min
6:     then v = 0
7: execute velocity command v
```

จากขั้นตอนวิธีที่ 17 จะเห็นได้ว่าวิธีการนี้จะเป็นเหมือนการสร้างแรงดูดจากตำแหน่งของหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งที่ได้รับการแนะนำ

4.5.5 การกระจายตัวในบริเวณ

การกระจายในบริเวณนี้คือการกระจายตัวของหุ่นยนต์ให้สม่ำเสทอในบริเวณที่ถูกต้อง ดังนั้น ขั้นตอนการกระจายตัวในบริเวณจะเกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้องเท่านั้น การกระจายตัวนี้หากไม่มีการจำกัดว่าให้กระจายภายใต้ขอบเขตใด ก็จะส่งผลให้หุ่นยนต์ที่อยู่ถูกบริเวณอยู่แล้วเคลื่อนที่ไปอยู่ในบริเวณที่ผิด ดังนั้นงานของการกระจายตัวในบริเวณจึงมีสองวัตถุประสงค์ คือการกระจายหุ่นยนต์ให้สม่ำเสมอ และการทำให้หุ่นยนต์กระจายตัวอยู่เฉพาะ ในบริเวณที่ถูกต้องไม่ออกไปยังบริเวณที่ผิดอีกด้วย การกระจายตัวที่ใช้ในขั้นตอนนี้ใช้การกระจายตัวด้วยบริเวณโวโรนอยแบบจุดศูนยกลางมวล ส่วนการป้องกันไม่ให้หุ่นยนต์ออกไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้อง ใช้แนวคิดของผนังเสมือนและจุดอันตรายดังจะกล่าวรายละเอียดต่อไป

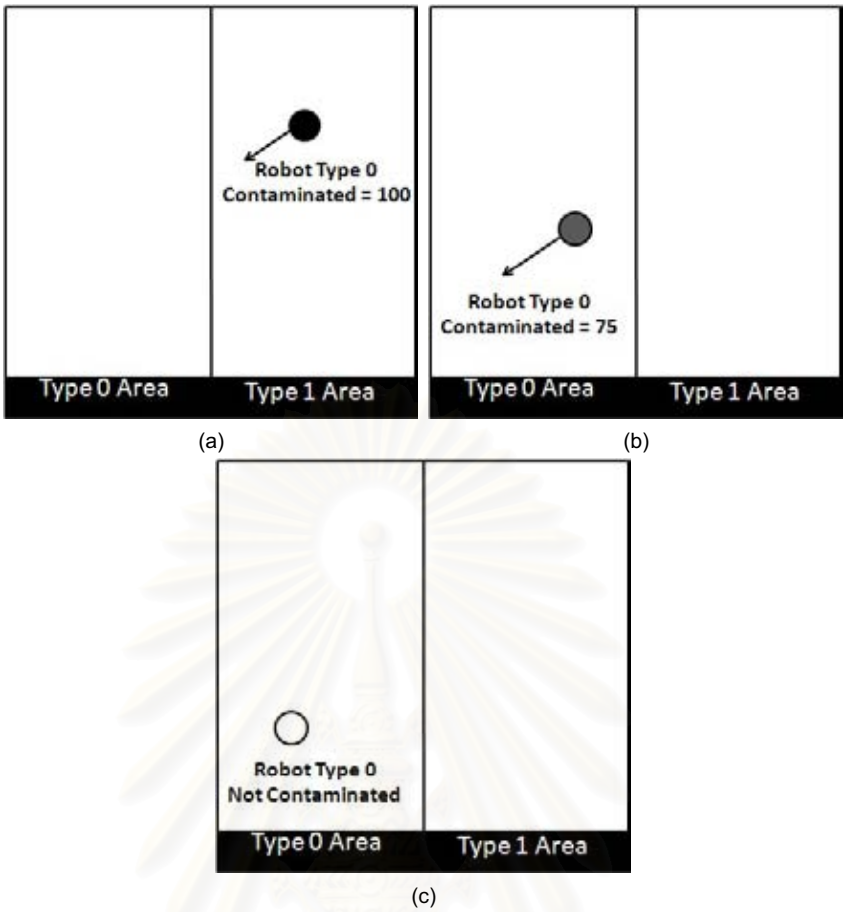
การทำงานของขั้นตอนการกระจายตัวในกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้ เมื่อหุ่นยนต์อยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้องจะถือว่าหุ่นยนต์ตัวนั้นเกิดการปนเปื้อน และการปนเปื้อนจะค่อยๆหายไปเมื่อเข้าสู่บริเวณที่ถูกต้อง เมื่อการปนเปื้อนสลายตัวไปหมดแล้วหุ่นยนต์จะทำการกระจายตัวในบริเวณโดยใช้แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวลโดยมีการเพิ่ม "จุดอันตราย" และ"ผนังเสมือน" เข้ามาเป็นเพื่อนบ้านในการคำนวณบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นด้วยเพื่อป้องกันไม่ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปอยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้องอีก

4.5.5.1 การปนเปื้อนและการสลายตัว

ในการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไขนี้ใช้การเลียนแบบการปนเปื้อนกัมมันตภาพรังสี มาเป็นส่วนหนึ่งของการทำงาน กล่าวคือเมื่อหุ่นยนต์อยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้องเปรียบเสมือนว่าหุ่นยนต์ทำงานอยู่ในบริเวณที่มีกำมันตภาพรังสีซึ่งการปนเปื้อนนี้จะติดตัวอยู่ตลอดเวลาที่อยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้อง แต่เมื่อหุ่นยนต์เข้าสู่บริเวณที่ถูกต้องแล้วกัมมันตภาพรังสีที่ติดตัวหุ่นยนต์จะค่อยๆสลายตัวไปเมื่อเวลาผ่านไป และจะสลายตัวหมดเมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับเวลาการสลายตัว (T_{decay}) ของกัมมันตภาพรังสีนั้น ค่าการปนเปื้อนนี้จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กล่าวคือเมื่อหุ่นยนต์เปลี่ยนจากบริเวณที่ไม่ถูกต้องมาเป็นบริเวณที่ถูกต้อง หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดิมจนกว่าการปนเปื้อนจะสลายตัวไปจึงจะเข้าสู่กระบวนการกระจายตัวในบริเวณที่ถูกต้องต่อไป แนวคิดของการปนเปื้อนและการสลายตัวแสดงในรูปที่ 4.21

4.5.5.2 ผนังเสมือนและจุดอันตราย

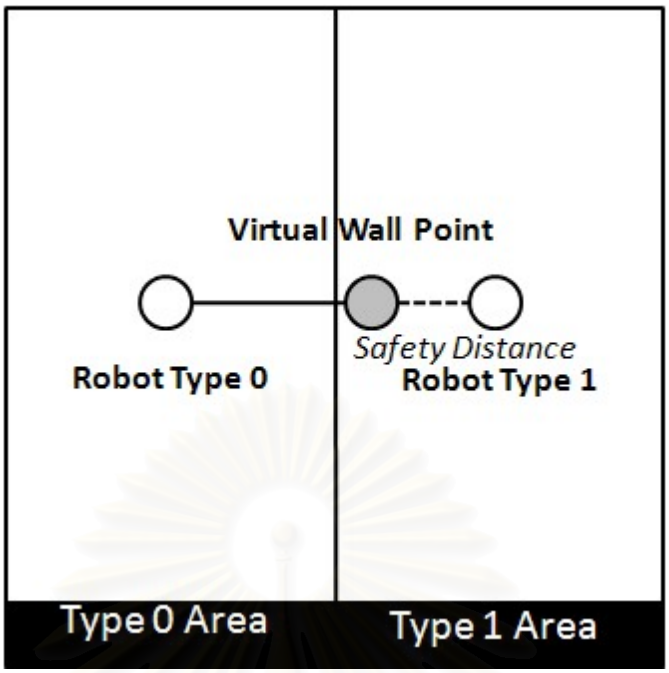
เมื่อหุ่นยนต์อยู่ในพื้นที่ที่ถูกต้องและไม่มีค่าการปนเปื้อนหุ่นยนต์จะพยายามกระจายตัวในบริเวณที่ตนเองรับผิดชอบโดยใช้แผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล แต่การกระจายนั้นอาจทำให้หุ่นยนต์กลับไปอยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้องได้ จึงได้มีการเพิ่มจุดอันตรายและผนังเสมือนเข้ามาเพื่อป้องกันการกลับเข้าสู่พื้นที่ที่ไม่ถูกต้อง รายละเอียดของจุดอันตรายและผนังเสมือนเป็นดังนี้



รูปที่ 4.21: แนวคิดของการปนเปื้อนและการสลายตัว(ก)เมื่อหุ่นยนต์อยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้อง(ข) เมื่อหุ่นยนต์เริ่มเข้าสู่บริเวณที่ถูกต้อง (ค) เมื่อหุ่นยนต์เวลาผ่านไปจนการปนเปื้อนสลายตัวหมด

ผนังเสมือนคือหุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้องแต่เป็นหุ่นยนต์คนละชนิดกับหุ่นยนต์ที่เราสนใจซึ่งหมายความว่าบริเวณที่ต่างชนิดกับบริเวณที่เราสนใจห่างออกไปอย่างน้อยเท่ากับระยะห่างระหว่างหุ่นยนต์ที่เราสนใจกับหุ่นยนต์ตัวนี้ แนวคิดของการเพิ่มผนังเสมือนคือใช้หุ่นยนต์ตัวนี้เป็นส่วนหนึ่งของการคำนวณบริเวณโวโรนอยท้องถิ่นของหุ่นยนต์ตัวที่เราสนใจ ซึ่งทำให้เกิดขอบของบริเวณโวโรนอยขึ้นตรงกลางระหว่างหุ่นยนต์ทั้งสองตัว ซึ่งการเพิ่มผนังเสมือนจะเป็นเหมือนการเพิ่มน้ำหนักการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไปในทิศทางที่ตรงข้ามกับการเคลื่อนที่เข้าหาหุ่นยนต์ที่ต่างชนิดและอยู่ถูกบริเวณนั่นเอง แม้ว่าจะเพิ่มผนังเสมือนดังกล่าวแล้วก็ยังมีโอกาสที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่กลับเข้าไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้องอีก ซึ่งการเคลื่อนที่ไปยังบริเวณพื้นที่ที่ไม่ถูกต้องมีผลเสียมากกว่าการกระจายตัวที่ไม่ดี จึงได้เพิ่ม "ระยะปลอดภัย" เข้าคำนวณในการเพิ่มผนังเสมือนด้วยกล่าวคือ หุ่นยนต์ที่ต่างชนิดและอยู่ถูกบริเวณจะถูกมองเสมือนว่าอยู่ใกล้กับหุ่นยนต์ที่เราสนใจขึ้นอีกเป็นระยะเท่ากับระยะปลอดภัย การเพิ่มระยะปลอดภัยนี้คือการเพิ่มน้ำหนักการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไปในทิศทางที่ตรงข้ามกับการเคลื่อนที่เข้าหาหุ่นยนต์ที่ต่างชนิดและอยู่ถูกบริเวณ แนวคิดของผนังเสมือนเป็นดังรูปที่ 4.22

อีกวิธีการหนึ่งในการลดโอกาสการเคลื่อนที่กลับไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้องคือการใช้การเพิ่ม



รูปที่ 4.22: แนวคิดของผนังเสมือน โดยมองจากมุมมองของหุ่นยนต์ชนิดที่ 0

จุดอันตราย เข้ามาในการคำนวณบริเวณโวโรนอยของหุ่นยนต์ตัวใดๆ แนวคิดของจุดอันตราย คือ ถ้าหุ่นยนต์ตัวใดเคลื่อนที่ผ่านเส้นแบ่งบริเวณสองชนิดที่ต่างกันโดยบริเวณหนึ่งเป็นบริเวณที่ถูกต้องและอีกบริเวณคือบริเวณที่ไม่ถูกต้อง หุ่นยนต์จะจำตำแหน่งของเขตแดนที่มันเคลื่อนผ่านไว้เพื่อไม่ให้เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปอีก โดยจุดอันตรายนี้เกิดได้จากสองกรณี กรณีแรกคือการเคลื่อนที่จากบริเวณที่ถูกต้องไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้อง หุ่นยนต์จะทำการบันทึกตำแหน่งแรกของบริเวณที่ไม่ถูกต้องที่มันได้เคลื่อนที่เข้าไปไว้ในรายการของจุดอันตราย อีกกรณีคือการเคลื่อนที่จากบริเวณที่ไม่ถูกต้องมายังบริเวณที่ถูกต้อง ในกรณีนี้หุ่นยนต์จะบันทึกตำแหน่งสุดท้ายของบริเวณที่ไม่ถูกต้องเข้าสู่รายการของจุดอันตราย การนำข้อมูลจุดอันตรายมาใช้ในการคำนวณบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นจะกระทำโดยให้ เพิ่มจุดที่มีระยะห่างจากหุ่นยนต์ที่สนใจเท่ากับสองเท่าของระยะจากหุ่นยนต์ไปยังจุดอันตราย และมีทิศทางอยู่ทิศทางเดียวกับจุดอันตราย เข้าไปเป็นเพื่อนบ้านของหุ่นยนต์ที่สนใจ การเพิ่มจุดนี้จะทำให้เกิดการเสร้างบริเวณโวโรนอยที่ผ่าน จุดอันตรายนี้จะลดโอกาสที่หุ่นยนต์ตัวนั้นจะกลับเข้าสู่บริเวณที่ไม่ถูกต้องอีก

ดังนั้นการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ในการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไขคือการสร้างบริเวณโวโรนอยท้องถิ่นแบบจุดศูนย์กลางมวลขึ้นโดยใช้เพื่อนบ้านโวโรนอยดังนี้ 1.หุ่นยนต์ชนิดเดียวกันที่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้อง 2. ผนังเสมือน 3. จุดที่สร้างจากจุดอันตรายการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ในการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข จะเป็นไปตามขั้นตอนวิธีที่ที่ 18

จากขั้นตอนวิธีที่ 18 ขั้นตอนวิธีนี้เริ่มต้นด้วยการสร้างเซทว่างของเพื่อนบ้านโวโรนอย ในบรรทัดที่ 2-5 คือการเพิ่มของหุ่นยนต์ ชนิดเดียวกันที่อยู่ถูกบริเวณเข้าไปในเซทนี้ หลังจากนั้นจะเพิ่มกำแพงเสมือน ซึ่งคือหุ่นยนต์ที่อยู่ถูกพื้นที่แต่คนละชนิดกับหุ่นยนต์ที่เราสนใจ โดยการ

Algorithm 18 CoverCorrectArea

```
1: voronoiNeighbor = ∅
2: for each robot i of type t being sensed
3:     if correctArea(i) and sameType(i,thisRobot) then
4:         append i to voronoiNeighbor
5:     }
6:     if CorrectArea(i) and not sameType(i,thisRobot) then
7:         virtualWallPoint = genVirtualWallPoint(i,safetyDistance)
8:         append virtualWallPoint to voronoiNeighbor
9:     }
10: }
11: for all p in dangerPointList
12:     q = genPointSameDirection(p,2*Distance(thisRobot,p))
13:     append q to voronoiNeighbor
14: }
15: voronoiVertex = localVoronoi(voronoiNeighbor)
16: target = centroid(voronoiVertex )
17: moveRobotTo(target)
```

เพิ่มนี้จะไม่ใช่เป็นการเพิ่มตำแหน่งของหุ่นยนต์เข้ามาโดยตรง แต่เป็นตำแหน่งหุ่นยนต์ที่เสมือนใกล้เข้ามาเป็นระยะทาง $safeDistance$ ดังจะเห็นได้ในบรรทัดที่ 7 หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มเพื่อนบ้านโวโรนอยที่เกิดจากจุดอันตราย โดยทำการเพิ่มจุดที่จะก่อให้เกิดขอบโวโรนอยผ่านจุดอันตราย ในทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นเชื่อมระหว่างจุดอันตรายกับหุ่นยนต์ที่เราสนใจ ดังแสดงในฟังก์ชั่น genPointSameDirection ในบรรทัดที่ 12 เมื่อเพิ่มจุดในเซทของเพื่อนบ้านโวโรนอยเรียบร้อยแล้ว จึงทำการสร้างบริเวณโวโรนอยตามขั้นตอนวิธีที่ 4 และเคลื่อนตัวไปยังจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอยนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

ผลการทดลอง

.เนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยผลการทดลองจากขั้นตอนวิธีที่เสนอในบทที่ 4 โดยแบ่งออกเป็น

- การจัดเรียงตัวแบบวงกลม
- การจัดกลุ่มหุ่นยนต์
- การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

5.1 การจัดเรียงตัวแบบวงกลม

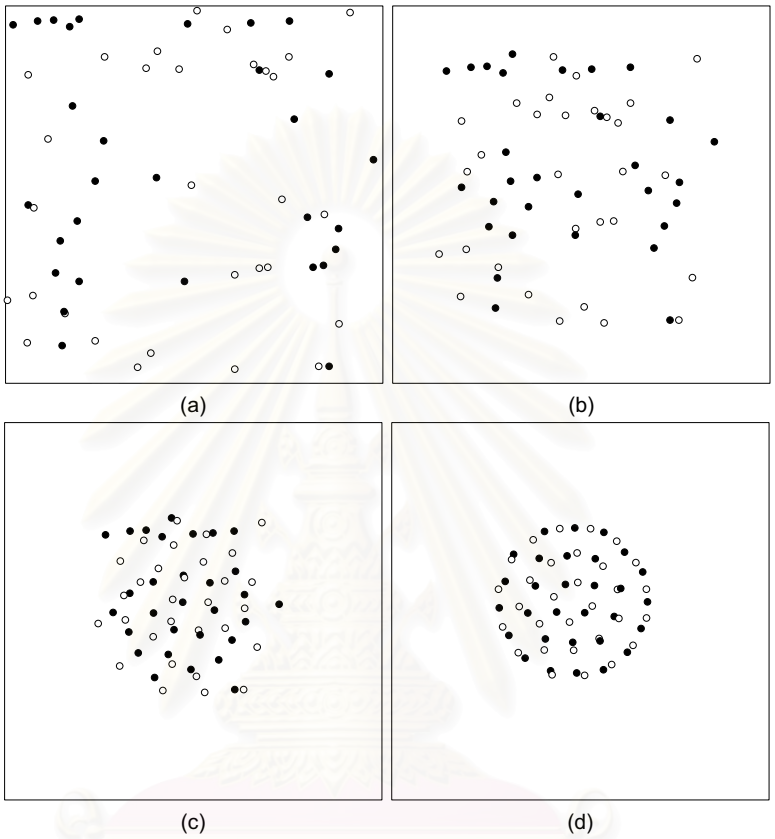
5.1.1 ผลการเรียงตัวแบบวงกลม

การทดลองนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อสังเกตพฤติกรรมของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมภายใต้เงื่อนไขเริ่มต้นที่ต่างกันกล่าวคือ หุ่นยนต์จะเริ่มต้นจากตำแหน่งที่เป็นการสุ่มในพื้นที่การทำงานและเมื่อให้หุ่นยนต์ทำงานไปในระยะเวลาหนึ่งหุ่นยนต์จะจัดเรียงตัวกันเป็นรูปวงกลม การทดลองนี้ใช้พื้นที่การทำงานที่เป็นสี่เหลี่ยมจตุรัสขนาด 400 x 400 ตารางหน่วย โดยใช้หุ่นยนต์ทั้งหมด 60 ตัว แบ่งเป็นสองประเภทประเภทละ 30 ตัวดังแสดงเป็นสีดำและขาวในรูปของหุ่นยนต์แต่ละตัวเท่ากับ 200 หน่วย ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์แต่ละตั่วจะถูกสุ่มทุกครั้ง ในการทดลองนี้ได้กำหนดค่า $K_a = 0.02$, $K_r = 120$

การทดลองในตัวจำลองเหต์การณ์พบว่าหุ่นยนต์จะมารวมกันเป็นวงกลมในบริเวณกลางพื้นที่การทำงานดังแสดงในรูป 5.1 จะเห็นได้ว่าในช่วงเริ่มต้นหุ่นยนตูถูกกระจายแบบสุ่มบนพื้นที่การทำงาน หลุงจากนั้นหุ่นยนต์จะเริ่มเคลื่อนที่เข้าหากันและก่อให้เกิดรูปร่างโดยประมาณ และเมื่อเวลาผ่านไปหุ่นยนต์แต่ละตัวจะเริ่มเคลื่อนที่น้อยลงเรื่อยๆ และเขาสู่สภาวะสมดุลในที่สุด โดยการเรียงตัวของหุ่นยนต์ที่อยู่ติดกันจะใกล้เคียงกับการเรียงสลับชนิดกัน ผลการทดลองจะได้วงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 156

การวัดผลที่ใช้ในการวัดผลของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมในการทดลองนี้มีสองประการคือ การวัดความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นรอบวง และการวัดค่าความกลม การวัดความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นรอบวงคือการวัดความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากหุ่นยนต์ที่อยู่บนเส้นรอบวงของวงกลมไปยังจุดที่เป็นค่าเฉลี่ยของตำแหน่งของหุ่นยนต์ทุกตัวซึ่งในที่นี้เราถือว่าเป็นจุดศูนย์กลาง

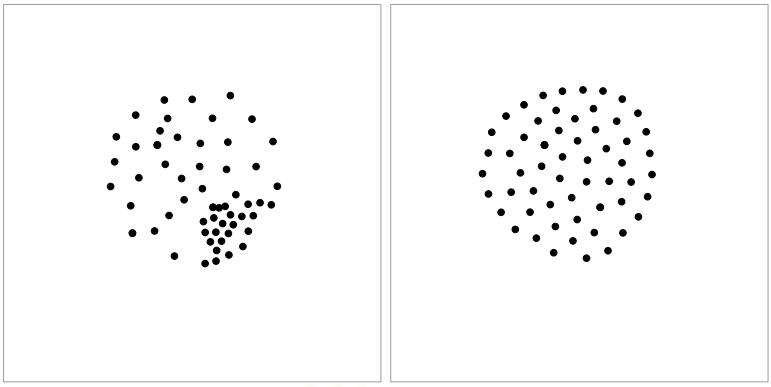
ในการทดลองนี้ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นรอบวงมีค่าเท่ากับ 1.77 ส่วนความกลมนิยามโดยเป็นอัตราส่วนระหว่างความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นรอบวงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่ได้ ค่าความกลมนี้คือการปรับเรียบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของรัศมีหุ่นยนต์บนเส้นรอบวงให้เปรียบเทียบกันได้ระหว่างวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ในการทดลองนี้ได้ค่าความกลมเท่ากับ 0.011



รูปที่ 5.1: ผลการเรียงตัวแบบวงกลม (ก) ที่เวลาเริ่มต้น (ข) ที่เวลา 50 หน่วย (ค) ที่เวลา 100 หน่วย (ง)ที่เวลา 200 หน่วย

งานวิจัยเกี่ยวกับการจัดเรียงตัวแบบวงกลมของกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีอยู่ในขณะนี้คืองานวิจัยของ Sugihara และ Suzuki [40] ซึ่งจะใช้เป็นตัวอ้างอิงในการทดลองการจัดเรียงตัวแบบวงกลม ซึ่งมีวิธีการทำงานคือถ้าเพื่อนบ้านตัวที่ใกล้ที่สุดของหุ่นยนต์นั้นอยู่ไกลกว่าระยะเส้นผ่านศูนย์กลางให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปหาเพื่อนบ้านตัวนั้นมิฉะนั้นหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ออกห่างจากเพื่อนบ้านที่ใกล้ที่สุด ในการทดลงเปรียบเทียบจะให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมของวิธีที่พัฒนาขึ้น และใช้ค่าความเร็วสูงสุดเท่ากันคือ 1 ผลการทดลองเป็นดังแสดงในรูปที่ 5.2

ในการทดลองเริ่มต้นการทำงานของกลุ่มหุ่นยนต์จากตำแหน่งสุ่มบนพื้นที่การทำงาน จากภาพที่ 5.2(ก) ซึ่งเป็นภาพของการทำงานที่เวลา 200 หน่วย จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์เริ่มมีการรวมตัวกันบริเวณกลางพื้นที่การทำงานเป็นรูปร่างวงกลม แต่ยังมีหุ่นยนต์ส่วนบางส่วนกระจุกตัวกันอยู่ในบริเวณหนึ่ง และเมื่อถึงเวลาการทำงานที่ 900 หน่วย ในภาพที่ 5.2(ข) หุ่นยนต์เข้าสู่สภาวะที่ใกล้เคียงรูปร่างวงกลม จากรูปที่ 5.2(ข) ที่เป็นภาพการจัดเรียงตัวเมื่อเวลาผ่านไป 900 หน่วย



(a) (b)

รูปที่ 5.2: ผลการเรียงตัวแบบวงกลม (ก) ที่เวลา 200 หน่วย (ข) ที่เวลา 900 หน่วย

แล้ว จะสังเกตได้ว่าการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์ยังไม่เป็นรูปวงกลมที่สมบูรณ์หากทียบกับรูปที่ 5.1(ง) ที่เวลาผ่านไปเพียง 200 หน่วยเท่านั้น จากข้อสังเกตนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานในการจัดเรียงตัวแบบวงกลมได้เร็วกว่าวิธีการที่เสนอใน [40]ภายใต้ข้อจำกัดเดียวกันคือ ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1 หน่วยต่อหน่วยเวลา และเนื่องจากวิธีการที่เสนอใน [40] ไม่ได้เสนอเงื่อนไขการหยุดการทำงานของการจัดเรียงตัว การเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์นี้จึงเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ ไม่อยู่นิ่ง ในการทดลองนี้ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นรอบวงมีค่าเท่ากับ 37.6738 และค่าความกลมเป็น 0.21 ดังแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 5.1

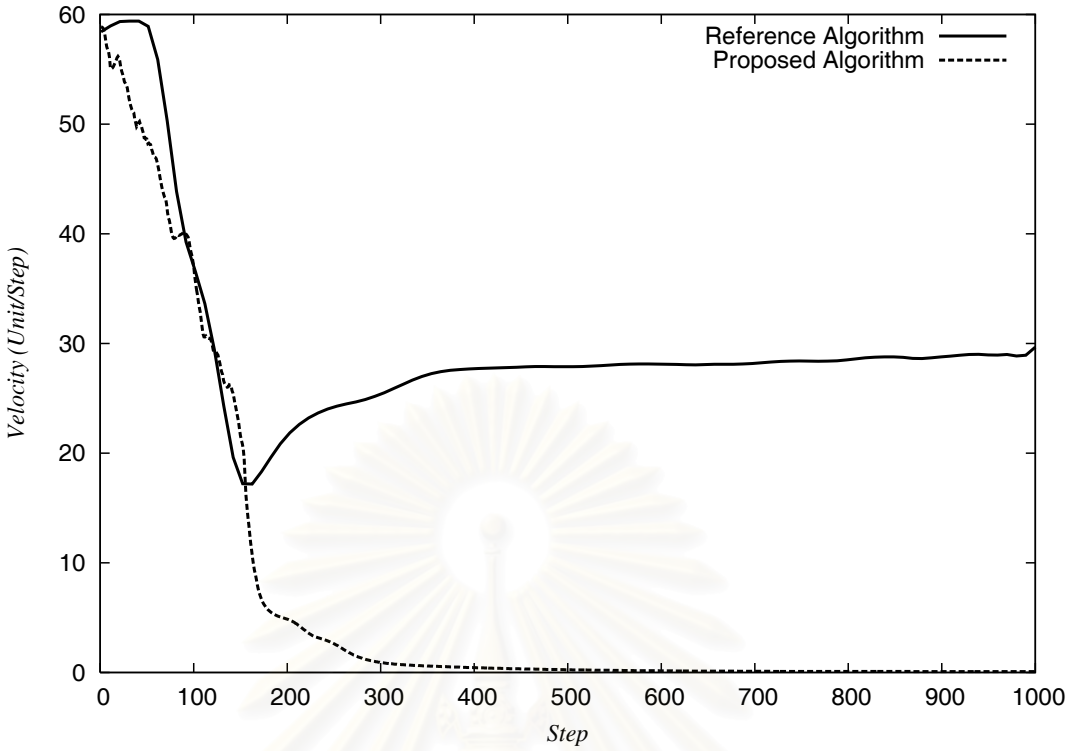
ตารางที่ 5.1: ตารางผลการทดลองการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

วิธีการ	ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของรัศมีหุ่นยนต์บนเส้นรอบวง	ค่าความกลม
วิธีที่พัฒนาขึ้น	1.77	0.011
วิธีการของ Sugihara และ Suzuki [40]	37.6738	0.21

สภาพของหุ่นยนต์ที่เวลาอนันต์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ควรนำมาพิจารณาเนื่องจากหากหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาแม้ในขณะที่เข้าสู่การจัดเรียงตัวแล้วจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการทำงานจริงซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาการทำงานของหุ่นยนต์ ในรูปที่ 5.3 แสดงความเร็วรวมของกลุ่มหุ่นยนต์ซึ่งหมายถึงผลรวมของขนาดความเร็วของหุ่นยนต์ทุกตัวในกลุ่ม จากกราฟจะเห็นได้ว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นมีความเร็วรวมของกลุ่มหุ่นยนต์ที่ค่อยๆลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนวิธีที่ใช้อ้างอิงจะมีควาเร็วรวมที่ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปจะเข้าสู่สถานะที่มีความเร็วคงที่ที่ความเร็วเฉลี่ยครึ่งหนึ่งของความเร็วสูงสุด ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นประสิทธิภาพในการทำงาน

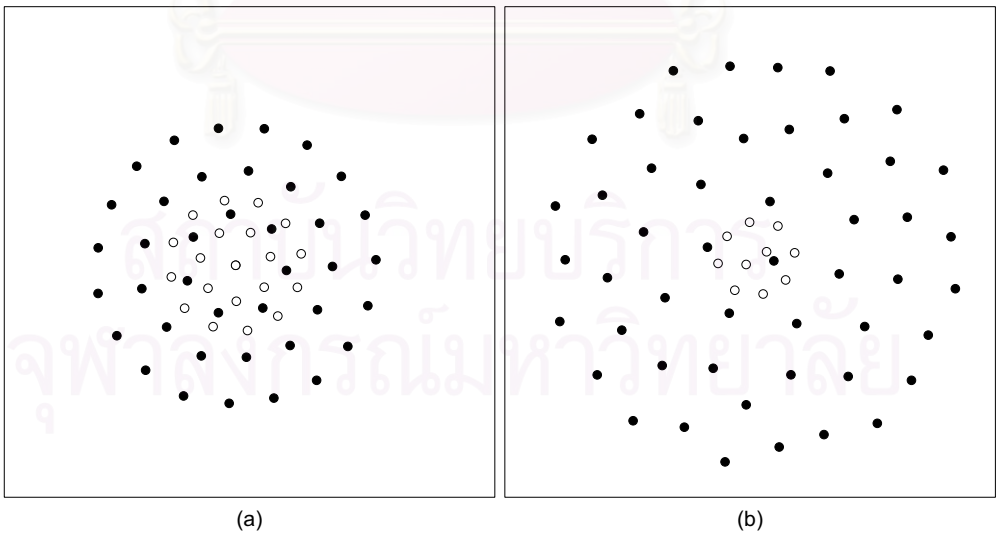
5.1.2 ผลของอัตราส่วนของชนิดของหุ่นยนต์

เนื่องจากวิธีการจัดเรียงตัวแบบวงกลมของหุ่นยนต์ที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้คุณสมบัติของชนิดของหุ่นยนต์เป็นข้อมูลที่ใช้ในการจัดเรียงตัว การเปลี่ยนอัตราส่วนของหุ่นยนต์แต่ละชนิดน่าจะมีผลต่อการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์เช่นกัน



รูปที่ 5.3: แสดงความเร็วรวมของกลุ่มหุ่นยนต์

การทดลองนี้ต้องการศึกษาผลของอัตราส่วนของหุ่นยนต์แต่ละชนิดจึงได้จัดการทดลองดังนี้ การทดลองนี้เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างหุ่นยนต์สองชนิดที่อัตราส่วนจำนวนระหว่างสองชนิดต่างกันคือ 20:40 และ 10:50 ตามลำดับ ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4: ผลของอัตราส่วนของชนิดของหุ่นยนต์ (ก) 20:40 (ข) 10:50

จากการทดลองได้เส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความกลมดังแสดงในตารางที่ 5.2

จะสังเกตได้ว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากอัตรส่วนของหุ่นยนต์ 10:50 มีขนาด

ตารางที่ 5.2: ตารางผลการทดลองอัตราส่วนของชนิดของหุ่นยนต์

อัตราส่วน	เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่ได้	ค่าความกลม
20:40	210	0.017
10:50	320	0.125

ใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่เกิดจากอัตรส่วนของหุ่นยนต์ 20:40 อย่างชัดเจน เนื่องจากหุ่นยนต์แต่ละชนิดจะมีแรงผลักกันระหว่างหุ่นยนต์ชนิดเดียวกันยิ่งมีแรงผลักมากจากจำนวนหุ่นยนต์ชนิดเดียวกันและมีแรงดูดจากหุ่นยนต์ต่างชนิดน้อยจะทำให้หุ่นยนต์ที่มีจำนวนมากนั้นมีระยะห่างกันมากขึ้นจนเป็นเหตุให้วงกลมที่เกิดจากกลุ่มหุ่นยนต์นั้นมีขนาดใหญ่ขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 5.4 (ข) นอกจากนั้นการที่มีแรงดึงผลักมากกว่าแรงดูดมากนั้นจะเริ่มทำให้แรงดูดมีไม่เพียงพอที่จะทำให้กลุ่มหุ่นยนต์คงรูปวงกลมอยู่ได้ซึ่งส่งผลให้กลุ่มหุ่นยนต์มีรูปร่างใกล้เคียงกับวงกลมลดลง

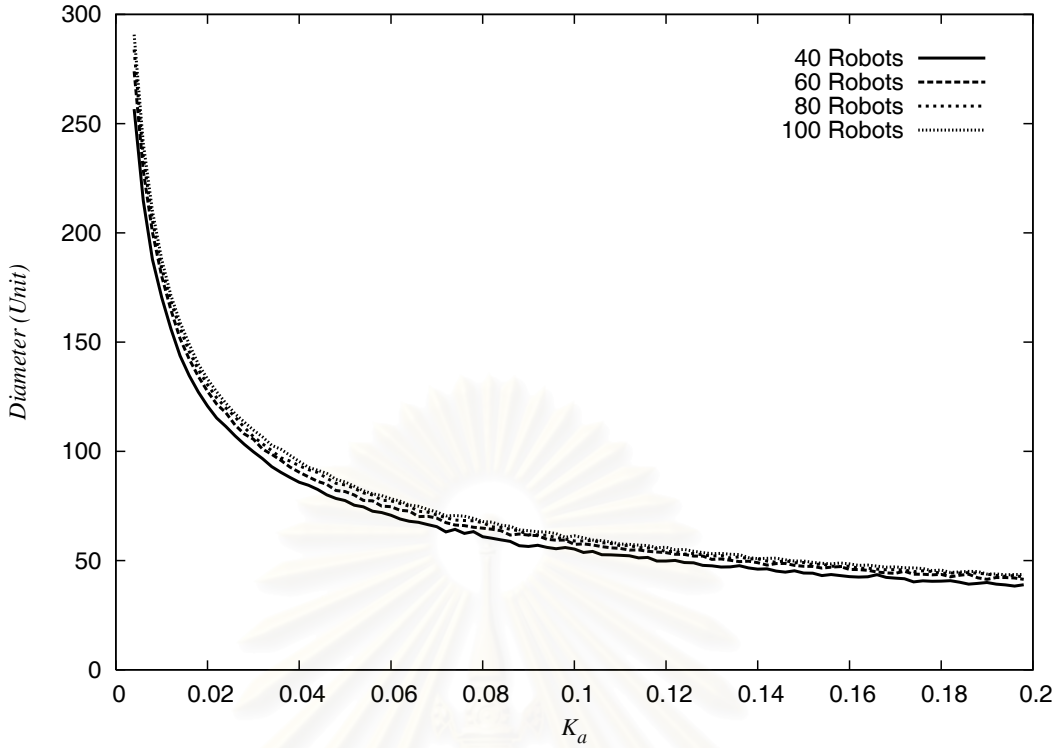
5.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_a และ K_r

จากวิธีการจัดเรียงกลุ่มหุ่นยนต์ที่เสนอใน ตัวแปรที่มีผลต่อการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์คือค่า K_a และ K_r ที่เป็นตัวกำหนดความแรงของแรงดูดและแรงผลัก การทดลองที่กล่าวถึงในหัวข้อนี้จะเป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรทั้งสองต่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่เกิดจากการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์

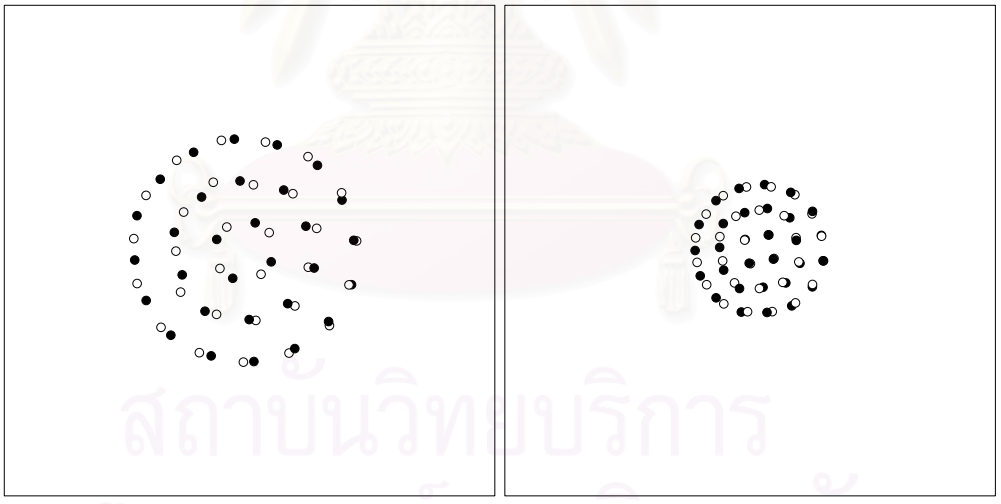
5.1.3.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_a

ในการทดลองนี้จะกำหนดค่า K_r ให้คงที่โดยมีค่าเท่ากับ 80 และเปลี่ยนค่า K_a จากน้อยไปยังมาก การทดลองนี้ทำการทดลองกับกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีจำนวน 40 ,60 ,80 และ 100 ตัวตามลำดับ ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่สร้างขึ้นมีค่าเป็นดังรูปที่ 5.5และผลของการจัดเรียงตัวที่ K_a เท่ากับ 0.01 และ 0.03 แสดงในรูปที่ 5.6

จะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 5.5 ว่าเมื่อเพิ่มค่า K_a จะทำให้กลุ่มหุ่นยนต์ มีการจัดเรียงตัวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลง และแนวโน้มดังกล่าวยังเกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ทุกจำนวนที่ทำการทดลอง ซึ่งพฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ ค่า K_a คือค่าคงที่ของการดูด เมื่อเราให้ค่าคงที่ของแรงผลักคงที่ และเพิ่มค่าคงที่ของแรงดูด ทำให้แรงดูดมีค่าสูงขึ้น หุ่นยนต์จึงเคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากขึ้น เนื่องจากแรงดูดจากหุ่นยนต์ต่างชนิด ในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าใกล้กันนั้นเองแรงผลักจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากระยะทางที่ลดลง ทำให้แรงผลักที่แปรผกผันกับระยะทางมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นยิ่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าใกล้กันมากเท่าไรแรงผลักก็ยิ่งสูงขึ้นจนเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหนึ่ง โดยที่สภาวะสมดุลนี้ กลุ่มหุ่นยนต์จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงจากเดิม



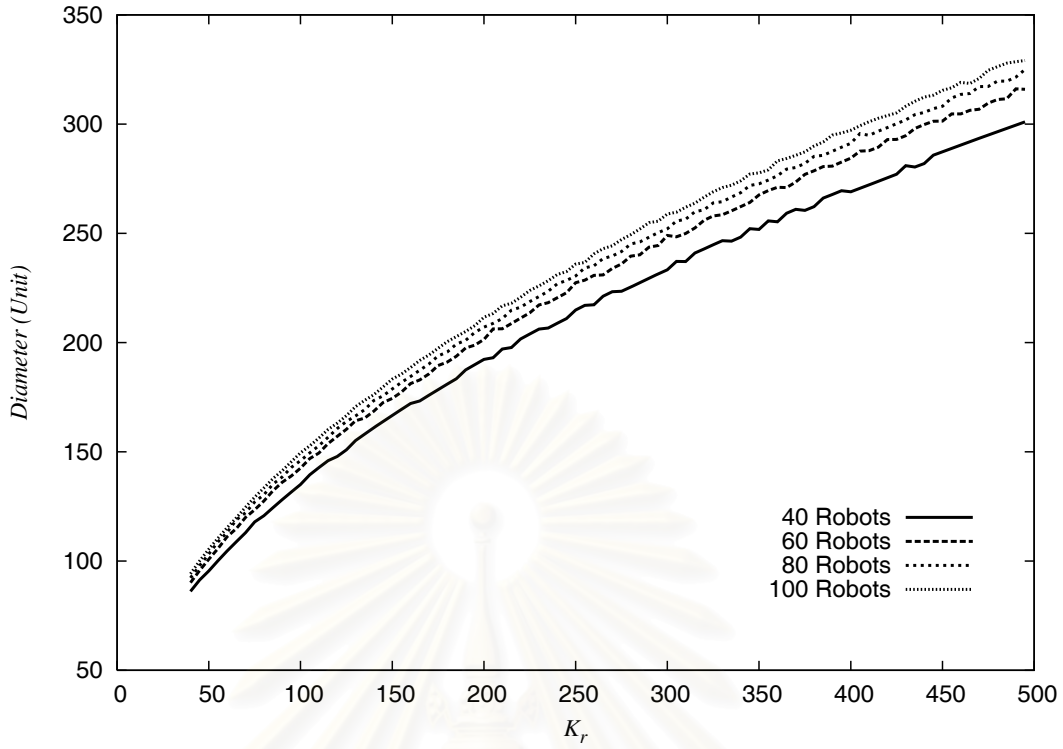
รูปที่ 5.5: แสดงความสัมพันธ์ของ K_a และเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มหุ่นยนต์ที่จำนวน 40 ,60 ,80 และ 100



รูปที่ 5.6: ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_a (ก) $K_a = 0.01$ (ข) $K_a = 0.03$

5.1.3.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงค่า K_r

ในการทดลองนี้จะกำหนดค่า K_a ให้คงที่โดยมีค่าเท่ากับ 0.02 และเปลี่ยนค่า K_r จากน้อยไปยังมาก การทดลองนี้ทำการทดลองกับกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีจำนวน 40 ,60 ,80 และ 100 ตัวตามลำดับ ผลของเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมที่สร้างขึ้นมีค่าเป็นดังรูปที่ 5.7



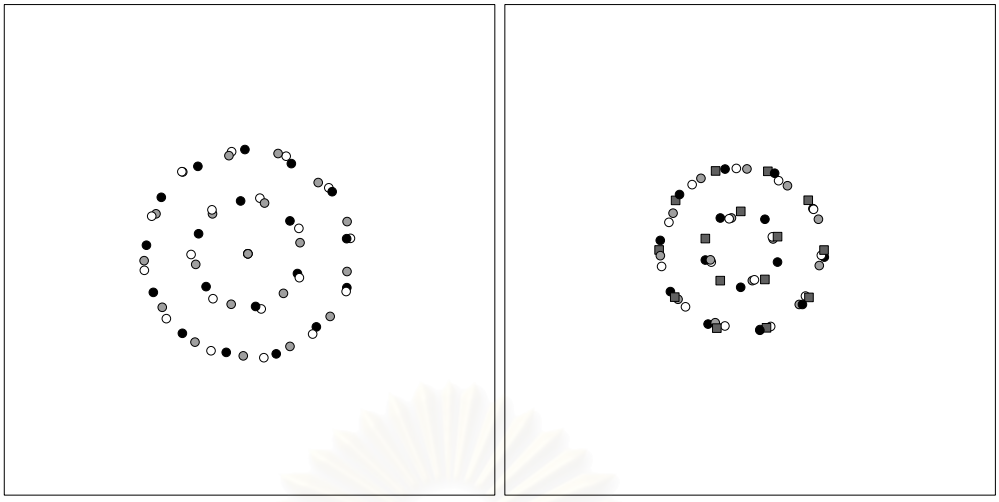
รูปที่ 5.7: แสดงความสัมพันธ์ของ K_r และเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มหุ่นยนต์ที่จำนวน 40 ,60 ,80 และ 100

จะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 5.7 ว่าเมื่อเพิ่มค่า K_r จะทำให้กลุ่มหุ่นยนต์ มีการจัดเรียงตัวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น และแนวโน้มดังกล่าวยังเกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ทุกจำนวนที่ทำการทดลอง พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ เนื่องจากค่าคงที่ของแรงผลัก K_r เพิ่มขึ้นโดยที่ค่าคงที่ของแรงดูดยังคงเท่าเดิม ทำให้แรงผลักระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์มีมากขึ้นหุ่นยนต์จึงเคลื่อนที่ออกห่างจากกันมากขึ้น และเมื่อหุ่นยนต์อยู่ห่างกันมากขึ้นแรงผลักก็จะลดลงพร้อมกับแรงดูดที่มากขึ้นเนื่องจากแรงดูดจะเพิ่ใขึ้นหากระยะทางระหว่างหุ่นยนต์ต่างชนิดกันมีมากขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มหุ่นยนต์ขยายไปเรื่อยๆ จะถึงจุดที่แรงเหล่านี้สมดุลกันอีกครั้งหนึ่งและจะไม่ขยายตัวต่อไปอีก

5.1.4 ผลของการเพิ่มจำนวนชนิดของหุ่นยนต์

การเพิ่มจำนวนชนิดของหุ่นยนต์มีผลต่อการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์ การทดลองนี้ทำเพื่อศึกษาว่าชนิดของหุ่นยนต์มีผลอย่างไรต่อการจัดเรียงตัวโดย ทำการทดลองกับหุ่นยนต์ 3 และ 4 ชนิดในหนึ่งกลุ่มที่มีสมาชิกรวม 60 ตัวและใช้ค่า K_a และ K_r เท่ากับ 0.02 และ 250 ตามลำดับ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.8

จากผลการทดลองในรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มจำนวนชนิดหุ่นยนต์ขึ้นขนาดของกลุ่มหุ่นยนต์จะลดลง เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มกลุ่มหุ่นยนต์โดยที่จำนวนหุ่นยนต์ทั้งหมดยังเท่าเดิม แสดงว่าจำนวนหุ่นยนต์ชนิดเดียวกับหุ่นยนต์ตัวหนึ่งๆ จะน้อยลงและจำนวนหุ่นยนต์ชนิดเดียวกันจะ



รูปที่ 5.8: ผลของการเปลี่ยนจำนวนชนิดของหุ่นยนต์ (ก) 3 ชนิด (ข) 4 ชนิด

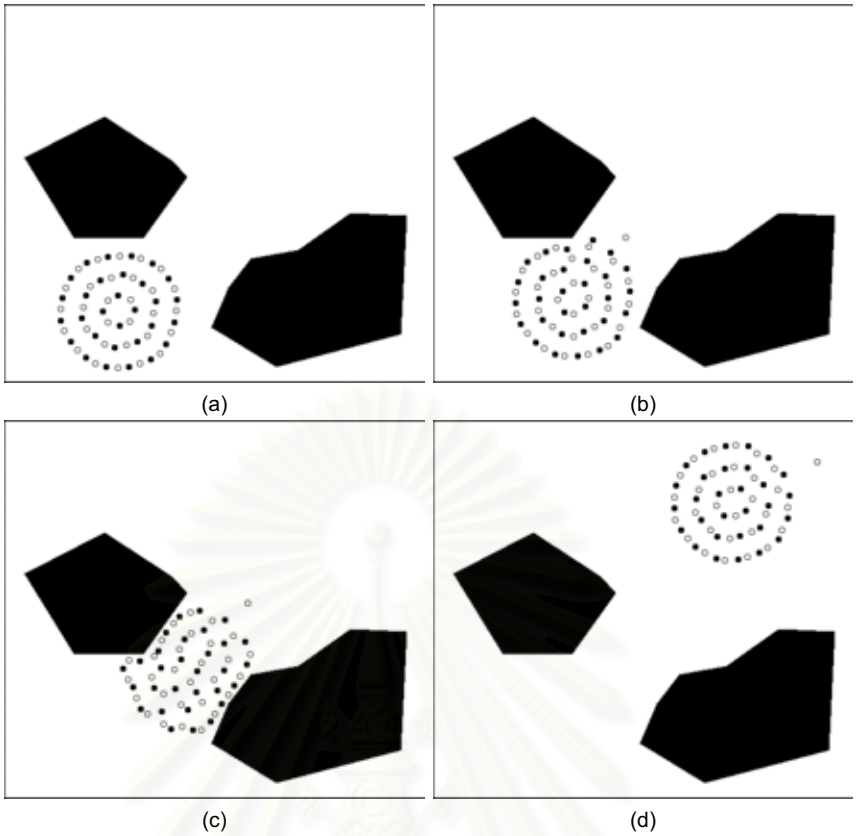
เพิ่มขึ้น นั่นหมายความแรงดูดที่กระทำต่อหุ่นยนต์จะสูงขึ้นและแรงผลักจะต่ำลง จึงส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของกลุ่มหุ่นยนต์ลดลง พฤติกรรมนี้ทำให้เห็นว่า เราสามารถควบคุมขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางได้ในทางอ้อมได้อีกวิธีหนึ่งโดยผ่าน การเพิ่มหรือลดชนิดของกลุ่มหุ่นยนต์ เมื่อมองในแง่การใช้งานจริงก็สามารถทำได้ง่าย เช่นการเติมหุ่นยนต์ชนิดใหม่ลงไป โดยไม่จำเป็นต้องเรียกหุ่นยนต์ทั้งหมดกลับมาตั้งค่า K_a, K_r ใหม่

5.1.5 ผลของการเคลื่อนที่พร้อมกับการคงการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

การทดลองนี้แสดงถึงการทำงานของวิธีการการเคลื่อนที่พร้อมกับการคงการจัดเรียงตัวแบบวงกลมที่เสนอเป็นส่วนขยายของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมธรรมดาโดยการทดลองนี้มีหุ่นยนต์จำนวน 60 ตัวแบ่งเป็นสองชนิดและมีหุ่นยนต์ตัวหนึ่งที่ได้กำหนดทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ไว้แล้ว ผลของการทำงานเป็นดังแสดงในรูปที่ 5.9

ผลการทดลองที่แสดงในภาพที่ 5.9 แสดงถึงหุ่นยนต์เคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดกวาง โดยมีหุ่นยนต์ตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นหุ่นยนต์นำทาง โดยใน (ก) แสดงถึงเวลาที่หุ่นยนต์นำทางเริ่มเคลื่อนที่ ในรูปที่ (ข) แสดงถึงกลุ่มหุ่นยนต์เริ่มเคลื่อนที่ผ่านสิงกีดขวาง จะเห็นว่าในภาพนี้หุ่นยนต์นำทางจะแยกตัวออกมาอย่างชัดเจนแล้ว และกลุ่มหุ่นยนต์ที่เหลือ มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเนื่องจากสมดุลแรงที่เปลี่ยนไปจากแรงที่เกิดขึ้นจากสิ่งกีดขวาง ในรูปที่ (ค) แสดงให้เห็นว่ากลุ่มหุ่นยนต์จะเปลี่ยนรูปร่างไปเพื่อให้ผ่านสิ่งกีดขวางไปได้ และในรูปที่ (ง) แสดงกลุ่มหุ่นยนต์ที่ผ่านออกจากสิ่งกีดขวางมาแล้ว กลับมาอยู่ในรูปร่างวงกลมเช่นเดิม

พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ เมื่อมีหุ่นยนต์ตัวใดตัวหนึ่งเคลื่อนที่ ตามทิศทางที่กำหนดไว้โดยไม่คำนวณแรงตามที่หุ่นยนต์ตัวอื่นๆ ทำ หุ่นยนต์นำทางตัวนี้จึงเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่กำหนดโดยไม่สนใจว่าหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ จะมีการเคลื่อนที่อย่างไร ส่วนหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ จะ



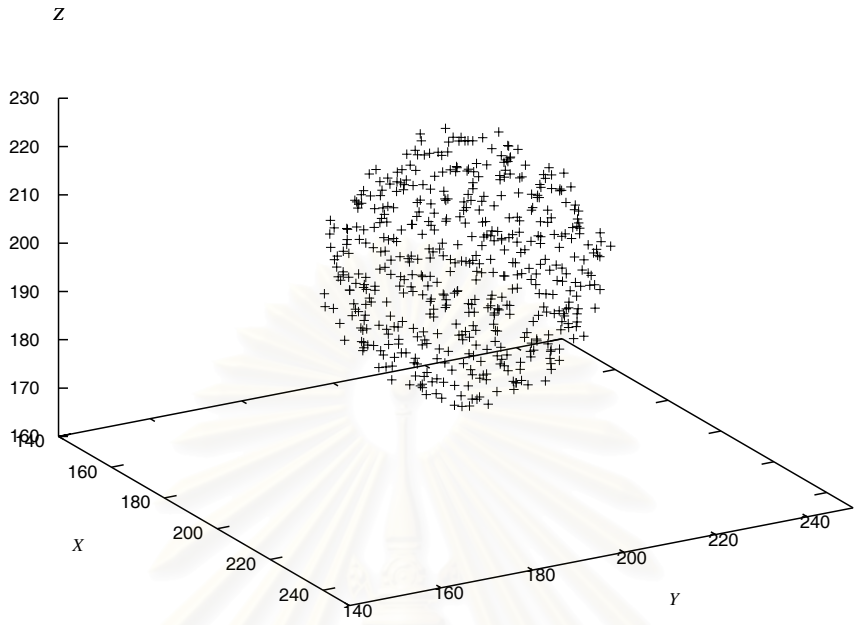
รูปที่ 5.9: ผลของการเคลื่อนที่พร้อมกับการคงการจัดเรียงตัวแบบวงกลม (ก) ที่เวลา 160 (ข) ที่เวลา 1200 หน่วย (ค) ที่เวลา 2200 หน่วย (ง)ที่เวลา 5000 หน่วย

รับรู้ว่าหุ่นยนต์ตัวนี้เป็นเหมือนกับหุ่นยนต์ทั่วไป จึงคำนวณแรงจากหุ่นยนต์นำทางเช่นเดียวกับจากหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ หุ่นยนต์เหล่านั้นจึงพยายามปรับสมดุลเข้าหาหุ่นยนต์นำทาง และในขณะเดียวกันหุ่นยนต์นำทางก็มีการเคลื่อนที่ไปด้วย สมดุลที่ปรับเข้าหาจึงเคลื่อนที่ไปด้วย นี่เป็นเหตุให้กลุ่มหุ่นยนต์รูปวงกลมเดินทางตามหุ่นยนต์นำทางไปได้ และเมื่อหุ่นยนต์พบกับสิ่งกีดขวางแรงจากสิ่งกีดขวางจะทำให้รูปร่างของหลุ่มหุ่นยนต์เปลี่ยนไปและรูปร่างจะกลับเป็นดังเดิมเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน อย่างไรก็ตามหากหุ่นยนต์นำทางเคลื่อนที่เร็วกว่าที่สมดุลของหลุ่มหุ่นยนตที่เหลือจะปรับได้ทัน หุ่นยนต์นำทางจะเคลื่อนที่ไปไกลกว่าระยะการรับรู้ของกลุ่มหุ่นยนต์ที่เหลือซึ่งจะทำให้กลุ่มหุ่นยนต์ที่เหลือไม่สามารถเคลื่อนที่ตามไปได้อีกต่อ การตั้งค่าความเร็วของหุนยนต์นำทางจึงเป็นอีกเรื่องที่มีคามสำคัญต่อการเคลื่อนที่พร้อมกับการคงการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

5.1.6 ผลของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมในสามมิติ

การทดลองนี้แสดงถึงการทำงานของของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมในสามมิติที่เสนอเป็นส่วนขยายของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมธรรมดา โดยการทดลองนี้มีหุ่นยนต์จำนวน 60 ตัวแบ่งเป็นสองชนิดและมีหุ่นยนต์ตัวหนึ่งที่ได้กำหนดทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่ไว้แล้ว ผลของการทำงานเป็นดังแสดงในรูปที่ 5.10 ในการทดลองหุ่นยนต์จะเริ่มจากตำแหน่งแบบสุ่มในสามมิติ หุ่นยนต์จะคล่อยๆ เคลื่อนที่เข้าหากันเรื่อย ๆ จนหยุดที่ตำแหน่งที่สัณฐานของกลุ่มหุ่นยนต์ดัง

แสดงในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10: ผลของการจัดเรียงตัวแบบวงกลมในสามมิติ

จะเห็นได้จาก 5.10 ว่าหุ่นยนต์จัดเรียงกันเป็นรูปทรงกลมในสามิติ ซึ่งรูปทรงกลมนี้เกิดจากผลเช่นเดียวกับรูปวงกลมคือสภาวะสมดุลของทั้งแรงดูดและแรงผลักที่กระทำต่อหุ่นยนต์ตัวหนึ่ง ๆ การทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทำงานของขั้นตอนการจัดเรียงตัวแบบวงกลมในการประยุกต์กับสภาพการทำงานแบบสามมิติ

5.1.7 สรุปผลการทดลองการจัดเรียงตัวแบบวงกลม

ผลที่ได้จากวิธีการจัดเรียงตัวแบบวงกลม คือหุ่นยนต์ที่กระจายตัวอยู่แบบสุ่ม จะค่อยๆ เข้ามารวมตัวกันเป็นวงกลม โดยอาศัยแรงดูดจากหุ่นยนต์ที่ต่างชนิดและแรงผลักจากหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน เมื่อเวลาผ่านไปการเคลื่อนที่ของกลุ่มหุ่นยนต์จะน้อยลง จนถึงเข้าสู่สภาวะสมดุลในที่สุด ในสภาพสมดุลนี้แรงลัพธ์ที่กระทำต่อหุ่นยนต์แต่ละตัวจะมีค่าใกล้เคียงศูนย์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอ้างอิงของ Sugihara และ Suzuki วิธีที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพดีกว่าทั้งในด้านของความเร็วในการทำงานและประสิทธิภาพในการทำงาน กล่าวคือ วิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถเข้าสู่การจัดเรียงตัวแบบวงกลมได้เร็วกว่าภายใต้ข้อจำกัดความเร็วสูงสุดที่เท่ากัน ซึ่งหมายความว่าหากใช้หุ่นยนต์ที่มีคุณสมัติเดียวกันขั้นตอนวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถทำงานได้เร็วกว่าวิธีอ้างอิง และเมื่อทำงานต่อไปเรื่อยๆ แนวโน้มความเร็วของหุ่นยนต์แต่ละตัวของวิธีที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ส่วนวิธีการอ้างอิงจะมีค่าอยู่ที่ประมาณครึ่งหนึ่งของความเร็วสูงสุด ซึ่งหมายความว่าการทำงานของวิธีที่เสนอนั้นจะประหยัดพลังงานมากกว่าเมื่อใช้งานจริง เพราะหุ่นยนต์ไม่ต้องเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา

ในขณะที่เข้าสู่สภาพวงกลมแล้ว ส่วนความกลมของวงกลมวิธีการที่เสนอสามารถให้ผลลัพธ์ของการจัดเรียงตัวที่มีความกลมมากกว่าอย่างชัดเจน ผลของการทำงานที่มีเสถียรภาพและมีคุณภาพดีกว่านั้นเนื่องมาจาก ในวิธีการที่พัฒนาขึ้น หุ่นยนต์จะใช้ข้อมูลจากหุ่นยนต์ทุกตัวที่อยู่ในระยะการรับรู้ ต่างจากวิธีอ้างอิงที่ใช้เพียงตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ไกลที่สุดหรือใกล้ที่สุดเท่านั้น ทำให้ธรรมชาติความต่อเนื่องในการทำงานของวิธีอ้างอิงมีน้อยกว่าวิธีที่พัฒนาขึ้น จึงส่งผลต่อความกลมของวงกลมที่ได้มีค่าต่ำกว่าไปด้วย และบางครั้งยังก่อให้เกิดรูปร่างของสามเหลี่ยมเลอลองซ์แทนที่จะเป็นวงกลมอีกด้วย และเนื่องจากวิธีการ อ้างอิงใช้ค่าจากหุ่นยนต์เพียงตัวเดียวเช่นหุ่นยนต์ตัวที่ไกลที่สุดหรือใกล้ที่สุด การเปลี่ยนแปลงหุ่นยนต์ที่ใช้อ้างอิงนั้น ย่อมก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และวิธีการอ้างอิงนี้มีโอกาสที่จะเปลี่ยนหุ่นยนต์อ้างอิงได้บ่อยจึงทำให้ที่สภาวะสมดุลของการจัดเรียงตัวหุ่นยนต์แต่ละตัวจึงยังมีการเคลื่อนที่อยู่ ต่างจากวิธีที่พัฒนาขึ้นที่ใช้ข้อมูลจากหุ่นยนต์ทุกตัวที่อยู่ในพื้นที่การทำงาน การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เกิดจากการรวมแรงจากหุ่นยนต์ทุกตัวหากมีหุ่นยนต์ตัวใดในพื้นที่รับรู้เคลื่อนที่ ก็จะไม่ส่งผลมากนักกับหุ่นยนต์ตัวที่สนใจ ซึ่งเมื่อหุ่นยนต์ส่วนใหญ่เคลื่อนที่น้อยลงก็จะเหนี่ยวนำให้หุ่นยนต์อื่นๆ เคลื่อนที่น้อยลงจนเข้าสู้สภาวะสมดุลที่หุ่นยนต์แต่ละตัวแทบไม่เคลื่อนที่เลย ดังแสดงในผลการทดลองแล้วว่าผลรวมของขนาดความเร็วมีค่าใกล้เคียงศูนย์

การควบคุมขนาดและลักษณะของวงลกมนั้นสามารถทำได้หลายวิธี วิธีที่เห็นได้ชัดที่สุดคือการเพิ่มและลดค่าคงที่การดูดและการผลัก (K_a, K_r) ซึ่งมีผลต่อขนาดแรงชนิดนั้นๆโดยตรง เมื่อแรงผลักมากขึ้นเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมก็มากขึ้น ในทางกลับกันถ้าแรงดูดมากขึ้นเส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมก็จะลดลง วิธีการเปลี่ยนขนาดของวงกลมด้วยการแก้ไขค่าคงที่นี้ ต่างจากการเปลี่ยนแปลงขนาดขิงวิธีอ้างอิง เนื่องจากวิธีอ้างอิงได้ใช้คุณลักษณะของวงกลมโดยตรงในขั้นตอนการทำงาน ส่วนการเกิดวงกลมของวิธีที่พัฒนาขึ้นเกิดจากพฤติกรรมกลุ่ม (Collective behavior) ดังนั้นการควบคุมจึงต้องทำผ่านตัวแปรที่มีผลต่อพฤติกรรมย่อยๆของหุ่นยนต์แต่ละตัว ในที่นี้จะเห็นได้ว่าค่า K_a,K_r เป็นตัวแปรที่เหมาะสมที่จะใช้ในการปรับพฤติกรรมย่อยดังกล่าว ส่วนการเปลี่ยนแปลงจำนวนชนิดของหุ่นยนต์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนของแรงดูดและแรงผลัก ซึ่งทำให้แรงลัพธ์ที่ทำต่อหุ่นยนต์เปลี่ยนไป เช่นเมื่อเพิ่มจำนวนชนิดอัตราส่วนแรงดูดจะมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ขนาดของวงกลมที่ได้เล็กลงเป็นต้น

ปัญหาการคงรูปร่างของการจัดเรียงตัวเป็นอีกหนึ่งปัญหาที่ได้รับความสนใจในการวิจัยด้านการจัดเรียงตัว วิธีการจัดเรียงตัวแบบวงกลมที่เสนอในที่นี้สามารถคงรูปร่างของการจัดเรียงตัวระหว่างการเคลื่อนที่ได้ โดยอาศัยการเหนี่ยวนำความสมดุลของกลุ่มด้วยหุ่นยนต์นำทาง จะเห็นได้ว่ากลุ่มหุ่นยนต์สามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางและสามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมได้ หลังจากผ่านสิ่งกีดขวางไปแล้ว แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีนี้มีความยืดหย่นในการประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการการเคื่อนที่ได้ด้วย ความยืดหยุ่นของขั้นตอนวิธีนี้ได้แสดงให้เห็นในอีกด้านหนึ่งในการจัดเรียงตัวในสามมิติ ซึ่งแสดงว่าหุ่นยนต์สามารถใช้ขั้นตอนวิธีเดิมในการจัดเรียงตัวได้ทั้งในสามมิติ ความสามารถนี้อาจมีประโยชน์ในการจัดเรียงตัวของ ยานอัตโนมัติใต้น้ำ หรือ

อากาศยานอัตโนมัติต่างๆ ได้

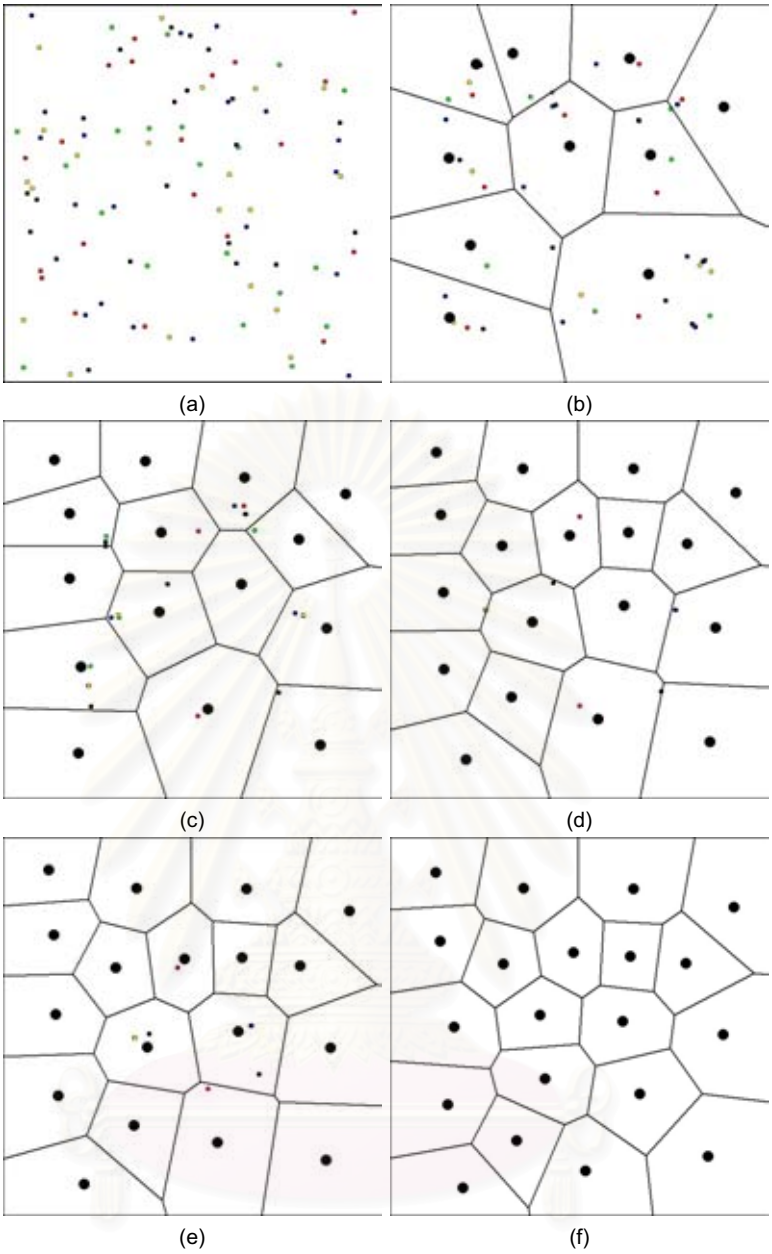
5.2 การจัดกลุ่ม

5.2.1 ผลการจัดกลุ่มของกลุ่มหุ่นยนต์

การทดลองนี้แสดงถึงลักษณะการทำงานทั่วไปของการจัดกลุ่มหุ่นยนต์ โดยการทดลองนี้ประกอบด้วยหุ่นยนต์จำนวน 100 ตัว แบ่งออกเป็น 5 ชนิด ชนิดละ 20 ตัว ทำงานในพื้นที่การทำงานมีขอบขนาด 400 x 400 ตารางหน่วย รัศมีการจัดกลุ่ม (R_{group}) มีความยาว 50 หน่วย และความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ 1 หน่วยต่อหน่วยเวลา ค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์แต่ละตัวถูกตั้งให้เท่ากันหมดทุกตัวโดยมีค่าเท่ากับ 160 หน่วย ทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้งแล้วเฉลี่ยจำนวนของกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบ ผลการทำงานของวิธีการทำงานแสดงในรูปที่ 5.11 ซึ่งแสดงบริเวณโวโรนอยของกลุ่มหุ่นยนต์แต่ละกลุ่มด้วยเส้นสีดำ จะเห็นได้ว่าในรูปที่ 5.11(ข) หุ่นยนต์แต่ละชนิดเริ่มมีการกระจายตัวกันเทียบกับชนิดของตนเอง และหุ่นยนต์บางส่วนได้จัดตัวกันเป็นกลุ่มสมบูรณ์แล้วซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่ามีจำนวน 10 กลุ่ม ในรูปที่ 5.11(ค) กลุ่มที่สมบูรณ์เริ่มมีจำนวนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกระจายตัวกันของหุ่นยนต์แต่ละชนิดเปิดโอกาสให้หุ่นยนต์พบกับหุ่นยนต์ต่างชนิดได้เพิ่มขึ้น ในขณะเดียวกันกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบแล้วก็จะเริ่มกระจายตัวออกจากกัน ในรูปที่ 5.11(ง) แสดงถึงกลุ่มหุ่นยนต์ที่สมบูรณ์มีจำนวนเกือบครบจำนวนที่เป็นไปได้แล้ว และเหลือหุ่นยนต์ที่เป็นอิสระอยู่จำนวนไม่มากนักแต่อยู่ห่างกันเกินกว่าระยะ R_{sense} ซึ่งแสดงว่าหากปราศจากกลไกที่เข้ามานำทางหุ่นยนต์อิสระเหล่านี้ไปพบสมาชิกในกลุ่ม หุ่นยนต์เหล่านี้จะไม่สามารถเข้าเป็นสมาชิกของกลุ่มได้เลย ในรูปที่ 5.11(จ) แสดงให้เห็นหุ่นยนต์ที่ยังไม่มีกลุ่มเดินทางมาตามการนำทางเพื่อไปยังจุดนัดพบ และรูปที่ 5.11(ฉ) แสดงภาวะที่หุ่นยนต์ทุกตัวมีกลุ่มเรียบร้อยแล้ว

กลุ่มที่มีสมาชิกครบจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนกลุ่มที่มีสมาชิกครบกับเวลาของการจำลองเหตุการณ์ ซึ่งจะเห็นว่าจำนวนกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทำงานและมาสู่ช่วงที่ไม่มีกลุ่มที่มีสมาชิกครบเกิดขึ้นใหม่เลย แต่หลังจากผ่านช่วงความมั่นใจแล้วการประมูลแบบท้องถิ่นจะเกิดขึ้นและนำหุ่นยนต์มาพบกันจนครบกลุ่มในช่วงท้ายของการทำงาน

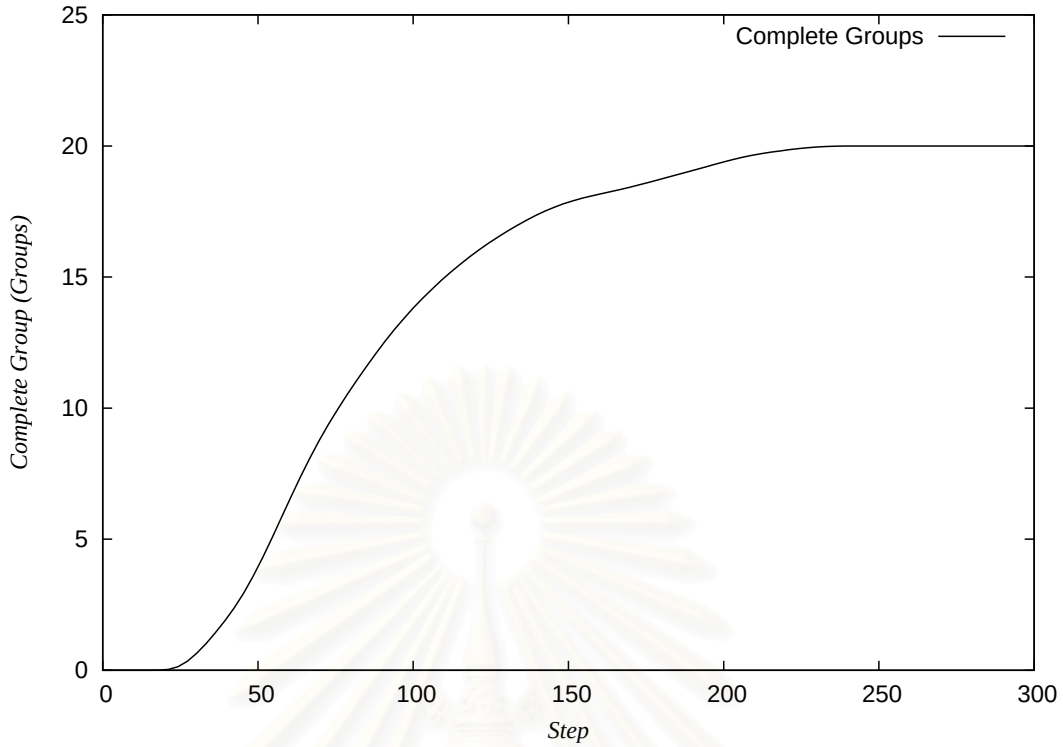
พื้นที่บริเวณโวโรนอยของกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบจะเปลี่ยนตามการวางตัวของหุ่นยนต์ ยิ่งกลุ่มหุ่นยนต์มีการกระจายตัวดีเท่าใดพื้นที่บริเวณโวโรนอยของกลุ่มหุ่นยนต์จะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น ความสัมพันธ์ของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยกับเวลาเป็นไปตามรูปที่ 5.13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งหมายความว่าการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์จะสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



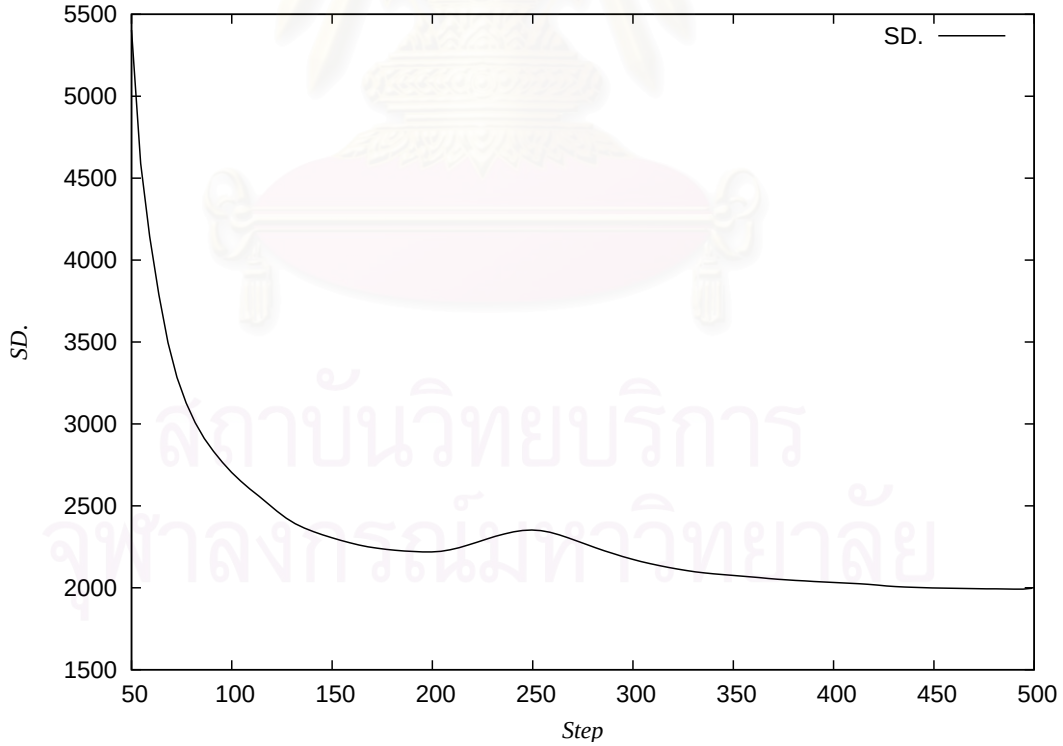
รูปที่ 5.11: ผลการจัดกลุ่มของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) ที่เวลาเริ่มต้น (ข) ที่เวลา 50 หน่วย (ค) ที่เวลา 100 หน่วย (ง)ที่เวลา 150 หน่วย (ต)ที่เวลา 200 หน่วย (ฉ)ที่เวลา 300 หน่วย

5.2.2 ผลของค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์ต่อการจัดกลุ่ม

การทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงผลของความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์แต่ละตัวต่อการจัดกลุ่มของหุ่นยนต์ โดยการทดลองนี้ประกอบด้วยหุ่นยนต์จำนวน 100 ตัว แบ่งออกเป็น 5 ชนิด ชนิดละ 20 ตัว ทำงานในพื้นที่การทำงานมีขอบขนาด 400 x 400 ตารางหน่วย รัศมีการจัดกลุ่ม (R_{group}) มีความยาว 50 หน่วย และความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ 1 หน่วยต่อหน่วยเวลา ค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์แต่ละตัวจะถูกตั้งให้เท่ากันหมดและถือเป็นตัวแปรต้นในการทดลองนี้ ค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์จะถูกเปลี่ยนและทำการจำลองเหตุการณ์ใหม่และทำซ้ำไปเรื่อยๆ ในการจำลองเหตุกาณ์แต่ละครั้งใช้เวลา 500 หน่วย ผลการทดลองเป็นดังนี้



รูปที่ 5.12: ความสัมพันธ์ของจำนวนกลุ่มที่มีสมาชิกครบกับเวลา

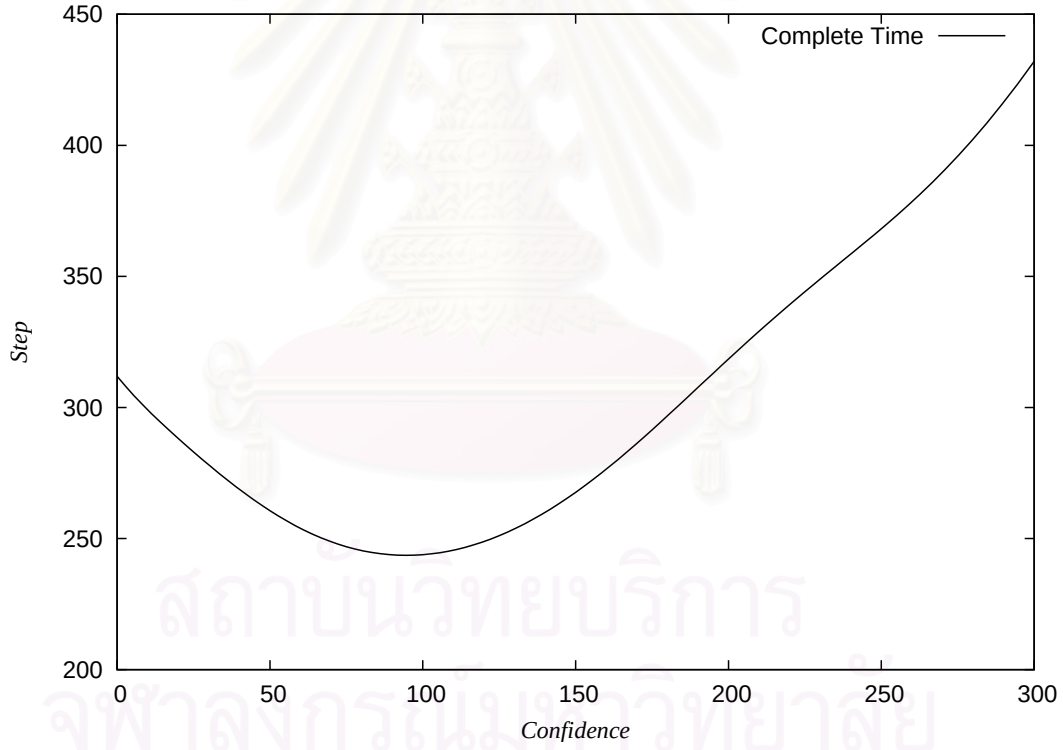


รูปที่ 5.13: ความสัมพันธ์ของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยกับเวลา

5.2.2.1 ผลของค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์ต่อระยะเวลาที่ใช้ในการทำงาน

การทดลองย่อยนี้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำงาน ระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานในที่นี้หมายถึงจำนวนขั้นของการจำลองเหตุการณ์ที่

ใช้กระทั่งหุ่นยนต์ทุกตัวมีกลุ่มและกลุ่มทุกกลุ่มมีสมาชิกครบทุกชนิด ความสัมพันธ์ระหว่างความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำงานแสดงในรูปที่ 5.14 จากกราฟจะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่ใช้มีแนวโน้มที่ลดลงจนถึงจุดต่ำสุดที่ค่าความมั่นใจประมาณ 120 และต่อจากนั้นมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ซึ่งแนวโน้มของกราฟสามารถอธิบายได้ดังนี้ ช่วงแรกที่เวลาที่ใช้มีแนวโน้มต่ำลงเนื่องจากการที่หุ่ยนต์มีโอกาสกระจายตัวกันมากขึ้นเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน กล่าวคือถ้าหุ่นยนต์มีความมั่นใจต่ำหุ่นยนต์จะหยุดการกระจายตัวแล้วเข้าสู่ช่วงการรอรับคำสั่งจากผู้ที่ชนะประมูลซึ่งถ้าเข้าสู่สภาวะนี้เร็วเกินไปจะเสียโอกาสที่หุ่นยนต์จะสามารถพบกลุ่มได้ด้วยตัวเอง และในขณะที่หุ่นยนต์มีการกระจายตัวยังไม่สม่ำเสมอหุ่นยนต์จำเป็นต้องเดินทางไกลกว่ากรณีที่มีการกระจายสม่ำเสมอแล้ว นี่จึงเป็นสาเหตุของเวลาในการทำงานที่สูงในช่วงแรก และเวลานี้จะค่อยๆ ลดลงเนื่องจากหุ่นยนต์มีการกระจายตัวกันดีขึ้น ณ. เวลาที่หุ่นยนต์เปลี่ยนจากการกระจายตัวเป็นการรอรับคำสั่ง ส่วนเวลาที่เพิ่มขึ้นในช่วงหลัง เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่หุ่นยนต์นั้นพยายามจัดกลุ่มด้วยตัวเองจนไม่สามารถจัดกลุ่มได้เพิ่มอีกภายใต้ระยะของ R_{sense} แล้ว การรอคอยการจัดกลุ่มให้สำเร็จด้วยตัวเองต่อไปย่อมทำให้หุ่นยนต์ใช้เวลานานขึ้นไปอีกโดยไม่จำเป็น

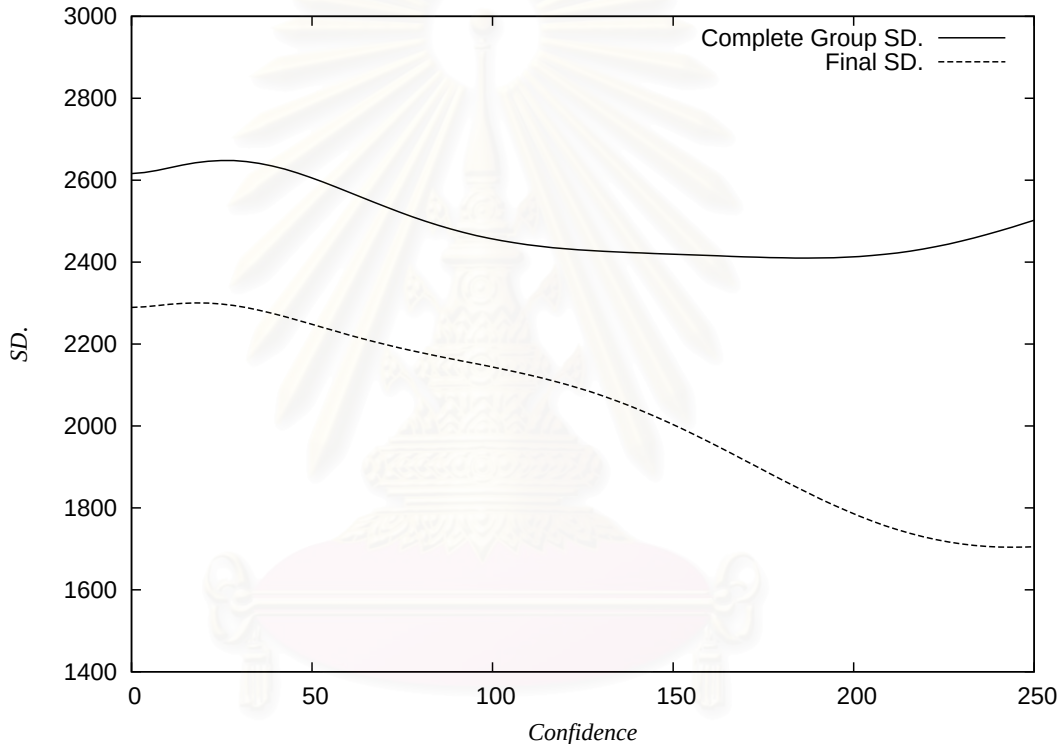


รูปที่ 5.14: ความสัมพันธ์ระหว่างความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์กับระยะเวลาที่ใช้ในการทำงาน

5.2.2.2 ผลของค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์ต่อค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอย

การทดลองย่อยนี้แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์กับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยของกลุ่มหุ่นยนต์แต่ละกลุ่ม โดยผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 5.15 โดยเป็นการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอ

ย ณ เวลาที่หุ่นยนต์ทุกตัวมีกลุ่ม กับ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอย ณ เวลา 500 หน่วย จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยของกลุ่มหุ่นยนต์แต่ละกลุ่มมีแนวโน้มที่จะลดลงเมื่อค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์มากขึ้น พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อค่าความเชื่อมั่นสูงจะเปิดโอกาสให้หุ่นยนต์ทำการจับกลุ่มกันก่อนและกลุ่มที่จับกันแล้วจะมีสามารถกระจายกันได้นาน ซึ่งการที่กลุ่มที่จับกันแล้วมีจำนวนมากและมีโอกาสกระจายได้นานก่อนกระบวนการประมูลจะเริ่มขึ้น ยิ่งเวลาผ่านไปนานการกระจายก็จะสม่ำเสมอขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งเมื่อการประมูลเริ่มขึ้นแล้วหุ่นยนต์จะเดินทางไปยังตำแหน่งนัดหมายก็จะอยู่ในตำแหน่งที่มีการกระจายที่ดีตามไปด้วยและจะส่งผลต่อการกระจายเมื่อสิ้นสุดการทำงานด้วย ดังแสดงในค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอย ณ เวลา 500 หน่วย

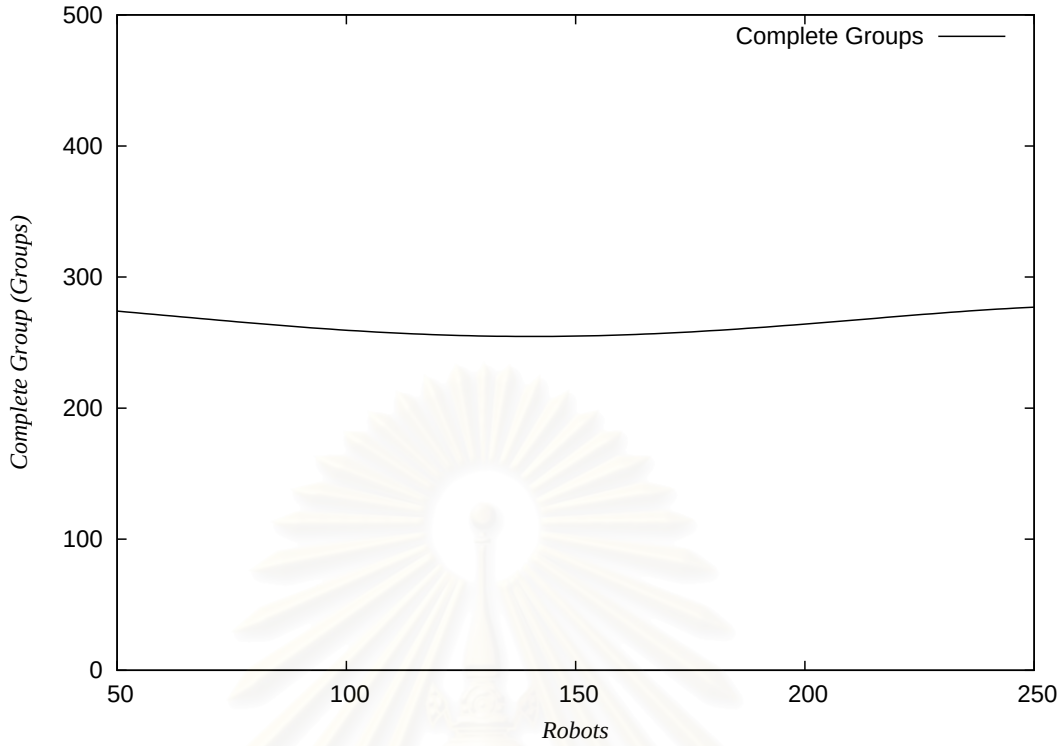


รูปที่ 5.15: ความสัมพันธ์ของความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์กับค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอย

5.2.3 ผลของจำนวนหุ่นยนต์ต่อการจัดกลุ่ม

การทดลองนี้จะแสดงความสัมพันธ์ของจำนวนหุ่นยนต์กับเวลาที่ใช้ในการทำงาน โดยการทดลองนี้ประกอบด้วยหุ่นยนต์จำนวน 50,100,150 และ 200 แบ่งออกเป็น 5 ชนิด ทำงานในพื้นที่การทำงานมีขอบขนาด 400 x 400 ตารางหน่วย รัศมีการจัดกลุ่ม (R_{group}) มีความยาว 50 หน่วย และความเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่ 1 หน่วยต่อหน่วยเวลา ค่าความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์แต่ละตัวถูกตั้งให้เท่ากันหมดทุกตัวโดยมีค่าเท่ากับ 160 หน่วย ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.16 และตารางที่ 5.3

จากผลการทดลองจะพบว่าเวลาที่ใช้ในการทำงานนั้นไม่มีความแตกต่างกันสำหรับขนาด

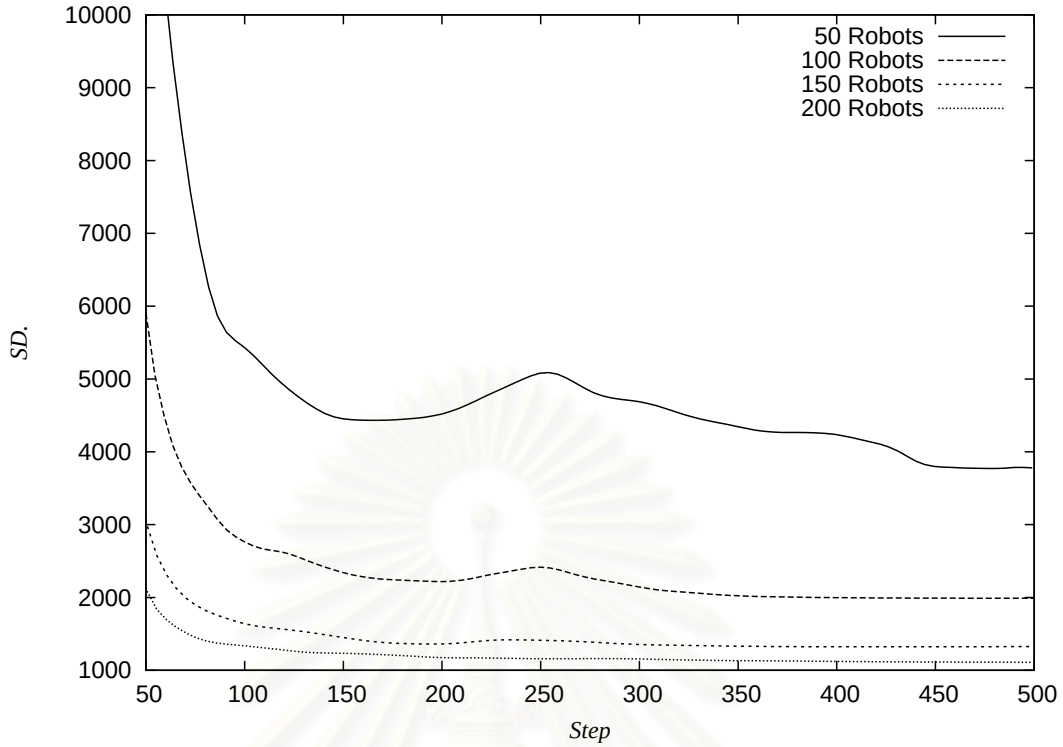


รูปที่ 5.16: ความสัมพันธ์ของจำนวนหุ่นยนต์กับเวลาที่ใช้ในการทำงาน

ตารางที่ 5.3: ตารางผลการทดลองการจัดกลุ่ม

ค่าความเชื่อมั่น	เวลาที่ใช้
50	274
100	259
150	236
200	269
250	277

กลุ่มหุ่นยนต์ที่ต่างกัน เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีแบบกระจายซึ่งมีพฤติกรรมการทำงานแบบขนานกันไป การเพิ่มหุ่นยนต์ลงไปในกลุ่มจึงไม่ทำให้การทำงานช้าลงแต่อย่างใด ส่งผลให้วิธีการนี้มีความสามารถในการใช้กับหุ่นยนต์จำนวนมากได้โดยประสิทธิภาพไม่ลดลง นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยกับจำนวนหุ่นยนต์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 5.17จะเห็นได้ว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยมีแนวโน้มลดลงในแนวทางที่สอดคล้องกันทุกจำนวนหุ่นยนต์ที่ใช้ และในสภาวะสิ้นสุดการทำงานการทดลองที่ใช้หุ่นยนต์จำนวนมากกว่าจะมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยต่ำกว่า เพราะการมีกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบแล้วจำนวนมากกว่าทำให้แต่ละกลุ่มครอบคลุมพื้นที่น้อยลง



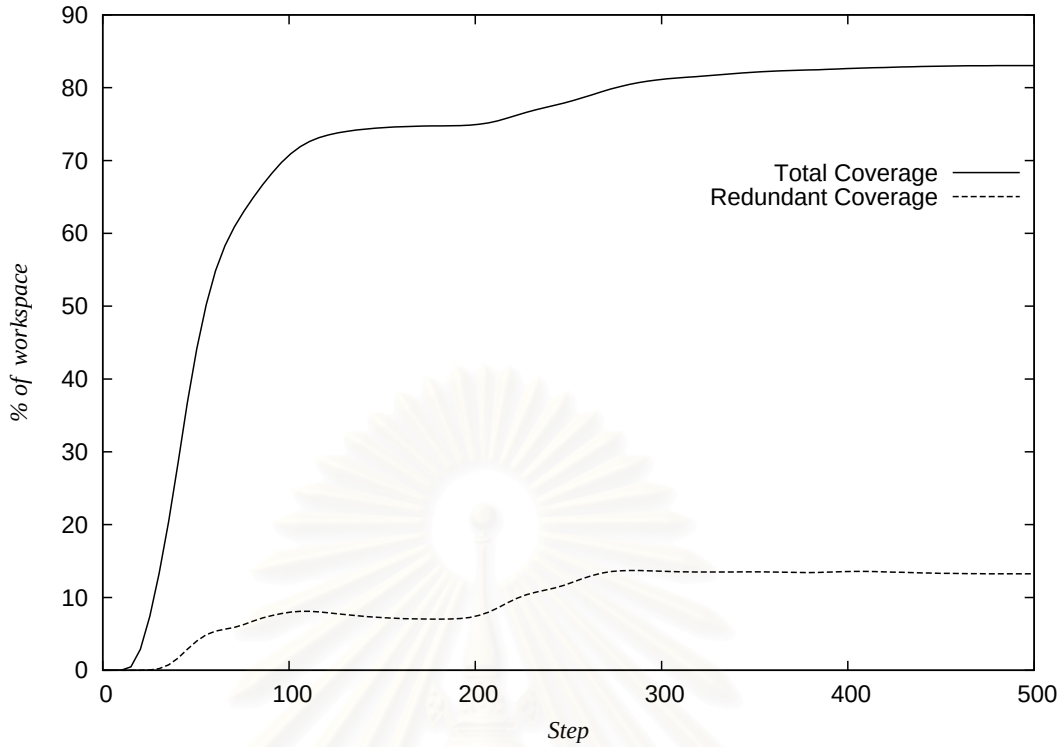
รูปที่ 5.17: ความสัมพันธ์ของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยกับจำนวนหุ่นยนต์

5.2.4 การครอบคลุมพื้นที่รับรู้

แม้ว่าในการวิธีที่เสนอนี้จะใช้พื้นที่ของบริเวณโวโรนอยในการทำงาน แต่ในความเป็นจริงพื้นที่ของการรับรู้สภาพแวดล้อมมักจะมีรูปร่างเป็นวงกลมอาทิเช่นการติดตั้งตัวรับรู้แบบอัลตราโซนิค หรือการใช้กล้องออมนิ (Omnidirectional Camera) การทดลองนี้จึงทำการทดลองเพื่อทดสอบพื้นที่ในการรับรู้ของกลุ่มหุ่นยนต์ในช่วงเวลาต่างๆ ของการจำลองเหตุการณ์ ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 5.18 โดยการทำงาน ณ.เวลาต่างๆแสดงในรูปที่ 5.18 จะเห็นได้ว่าพื้นที่การรับรู้ของหุ่นยนต์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่พื้นที่ที่มีการทับซ้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและคงที่เมื่อเวลาผ่านไป ลักษณะเช่นนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถของการนำวิธีการนี้มาใช้ในงานที่ต้องการให้กลุ่มหุ่นยนต์รับรู้ข้อมูล เนื่องจากมีพื้นที่การครอบคลุมที่สูงและพื้นที่ทับซ้อนต่ำจึงทำให้ประหยัดจำนวนหุ่นยนต์ที่ใช้

5.2.5 สรุปผลการทดลองการจัดกลุ่มหุ่นยนต์

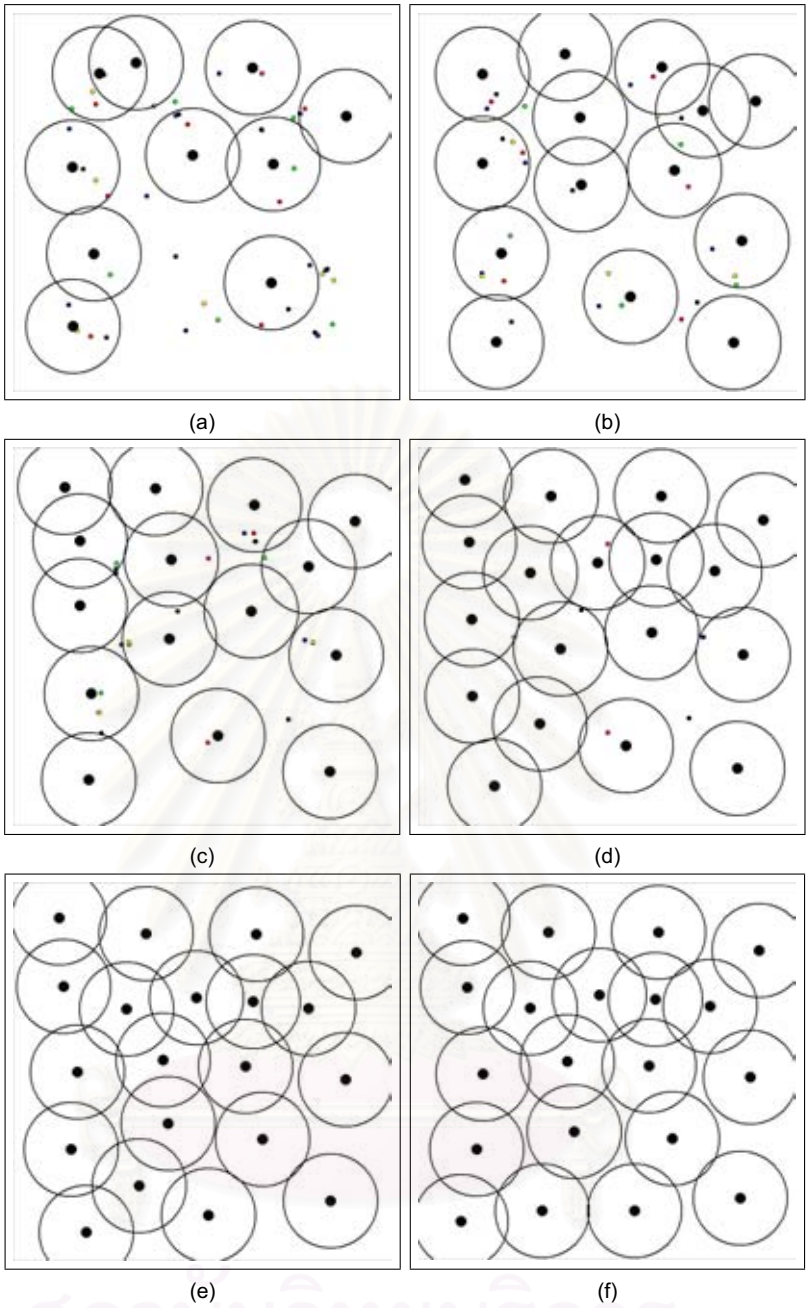
ในการทดลองการจัดกลุมของหุ่นยนต์ วิธีหนึ่งในการวัดความสามารถคือ จำนวนกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบในช่วงเวลาต่างๆ จากการทดลองจะเห็นได้ว่าในช่วงแรกอัตราการเพิ่มของกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบจะสูง เนื่องจากมีกลุ่มหุ่นยนต์เกิดขึ้นใหม่อยู่ตลอดเวลา เมื่อหุ่นยนต์แต่ละตัวพยายามเคลื่อนที่กระจายตัวเทียบกับหุ่นยนต์ชนิดเดียวกัน การกระจายตัวนี้เปิดโอกาสให้หุ่นยนต์ได้พบกับสมาชิกชนิดอื่นๆ จนสามารถจัดกลุ่มสมบูรณ์ได้ในที่สุด และเมื่อหุ่นยนต์ที่สามารถมองเห็น



รูปที่ 5.18: ความสัมพันธ์ของบริเวณที่ตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ครอบคลุมกับเวลา

เพื่อนร่วมกลุ่มได้ครบทุกชนิดรวมตัวกันไปหมดแล้ว การเพิ่มขึ้นของกลุ่มหุ่นยนต์ก็จะหยุดลง และจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อเริ่มมีการประมูลเกิดขึ้น ดังจะเห็นการเพิ่มขึ้นนี้ในช่วงท้ายซึ่งจะเป็นการเพิ่มขึ้นที่ช้ากว่าในช่วงต้น ผลการทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นอีกว่าการเลือกค่าความมั่นใจของกลุ่มหุ่นยนต์นั้นส่งผลต่อความเร็วในการทำงานด้วย กล่าวคือถ้าให้ค่าความมั่นใจมีค่ามากจะเกิดช่วงเวลาที่หุ่นยนต์ ต้องรอโดยที่ไม่มีทางที่จะพบสมาชิกเพิ่มจะกินเวลานาน ทำให้เสียเวลาในช่วงนี้ไปโดยเปล่าประโยชน์ และในทางกลับกันหากให้ค่าความมั่นใจน้อยเกินไปหุ่นยนต์จะเสียโอกาสที่จะพบสมาชิกครบถ้วยด้วยตนเอง ซึ่งส่งผลให้หุ่นยนต์ต้องเดินทางมากขึ้นจึงทำให้เวลาในการทำงานมากขึ้น ดังนั้นการเลือกค่าความมั่นใจที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของวิธีการนี้ การปรับค่าของความมั่นใจให้เหมาะกับสภาพแวดล้อมและการทำงานของหุ่นยนต์จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีได้อย่างมีนัยสำคัญ

อีกปัจจัยที่ใช้ในการวัดความสามารถของการจัดกลุ่มหุ่นยนต์คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยที่กลุ่มหุ่นยนต์ครอบครอง ถ้าค่าดังกล่าวมีค่าน้อยแสดงว่ากลุ่มหุ่นยนต์แต่ละกลุ่มมีการกระจายที่ดี จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยที่กลุ่มหุ่นยนต์ครอบครองมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และจะลดลงช้าลงในช่วงท้าย พฤติกรรมนี้สอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกลุ่มหุ่นยนต์ที่มีสมาชิกครบ เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของกลุ่มหุ่นยนต์จะทำให้พื้นที่เฉลี่ยที่หุ่นยนต์แต่ละตัวครอบครองนั้นลดลง ส่งผลให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยที่กลุ่มหุ่นยนต์ครอบครองลดลงตามไปด้วย การเพิ่มหุ่นยนต์เข้ามานั้นมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ครอบครองจึงทำให้ค่า



รูปที่ 5.19: แสดงพื้นที่การรับรู้ของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) ที่เวลา 50 หน่วย (ข) ที่เวลา 75 หน่วย (ค) ที่เวลา 100 หน่วย (ง)ที่เวลา 150 หน่วย (ต)ที่เวลา 300 หน่วย (ฉ)ที่เวลา 400 หน่วย

ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยที่กลุ่มหุ่นยนต์ครอบครองลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก แต่ในช่วงท้ายจะเป็นการปรับให้กลุ่มหุ่นยนต์มีการกระจายที่เท่ากันมากขึ้นโดยอาศัยการเคลื่อนที่เข้าหาจุดศูนย์กลางมวลของบริเวณโวโรนอย และจะไม่มีกลุ่มหุ่นยนต์เพิ่มเนื่องจากหุ่นยนต์ทุกตัวมีกลุ่มแล้ว จึงส่งผลให้การลดลงของความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยที่กลุ่มหุ่นยนต์ครอบครองมีอัตราที่ช้าลง

วิธีการจัดกลุ่มหุ่นยนต์มีธรรมชาติของการทำงานแบบขนาน กล่าวคือหุ่นยนตแต่ละตัวจะทำงานไปพร้อมๆ กัน ไม่ต้องรอให้เกิดกลุ่มที่สมบูรณ์เพิ่มทีละกลุ่มดังจะเห็นได้จากผลการทดลอง

ที่แสดงว่าเมื่อเพิ่มจำนวนหุ่นยนต์เข้าไปในการทดลองแต่คงเงื่อนไขอื่นๆ ไว้ดังเดิม ขั้นตอนวิธีนี้ใช้เวลามีความแตกต่างกันน้อยมาก และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยที่กลุ่มหุ่นยนต์ครอบครองก็มีแนวโน้มลดลงไปในรูปแบบที่ใกล้เคียงกัน ไม่ว่าจะใช้หุ่นยนต์จำนวนทำใดทำการทดลองก็ตาม

5.3 การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

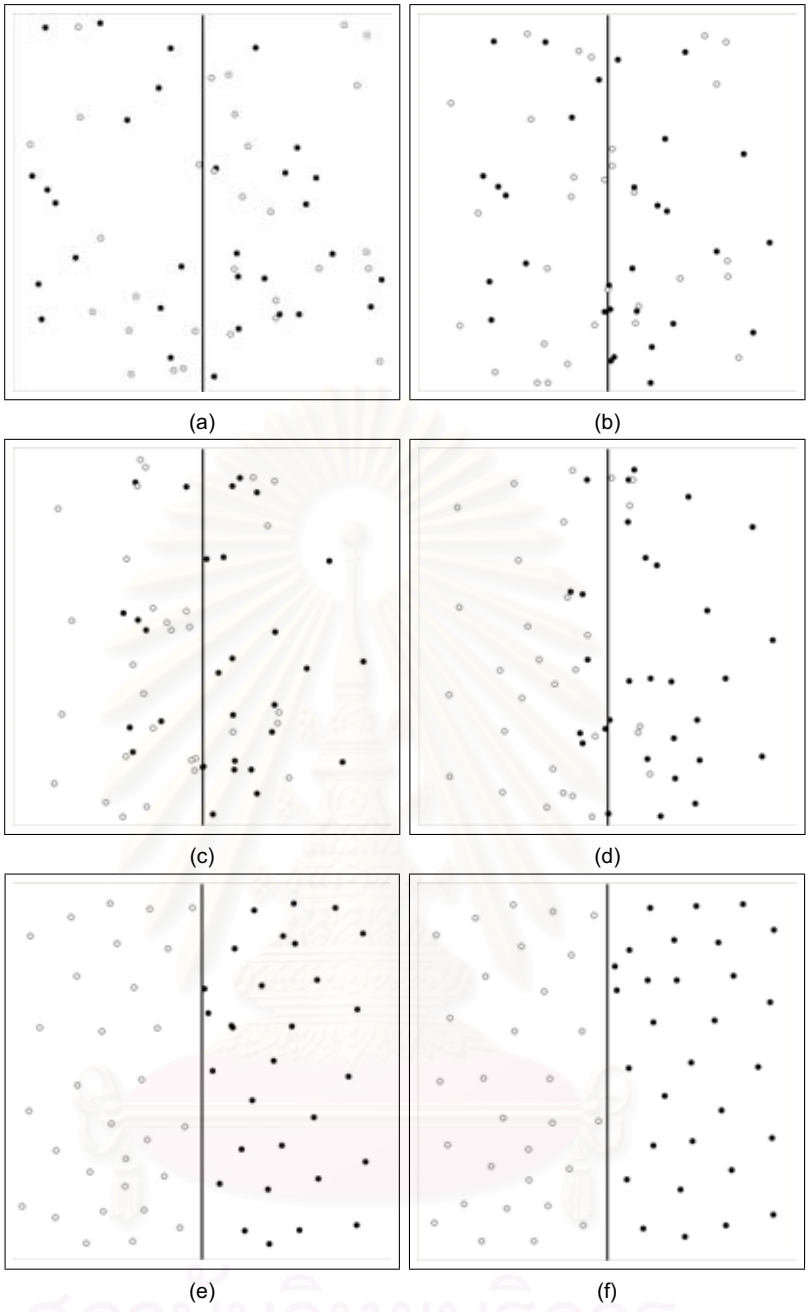
5.3.1 ผลการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

การทดลองนี้กระทำเพื่อแสดงการทำงานทั่วไปของการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข การทดลองกระทำโดยใช้หุ่นยนต์ทั้งหมด 60 ตัวแบ่งออกเป็นสองชนิด ชนิดละ 30 ตัว เริ่มต้นจากตำแหน่งสุ่มบนพื้นที่ขนาด 400 x 400 ตารางหน่วยซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ทางด้านซ้ายเป็นพื้นที่สำหรับหุ่นยนต์ชนิดที่ 0 และทางด้านขวาเป็นพันที่สำหรับหุ่นยนต์ชนิดที่ 1 โดยให้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1 หน่วยต่อหน่วยเวลาและรัศมีการรับรู้ R_{sense} มีค่าเท่ากับ 100 หน่วย ซึ่งผลการทำงานแสดงในรูปที่ 5.20 และความสัมพันธ์ของจำนวนหุ่นยนต์ที่อยู่มีตำแหน่งถูกต้องกับเวลาแสดงในรูปที่ 5.21

จากรูปผลการทดลองในรูปที่ 5.20จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์เริ่มต้นจากการกระจายตัวแบบสุ่มในพื้นที่ทำงานโดยหุ่นยนต์แต่ละชนิดจะเริ่มต้นจากจุดที่อาจจะไม่ใช่ตำแหน่งที่ถูกต้องของตัวหุ่นยนต์ เช่นหุ่นยนต์ชนิดที่ 0 อาจเริ่มต้นจากด้านขวาของพื้นที่การทำงานนี้ ในระหว่างการทำงานจะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์มีการเดินทางข้ามเขตแดน โดยส่วนใหญ่จะเป็นการข้ามจากพื้นที่ที่หุ่นยนต์ตัวนั้นไม่ควรอยู่ไปยังพื้นที่ที่ถูกต้องสำหรับหุ่นยนต์ตัวนั้น พฤติกรรมนี้เกิดขึ้นมากในช่วงต้นของการทำงานดังปรากฏในรูปที่ 5.20 (ข) และ (ค) พฤติกรรมในช่วงนี้สัมพันธ์กับกราฟในรูปที่ I5.21ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการเพิ่มขึ้นของหุ่นยนต์ที่อยู่ถูกพื้นที่ขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนในภาพที่ 5.20 (ง) นั้นจะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์เริ่มมีการแบ่งพวกกันอย่างชัดเจน เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นหุ่นยนต์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดในพื้นที่ทำงานคือการปรับตัวของหุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้องแล้วให้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอเท่านั้นดังแสดงในรูปที่ 5.20 (จ) และ (ฉ)

นอกจากการทดลองการทำงานของกลุ่มหุ่นยนต์บนพื้นที่สองชนิดดังแสดงข้างต้น การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไขยังสามารถใช้งานได้กับพื้นที่การทำงานที่ซับซ้อนดังแสดงในการทดลองต่อไปนี้ ซึ่งประกอบด้วย หุ่นยนต์ทั้งหมด 60 ตัว แบ่งออกเป็นสามชนิด ชนิดละ 20 ตัวมีหน้าที่กระจายตัวในพื้นที่สามแบบที่ไม่มีรูปร่างลักษณะไม่เท่ากัน รูปที่ 5.22แสดงพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์โดยแบ่งออกเป็นสามส่วน ซึ่งแต่ละส่วนสัมพันธ์กับหุ่นยนต์ชนิดหนึ่งๆ ค่าเริ่มต้นและตัวแปรควบคุมอื่นเป็นไปในลักษณะเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา ผลลัพธ์ของการทำงานแสดงในรูปที่ 5.23

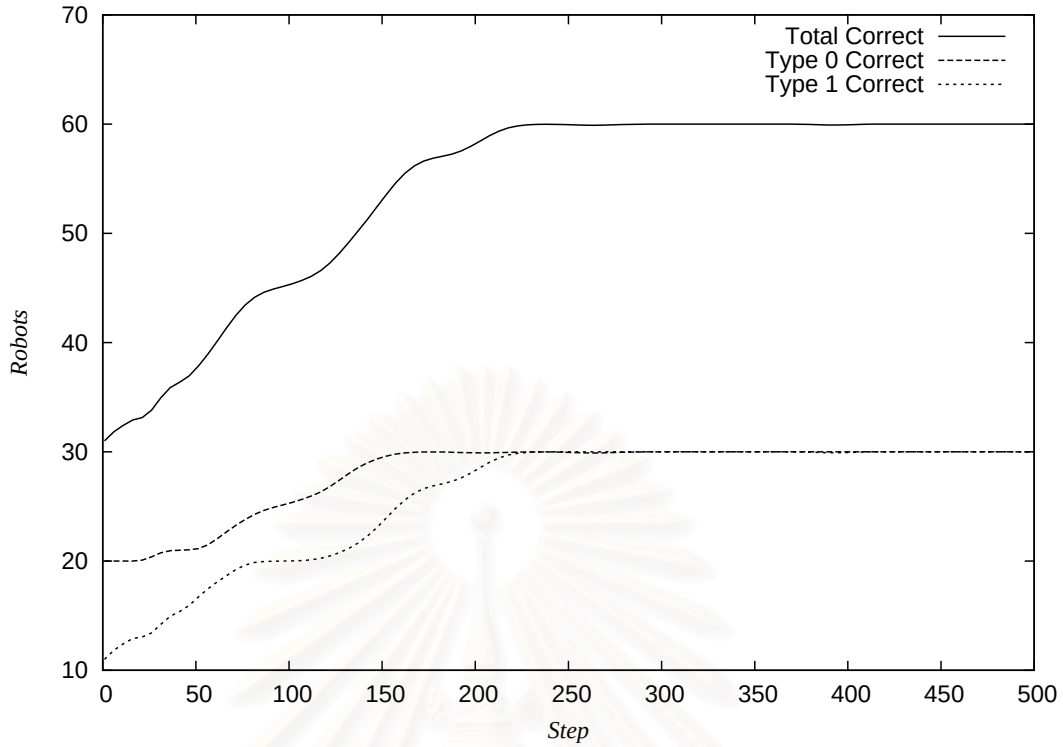
เพื่อทดสอบการทำงานที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นกลุ่มหุ่นยนต์จะถูกทดสอบในพื้นที่ที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นโดยพื้นที่นี้ประกอบด้วย ดังแสดงในรูปที่



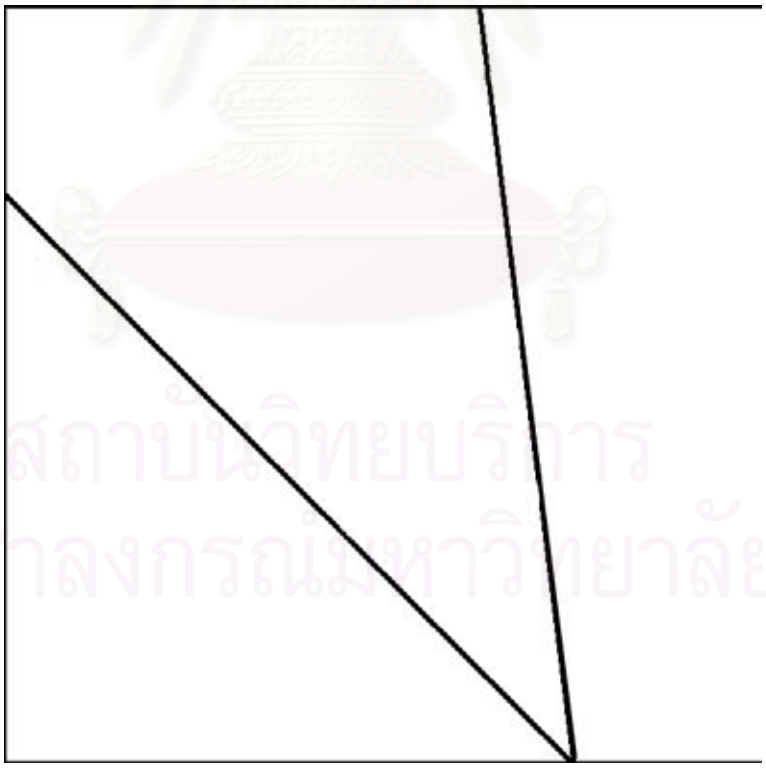
รูปที่ 5.20: แสดงพื้นที่การรับรู้ของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) ที่เวลาเริ่มต้น (ข) ที่เวลา 50 หน่วย (ค) ที่เวลา 100 หน่วย (ง)ที่เวลา 150 หน่วย (จ)ที่เวลา 300 หน่วย (ฉ)ที่เวลา 400 หน่วย

5.3.2 ผลของระยะปลอดภัยต่อการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

การทดลองนี้กระทำเพื่อศึกษาผลของระยะปลอดภัยต่อการทำงานของวิธีการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข การทดลองกระทำโดยใช้หุ่นยนต์ทั้งหมด 60 ตัวแบ่งออกเป็นสองชนิด ชนิดละ 30 ตัว เริ่มต้นจากตำแหน่งสุ่มบนพื้นที่ขนาด 400 x 400 ตารางหน่วยซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ทางด้านซ้ายเป็นพื้นที่สำหรับหุ่นยนต์ชนิดที่ 0 และทางด้านขวาเป็นพื้นที่สำหรับหุ่นยนต์ชนิดที่ 1 โดยให้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1 หน่วยต่อหน่วยเวลาและรัศมีการรับรู้ R_{sense} มีค่าเท่ากับ 100 หน่วย ทดลองปรับค่าระยะปลอดภัยเป็น 0,5,10,15,20 และ 25 หน่วยตามลำดับ วัดผลที่การ

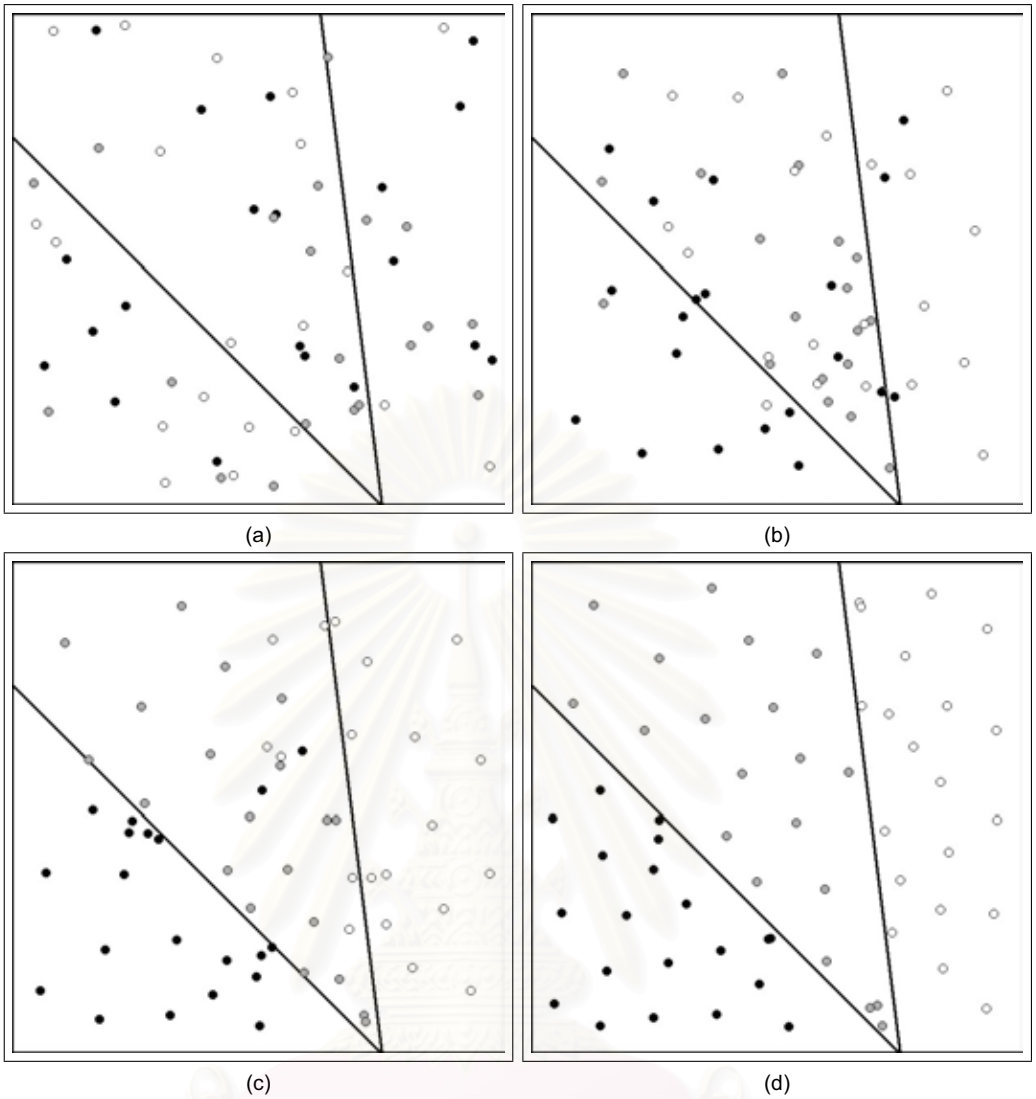


รูปที่ 5.21: ความสัมพันธ์ของจำนวนหุ่นยนต์ที่อยู่มีตำแหน่งถูกต้องกับเวลา



รูปที่ 5.22: พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ซึ่งประกอบด้วยสามบริเวณย่อย

ทำงาน ณ เวลา 500 หน่วย ทำการทดลองเพื่อวัดผลความผิดพลาด ความผิดพลาดในที่นี้หมายถึงจำนวนครั้งที่หุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้องเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่ไม่ถูกต้อง ผลการทดลองเป็น



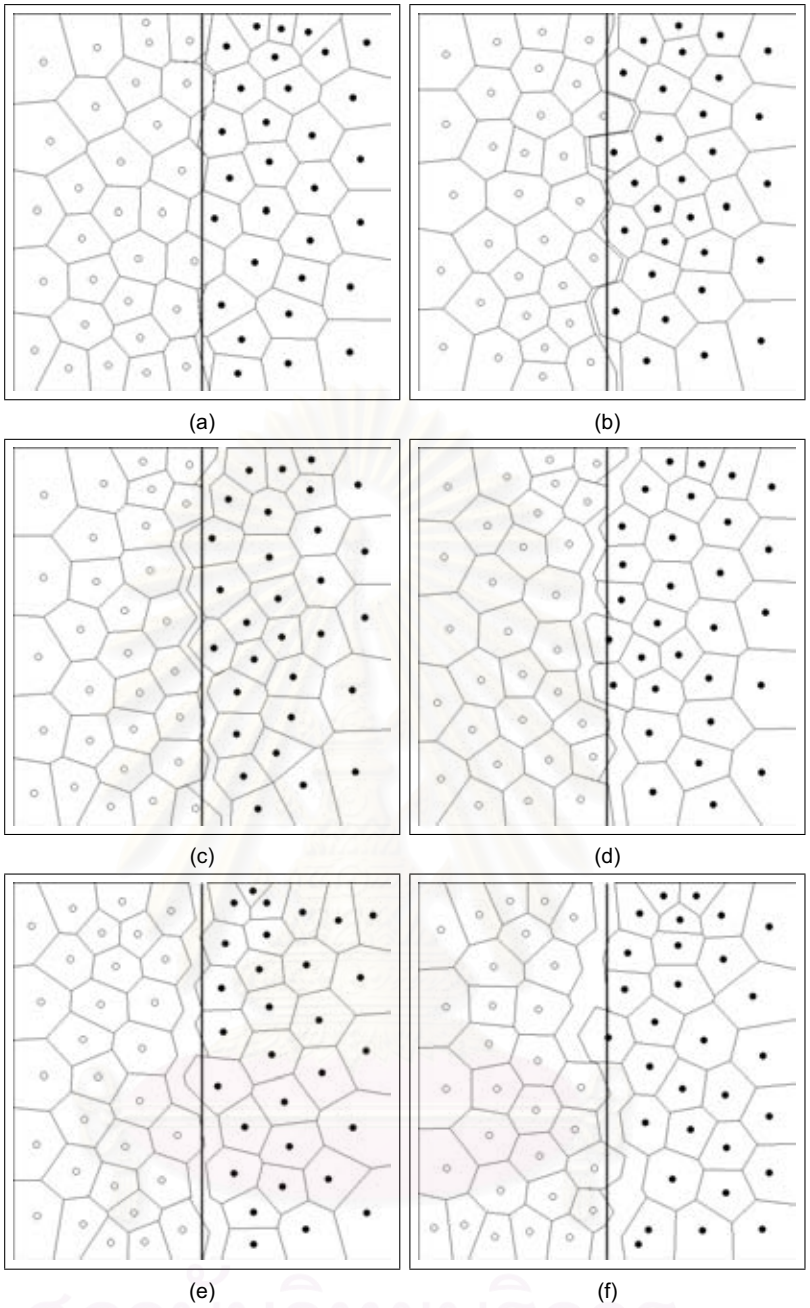
รูปที่ 5.23: แสดงการทำงานของกลุ่มหุ่นยนต์ (ก) ที่เวลาเริ่มต้น (ข) ที่เวลา 100 หน่วย (ค) ที่เวลา 200 หน่วย (ง)ที่เวลา 400 หน่วย

ดังรูปที่ 5.24 รูปที่ 5.25 และตาราง 5.4

ตารางที่ 5.4: ตารางแสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ระยะปลอดภัยต่างๆ

ระยะปลอดภัย	ค่าความผิดพลาด
0	18.2
5	10.6
10	10
15	10.2
20	9.8
25	6.6

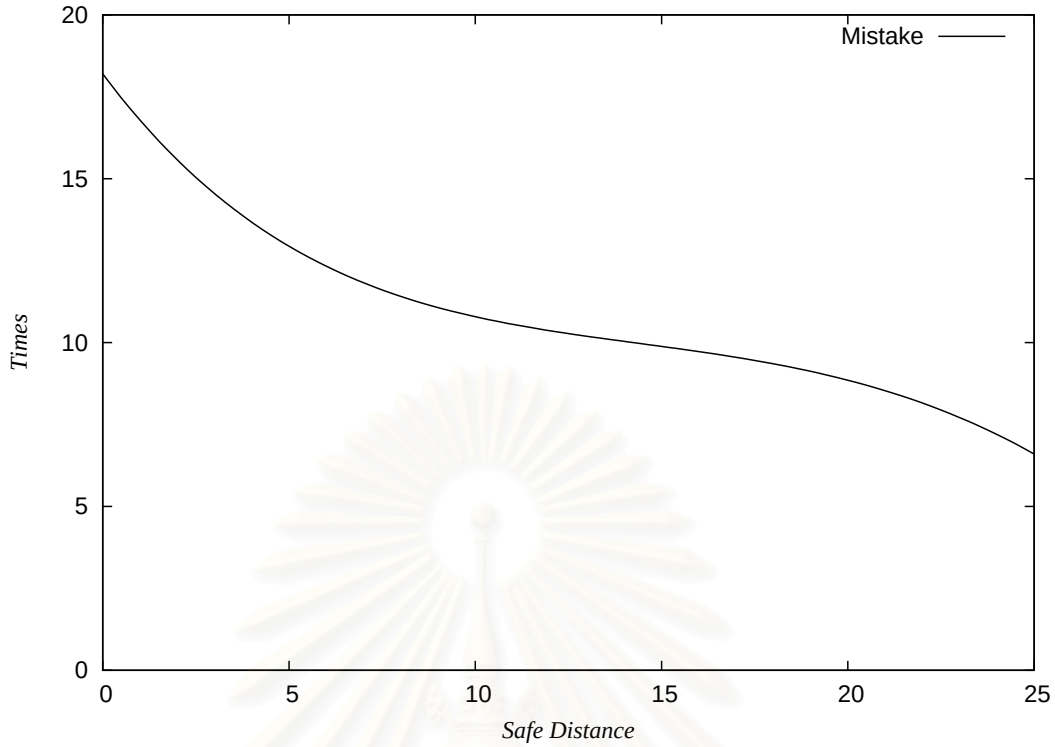
จากรูปที่ 5.24 แสดงบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นของหุ่นยนต์แต่ละตัว ซึ่งบริเวณโวโรนอยนี้คือบริเวณโวโรนอยที่หุ่นยนต์นำมาใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ ในบริเวณเส้นแบ่งพื้นที่การทำงานจะเห็นได้ว่าบริเวณโวโรนอยท้องถิ่นของหุ่นยนต์จะไม่ติดกัน ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนใน



รูปที่ 5.24: แสดงผลของระยะปลอดภัยต่อการทำงานของวิธีการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข (ก) ระยะปลอดภัย 0 หน่วย (ข) ระยะปลอดภัย 5 หน่วย (ค) ระยะปลอดภัย 10 หน่วย (ง)ระยะปลอดภัย 15 หน่วย (จ)ระยะปลอดภัย 20 หน่วย (ฉ)ระยะปลอดภัย 25 หน่วย

รูปที่ 5.24 (จ) และ (ฉ) พื้นที่ว่างบริเวณนี่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าของระยะปลอดภัยที่ทำให้หุ่นยนต์มองหุ่นยนต์ชนิดอื่นที่อยู่ถูกตำแหน่งเสมือนว่าใกล้เข้ามาจึงทำให้บริเวณโวโรนอยท้องถิ่นของหุ่นยนต์ที่อยู่บริเวณแนวเชื่อมต่อระหว่างพื้นที่ที่ต่างกันได้รับผลจากค่าระยะปลอดภัยนี้และทำให้เกิดพื้นที่ซึ่งไม่อยู่ในบริเวณโวโรนอยท้องถิ่นของหุ่นยนต์ตัวใดเลยขึ้นในบริเวณนี้ บริเวณดังกล่าวมีแนวโน้มที่จะขยายตัวเมื่อเพิ่มค่าระยะความปลอดภัยขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.24

จากรูปที่ 5.25จะพบว่าแนวโน้มของความผิดพลาดของการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไขมีแนวโน้ม



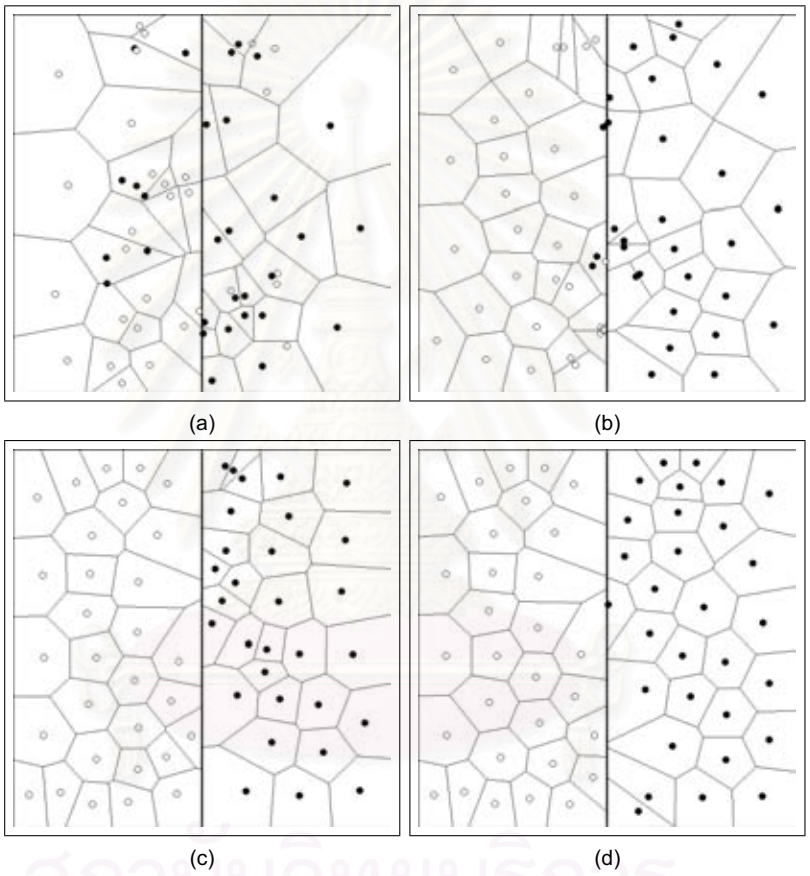
รูปที่ 5.25: ความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดกับระยะปลอดภัย

ลดลงเมื่อระยะปลอดภัยเพิ่มขึ้น พฤติกรรมนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ เนื่องจากหุ่นยนต์จะใช้หุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณพื้นที่รับรู้มาใช้ในการสร้างบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่น การที่หุ่นยนต์มองเห็นหุ่นยนต์ประเภทอื่นที่อยู่ในพื้นที่ที่ถูกต้องและคำนวณเสมือนว่าหุ่นยนต์ดังกล่าวอยู่ใกล้ขึ้นเป็นระยะเท่ากับระยะปลอดภัย เมื่อพิจารณาขอบของบริเวณโวโรนอยที่เกิดจากหุ่นยนต์ดังกล่าวจะพบว่าขอบนี้อยู่ใกล้กับหุ่นยนต์เป็นจุดกำเนิดบริเวณโวโรนอยมากขึ้นซึ่งจะมีผลให้จุดศูนย์กลางมวลมีตำแหน่งที่ห่างจากบริเวณที่ต่างชนิดกับบริเวณที่ถูกต้องสำหรับหุ่นยนต์มากยิ่งขึ้น การที่จุดศูนย์กลางมวลห่างจากบริเวณต่างชนิดมากขึ้นทำให้โอกาสที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปบริเวณนั้นต่ำลงไปด้วย และยิ่งระยะปลอดภัยมีค่ามากเท่าใดจุดศูนย์กลางนี้ก็จะห่างจากบริเวณต่างชนิดมากเท่านั้นและจะทำให้โอกาสที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้องน้อยลงไปด้วย อย่างไรก็ตามการเพิ่มค่าระยะปลอดภัยก็มีข้อเสียด้วยคือจะทำให้การกระจายตัวของหุ่นยนต์มีความสม่ำเสมอน้อยลง เนื่องจากแทนที่หุ่นยนต์จะกระจายตัวครอบคลุมทั้งพื้นที่ทำงานที่ตนเองรับผิดชอบ กลับครอบคลุมเพียงส่วนหนึ่งเนื่องจากมีพื้นที่บางส่วนเป็นพื้นที่ที่ไม่ครอบคลุมโดยหุ่นยนต์ตัวใดเลยดังที่เกิดขึ้นในรูปที่ 5.24 (จ) และ (ฉ)

5.3.3 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอย

การทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการกระจายตัวของหุ่นยนต์แต่ละชนิด โดยอาศัยบริเวณโวโรนอยเป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพ บริเวณโวโรนอยที่ใช้ในการวัดผลนี้แตกต่างจากบริเวณโวโรนอยที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แต่ละตัวกล่าวคือ บริเวณโวโร

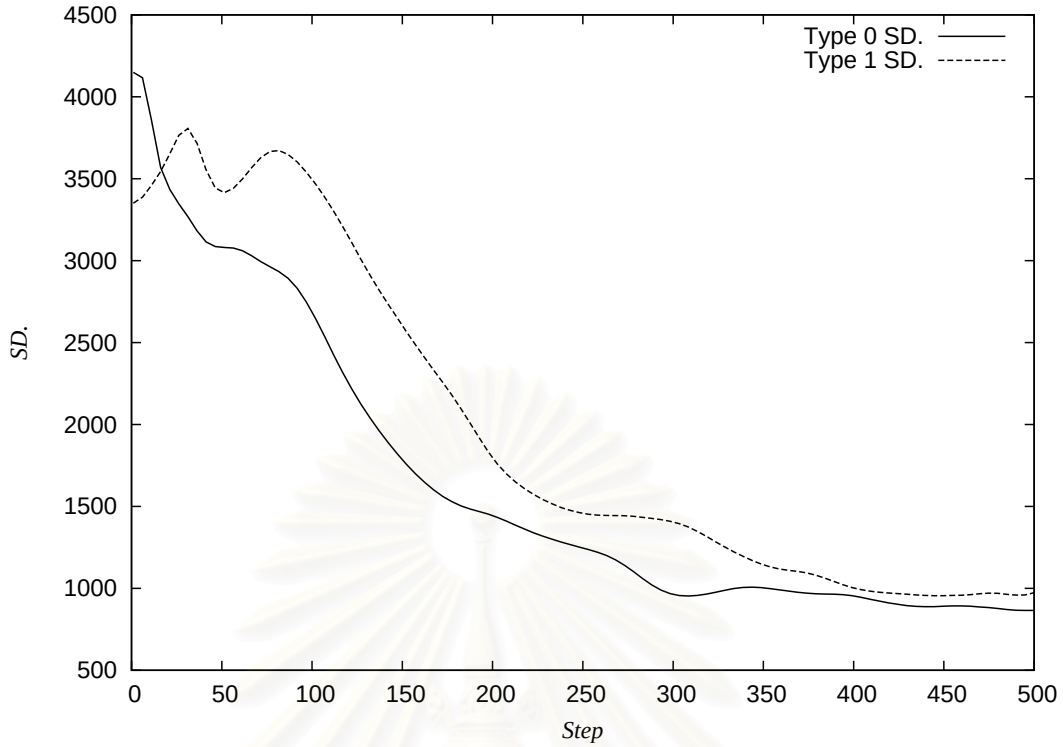
นอยนี้จะคำนวณเฉพาะกับหุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้องเท่านั้นและรวมเส้นแบ่งอาณาเขตของพื้นที่เป็นส่วนหนึ่งของเส้นขอบโวโรนอยด้วย ข้อจำกัดนี้แสดงให้เห็นว่าบริเวณโวโรนอยนี้คือการวัดการกระจายของหุ่นยนต์ที่อยู่ถูกบริเวณเปรียบเทียบกับบริเวณนั้นนั่นเอง การทดลองกระทำโดยใช้หุ่นยนต์ทั้งหมด 60 ตัวแบ่งออกเป็นสองชนิด ชนิดละ 30 ตัว เริ่มต้นจากตำแหน่งสุ่มบนพื้นที่ขนาด 400 x 400 ตารางหน่วยซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน ทางด้านซ้ายเป็นพื้นที่สำหรับหุ่นยนต์ชนิดที่ 0 และทางด้านขวาเป็นพื้นที่สำหรับหุ่นยนต์ชนิดที่ 1 โดยให้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1 หน่วยต่อหน่วยเวลาและรัศมีการรับรู้ R_{sense} มีค่าเท่ากับ 100 หน่วย ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.26 และ 5.27



รูปที่ 5.26: แสดงพื้นที่โวโรนอย ณ เวลาต่างๆ (ก) เวลา 100 หน่วย (ข) เวลา 200 หน่วย (ค) เวลา 300 หน่วย (ง) เวลา 500 หน่วย

จากรูปที่ 5.26 (ข) จะเห็นได้ว่ามีจำนวนหุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้องเพิ่มขึ้นแต่พื้นที่ของบริเวณโวโรนอยแต่ละบริเวณยังต่างกันมากอยู่ ส่วนในภาพที่ 5.26 (ค) จะเห็นว่าหุ่นยนต์มีอยู่ในบริเวณที่ถูกต้องทุกตัวแล้วแต่การกระจายตัวยังไม่สม่ำเสมอเท่าใดนัก ในรูปที่ 5.26 (ง) แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์ทุกตัวอยู่ในบริเวณที่ถูกต้องและการกระจายตัวมีความใกล้เคียงกับการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ

ในรูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยกับเวลา ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยมีแนวโน้มที่จะ



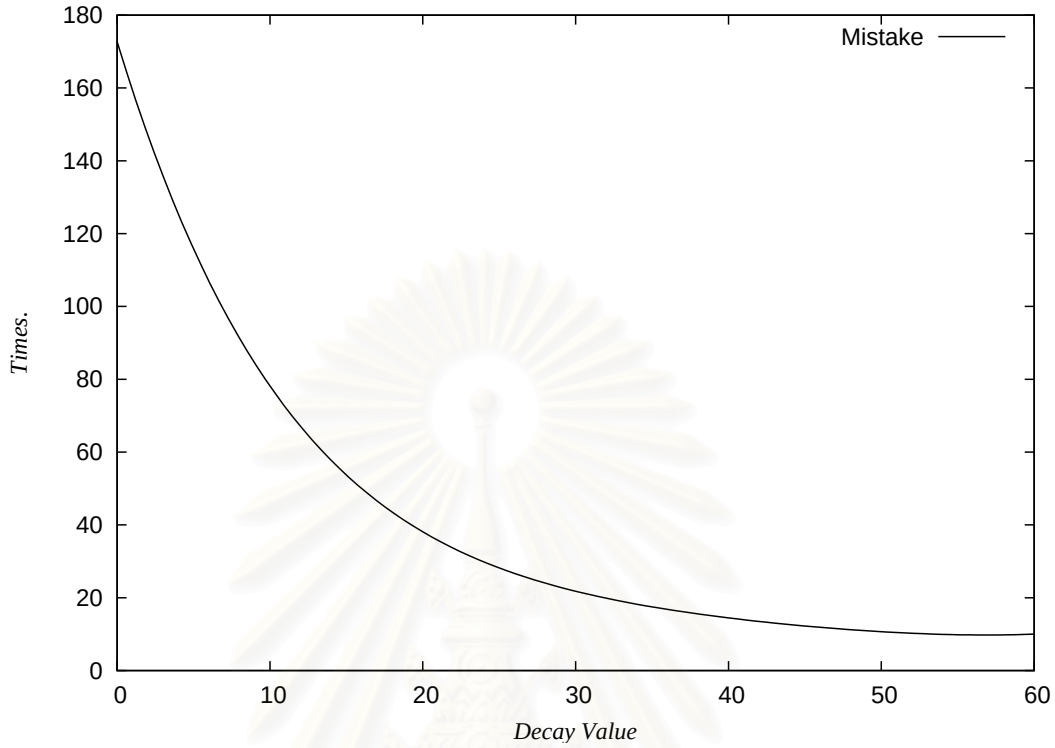
รูปที่ 5.27: ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยกับเวลา

ลดลงเมื่อเวลาผ่านไปและจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากในช่วงแรกมีหุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้องเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังแสดงในรูปที่ 5.21ทำให้พื้นที่บริเวณโวโรนอยท้องถิ่นของหุ่นยนต์แต่ละตัวลดลง การลดลงของพื้นที่โวโรนอยนี้จะทำให้ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยลดลงตามไปด้วย นั่นหมายความว่าหุ่นยนต์ในบริเวณนั้นมีการกระจายตัวที่ดีขึ้นนั่นเอง ส่วนในช่วงท้ายของการทำงานที่อัตราการลดลงของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยมีแนวโน้มการลดที่ช้าลง เนื่องจากในช่วงนี้หุ่นยนต์ทุกตัวจะอยู่ในบริเวณที่ถูกต้องแล้ว การเปลี่ยนแปลงในช่วงนี้จะเป็นเพียงการปรับให้บริเวณโวโรนอยของหุ่นยนต์แต่ละตัวใกล้เคียงกันมากขึ้นเท่านั้น ไม่ใช่การเพิ่มหุ่นยนต์ที่ถูกต้องตัวใหม่เข้าสู่บริเวณ จึงทำให้การลดลงของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยไม่รวดเร็วเหมือนในระยะแรก

5.3.4 ผลของค่าการสลายตัวต่อการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข

การทดลองนี้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายตัวกับความผิดพลาดของการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข เนื่องจากค่าการสลายตัวจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่หุ่นยนต์เมื่อหุ่นยนต์เปลี่ยนจากบริเวณที่ผิดไปยังถูกต้องว่าหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ต่อไปอีกเท่าใดหลังจากที่เข้ามายังบริเวณที่ถูกต้องแล้ วการทดลองกระทำโดยใช้หุ่นยนต์ทั้งหมด 60 ตัวแบ่งออกเป็นสองชนิด ชนิดละ 30 ตัว เริ่มต้นจากตำแหน่งสุ่มบนพื้นที่ขนาด 400 x 400 ตารางหน่วยซึ่งแบ่งออกเป็นสองส่วนเท่าๆ กัน ทางด้านซ้ายเป็นพื้นที่สำหรับหุ่นยนต์ชนิดที่ 0 และทางด้านขวาเป็นพื้นที่สำหรับหุ่นยนต์ชนิดที่ 1 โดยให้ความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1 หน่วยต่อหน่วยเวลาและรัศมีการรับรู้ R_{sense} มีค่าเท่ากับ 100

หน่วย ทดลองโดยใช้ค่าการสลายตัว 0, 10, 20, 30 และ 40 ตามลำดับ ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.28 และตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.28: ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการสลายตัวกับความผิดพลาด

ตารางที่ 5.5: ตารางแสดงความผิดพลาดที่ค่าการสลายตัวต่างๆ

ค่าการสลายตัว	ค่าความผิดพลาด
0	172.7
10	34.8
20	26.2
30	17.6
40	13.7
50	8.4
60	10

จากรูปที่ 5.28 และตารางที่ 5.5 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดมีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าการสลายตัวเพิ่มขึ้น พฤติกรรมนี้อธิบายได้จากการที่ค่าความผิดพลาดคือจำนวนขั้นของการจำลองเหตุการณ์ที่หุ่นยนต์ที่เพิ่งเข้าสู่บริเวณที่ถูกต้องจะเดินทางตามทิศทางเดิมก่อนที่จะเข้ามาอยู่ในบริเวณที่ถูกต้อง กล่าวโดยสรุปคือหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามทิศทางเดิมเป็นจำนวน T_{decay} ขั้นหลังจากที่เข้าสู่บริเวณที่ถูกต้องแล้ว ในกรณีที่ค่าการสลายตัวต่ำหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ต่อในทิศทางเดิมเพียงระยะสั้นๆ ทำให้หุ่นยนต์ยังอยู่ใกล้กับบริเวณรอยต่อของพื้นที่ซึ่งจะมีโอกาสที่หุ่นยนต์นั้นจะเคลื่อนที่กลับไปอยู่ในบริเวณที่ผิดสูง แต่เมื่อตั้งค่าการสลายตัวสูงๆ หุ่นยนต์จะยังเคลื่อนที่ต่อไปอีกหลังจากเข้าสู่บริเวณที่ถูกต้องแล้วเป็นเวลานานพอที่จะทำให้หุ่นยนต์อยู่ห่างจากบริเวณรอยต่อ ซึ่งจะทำให้โอกาสที่จะเคลื่อนที่กลับเข้าสู่บริเวณที่ผิดต่ำลงด้วย แม้ว่าการเพิ่มค่าการสลายตัวจะมีลดความผิด

พลาดของหุ่นยนต์แต่การเพิ่มค่าการสลายตัวไปเป็นค่าที่สูงมาก เมื่อเทียบกับขนาดของพื้นที่การทำงานจะทำให้หุ่นยนต์เข้าสู่สภาพสมดุลได้ยากและมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการใช้งานจริง เช่นการตั้งค่าการสลายตัวเท่ากับ 200 จะทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นระยะทางรวมกันกว่า 17,000 หน่วย ในขณะที่ค่าการสลายตัว 10 ก่อให้เกิดการเดินทางเพียง 12,000 หน่วย

5.3.5 สรุปผลการทดลองการกระจายแบบมีเงื่อนไข

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีการกระจายแบบมีเงื่อนไขสามารถบรรลุจุดประสงค์ของการทำงานได้โดยมีความผิดพลาดน้อยมาก การทำงานในช่วงแรกจะเห็นได้ว่าเป็นการเคลื่อนที่สู่บริเวณที่ถูกต้องและในช่วงหลังจะเป็นการกระจายตัวให้สม่ำเสมอ ดังจะเห็นได้จากค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของพื้นที่บริเวณโวโรนอยของบริเวณที่ถูกต้องจะลดลงอย่างรวดเร็วอันเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนหุ่นยนต์ที่ถูกต้อง และจะลดลงอย่างช้าๆ ในช่วงท้ายเนื่องจากจะเป็นการปรับการกระจายตัวในพื้นที่ที่ถูกต้องเท่านั้น ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของการกระจายแบบมีเงื่อนไขมีสองส่วนปัจจัยหลักๆ คือ ระยะปลอดภัยและค่าคงที่การสลายตัวดังจะกล่าวต่อไป

ในการกระจายแบบมีเงื่อนไข สิ่งสำคัญที่เราสนใจคือไม่ต้องการให้หุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณที่ถูกต้องแล้วเคลื่อนที่ไปอยู่ในบริเวณที่ผิด ซึ่งกลไลที่ใช้เพื่อให้บรรลุจุดประสงค์นี้อย่างหนึ่งคือ ระยะปลอดภัย ระยะนี้จะทำให้หุ่นยนต์ไม่เข้าใกล้พื้นที่ที่ไม่ถูกต้องมากเกินไป ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าหากเพิ่มค่านี้ให้สูงขึ้นโอกาสที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้องก็จะน้อยลง แต่เนื่องจากการเพิ่มระยะปลอดภัยเป็นการเพิ่มระยะเสมือนเข้าไป จึงก่อให้เกิดบริเวณที่ไม่ได้รับการครอบคลุมจากบริเวณโวโรนอยแบบท้องถิ่นของหุ่นยนต์ตัวใดเลย ยิ่งบริเวณนี้มีมากเท่าใดการกระจายของหุ่นยนต์ยิ่งไม่สม่ำเสมอ ค่าของระยะปลอดภัยจึงต้องเลือกอย่างระมัดระวังโดยที่ไม่น้อยเกินไปจนทำให้หุ่นยนต์เดินทางไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้องบ่อย และไม่เยอะเกินไปจนส่งผลกระทบต่อการกระจายตัวของหุ่นยนต์

แนวคิดของการปนเปื้อนและการสลายตัวสามารถ ลดการเดินทางที่ไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้องได้อย่างชัดเจน ดังจะเห็นได้ว่าเมื่อตั้งค่าการสลายตัวสูงขึ้น ค่าความผิดพลาดจะลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากหุ่นยนต์ที่เดินทางมาจากบริเวณที่ไม่ถูกต้องจะเดินทางลึกเข้าไปในบริเวณที่ถูกต้อง เมื่อหุ่นยนต์ตัวนั้นเข้าสู่การกระจายตัว การกระจายตัวจะเริ่มจากบริเวณด้านในและกระจายออกมาทำให้หุ่นยนต์ค่อยๆ ปรับการกระจายตัวไปเรื่อยๆ จนถึงบริเวณที่เป็นขอบเขต จะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไม่มากแล้ว จึงทำให้โอกาสที่หุ่นยนต์ตัวใหม่จะผลักหุ่นยนต์ตัวอื่นหรือโดนผลักออกไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้องมีน้อยลง ผิดกับการไม่ใช้แนวคิดการปนเปื้อนและสลายตัวที่หุ่นยนต์จะเข้าสู่การกระจายตัวทันทีที่เข้าสู่บริเวณที่ถูกต้อง ซึ่งมีโอกาสสูงที่การเคลื่อนที่ไปสู่จุดศูนย์กลางมวลทันทีที่เข้าสู่บริเวณที่ถูกต้อง จะพาหุ่นยนต์ไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้อง เนื่องจากหุ่นยนต์ตัวนี้จะยังอยู่ในบริเวณใกล้กับขอบของบริเวณ หากจุดศูนย์กลางของบริเวณโวโรนอยอยู่ในบริเวณที่ไม่ถูกต้องแล้ว ก็เป็นไปได้มากที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่ไม่ถูกต้องตามไปด้วย เนื่องจาก

ตัวหุ่นยนต์อยู่ใกล้กับขอบของบริเวณอยู่แล้ว การเคลื่อนที่เล็กน้อยก็สามารถทำให้หุ่นยนต์ไปสู่บริเวณที่ไม่ถูกต้องได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

บทสรุป

6.1 บทสรุป

การใช้งานกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวทำให้เกิดปัญหาและความท้าทายใหม่ๆ ที่ไม่เคยมีอยู่ในระบบหุ่นยนต์ตัวเดียว การจัดเรียงตัวก็เป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญของการใช้งานกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัว เนื่องด้วยความจำเป็นใน การวางตำแหน่งของหุ่นยนต์ให้เหมาะสมกับงานเฉพาะอย่าง อาทิ การจัดเรียงตัวเพื่อเคลื่อนย้ายสิ่งของ หรือการจัดเรียงตัวเพื่อรวบรวมข้อมูล

ปัญหาการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์นั้นความสำคัญของปัญหาอยู่ที่ การจัดเรียงตัวหุ่นยนต์ไม่มีข้อมูลตำแหน่งแบบสัมบูรณ์เมื่อเทียบกับพื้นที่การทำงาน เนื่องจากหากทราบตำแหน่งสัมบูรณ์ของหุ่นยนต์แต่ละตัวแล้ว ปัญหานี้จะกลายเป็นปัญหาการวางแผนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตัวเดียวไปโดยปริยาย ดังนั้นสิ่งสำคัญในการทำงานคือการประสานงานและวางแผนระหว่างกลุ่มหุ่นยนต์เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ออกมาเป็นการจัดเรียงตัวตามที่ต้องการ ปัญหาการจัดเรียงตัวนั้นนอกจากจะแยกแยะตามรูปแบบผลลัพธ์ของการจัดเรียงตัวแล้ว ยังสามารถแยกแยะตามข้อมูลที่รับรู้ได้อีก เนื่องจากวิธีการทำงานจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากถ้าเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขข้อมูลที่รับรู้ เช่นการติดต่อสื่อสารที่สมมุติว่าสามารถติดต่อถึงกันได้หมด หรือการรับรู้ที่สมมุติว่ามีระยะทางไม่จำกัด

วิธีการควบคุมที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ได้ศึกษาการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ภายใต้ข้อจำกัดทางด้านการสื่อสารและการรับรู้ กล่าวคือมีการสื่อสารได้ในระยะจำกัดและมีการรับรู้เป็นระยะจำกัดเช่นกัน รวมถึงการที่หุ่นยนต์แต่ละตัวไม่มีการอ้างอิงตำแหน่งสัมบูรณ์เมื่อเทียบกับพื้นที่การทำงาน

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้กล่าวถึงวิธีการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อแก้ปัญหาการจัดเรียงตัวที่เลือกมาเป็นตัวอย่างสามปัญหา เพื่อแสดงถึงประเด็นที่น่าสนใจในการทำงานของการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์กล่าวคือ

- การจัดเรียงตัวแบบวงกลม แสดงถึงปัญหาของการสร้างคุณสมบัติแบบภาพรวมด้วยข้อมูลแบบท้องถิ่น
- การจัดกลุ่มหุ่นยนต์ แสดงถึงปัญหาของการจัดแบ่งทรัพยากรและการแบ่งงานในกลุ่มหุ่นยนต์
- การกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข แสดงถึงปัญหาของการทำงานร่วมกันของกลุ่มหุ่นยนต์

ขั้นตอนวิธีที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้กับปัญหาข้างต้นนั้นมีคุณสมบัติอันพึงประสงค์ของขั้นตอนวิธีสำหรับกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวสำหรับการใช้งานจริง กล่าวคือ

- **การทำงานแบบกระจาย** ขั้นตอนวิธีที่เสนอนี้มีการทำงานแบบกระจายคือหุ่นยนต์แต่ละตัวมีการทำงานเป็นของตนเอง ไม่จำเป็นต้องมีหัวหน้ากลุ่ม เนื่องจากการมีหัวหน้ากลุ่มจะก่อให้เกิดปัญหาจุดรวมข้อผิดพลาดได้ (single point of failure) และเมื่อ
- **การใช้ข้อมูลแบบท้องถิ่น** ขั้นตอนวิธีที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้ข้อมูลจากการรับรู้ของตัวหุ่นยนต์เองและข้อมูลที่ได้จากการสื่อสาร แต่ไม่ได้ใช้ข้อมูลภาพรวมของพื้นที่การทำงาน จึงทำให้ขั้นตอนวิธีที่เสนอนั้น
- **การติดต่อแบบท้องถิ่น** หุ่นยนต์ทั้งหมด
- **การทำงานเชิงขนาน**

6.2 แนวทางการประยุกต์ใช้งาน

ขั้นตอนวิธีการจัดเรียงตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ที่ได้เสนอไป มีความเป็นไปได้ที่จะนำปประยุกต์ใช้งานในงานหลากหลายประเภทอาทิเช่น

- **การรักษาความปลอดภัยตามชนิดพื้นที่** ในพื้นที่ที่ต่างกันอาจมีความต้องการการรักษาความปลอดภัยที่ต่างกันด้วย อาทิเช่นบริเวณภายในอาคารจะใช้กล้องวงจรปิดติดอยู่บนหุ่นยนต์ตรวจการณ์ ส่วนภายนอกอาคารอาจจะใช้เพียงหุ่นยนต์ที่ติดตั้งตัวรับรู้ความเคลื่อนไหว สำหรับงานที่กล่าวมาข้างต้นเราสามารถประยุกต์ใช้วิธีการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไขได้ โดยให้หุ่นยนต์สามารถรู้ความแตกต่างระหว่างบริเวณ โดยอาจจะเป็นสีของพื้น หรือเสาสัญญาณ (beacon)
- **การตรวจสอบสภาพอากาศ** ในพื้นที่ภัยภิบัติทางด้านสารเคมี จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีการตรวจสภาพอากาศของจุดต่างๆ ทั่วบริเวณภัยภิบัติ การที่หุ่นยนตแต่ละตัวจะติดตั้งตัวรับรู้ทุกแบบอาจจะไม่สะดวก เราสามารถประยุกต์ใช้วิธีของการจัดกลุ่มของหุ่นยนต์ที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ในการรวมหุ่นยนต์ที่ติดตั้งตัวรุบรู้หลายๆ แบบเข้ามาเป็นหนึ่งกลุ่ม เพื่อที่จะสามารถบอกคุณภาพของอากาศ ณ จุดนั้นๆ ได้ครบทุกตัวแปร นอกจากนี้เรายังสามารถประยุกต์ให้กลุ่มหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปทั่วบริเวณโวโรนอยของตน เพื่อเก็บข้อมูลให้ครบทุกจุดก็สามารถทำได้
- **การระวังภัยของกลุ่มหุ่นยนต์** เมื่อหุ่นยนต์เรียงตัวกันเป็นวงกลมจะเป็นสภาพที่หุ่นยนต์มีพื้นที่ผิวที่สัมผัสบริวณภายนอกน้อยที่สุด ซึ่งอาจจะนำมาใช้เมื่อกลุ่มหุ่นยนต์พบกับอันตรายต่างๆ เพื่อเพิ่มการอยู่รอดของหุ่นยนต์ เช่นเมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบพายุทราย การเรียงตัวกันเป็นวงกลมจะสามารถป้องกันหุ่นยนต์ที่อยู่ภายในจากความเสียหายได้
- **การประกอบชิ้นส่วนแบบกระจาย** โดยปกติแล้วการประกอบชิ้นส่วนจะกระทำด้วยสายพานในดรงงานการผลิต แต่หากเกิดภาวะจำเป็นที่หุ่นยนต์ต้องออกไปหาวัตถุดิบมาเอง เช่นการประกอบหุ่นยนต์ใหม่จากซากของหุ่นยนต์ที่ได้รับความเสียหาย เราจะสามารถใช้วิธีการจัดกลุ่มหุ่นยนต์ ในการรวบรวมวัตถุดิบให้ครบการประกอบเป็นหุ่นยนต์ที่สมบูรณ์หนึ่งตัว

- **การบริการเครือข่ายไร้สาย** ในพื้นที่ที่ต้องมีการใช้เครือข่ายไวร์เลสแลนในบริเวณที่เป็นบริเวณชั่วคราวหรือกรณีที่บริเวณมีการเปลี่ยนแปลงบ่อยๆ เช่นในการรบ หรือในการประชุมที่มีการย้ายห้องประชุมบ่อยๆ เราสามารถนำอุปกรณ์รับส่งสัญญาณติดตั้งไว้บนหุ่นยนต์แล้วทำการกระจายหุ่นยนต์เหล่านั้นด้วยแผนภาพโวโรนอยแบบจุดศูนย์กลางมวล ก็จะทำให้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณกระจายอยู่ทั่วบริเวณที่ต้องการใช้งานได้อย่างสม่ำเสมอ

6.3 แนวทางการพัฒนาต่อ

วิธีการควบคุมหุ่นยนต์ที่ได้เสนอไปนั้นแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ที่จะทำการพัฒนาความสมารถของขั้นตอนการควบคุมหุ่นยนต์ ที่ได้เสนอนี้ได้ในหลายแนวทาง เพื่อประยุกต์ใช้ในงานที่หลากหลายยิ่งขึ้น แนวทางการพัฒนาต่อมีดังนี้

6.3.1 การกระจายตัวแบบแบ่งความสำคัญ (Context sensitive coverage)

ในการกระจายตัวที่ได้เสนอไปในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ว่าจะในการกระจายตัวแบบมีเงื่อนไข หรือในการกระจายตัวของกลุ่มหุ่นยนต์ในการจับกลุ่ม จะเป็นการกระจายตัวที่สม่ำเสมอกล่าวคือมีพื้นที่รับผิดชอบของหุ่นยนต์หรือกลุ่มหุ่นยนต์เท่าๆ กัน แต่ในความเป็นจริงแล้ว พื้นที่บางจุดอาจต้องการการครอบคลุมที่หนาแน่นหรือแบาบางกว่าที่อื่น ตัวอย่างเช่น การใช้การกระจายหุ่นยนต์เพื่อเฝ้ายามในห้างสรรพสินค้า เราอาจจะต้องการให้หุ่นยนต์เฝ้าในบริเวณเคาน์เตอร์เก็บเงินมากกว่าโถงทางเดินเป็นต้น ปัญหาของการกระจายตัวแบบแบ่งความสำคัญคือ ความหนาแน่นของหุ่นยนต์จะถูกกำหนดโดยข้อมูลจากการรับรู้ของหุ่นยนต์ ว่า ณ บริเวณใดหุ่นยนต์ควรกระจายตัวด้วยความหนาแน่นที่มาก และบริเวณใดที่หุ่นยนต์ควรกระจายตัวอย่างเบาบาง วิธีที่เหมาะสมในการแก้ปัญหานี้คือการใช้บริเวณโวโรนอยแบบศูนย์กลางเหมือนเดิม แต่ในการสร้างบริเวณโวโรนอยจะเป็นบริเวณโวโรนอยแบบถ่วงน้ำหนักด้วยค่าความสำคัญของบริเวณนั้น ๆ

อีกกรณีที่สามารถประยุกต์ใช้การกระจายตัวแบบแบ่งความสำคัญได้คือ กรณีที่หุ่นยนต์หรือลุ่มหุ่นยนต์มีความสามารถในการรับรู้ไม่เท่ากับ หุ่นยนต์ที่สามารถรับรู้ได้ดีกว่าควรจะครอบคลุมพื้นที่มากกว่าหุ่นยนต์ที่มีความสามารถน้อยกว่า

6.3.2 การซ่อมแซมตัวเอง

ในการใช้งานจริงมีโอกาสที่หุ่นยนต์จะเกิดการเสียหายขึ้นได้เช่นเกิดจากสภาพแวดล้อมหรือเกิดจากความผิดพลาดของหุ่นยนต์เอง และเมื่อเกิดการเสียหายขึ้น กลุ่มหุ่นยนต์ควรจะมีความสามารถในการซ่อมแซมการทำงานโดยการส่งหุ่นยนต์ตัวใหม่เข้าไปแทนที่ ความสามารถในการซ่อมแซมตัวเองนั้นจะประกอบด้วยขั้นตอนหลักๆคือ การระบุหุ่นยนต์ที่เสียหาย และการส่งหุ่นยนต์ใหม่เข้ามาแทนที่ การระบุหุ่นยนต์ที่เสียหายอาจทำได้โดยให้หุ่นยนต์มีการโต้ตอบกับเพื่อนรอบข้างเสมอ และเมื่อใดที่หุ่นยนต์ขาดหารสื่อสารกับเพื่อนบ้านให้ถือว่าหุ่นยนต์ตัวนั้นได้รับความเสียหาย

ส่วนการส่งหุ่นยนตเข้ามาแทนที่ เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่เข้ามาแทนที่นั้นอาจจะเป็นการเดินทางตามขอบของบริเวณโวโรนอยจนถึงขอบของบริเวณโวโรนอยที่มีหุ่นยนต์ที่เสียหายแล้วจึงเคลื่อนที่เข้าแทนที่

6.3.3 การกระจายตัวในสามมิติ

ปัญหาอย่างเช่นการตรวจสอบพื้นผิวของกระสวยอวกาศว่ามีรอยรั่วหรือไม่ ต้องอาศัยการทำงานของการกระจายตัวของหุ่นยนต์ แต่พื้นที่การทำงานไม่ได้เป็นระนาบสองมิติและมีความสลับซับซ้อน หากสามารถพัฒนาขั้นตอนวิธีที่สามารถครอบคลุมพื้นผิวที่มีการวางตัวซับซ้อนในสามมิติได้ จะเพิ่มประโยชน์ให้วิธีการกระจายตัวได้อีกมาก

6.3.4 การติดตามวัตถุ

เมื่อเราได้หุ่นยนต์ที่กระจายตัวกันอยู่แล้ว จะสามารถใช้หุ่นยนต์เหล่านั้นติดตามวัตถุที่เคลื่อนที่เข้ามายังพื้นที่ที่ครอบครองอยู่ เพื่อการใช้งานบางอย่างเช่นการเฝ้าระวัง การส่งต่อการติดตามวัตถุอาจจะกระทำเมื่อวัตถุนั้นเข้าสู่บริเวณโวโรนอยของหุ่นยนต์ตัวใหม่ การส่งต่อการติดตามนั้นทำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับวุตถุนั้นให้สูงที่สุด จะเห็นได้ว่าด้วยคุณสมบัติของบริเวรโวโรนอย จุดใดๆ ในบริเวณโวโรนอยจะใกล้กับจุดกำดนิกของบริเวณโวโรนอยนั้น มากกว่าจุดกำเนิดอื่น เมื่อวัตถุเข้ามาถึงบริเวณโวโรนอยของหุ่นยนต์ตัวใด ก็ควรจะให้หุ่นยนต์ตัวนั้นทำหน้าที่ติดตามวัตถุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. J. Liu and J. Wu. Multi-Agent Robotic Systems. The CRC Press, 2001.
2. T. Arai, E. Pagello, and L. E. Parker. Editorial: Advances in Multi-Robot Systems. IEEE Transactions on robotics and automation 18(2002): 655-661.
3. E. Bahceci, O. Soysal, and E. Sahin. A Review: Pattern Formation and Adaptation in Multi-Robot Systems. Technical report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, October 2003.
4. H. C.-H. Hsu and A. Liu. Applying a taxonomy of formation control in developing a robotic system. In IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence, 2005.
5. P. Santana, J. Barata, H. Cruz, A. Mestre, J. Lisboa, and L. Flores. A multi-robot system for landmine detection. In Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005. 10th IEEE Conference on, 2005.
6. Z. Wang, A. M.N., N. E., and T. T. A multiple robot system for cooperative object transportation withvarious requirements on task performing. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1999.
7. M. Koes, I. Nourbakhsh, and K. Sycara. Heterogeneous multirobot coordination with spatial and temporal constraints. In Proceedings of the Twentieth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI), 2005.
8. L. Parker. L-alliance: Task-oriented multi-robot learning in behavior-based systems. Journal of Advanced Robotics (1997).
9. T. S. Dahl, M. J. Mataric, and G. S. Sukhatme. Emergent robot differentiation for distributed multi-robot task allocation. In International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, 2004.
10. R. Murphy, C. Lisetti, L. Irish, R. Tardif, and A. Gage. Emotion-based control of cooperating heterogeneous mobile robots. IEEE Transactions on robotics and automation 18(2001).
11. B. P. Gerkey and M. J. Mataric. A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. International Journal of Robotics Research 23, 9(2004): 939-954.
12. T. Balch and M. Hybinette. Social potentials for scalable multi-robot formations. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000.

13. S. Carpin and L. Parker. Cooperative leader following in a distributed multi-robot system. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002.

14. Y. Zou and K. Chakrabarty. Sensor deployment and target localization based on virtual forces. In INFOCOM, 2003, 2003.

15. S. Dhillon, K. Chakrabarty, and S. Iyengar. Sensor placement for grid coverage under imprecise detections. In International Conference on Information Fusion, 2002.

16. J. Connell. A colony architecture for an artificial creature. Technical report, Cambridge, MA, USA, 1989.

17. J. Hampshire, J. Salido, J. Dolan, and P. Khosla. A modified reactive control framework for cooperative mobile robots. In SPIE International Symposium on Sensor Fusion and Decentralized Control in Autonomous Robotic Systems, 1997.

18. J. H. Connell. Sss: A hybrid architecture applied to robot navigation. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992.

19. M. Mataric. Behavior-based robotics as a tool for synthesis of artificial behavior and analysis of natural behavior. Trends in Cognitive Science 2(1998): 82-87.

20. R. A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. IEEE Journal of Robotics and Automation 2(1986): 14-23.

21. T. Balch and R. Arkin. Behavior-based Formation Control for Multi-robot Teams. IEEE Transactions on Robotics and Automation 14(1998): 926-939.

22. T. R. Balch. Integrating learning with motor schema-based control for a robot soccer team. In RoboCup-97: Robot Soccer World Cup I, pp. 483--491, London, UK. Springer-Verlag, 1998.

23. O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. The International Journal of Robotics Research 5(1986).

24. A. Howard, M. J. Mataric, and G. S. Sukhatme. Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem. In P roceedings of the 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS02), 2002.

25. F. E. Schneider and D. Wildermuth. A potential field based approach to multi robot formation navigation. In International Conference on Robotics Intelligent Systems and Signal Processing, 2003.

26. S. P. Lloyd. Least squares quantization in pcm. IEEE Transactions on Information Theory 28(1982): 127-137.

27. T. Arai, H. Ogata, and T. Suzuki. Collision Avoidance Among Multiple Robots Using Virtual Impedance. In IEEE/RSJ International Workshop onIntellignet Robots andSystems, 1989.

28. S. M. Farritor and S. Goddard. Intelligent Highway Safety Markers. IEEE Intelligent Systems 19, 6(2004): 8-11.

29. T. R. Federation. Robocup official site. Available from: http://www.robocup.org/, 2007.

30. A. Sorin, S. Peter, and V. Manuela. Building a dedicated robotic soccer system. In International Conference on Intelligent Robots and Systems Workshop on RoboCup, 1996.

31. M. Veloso, P. Stone, and K. Han. The CMUnited-97 robotic soccer team: Perception and multiagent control. In K. P. Sycara and M. Wooldridge, editors, Proceedings of the 2nd International Conference on Autonomous Agents, pp. 78--85, New York. ACM Press, 1998.

32. T. Bersano-Begey. Multi-agent teamwork, adaptive learning, and adversarial planning in robocup using a prs architecture. In 1997 IJCAI Workshop on RoboCup., 1997.

33. C. Reynolds. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, in Computer Graphics. In SIGGRAPH '87, 1987.

34. C. W. Reynolds. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. Computer Graphics 21, 4(1987): 25-34.

35. T. Burton. Batman Returns. Movie, 1992.

36. L. E. Parker. Designing Control Laws for Cooperative Agent Teams. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1993.

37. J. P. Desai. A graph theoretic approach for modeling mobile robot team formations. Journal of Robotic Systems 19(2002): 511-525.

38. G. A. Kaminka and R. Glick. Towards Robust Multi-Robot Formations. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006.

39. Q. Chen and L. J.Y.S. Distributed motion coordination of multiple robots. In IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1994.

40. K. Sugihara and I. Suzuki. Distributed Algorithms for Formation of Geometric Patterns with Many Mobile Robots. Journal of Robotic Systems 13(1996): 127-139.

41. T. Balch and M. Hybinette. Social Potentials for Scalable Multirobot Formations. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA-2000), 2000.

42. J. Fredslund and M. Mataric. A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communications. IEEE Transactions on Robotics and Automation 18(2002): 837-846.

43. W. Spears and D. Gordon. Using artificial physics to control agents. In IEEE International Conference on Information, Intelligence, and Systems, 1999.

44. T. D. Barfoot and C. M. Clark. Motion planning for formations of mobile robots. Robotics and Autonomous Systems 46(2004): 65-78.

45. D. W. Gage. Command Control for Many-Robot Systems. In AUVS-92, the Nineteenth Annual AUVS Technical Symposium, Huntsville AL. June 1992.

46. B. Gerkey, R. Vaughan, and A. Howard. The player/stage project: Tools for multi-robot and distributed sensor systems. In IEEE International Conference on Advance Robotics, 2003.

47. M. Batalin and G. Sukhatme. Spreading out: A local approach to multi-robot coverage. In The 6th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, 2002.

48. J. L. Pearce, P. E. Rybski, S. A. Stoeter, and N. Papanikolopoulos. Dispersion behaviors for a team of multiple miniature robots. In IEEE International Conference On Robotics and Automation, 2003.

49. A. Howard, M. J. Mataric, and G. S. Sukhatme. An incremental self-deployment algorithm for mobile sensor networks. Autonomous Robots 13, 2(2002): 113--126.

50. A. Howard, M. J. Mataric, and G. S. Sukhatme. Localization for mobile robot teams using maximum likelihood estimation. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002.

51. A. F. Winfield. Distributed sensing and data collection via broken ad hoc wireless connected networks of mobile robots. In The 4th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, 2000.

52. J. Cortes, S. Martinez, T. Karatas, and F. Bullo. Coverage control for mobile sensing networks. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002.

53. J. Tan., N. Xi., W. Sheng., and J. Xiao. Modeling multiple robot systems for area coverage and cooperation. In IEEE International Conference on Robotics and Automation,, pp. 2568-2573, New Orleans, LA. April 2004.

54. G. Wang, G. Cao, and T. Porta. Movement assisted sensor deployment. In IEEE Conference on Computer Communications, 2003.

55. I. Rekleitis, V. Lee-Shue, A. P. New, and H. Choset. Limited communication, multi-robot team based coverage. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3462-3468, New Orleasn, LA. April 2004.

56. L. Parker. Alliance: An architecture for fault-tolerant multi-robot cooperation. IEEE Transactions on Robotics and Automation 14(1998): 220-240.

57. M. B. Dias and A. T. Stentz. Traderbots: A market-based approach for resource, role, and task allocation in multirobot coordination. Technical report, CMU-RI, 2003.

58. R. Davis and R. G. Smith. Negotiation as a metaphor for distributed problem solving. (1988): 333--356.

59. C. V. Boys. Soap-Bubbles: Their Colours and the Forces Which Mold Them. Gannon Distributing Co, 1959.

60. D. W. Thompson. On Growth and Form. Cambridge University Press, 1942.

61. Q. Du, V. Faber, and M. Gunzburger. Centroidal voronoi tessellations:applications and algorithms. SIAM REVIEW 41, 4(1999): 637-676.

62. G. Barlow. Hexagonal territories. Animal Behavior 22(1974): 876–878.

63. A. Suzuki and M. Iri. Approximation of a tessellation of the plane by a voronoi diagram. Journal of Operation Research Society of Japan 29(1986): 69-96.

64. T. Maneewarn and P. Rittipravat. Sorting objects by multiple robots using voronoi separation and fuzzy control. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, 2003.

65. F. Aurenhammer. Voronoi diagrams a - survey of a fundamental geometric data structure. ACM Computing Survey 23, 3(1991): 345--405.

66. J. Kurose and K. Ross. Computer Networking. Addison Wesley, 2003.

ภาคผนวก

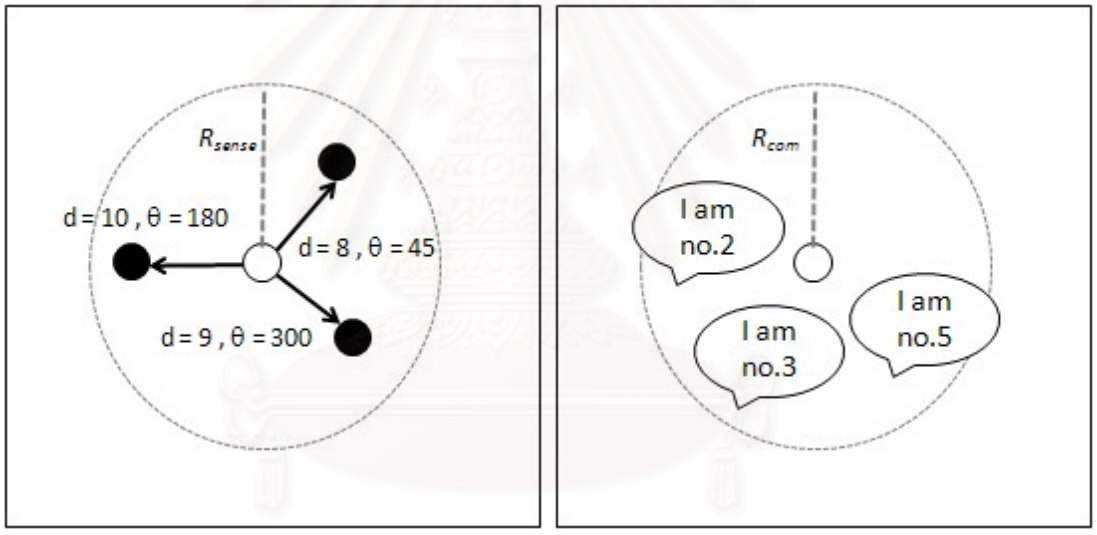
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การอ้างอิงตัวตนในการสื่อสารของกลุ่มหุ่นยนต์

ก.1 ปัญหาการเชื่อมโยงการรับรู้และการสื่อสาร

ปัญหาหนึ่งที่สำคัญสำหรับการทำงานของกลุ่มหุ่นยนต์คือการเชื่อมโยงการรับรู้ของหุ่นยนต์เข้ากับการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ อาทิเช่น หากหุ่นยนต์ตรวจพบเพื่อนบ้านต่างชนิดอยู่ทางทิศเหนือห่างไปเป็นระยะ 30 หน่วยและต้องการจะสื่อสารกับหุ่นยนต์ตัวนั้นเพื่อให้เข้ามารวมกลุ่ม ในแง่ของการสื่อสาร หุ่นยนต์ที่ต้องการส่งคำขอนั้นจะทราบได้อย่างไร ว่าต้องสื่อสารกับหุ่นยนต์หมายเลขใด เนื่องจากตัวรับรู้มีข้อมูลเพียงชนิดและตำแหน่งของหุ่นยนต์รอบข้าง ไม่สามารถรู้ได้ว่าหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวนั้นเป็นหุ่นยนต์หมายเลขเท่าใด ปัญหานี้สามรถแสดงให้เห็นได้ดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1: แสดงปัญหาการเชื่อมโยงการรับรู้และการสื่อสาร (ก) การรับรู้ของหุ่นยนต์(ข) การสื่อสารของหุ่นยนต์

ในรูปที่ ก.1 รูป (ก) แสดงถึงว่าการรับรู้ของหุ่นยนต์จะสามารถทราบชนิด, ระยะทาง และทิศทางของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านได้ ในขณะที่ข้อมูลจากการสื่อสารจะได้ข้อความที่หุ่นยนต์เพื่อนบ้านส่งมาให้ แต่ไม่สามารถระบุทิศทางได้ เนื่องจากการระบุทิศทางหรือตำแหน่งจากการสื่อสารต้องใช้อุปกรณ์พิเศษ เช่นเสาอากาศแบบแถวที่สามารถระบุทิศทางสัญญาณได้ ปัญหาของการเชื่อมโยงการรับรู้กับการสื่อสารเกิดขึ้นเมื่อ หุ่นยนต์ต้องการสื่อสารกับเพื่อนบ้านตัวใดตัวหนึ่งที่ทราบมาจากการรับรู้ เช่นต้องการส่งข้อความไปให้หุ่นยนต์ตัวที่ใกล้ที่สุด แต่หุ่นยนต์ทราบเพียงแต่ว่าหุ่นยนต์ที่อยู่รอบๆตัวคือหุ่นยนต์หมายเลข 2,3 และ 5 แต่ไม่ทราบว่าหุ่นยนต์ตัวใดเป็นหุ่นยนต์ตัวที่อยู่ใกล้ที่สุด จึงไม่สามารถส่งคำสั่งไปยังหุ่นยนต์ตัวที่ใกล้ที่สุดได้

ดังนั้นปัญหาของการอ้างอิงตัวตนในการสื่อสารของกลุ่มหุ่นยนต์นิยามดังนี้ หุ่นยนต์มีข้อมูลตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ที่อยู่ภายในรัศมี R_{sense} ต้องการที่จะส่งข้อมูลไปยังหุ่นยนต์ตัวดังกล่าวแบบเฉพาะเจาะจง โดยที่หุ่นยนต์ตัวส่งไม่ทราบหมายเลขประจำตัวของผู้รับ

วิธีที่จะเสนอต่อไปในบทนี้เป็นวิธีการสื่อสารที่ใช้การเชื่อมโยงการรับรู้กับการสื่อสารของหุ่นยนต์ด้วยวิธี การอ้างอิงแบบย้อนกลับ ซึ่งมีหลักการทำงานโดยสรุปคือ หากหุ่นยนต์ต้องการติดต่อสื่อสารกับหุ่นยนต์ตัวใดที่อยู่ในรัศมีการรับรู้ ให้ส่งตำแหน่งของหุ่นยนตฺที่ต้องการติดต่อด้วยพร้อมไปกับข้อมูลที่ต้องการส่ง หากหุ่นยนต์ตัวใดได้รับข้อมูลและตรวจสอบจากการรับรู้พบหุ่นยนต์ตัวที่ส่งข้อมูลอยู่ ในตำแหน่งที่สอดคล้องกับข้อมูลที่ได้รับมา หุ่นยนต์ที่ได้รับข้อความจะทราบได้ทันทีว่าหุ่นยนต์ผู้ส่งข้อมูลนั้นต้องการสื่อสารกับตน

ก.2 แนวคิดเบื้องต้นของการอ้างอิงตัวตนในการสื่อสารของกลุ่มหุ่นยนต์

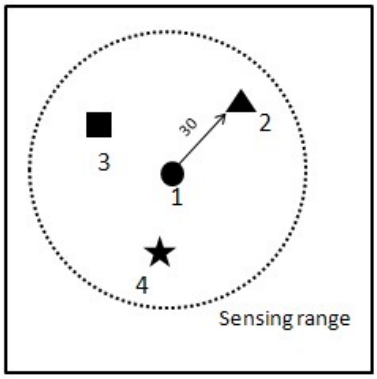
แนวคิดเบื้องต้นของการอ้างอิงตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์นั้นอาศัยแนวคิดที่ว่า หุ่นยนต์สามารถอ้างอิงสิ่งที่ตนรับรู้ได้ด้วยตัวรับรู้ต่างๆ เข้ากับการสื่อสารได้โดยอาศัยข้อมูลจากตัวรับรู้ที่ เข้ากันได้จากทั้งหุ่นยนต์ที่ต้องการเริ่มการสื่อสารและหุ่นยนต์ที่เป็นตัวรับการสื่อสาร ข้อมูลที่จะสามารถอ้างอิงความเข้ากันได้นั้นต้องอยู่ในรูปแบบที่เป็นข้อมูลที่เทียบกับแกนอ้างอิงเดียวกัน ในที่นี้จึงเลือกใช้แกนอ้างอิงคือทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก ซึ่งสามารถใช้อ้างอิงได้แม้ว่าจะเป็นหุ่นยนต์คนละตัวกัน

หุ่นยนต์จะทำการระบุระยะทาง, ทิศทางและชนิดของหุ่นยนต์ตัวที่ตนต้องการสื่อสารด้วยไปพร้อมกับข้อมูลระบุตัวตนของตนเองว่าตัวหุ่นยนต์ที่เป็นผู้เริ่มการสื่อสารเป็นหุ่นยนต์ชนิดใดและเลขที่สำหรับใช้ในการสื่อสารเป็นเท่าใด เมื่อหุ่นยนต์ที่อยู่ในรัศมีการสื่อสารได้รับข้อมูล ก็จะสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณว่าตนเองนั้นเป็นหุ่นยนต์ผู้รับสำหรับการสื่อสารนั้นหรือไม่ โดยอาศัยหลักที่ว่า หุ่นยนต์ผู้รับควรจะมองเห็นหุ่นยนต์ผู้เริ่มการสื่อสารได้และการวางตัวที่รับรู้นั้นต้องสอดคล้องกับข้อมูล ระยะทาง, ทิศทาง และชนิดของหุ่นยนต์ ที่หุ่นยนต์ตัวนั้นได้รับมา ถ้าข้อมูลสอดคล้องกัน แสดงว่าหุ่นยนต์ตัวนั้นเป็นหุ่นยนต์ผู้รับของข้อความนี้ ให้เริ่มการสื่อสารกับหุ่นยนต์ผู้เริ่มการสื่อสารได้ ในที่นี้จะเรียกวิธีการนี้ว่าการอ้างอิงย้อนกลับ

วิธีการอ้างอิงย้อนกลับสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนได้ดังนี้

ก.2.1 การระบุตัวหุ่นยนต์ที่ต้องการติดต่อด้วย

จากขั้นตอนวิธีการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์ทั้งสามแบบที่เสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์จำเป็นต้องติดต่อกับหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ ที่มีชนิดและอยู่ในตำแหน่งตามที่ต้องการ หุ่นยนต์ตัวที่ต้องการเริ่มทำการติดต่อจำเป็นต้องระบุตำแหน่งสัมพัทธ์และชนิดของหุ่นยนต์ตัวที่ต้องการทำการสื่อสารด้วยให้ถูกต้อง



รูปที่ ก.2: การระบุตัวหุ่นยนต์ที่ต้องการติดต่อด้วย

ในรูปที่ ก.2จะเห็นได้ว่าหากหุ่นยนต์หมายเลข 1 ต้องการสื่อสารกับหุ่นยนต์ที่อยู่ทางตะวันออกเฉียงหนือห่างเป็นระยะ 30 จากตัวเอง สามารถทำได้โดยการระบุว่าต้องการสื่อสารกับหุ่นยนต์หมายเลข 2 แต่โดยความเป็นจริงแล้วหุ่นยนต์หมายเลข 1 จะไม่สามารถจับคู่หมายเลขของหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ กับตำแหน่งของหุ่นยนต์เหล่านั้นได้โดยตรง เพราะความสามารถในการจับคู่ระหว่างการรับรู้และการสื่อสารดังกล่าว จะต้องการความสามารถในการรับรู้ที่สูงขึ้น เช่นการติดรหัสสีไว้ที่หุ่นยนต์ทุกตัว และให้หุ่นยนต์ทุกตัวมีกล้องเพื่อทำการประมวลพลภาพเพื่อใช้ในการระบุหมายเลขในการสื่อสาร เข้ากับตำแหน่งที่รับรู้ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จำกัดอยู่เพียงการใช้ตัวรับรู้พื้นฐานซึ่งคือ การรับรู้ระยะ,ทิศทาง และชนิดของหุ่นยนต์

ในขั้นตอนการระบุตัวหุ่นยนต์ที่ต้องการติดต่อด้วยสำหรับกรณีตัวอย่างในรูปที่ ก.2 คือการระบุว่าหุ่นยนต์ที่ต้องการติดต่อคือ หุ่นยนต์ชนิดสามเหลี่ยม ที่อยู่ทางตะวันออกเฉียงเหนือห่างไปเป็นระยะสามสิบหน่วยจากตนเอง

ก.2.2 ส่งข้อมูลขอติดต่อสื่อสาร

ในขั้นตอนการขอติดต่อสื่อสารกับหุ่นยนต์ตัวอื่น หุ่นยนต์ตัวที่ร้องขอจะต้องระบุหุ่นยนต์ตัวที่ต้องการติดต่อตามหัวข้อก่อนหน้านี้แล้ว หุ่นยนต์ที่ร้องขอติดต่อสื่อสารยังต้องระบุข้อมูลเกี่ยวกับตัวเองด้วยเพื่อให้หุ่นยนต์ที่ได้รับข้อมูลสามารถนำข้อมูลมาตรวจสอบย้อนกลับได้ว่าตัวมันเองเป็นหุ่นยนต์เป้าหมายในคำขอติดต่อสื่อสารนั้นๆ หรือไม่

เมื่อเทียบกับตัวอย่างในรูปที่ ก.2 นอกจากข้อมูลที่ระบุเป้าหมายการติดต่อว่าเป็นหุ่นยนต์ชนิดสามเหลี่ยม ที่อยู่ทางตะวันออกเฉียงเหนือห่างไปเป็นระยะสามสิบหน่วยจากตนเองแล้ว ยังต้องระบุว่าผู้ร้องขอเป็นหุ่นยนต์ชนิดวงกลมเพื่อใช้ในการตรวจสอบย้อนกลับของหุ่นยนต์ที่ได้รับการติดต่อ และมีหมายเลขในการติดต่อสื่อสารเป็นหมายเลขสองเพื่อใช้ในการติดต่อกลับจากหุ่นยนต์ที่ได้รับการติดต่อ

ดังนั้นข้อมูลที่ต้องทำการส่งเพื่อขอการติดต่อสื่อสารจะเป็นดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.1: ข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสาร

ทิศทางของหุ่นยนต์ที่ต้องการสื่อสารด้วย
ระยะห่างของหุ่นยนต์ที่ต้องการสื่อสารด้วย
ชนิดของหุ่นยนต์ที่ต้องการสื่อสารด้วย
ชนิดของหุ่นยนต์ที่เป็นตัวร้องขอการสื่อสาร
หมายเลขของหุ่นยนต์ที่เป็นตัวร้องขอการสื่อสาร

ก.2.3 หุ่นยนต์ที่ได้รับข้อมูลทำการตัดสินใจ

ข้อมูลที่กล่าวถึงในหัวข้อที่ผ่านมาจะถูกส่งแบบกระจายภายในรัศมีการสื่อสารของหุ่นยนต์ที่ต้องการทำการสื่อสาร เมื่อมีหุ่นยนต์ได้รับข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสารตามตารางที่ ก.2แล้วจะทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่หุ่นยนต์ตัวนั้นเองรับรู้ว่าจากตัวรับรู้ ว่าข้อมูลที่รับรู้มานั้นสอดคล้องกับข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสารเพียงพอที่จะสนับสนุนว่าตัวมันเองเป็นเป้าหมายของการร้องขอการสื่อสารครั้งนี้หรือไม่

เมื่อเทียบกับตัวอย่างในรูปที่ ก.2แล้วข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสารจะเป็นดังนี้

ตารางที่ ก.2: ข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสาร

ทิศทางของหุ่นยนต์ที่ต้องการสื่อสารด้วย	ตะวันออกเฉียงเหนือ
ระยะห่างของหุ่นยนต์ที่ต้องการสื่อสารด้วย	30
ชนิดของหุ่นยนต์ที่ต้องการสื่อสารด้วย	สามเหลี่ยม
ชนิดของหุ่นยนต์ที่เป็นตัวร้องขอการสื่อสาร	วงกลม
หมายเลขของหุ่นยนต์ที่เป็นตัวร้องขอการสื่อสาร	1

เมื่อหุ่นยนต์หมายเลขสองได้รับข้อมูลดังตารางข้างต้น หุ่นยนต์จะทำการเทียบกลับว่า ตัวมันเองมองเห็น**หุ่นยนต์แบบวงกลม** อยู่ทางทิศ **ตะวันตกเฉียงใต้**และมีระยะห่าง **30 หน่วย** หรือไม่ ถ้าข้อมูลสอดคล้องตามหุ่นยนต์หมายเลข 2 จะทำการติดต่อกลับไปยังหุ่นยนต์หมายเลข 1 เพื่อแจ้งว่าหุ่นยนต์หมายเลข 2 คือเป้าหมายของคำร้องการสื่อสารนั้น

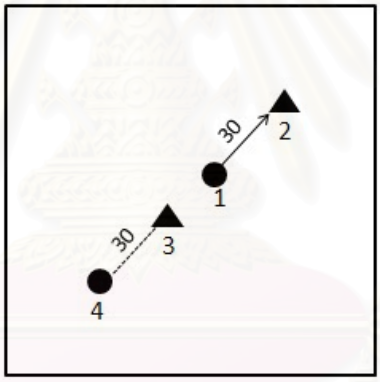
การอ้างอิงแบบย้อนกลับอาศัยประโยชน์จากการที่หุ่นยนต์มีข้อมูลทิศทางการวางตัวที่สามารถนำมาใช้อ้างอิงระหว่างกันได้ เนื่องจากการวางตัวนี้เป็นข้อมูลที่เทียบกับแกนอ้างอิงเดียวกัน ซึ่งในการใช้งานจริงแกนอ้างอิงนี้คือทิศทางของสนามแม่เหล็กโลก จึงสามารถใช้อ้างอิงได้แม้ว่าจะเป็นหุ่นยนต์คนละตัวกัน

ก.3 ปัญหาของการอ้างอิงตัวตน

การอ้างอิงตัวตนโดยแนวคิดการอ้างอิงแบบย้อนกลับที่ได้เสนอไปในหัวข้อก่อนหน้านั้น สามารถใช้ในการอ้างอิงในการติดต่อสื่อสารได้จริงในสถานการณ์ทั่วไป ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ ก.2 แต่

แนวคิดการอ้างอิงแบบย้อนกลับยังมีข้อบกพร่องในความสามารถอีกหลายประการอาทิ

1. **ความผิดพลาดของตัวรับรู้** เป็นปัญหาที่อาจเกิดได้จากความผิดพลาดของตัวรับรู้ซึ่งจะมีความผิดพลาดในการวัดเกิดขึ้นได้เสมอ เช่นหากระยะทางที่หุ่นยนต์ตัวที่ร้องขอการติดต่อสื่อสารวัดได้ไม่เท่ากับระยะทางที่หุ่นยนต์เป้าหมายวัดได้ เป็นผลให้ไม่เกิดการเริ่มการสื่อสารระหว่างหุ่นยนต์ทั้งสองตัวดังกล่าวทั้งๆ ที่อยู่ในสถานะที่จะสื่อสารกันได้ ความผิดพลาดเกี่ยวกัตัวรับรู้นี้เป็นปัญหาที่พบมากในการใช้งานจริงของหุ่นยนต์จึงจำเป็นต้องเตรียมการแก้ไขปัญหานี้ไว้ด้วย
2. **ความกำกวมในการตัดสินใจของหุ่นยนต์เป้าหมาย** เมื่อมองในลักษณะการวางตัวพื้นฐานวิธีการที่เสนอสามารถทำงานได้ถูกต้อง แต่เมื่อมองว่าการส่งข้อความออกไปนั้นอาจทำด้วยการส่งด้วยคลื่นวิทยุ หรือสื่ออื่นๆ ที่ไม่ใช่การสื่อสารแบบต้องอยู่ในแนวสายตา เมื่อทำการประกาศขอทำการติดต่อสื่อสารไปแล้ว ข้อความจะเดินทางไปในทุกทิศทาง ซึ่งหุ่นยนต์ที่อยู่ในตำแหน่งอื่น อาจทำการตรวจสอบย้อนกับแล้วพบว่าตนเองเป็นหุ่นยนต์เป้าหมายของการสื่อสารนั้น ๆ ทำให้การทำงานของการอ้างอิงตำแหน่งแบบย้อนกลับผิดพลาดได้



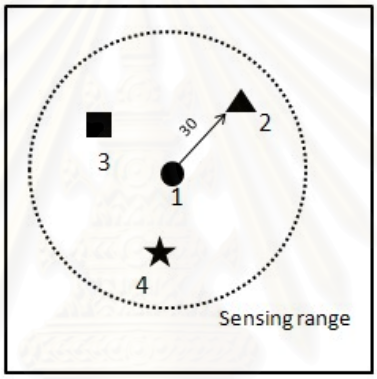
รูปที่ ก.3: กรณีที่อาจเกิดความกำกวมในการตัดสินใจของหุ่นยนต์เป้าหมาย

ตัวอย่างเช่นในรูปที่ ก.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อหุ่นยนต์หมายเลข 1 ต้องการจะสื่อสารกับหุ่นยนต์หมายเลข 2 หุ่นยนต์จะทำการส่งข้อมูลขอติดต่อสื่อสารดังแสดงในตารางที่ ก.2 เพื่อหาหุ่นยนต์ที่เป็นหุ่นยนต์ชนิดสามเหลี่ยม และมองเห็นหุ่นยนต์ชนิดวงกลมอยู่ทางตะวันตกเฉียงใต้ห่างออกไป 30 หน่วย ข้อมูลนี้จะทำการส่งออกไปในทุกทิศทาง และเมื่อหุ่นยนต์หมายเลข 2 และ 3 ได้รับข้อมูล หุ่นยนต์ทั้งสองจะทำการตรวจสอบว่าสิ่งที่ตัวรับรู้ตรวจสอบได้นั้นตรงกับที่ได้ระบุไว้ในข้อมูลการขอติดต่อสื่อสารของหุ่นยนต์หมายเลข 1 หรือไม่ ซึ่งในกรณีนี้ปรากฏว่าทั้งหุ่นยนต์หมายเลข 2 และ 3 มีสภาพแวดล้อมที่รับรู้ได้เหมือนกันคือเป็นหุ่นยนต์ชนิดสามเหลี่ยม และมองเห็นหุ่นยนต์ชนิดวงกลมอยู่ทางตะวันตกเฉียงใต้ห่างออกไป 30 หน่วย ทำให้เกิดความกำกวมว่าจะเลือกสื่อสารกับหุนยนต์ตัวใดดี เพราะถ้าเลือกหุ่นยนต์หมายเลข 3 จะทำให้การทำงานผิดพลาดอย่างชัดเจน

ตัวอย่างความผิดพลาดทั้งสองนี้จำเป็นต้องนำมาเพิ่มเติมในแนวคิดของการอ้างอิงย้อนกลับ เพื่อให้เป็นวิธีการที่สามารถใช้งานได้จริงต่อไป

ก.4 วิธีการอ้างอิงตัวตนด้วยรูปแบบร่วม

จากหัวข้อที่แสดงใน ก.2 จะเห็นได้ว่าเป็นการอ้างอิงแบบย้อนกลับระหว่างหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารกับหุ่นยนต์ที่ได้รับข้อมูลการร้องขอนั้นเท่านั้น ไม่ได้รวมถึงหุ่นยนต์แวดล้อมตัวอื่นมีตำแหน่งเท่าใด ซึ่งข้อมูลนี้มีประโยชน์ต่อการระบุตัวตนกล่าวคือ หากหุ่นยนต์ที่ร้องขอการสื่อสารมีข้อมูลตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง จะสามารถใช้ลดความกำกวมในการระบุตัวตนได้โดยการส่งตำแหน่งเหล่านั้นเป็นข้อมูลเพิ่มเติมในคำขอติดต่อสื่อสาร เมื่อหุ่นยนต์ตัวอื่นได้รับข้อมูลดังนั้นจะสามารถนำไปเปรียบเทียบได้ว่า ข้อมูลอื่นๆ ของหุ่นยนต์ผู้ขอการติดต่อสื่อสารสอดคล้องกับข้อมูลที่หุ่นยนต์ตัวนั้นๆ เพียงใด ดังแสดงในรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4: ตัวอย่างการอ้างอิงตัวตนด้วยรูปแบบร่วม

จากตัวอย่างในรูปที่ ก.4 ได้แสดงใน ก.3 ว่าอาจเกิดปัญหาได้หากใช้วิธีการอ้างอิงตัวตนแบบย้อนกลับเพียงอย่างเดียว เนื่องจากมีหุ่นยนต์ที่มองเห็น หุ่นยนต์ที่มีจำแหน่งและชนิดเช่นเดียวกับหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการติดต่อมากกว่าหนึ่งตัว แต่ถ้าเพิ่มข้อมูลสภาพแวดล้อมของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการติดต่อสื่อสารไปด้วยจะสามารถกำจัดความกำกวมนี้ไปได้ โดยในตัวอย่างที่แสดงนั้นถ้าหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารระบุตำแหน่งสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ตัวอื่นๆ ที่หุ่นยนต์เป้าหมายควรจะที่จะรับรู้ได้ ในที่นี้คือหุ่นยนต์เป้าหมายต้องมองเห็นหุ่นยนต์ชนิดสี่เหลี่ยมอยู่ทางทิศใต้ห่างเป็นระยะ 20 หน่วย ซึ่งเมื่อระบุข้อมูลดังนี้ออกไปหุ่นยนต์ที่มีข้อมูลสอดคล้องมีเพียงตัวเดียวคือหุ่นยนต์หมายเลข 2 การอ้างอิงตัวตนด้วยรูปแบบร่วมมีขั้นตอนการทำงานดังต่อไปนี้

ก.4.1 การส่งข้อมูลเพื่อขอการติดต่อสื่อสาร

ในขั้นตอนนี้หุ่นยนต์ที่ต้องการทำการติดต่อสื่อสารจะส่งข้อมูลรายละเอียดของหุ่นยนต์เป้าหมายที่ต้องการติดต่อด้วยว่าอยู่ระยะห่างเท่าใด ในทิศทางใด และ ข้อมูลจากตัวรับรู้ว่ามีหุ่นยนต์ชนิดใดอยู่บริเวณใดบ้างเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ผู้ขอการติดต่อสื่อสาร และสุดท้ายคือข้อมูลของหุ่นยนต์ผู้ขอการติดต่อเองว่าเป็นหุ่นยนต์ชนิดใด ดังนั้นข้อมูลที่หุ่นยนต์ผู้ร้องขอการติดต่อสื่อสารจะสรุปได้

ดังตารางที่ ก.4.2.3

ตารางที่ ก.3: ข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสาร

หมายเลขคำขอติดต่อสื่อสาร		
หมายเลขหุ่นยนต์ที่ร้องขอการติดต่อสื่อสาร		
ทิศทางของหุ่นยนต์ที่ต้องการสื่อสารด้วย		
ระยะห่างของหุ่นยนต์ที่ต้องการสื่อสารด้วย		
ชนิด	**ทิศทาง**	**ระยะทาง**
หุ่นยนต์เป้าหมาย	หุ่นยนต์เป้าหมาย	หุ่นยนต์เป้าหมาย
หุ่นยนต์ข้างเคียง 1	หุ่นยนต์ข้างเคียง 1	หุ่นยนต์ข้างเคียง 1
...	...	...
หุ่นยนต์ข้างเคียง n	หุ่นยนต์ข้างเคียง n	หุ่นยนต์ข้างเคียง n

ส่วนแรกของข้อมูลการร้องขอติดต่อสื่อสารคือ หมายเลขคำขอและหมายเลขของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการติดต่อสื่อสาร ที่ต้องมีหมายเลขระบุไว้นั้นเพื่อให้ผู้ตอบรับสามารถตอบรับกลับมายังผู้ขอได้ถูกต้อง และป้องกันการตอบคำขอซ้ำซ้อน การออกหมายเลขคำขอนั้นจะเป็นการเรียงลำดับไป สำหรับหุ่นยนต์ตัวหนึ่งๆ เมื่อรวมกับหมายเลขของหุ่นยนต์แล้วจึงเป็นชุดตัวเลขที่เป็นเอกลักษณ์ของข้อความนั้นๆ ส่วนต่อมาคือชนิดของหุ่นยนต์ผู้รองขอสำหรับใช้เพื่อทำการอ้างอิงกลับมาเปรียบเทียบ

ข้อมูลส่วนต่อไปคือข้อมูลเกี่ยวกับหุ่นยนต์ที่อยู่ในระยะการรับรู้ ของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการติดต่อ โดยข้อมูลของหุ่นยนต์แต่ละตัวจะประกอบด้วยข้อมูลชนิดของหุ่นยนต์ ระยะทาง และทิศทางของหุ่นยนต์รอบข้าง โดยในส่วนนี้ข้อมูลตัวแรกคือข้อมูลของหุ่นยนต์เป้าหมายเนื่องจากอย่างน้อยการขอติดต่อสื่อสารต้องระบุเป้าหมายของการสื่อสารครั้งนั้นๆ

ข้อมูลที่แสดงในตารางที่ จะถูกส่งออกไปยังหุ่นยนต์ที่อยู่รอบๆ ของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสาร โดยทำการส่งแบบกระจายภายในระยะการสื่อสารของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอ

ก.4.2 การตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล

ในส่วนการตรวจสอบความสอดคล้องของข้อมูล จะเริ่มตั้งแต่หุ่นยนต์ที่อยู่รอบๆของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสาร ได้รับข้อมูลร้องการการสื่อสาร ซึ่งหุ่นยนต์ตัวที่ได้รับข้อมูลจะเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้รับ กับสภาพแวดล้อมที่หุ่นยนต์ตัวนั้นรับรู้ได้ เพื่อหาความสอดคล้องที่จะมีหุ่นยนต์บางตัวอยู่ในระยะการรรับรู้ของทั้งหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสาร และผู้ได้รับการร้องขอ ซึ่งจะช่วยยืนยันความเชื่อมั่นของหุ่นยนต์ตัวนั้นว่ามีโอกาสสูงที่จะเป็นหุ่นยนต์เป้าหมายของการสื่อสาร

การทดสอบความสอดคล้องทำได้โดยการคำนวณความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์เมื่อเทียบกับข้อมูลที่ได้รับมาว่ามีความผิดพลาดต่างกันมากน้อยเพียงใด หุ่นยนต์ที่มีค่าความผิดพลาดนี้ต่ำสุด จะเป็นหุ่นยนต์ที่ถูกเลือกให้เป็นหุ่นยนต์เป้าหมายของการสื่อสาร เนื่องจากมีความสอดคล้องกับข้อมูลของผู้ร้องขอมากที่สุด

การทดาอบความสอดคล้องสามารถแบ่งได้เป็นขั้นตอนย่อยๆ ดังนี้

- คำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์รอบข้างจากข้อมูลคำร้องขอติดต่อสื่อสาร
- คำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์รอบข้างของหุ่นยนต์ที่ได้รับข้อความร้องขอ
- คำนวณค่าความผิดพลาด

ก.4.2.1 คำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์รอบข้างจากข้อมูลคำร้องขอติดต่อสื่อสาร

หุ่นยนต์แต่ละตัวเมื่อได้รับคำร้องขอติดต่อสื่อสารมา ภายในคำขอนั้นจะมีข้อมูลตำแหน่งของหุ่นยนต์รอบข้างที่อยู่ภายในระยะการรับรู้ของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอ หุ่นยนต์ที่รับข้อมูลมาจะทำการคำนวณตำแหน่งรอบข้างเหล่านั้น ให้มาอยู่ในกรอบสัมพัทธ์กับหุ่นยนต์ที่เป็นเป้าหมาย เพื่อนำไว้ใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลที่รับรู้จากตัวรับรู้ของหุ่นยนต์ตัวนั้นอีกทีหนึ่ง การคำนวณตำแหน่งสัมพัทธ์เป็นดังนี้

$$\mathbf{r}_{targetNeighbor} = \mathbf{r}_{neighbor} - \mathbf{r}_{target}$$

โดย $\mathbf{r}_{targetNeighbor}$ แทนเวคเตอร์ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการอ้างอิงเมื่อเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์เป้าหมายของการติดต่อสื่อสาร $\mathbf{r}_{neighbor}$ แทนเวคเตอร์ตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่อยู่ในระยะรอบข้างของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสาร และ $\mathbf{r}_{target}$ คือเวคเตอร์แสดงตำแหน่งขอหุ่นยนต์เป้าหมายเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ที่รเองขอการสื่อสาร

นอกจากการคำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์รอบข้างที่สัมพัทธ์กับหุ่นยนต์เป้าหมายแล้ว เพื่อให้ได้ตำแหน่งที่สามารถใช้อ้างอิงความสอดคล้องกันระหว่างหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการติดต่อกับหุ่นยนต์เป้าหมาย หุ่นยนต์ที่ใช้อ้างอิงเหล่านั้นต้องอยู่ในพิสัยของการรับรู้ของทั้งหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารและหุ่นยนต์แเป้าหมายในการสื่อสาร จากข้อมูลที่ส่งมาในข้อมูลการร้องขอการสื่อวารเป็นหุ่นยนต์ที่อยู่ในระยะการรับรู้ของหุ่นยนต์ผู้ร้องขออยู่แล้ว สิ่งที่ต้องทำมีเพียงคัดกรองให้เหลือเฉพาะหุ่นยนต์อ้างอิงที่อยู่ในระยะของหุ่นยนต์ที่เป็นเป้าหมายของการสื่อสาร การทำงานของขั้นตอนคำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์รอบข้างจากข้อมูลคำร้องขอติดต่อสื่อสาร จะสามารถแสดงได้ในขั้นตอนวิธีที่ 19

Algorithm 19 Calculate Refernce Relative Postion

```
1: for each robot r in neigborRobotList except targetRobot
2:     if distace(targetRobot,r) range
3:         targetNeighborList.add(r.pos - targetRobot.pos )
4:     }
5: }
```

จากขั้นตอนวิธีที่แสดงจะเห็นได้ว่าในบรรทัดที่ 2 จะเป็นการคัดกรองหุ่นยนต์ที่อยู่ห่างจาก

หุ่นยนต์เป้าหมายในการสื่อสารมากกว่าจะยะทางการรับรู้ออกไปเพื่อให้เหลือเฉพาะหุ่นยนต์ที่ทั้งผู้ส่งและผู้รับมองเห็น เพื่อสามารถใช้ในการอ้างอิงระหว่างกันได้เท่านั้น

ก.4.2.2 คำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์รอบข้างของหุ่นยนต์ที่ได้รับข้อความร้องขอ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการคัดเลือกหุ่นยนต์ที่อยู่ในระยะการรับรู้ของหุ่นยนต์ผู้ได้รับข้อความร้องขอการสื่อสารให้เหลือเฉพาะหุ่นยนต์ที่อยู่ในระยะของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารเท่านั้น เพื่อให้สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ การเทียบระยะนี้เทียบเสมือนว่าหุ่นยนต์ผู้ได้รับการร้องขอเป็นหุ่นยนต์เป้าหมาย ดังนั้นในขั้นตอนนี้จึงประกอบด้วย สองขั้นตอนย่อยคือ การคำนวณตำแหน่งของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอสัมพัทธ์กับหุ่นยนต์เป้าหมาย และการตรวจสอบตำแหน่งและคัดกรองหุ่นยนต์เพื่อนบ้านของหุ่นยนต์ที่ได้รับข้อมูลกาารร้องขอตามที่แสดงในขั้นตอนวิธีที่ 20

Algorithm 20 Recipient pre-process

```
1: for each robot r being sensed
2:     if distace(requester,r) ≤ range
3:         localNeighborList.add(r.pos )
4:     }
5: }
```

จากขั้นตอนวิธีที่ 20 นี้ทำเพื่อ คำนวณว่าหุ่นยนต์ที่เป็นเป้าหมายจะมองเห็นหุ่นยนต์ใดบ้าง โดยอาศัยข้อมูลจากผู้ร้องขอการสื่อสาร มาใส่ในายการข้อมูลเพื่อนบ้านของหุ่นยนต์เป้าหมายที่ชื่อว่า localNeighborList ในบรรทัดที่ 1 แสดงให้เห็นการคำนวณกับหุ่นยนต์ทุกตัวที่อยู่ในระยะการมองเห็นของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสาร และที่ยกเว้นหุ่นยนต์ที่เป็นเป้าหมายในการสื่อสาร ก็เนื่องมาจากหุ่นยนต์เป้าหมายย่อมไม่สามารถมองเห็นตัวเองได้จากการรับรู้

ในบรรทัดที่สองเป็นการคำนวณระยะทางระหว่างระยะทางจาก ตำแหน่งสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารเทียบกับหุ่นยนต์เป้าหมาย กับตำแหน่งสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ที่ได้รับข้อมูลการร้องขอ ขั้นตอนนี้มีขึ้นเพื่อจำกัดให้หุ่นยนต์รอบข้างนั้นเหลือเพียงหุ่นยนต์ที่จะสามารถนำมาอ้างอิงร่วมกันกับหุ้นยนต์ผู้ร้องขอได้หากหุ่นยนต์ผู้ได้รับข้อความนี้เป็นหุ่นยนต์

จะสังเกตได้ว่าใน localNeighborList ไม่มีหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารอยู่ เนื่องจากการเทียบตำแหน่งระหว่างหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารนั้น จะทำการคำนวณแยกต่างหากเนื่องจากเป็นการคำนวณหลัก ไม่รวมกับการคำนวณตำแหน่งหุ่นยนต์รอบๆ ที่ใช้เพื่อการลดความกำกวม

ก.4.2.3 คำนวณค่าความผิดพลาด

ในขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการระบุตัวตนคือการคำนวณค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์แต่ละตัวว่ามีความเบี่ยงเบนจากการเป็นหุ่นยนต์เป้าหมายในอุดมคติมากน้อยเพียงใด ยิ่งถ้าค่าความผิดพลาดมีค่าต่ำหมายความว่าหุ่นยนต์ตัวนั้นน่าจะเป็นหุ่นยนต์เป้าหมายมาก หุ่นยนต์

ที่ได้รับข้อมุลร้องขอการสื่อสารจะส่งค่าความผิดพลาดกลับมายังผู้ร้องขอ และผู้ร้องขอจะเลือกว่าหุ่นยนต์ที่มีค่าความผิดพลาดต่ำสุดมาเป็นหุ่นยนต์เป้าหมายของการสื่อสาร

ค่าความผิดพลาดที่ใช้ในการพิจารณาเลือกหุ่นยนต์เป้าหมายนั้นคือผลรวมของ ค่าความผิดพลาดระหว่างผู้ได้รับคำร้องข้อและผู้ส่งคำร้องขอ กับผลรวมของความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์เพื่อนบ้าน

$$Error_{total} = Error_{requeseter} + \sum_{i=1}^{n} Error_i$$

โดย $Error_{total}$ คือค่าความผิดพลาดรวมของหุ่นยนต์ที่ได้รับข้อความร้องขอตัวหนึ่งๆ ที่จะส่งกลับไปยังผู้ร้องขอการสื่อสาร $Error_{requeseter}$ แทนค่าความผิดพลาดระหว่างผู้ได้รับคำร้องข้อและผู้ส่งคำร้องขอ และ $Error_i$ แทนค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์รอบข้างเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์รอบข้างตัวที่ i ของผู้ร้องขอ

ค่าความผิดพลาดระหว่างผู้ได้รับคำร้องข้อและผู้ส่งคำร้องขอเป็นผลรวมของค่าความผิดพลาดสี่ชนิดย่อย คือ ความผิดพลาดทางระยะทาง ทิศทาง ชนิดของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอ และ ชนิดของหุ่นยนต์เป้าหมาย ค่าความผิดพลาดระหว่างผู้ได้รับคำร้องข้อและผู้ส่งคำร้องขอเป็นดังต่อไปนี้

$$Error_{requester} = Error_{distance} + Error_{angle} + Error_{requesterType} + Error_{targetType}$$

โดย $Error_{distance}$ แทนค่าความผิดพลาดทางระยะทางระหว่างหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารกับหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอ $Error_{angle}$ แทนค่าความผิดพลาดทางมุมระหว่างหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารกับหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอ $Error_{requesterType}$ แทนค่าความผิดพลาดของชนิดของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสาร $Error_{targetType}$ แทนค่าความผิดพลาดของชนิดของหุ่นยนต์ผู้ได้รับคำร้องขอ

ความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเป็นผลรวมของค่าความผิดพลาดสามชนิดย่อย คือ ความผิดพลาดทางระยะทาง ทิศทาง และชนิดของหุ่นยนต์เพื่อนบ้าน ความผิดพลาดของตำแหน่งหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเป็นไปตามสมการที่ ก.4.2.3

$$Error_{neighbor} = Error_{distance} + Error_{angle} + Error_{neighborType}$$

โดย $Error_{distance}$ แทนค่าความผิดพลาดทางระยะทางระหว่างหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอไปยังหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเทียบกับหุ่นยนต์เป้าหมายไปยังเพื่อนบ้าน ตัวที่น่าจะเป็นตัวเดียวกันมากที่สุด $Error_{angle}$ โดย $Error_{distance}$ แทนค่าความผิดพลาดทางระยะมุมระหว่างหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอและหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเทียบกับหุ่นยนต์เป้าหมายและพื่อนบ้าน ตัวที่น่าจะเป็นตัวเดียวกันมากที่สุด $Error_{neighborType}$ แทนค่าความผิดพลาดของชนิดของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านที่น่าจะเป็นหุ่นยนต์เพื่อนบ้าตัวเดียวกับหุ่นยนต์เป้าหมาย

ในหัวข้อย่อยสองหัวข้อถัดไปจะอธิบายวิธีการคำนวณค่าความผิดพลาดระหว่างผู้ได้รับคำร้องขอและผู้ส่งคำร้องขอและค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตามลำดับ

วิธีการคำนวณค่าความผิดพลาดระหว่างผู้ได้รับคำร้องขอและผู้ส่งคำร้องขอ

ค่าความผิดพลาดระหว่างผู้ได้รับคำร้องขอและผู้ส่งคำร้องขอจะเป็นการมองย้อนกลับจากหุ่นยนต์ผู้ได้รับคำร้องขอ ว่าพบหุ่นยนต์ที่มีลักษณะเดียวกับผู้ร้องขออยู่ในตำแหน่งที่สอดคล้องกับข้อมูลการร้องขอการสื่อสารหรือไม่ และมีความผิดเพี้ยนทางตำแหน่งและชนิดอย่างไร

จากข้อมูลคำร้องขอการสื่อสารในตารางที่ จะเห็นได้ว่ามีข้อมูลตำแหน่งของหุ่นยนต์เป้าหมายอยู่ในนั้นด้วย จากข้อมูลนี้เราสามารถคำนวณตำแหน่งที่หุ่นยนต์เป้ามายจะมองเห็นหุ่นยนต์ผู้ร้องขอได้ดังนี้

$$\mathbf{r}_{requester} = -\mathbf{r}_{target}$$

โดยที่ $\mathbf{r}_{requester}$ แทนตำแหน่งสัมพัทธ์ของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอเทียบกับหุ่นยนต์เป้าหมาย และ $\mathbf{r}_{target}$ แทนตำแหน่งของหุ่นยนต์เป้าหมายที่ระบุไว้ในคำขอ

การคำนวณค่าความผิดพลาดทางระยะทางระหว่างหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอกับหุ่นยนต์ผู้ร้องขอเป็นดังต่อไปนี้

$$DistanceError = |distance_{requester} - distance_{sensed}|$$

$$Error_{distance} = \frac{DistanceError}{distance_{requester}} \times 100$$

โดย $distance_{requester}$หมายถึงระยะทางจากหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารไปยังเป้าหมาย ข้อมูลนี้จะสามารถคำนวณได้จากข้อมูลในคำขอการสื่อสาร และ$distance_{sensed}$ คือระยะทางจากหุ่นยนต์ผู้ได้รับคำร้องขอการสื่อสารไปยังหุ่นยนต์ที่คาดว่าจะเป็นหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสาร และ $Error_{distance}$ คือค่าความผิดพลาดทางระยะทางระหว่างหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอกับหุ่นยนต์ผู้ร้องขอที่จะนำไป

ใช้ในการคำนวณค่าความผิดพลาดรวมอีกทีหนึ่ง

การคำนวณค่าความผิดพลาดเชิงมุมระหว่างหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอกับหุ่นยนต์ผู้ร้องขอเป็นดังต่อไปนี้

$$AngularError = |\theta_{requester} - \theta_{sensed}|$$

$$Error_{angle} = \begin{cases} \frac{AngularError}{180} \times 100 & \text{if } AngularError < 180 \\ \frac{360 - AngularError}{180} \times 100 & \text{if } AngularError \geq 180 \end{cases}$$

โดย $\theta_{requester}$ คือทิศทางของหุ่นยนต์ของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารเมื่อเทียบกับตำแหน่งของหุ่นยนต์เป้าหมาย และθ_{sensed} เป็นทิศทางของหุ่นยนต์ที่คาดว่าจะเป็นผู้ร้องขอที่ผู้ได้รับข้อความร้องขอรับรู้ได้โดยข้อมูลทั้งสองมีหน่วยเป็นองศา และ $Error_{angle}$ คือค่าความผิดพลาดเชิงมุมระหว่างหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอกับหุ่นยนต์ผู้ร้องขอที่จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าความผิดพลาดรวมอีกทีหนึ่ง

ความผิดพลาดของชนิดของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารจะมีการคำนวณที่แตกต่างไปจากการคำนวณกความผิดพลาดทางระยะทางและความผิดพลาดเชิงมุม เนื่องจากข้อมูลชนิดเป็นข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง จึงคิดคะแนนความผิดพลาดตามหลักที่ว่าถ้าชนิดของหุ่นยนต์ที่น่าจะเป็นหุ่นยนต์ผู้ร้องขอตรงกับข้อมูลที่ระบุในคำขอ ให้ค่าความผิดพลาดต่ำหรือเป็น 0 ส่วนถ้าชนิดไม่ตรงกันให้ค่าความผิดพลาดมีค่าสูง ส่วนค่าความผิดพลาดทั้งสองนี้จะสามารถปรับเปลี่ยนได้ เพื่อปรับความเชื่อมั่นในข้อมูลการระบุชนิด

$$Error_{requesterType} = \begin{cases} k_{correct} & \text{if } type_{requester} = type_{sensed} \\ k_{incorrect} & \text{if } type_{requester} \neq type_{sensed} \end{cases}$$

โดย $type_{requester}$ และ $type_{requester}$ คือชนิดของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสาร และ ชนิดของหุ่นยนต์ที่คาดว่าจะเป็นผู้ร้องขอ ส่วน $k_{correct}$ และ $k_{incorrect}$ เป็นค่าความผิดพลาดที่พิจารณาสำหรับกรณีที่ชนิดสอดคล้องและไม่สอดคล้องตามลำดับ

ความผิดพลาดของชนิดของหุ่นยนต์เป้าหมายเป็นการเปรียบเทียบว่าตัวหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอการติดต่อสื่อสารมีชนิดตรงกับที่ระบุในคำร้องขอติดต่อหรือไม่ โดยการทำงานเป็นไปดังต่อไปนี้

$$Error_{targetType} = \begin{cases} k_{correct} & \text{if } type_{target} = type_{self} \\ k_{incorrect} & \text{if } type_{taget} \neq type_{self} \end{cases}$$

โดย $type_{target}$ คือชนิดของหุ่นยนต์ที่เป็นเป้าหมายในการสื่อสาร ข้อมูลนี้จะระบุมาแล้วในคำร้องขอการสื่อสาร $type_{self}$ แทนชนิดของหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอ $k_{correct}$ และ $k_{incorrect}$ เป็นค่าความผิดพลาดที่พิจารณาสำหรับกรณีที่ชนิดสอดคล้องและไม่สอดคล้องตามลำดับ

วิธีการคำนวณค่าความผิดพลาดของรูปแบบการวางตัวของหุ่นยนต์เพื่อนบ้าน

ในหัวข้อก่อนหน้านี้ได้กล่าวถึงการคำนวณค่าความผิดพลาดระหว่างผู้ได้รับคำร้องขอและผู้ส่งคำร้องขอไปแล้ว แต่ค่าความผิดพลาดอาจจะออกมาใกล้เคียงกันได้เนื่องจากการคำนวณใช้การอ้างอิงอยู่กับหุ่นยนต์เพียงตัวเดียว หากมีความกรณีที่ใกล้เคียงกันเกิดขึ้นจะทำให้ผลลัพธ์ออกมาไม่ถูกต้อง จึงมีแนวคิดที่จะหาความสอดคล้องระหว่างหุ่นยนต์เพื่อนบ้านของผู้ได้รับคำร้องขอการสื่อสารเทียบกับหุ่นยนต์เป้าหมายว่ามีความเหมือนหรือแตกต่างกันของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านอย่างไร เช่นหากหุ่นยนต์ผู้ได้รับคำร้องขอการสื่อสารมีรูปแบบของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านที่เหมือนกับรูปแบบที่หุ่นยนต์เป้าหมายควรจะมี แสดงว่าหุ่นยนต์ผู้ได้รับคำร้องขอนั้นเป็นหุ่นยนต์เป้าหมาย ค่าความผิดพลาดของรูปแบบการวางตัวของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านนี้จะใช้พิจารณาร่วมกับค่าความผิดพลาดระหว่างผู้ได้รับคำร้องขอและผู้ส่งคำร้องขอด้วย

ค่าความผิดพลาดของรูปแบบการวางตัวของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านจะเป็นการคำนวณค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านแต่ละตัวเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านที่ควรจะมองเห็นหากเป็นหุ่นยนต์เป้าหมาย และนำมาเฉลี่ยเป็นค่าความผิดพลาดของรูปแบบการวางตัว ที่ต้องมีการเฉลี่ยเนื่องจากจำนวนเพื่อนบ้านของหุ่นยนต์แต่ละตัวอาจจะไม่เท่ากัน ถ้าไม่ทำการเฉลี่ยอาจจะทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้องได้

ค่าความผิดพลาดของรูปแบบการวางตัวของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านนั้นคำนวณจากค่าความผิดพลาดสามชนิด ซึ่งประกอบด้วย ค่าความผิดพลาดทางระยะทาง ค่าความผิดพลาดเชิงมุม และค่าความผิดพลาดของการระบุชนิด รายละเอียดของการคำนวณค่าความผิดพลาดแต่ละแบบจะกล่าวถึงต่อไปดังนี้

การคำนวณค่าความผิดพลาดทางระยะทางของรูปแบบการวางตัวของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเป็นการคำนวณระยะทางที่แตกต่างกันระหว่างหุ่นยนต์เพื่อนบ้านของหุ่นยนต์เป้าหมาย ซึ่งข้อมูลนี้จะมีมาในข้อมูลคำร้องขอการสื่อสารอยู่แล้ว กับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านของผู้ได้รับคำร้องขอที่ใกล้เคียงกันที่สุด ค่าความแตกต่างค่าความผิดพลาดทางระยะทางของรูปแบบการวางตัวของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านมีวิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

$$DistanceError_i = |distance_{target}(i) - distance_{sensed}(i)|$$

$$Error_{distance}(i) = \frac{DistanceError_i}{distance_{target}(i)} \times 100$$

โดย $Error_{distance}(i)$ แทนค่าความผิดพลาดทางระยะทางของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเมื่อเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่ i ของหุ่นยนต์เป้าหมาย $distance_{target}(i)$ คือระยะทางจากหุ่นยนต์เป้าหมายไปยังหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่ i $distance_{sensed}(i)$ คือระยะทางจากหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอการสื่อสารไปยังหุ่นยนต์เพื่อนบ้านที่น่าจะเป็นหุ่นยนต์ตัวเดียวกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่ i ของหุ่นยนต์เป้าหมาย

การคำนวณค่าความผิดพลาดเชิงมุมของรูปแบบการวางตัวของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเป็นการคำนวณมุมที่แตกต่างกัน ระหว่างหุ่นยนต์เพื่อนบ้านของหุ่นยนต์เป้าหมาย ซึ่งข้อมูลนี้จะมีมาในข้อมูลคำร้องขอการสื่อสารอนู่แล้ว กับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านของผู้ได้รับคำร้องขอที่น่าจะสอดคล้องกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวนั้นๆ การคำนวณค่าความผิดพลาดเชิงมุมของรูปแบบการวางตัวของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเป็นดังต่อไปนี้

$$DistanceError_i = |distance_{target}(i) - distance_{sensed}(i)|$$

$$Error_{distance}(i) = \frac{DistanceError_i}{distance_{target}(i)} \times 100$$

$$AngularError_i = |\theta_{target}(i) - \theta_{sensed}(i)|$$

$$Error_{angle}(i) = \begin{cases} \frac{AngularError_i}{180} \times 100 & \text{if } AngularError_i < 180 \\ \frac{360 - AngularError_i}{180} \times 100 & \text{if } AngularError_i \geq 180 \end{cases}$$

โดย $Error_{angle}(i)$ แทนค่าความผิดพลาดเชิงมุมของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเมื่อเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่ i ของหุ่นยนต์เป้าหมาย $\theta_{target}(i)$ คือมุมระหว่างหุ่นยนต์เป้าหมายและหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่ i $\theta_{sensed}(i)$ คือมุมระหว่างหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอการสื่อสารกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านที่น่าจะเป็นหุ่นยนต์ตัวเดียวกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่ i ของหุ่นยนต์เป้าหมาย

ค่าความผิดพลาดชนิดสุดท้ายของการคำนวณค่าความผิดพลาดของรูปแบบการวางตัวของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านคือความผิดพลาดของการระบุชนิด วิธีการคำนวณค่าความผิดพลาดของการระบุชนิดนั้นจะคำนวณจากความแตกต่างของชนิดระหว่างหุ่นยนต์เพื่อนบ้านที่ หุ่นยนต์เป้าหมายควรจะมองเห็นและหุ่นยนต์เพื่อนบ้านที่สอดคล้องกันของหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอ การคำนวณความผิดพลาดในการระบุชนิดเป็นไปดังต่อไปนี้

$$Error_{neighborType}(i) = \begin{cases} k_{correct} & \text{if } type_{target}(i) = type_{sensed}(i) \\ k_{incorrect} & \text{if } type_{target}(i) \neq type_{sensed}(i) \end{cases}$$

โดย $Error_{neighborType}(i)$ แทนค่าความผิดพลาดในการรบุชนิดของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านเมื่อเปรียบเทียบกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่ i ของหุ่นยนต์เป้าหมาย $type_{target}(i)$ คือชนิดของหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่ i ของหุ่นยนต์เป้ามหาย $type_{sensed}(i)$ คือชนิดของหุ่นยนต์ที่ได้รับคำร้องขอการสื่อสารที่น่าจะเป็นหุ่นยนต์ตัวเดียวกับหุ่นยนต์เพื่อนบ้านตัวที่ i ของหุ่นยนต์เป้าหมาย

ก.5 การทดลอง

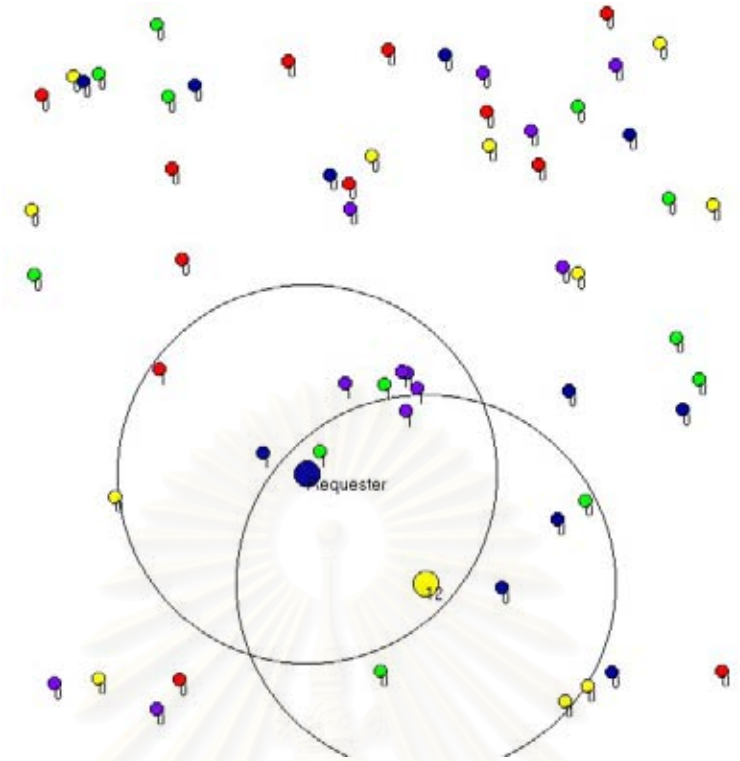
การทดลองจะทำการทดสอบการทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวบนการจำลองเหตุการณ์เช่นเดียวกับการทดลองอื่นๆ ที่ใช้ในการทดสอบวิธีการจัดเรียงตัวของหุ่นยนต์ในบทก่อน ๆ แล้ว ในการทดลองนี้จะกระทำเป็นจำนวน 200 ครั้งต่อการทดลองหนึ่งชุด เป็นการทดสอบการระบุตัวตนระหว่างหุ่นยนต์หนึ่งคู่ โดยสุ่มหุ่นยนต์ที่จะเป็นเป้าหมายและเปลี่ยนตำแหน่งของกลุ่มหุ่นยนต์ทั้งหมดไปเรื่อย ๆ ตลอดการทดลอง การทดลองจะบันทึกความถูกต้องของผลที่ได้ .

การทดลองวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวจะแบ่งเป็นการทดลองย่อยๆ ดังนี้

1. การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่ไม่มีข้อผิดพลาดทางการวัด
2. การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดระยะทาง
3. การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดทิศทาง
4. การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดชนิด
5. การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดหลายแบบ

ก.5.1 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่ไม่มีข้อผิดพลาดทางการวัด

การทดลองนี้วัดความถูกต้องของการระบุตัวตน จากการจำลองเหต์การณ์ทั้งหมด 200 ครั้ง ด้วยหุ่นยนต์ 60 ตัว แบ่งออกเป็น 5 ประเภทเท่าๆ กัน ตำแหน่งเริ่มต้นของการจำลองเหตุการณ์แต่ละครั้งเป็นการสุ่ม และแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบจะทำการเก็บค่าความถูกต้องของการทำงานไว้ ผลการทดลองเป็นไปดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5: การทดลองวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่ไม่มีข้อผิดพลาดทางการวัด

จากรูปจะแสดงหุ่นยนต์ผู้ร้องขอการสื่อสารด้วยวงกลมขนาดใหญ่และระบุไว้ว่าเป็น "Requester" ส่วนเป้าหมายคือลงกลมขนาดใหญ่อีกวงหนึ่งที่มีตัวเลขกำกับ ตัวเชขเหล่านี้ระบุคะแนนความสอดคล้องของหุ่นยนต์แต่ละตัว โดยยิ่งคะแนนมากยิ่งมีโอกาสถูกเลือกเป็นหุ่นยนต์เป้าหมายมาก วงกลมล้อมรอบหุ่นยนต์ผู้ร้องขอและหุ่นยนต์เป้าหมายแสดงระยะการรับรู้ของหุ่นยนต์ ผลการทดลองเป็นไปดังตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4: ผลการทดลองวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่ไม่มีข้อผิดพลาดทางการวัด

ร้อยละ ร้อยละความถูกต้อง	ค่าความผิดพลาด เฉลี่ย	ค่าความผิดพลาด ต่ำสุดเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง ของความผิดพลาด
100	136.38	0	80.88

จากการทดลองพบว่าการระบุตัวตนของหุ่นยนต์สามารถทำได้ถูกต้องทุกครั้งที่ทดลอง สาเหตุเนื่องจาก การทดลองนี้ไม่ได้มีการจำลองเหตุการณ์ของการเกิดความผิดพลาดแต่อย่างใด การทดลองนี้จึงให้ผลตามสภาพอุดมคติ

ก.5.2 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดระยะทาง

การทดลองนี้วัดความถูกต้องของการระบุตัวตนในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดระยะทาง โดยทำการทดลองด้วยหุ่นยนต์ 60 ตัว แบ่งออกเป็น 5 ประเภทเท่าๆ กัน ตำแหน่งเริ่มต้นของ

การจำลองเหตุการณ์แต่ละครั้งเป็นการสุ่ม และแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบจะทำการเก็บค่าความถูกต้องของการทำงานไว้ ทำการทดลอง 100 ครั้งต่อค่าความผิดพลาดของการวัดค่าหนึ่ง ๆ

การจำลองความผิดพลาดของการวัด มีหลักการโดยใส่ค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ค่าที่ถูกต้องของการวัด และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ผลคูณของค่าความผิดพลาดของการวัดกับค่าระยะทางที่ถูกต้อง ซึ่งในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนค่าความผิดพลาดของการวัดดังกล่าว ไปเป็นค่าต่างๆกัน เพื่อแสดงผลกระทบของความผิดพลาดของการวัดระยะทางกับประสิทธิภาพการทำงานของ การระบุตัวตนของหุ่นยนต์

ผลการทดลองวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดระยะทางที่ค่าความผิดพลาดของการวัดตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.3 โดยที่แต่ละค่าจะทำการทดลอง 5 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยมาเป็นผลลัพธ์ ดังแสดงในตารางที่ ก.8

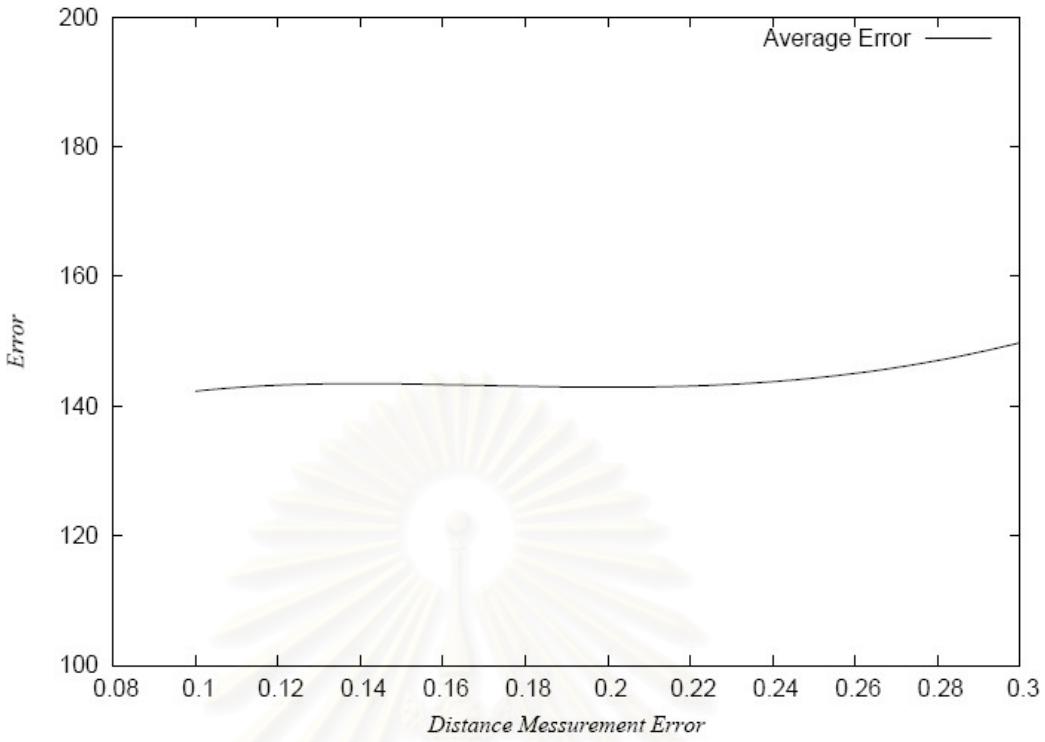
ตารางที่ ก.5: ผลการทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดระยะทาง

ความผิดพลาดของการวัด	ร้อยละความถูกต้อง	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	ค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาด
0.10	100	142.28	10.61	77.64
0.15	99.60	145.76	14.84	72.46
0.20	97.60	140.63	20.25	63.86
0.25	96.00	141.91	23.73	60.33
0.30	95.00	149.77	28.19	60.74

จากตารางที่ ก.8 แสดงผลการทดลอง โดยความผิดพลาดของการวัดคือค่าที่ใช้ในการสร้างความผิดพลาดในการกระจายแบบปกติดังกล่าวไปแล้วก่อนหน้านี้ ค่าร้อยละความถูกต้องคือร้อยละที่ขั้นตอนการระบุตัวตนของหุ่นยนต์ทำงานถูกต้อง ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคือการเฉลี่ยผลการคำนวณค่าความผิดพลาดรวมของหุ่นยนต์ทุกตัวที่อยู่ในระยะการสื่อสารของหุ่นยนต์ผู้ร้องขอ ค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ยคือค่าเฉลี่ยชองความผิดพลาดของหุ่นยนต์ที่ได้รับการเลือกว่าเป็นหุ่นยนต์เป้าหมายของการสื่อสาร และค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาดคือค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาดระหว่างหุ่นยนต์ที่ได้รับการคัดเลือกและหุ่นยนต์ที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุดตัวถัดไป

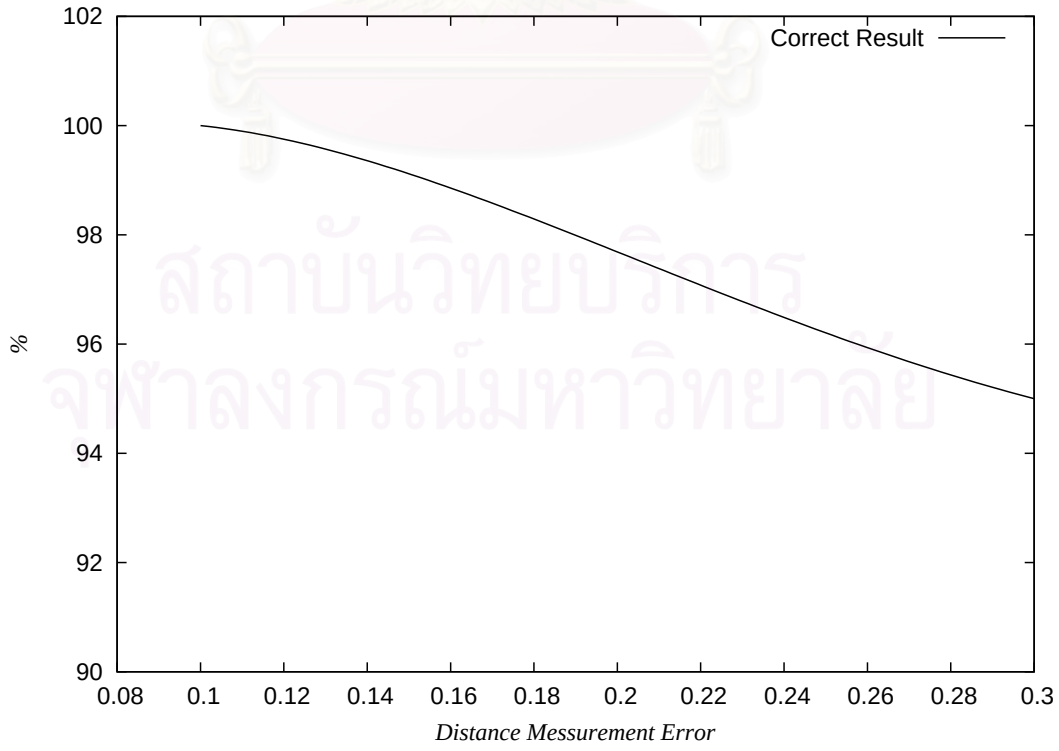
เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของค่าความผิดพลาดเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ ก.6 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความผิดพลาดการวัดต่างๆ กันจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยมีแนวโน้มไม่เปลี่ยนแปลง สาเหตุเนื่องจากความผิดพลาดที่เราเพิ่มเข้าไปในการวัดระยะทางเป็นความผิดพลาดแบบปกติ ทำให้ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณาในส่วนของร้อยละความถูกต้องดังแสดงในรูปที่ ก.7 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความผิดพลาดการวัดต่างๆ กันจะเห็นได้ว่าร้อยละความถูกต้องมีแนวโน้มต่ำลง เหตุผลนั้นเนื่องจากการเพิ่มความผิดพลาดจะทำให้โอกาสที่หุ่นยนต์เป้าหมายจะโดนรบกวนด้วยค่ารบกวนที่ใส่เข้าไป



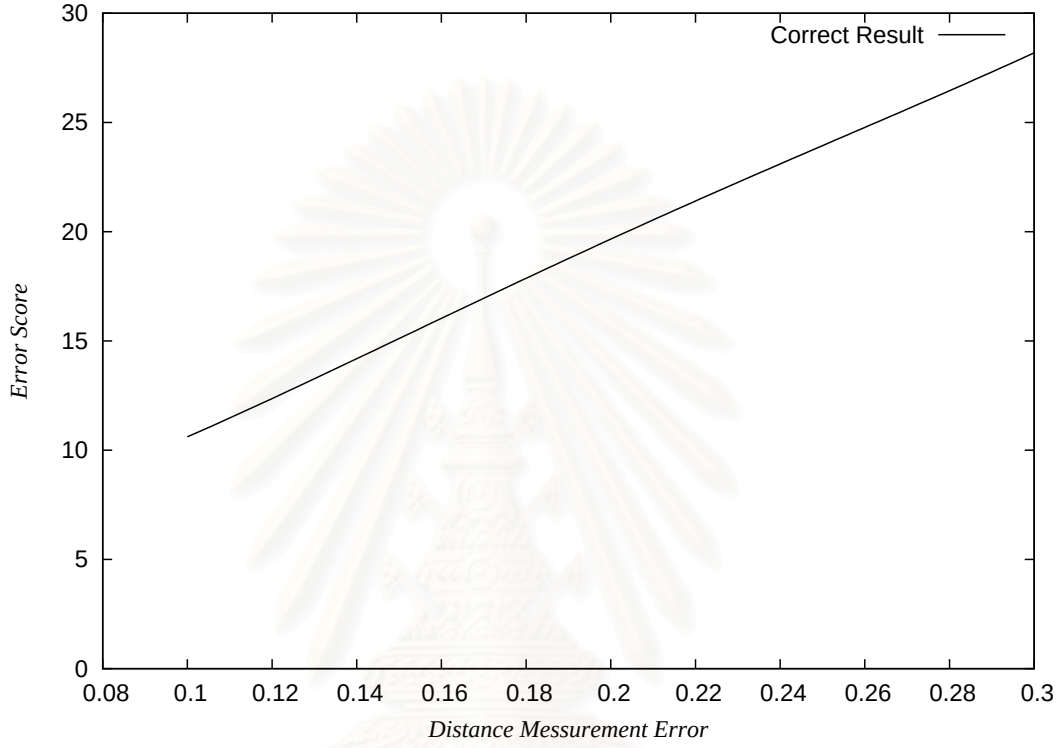
รูปที่ ก.6: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าความผิดพลาดเฉลี่ย

ทำให้หุ่นยนต์ที่เป็นเป้าหมายมีค่าความผิดพลาดสูงขึ้น ซึ่งโอกาสที่หุ่นยนต์บางตัวจะมีโอกาสมีค่าความถูกต้องต่ำกว่าย่อมเกิดขึ้นได้ และจะยิ่งเกิดได้มากขึ้นหากความผิดพลาดของการวัดสูงขึ้น



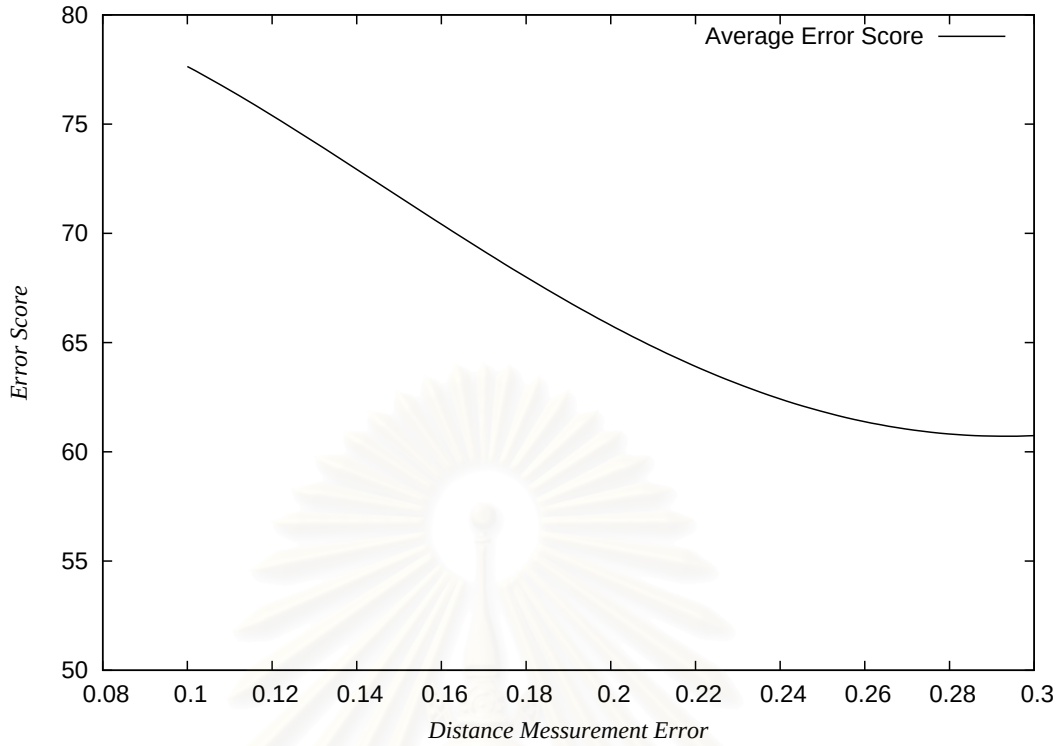
รูปที่ ก.7: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าร้อยละความถูกต้อง

ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ยและค่าความผิดพลาดการวัดเป็นไปดังรูปที่ ก.8 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความผิดพลาดการวัดต่างๆ กันจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ยมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากค่าที่ถูกต้องสำหรับหุ่นยนต์เป้าหมายมีเพียงค่าเดียว ยิ่งมีการเพิ่มความผิดพลาดของการวัดจะยิ่งทำให้ค่าที่วัดได้ห่างออกจากค่าจริงมากขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์เป้าหมายมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ ก.8: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ย

ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดทางการวัดและค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาดเป็นไปดังรูปที่ ก.8 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างความผิดพลาดการวัดต่างๆ กันจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาดมีแนวโน้มที่จะต่ำลง เนื่องจากค่าเฉลี่ยความผิดพลาดจากหุ่นยนต์ที่ได้รับการเลือกให้เป็นหุ่นยนต์เป้าหมายมีแนวโน้มสูงขึ้นดังได้กล่าวมาแล้ว ในขณะเดียวกันค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์ที่มีความผิดพลาดรองลงมามีแนวโน้มไม่เพิ่มขึ้น และหุ่นยนต์ที่มีค่าความผิดพลาดรองลงมาจะมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากหุ่นยนต์ตัวนี้เป็นหุ่นยนต์ที่ไม่ได้เป็นเป้าหมาย ดังนั้นการใส่ค่าความผิดพลาดทางการัดเข้าไปอาจจะเป็นการเพิ่มหรือลดค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์ตัวนี้ก็ได้ และเนื่องจากเราได้ใช้ความผิดพลาดทางการวัดที่เป็นการกระจายแบบปกติ จึงทำให้ค่านี้ไม่เปลี่ยนแปลง จากเหตุผลทั้งสองข้อนี้ประกอบกันจึงทำให้ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาดมีแนวโน้มคงที่



รูปที่ ก.9: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาด

ก.5.3 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดมุม

การทดลองนี้วัดความถูกต้องของการระบุตัวตนในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดมุม โดยทำการทดลองด้วยหุ่นยนต์ 60 ตัว แบ่งออกเป็น 5 ประเภทเท่าๆ กัน ตำแหน่งเริ่มต้นของการจำลองเหตุการณ์แต่ละครั้งเป็นการสุ่ม และแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบจะทำการเก็บค่าความถูกต้องของการทำงานไว้ ทำการทดลอง 100 ครั้งต่อค่าความผิดพลาดของการวัดค่าหนึ่ง ๆ

การจำลองความผิดพลาดของการวัด มีหลักการโดยใส่ค่าความผิดพลาดที่มีการกระจายแบบปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ค่าที่ถูกต้องของการวัด และมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ ผลคูณของค่าความผิดพลาดของการวัดกับค่ามุมที่ถูกต้อง ซึ่งในการทดลองนี้จะปรับเปลี่ยนค่าความผิดพลาดของการวัดดังกล่าว ไปเป็นค่าต่างๆกัน เพื่อแสดงผลกระทบของความผิดพลาดของการวัดมุมกับประสิทธิภาพการทำงานของ การระบุตัวตนของหุ่นยนต์

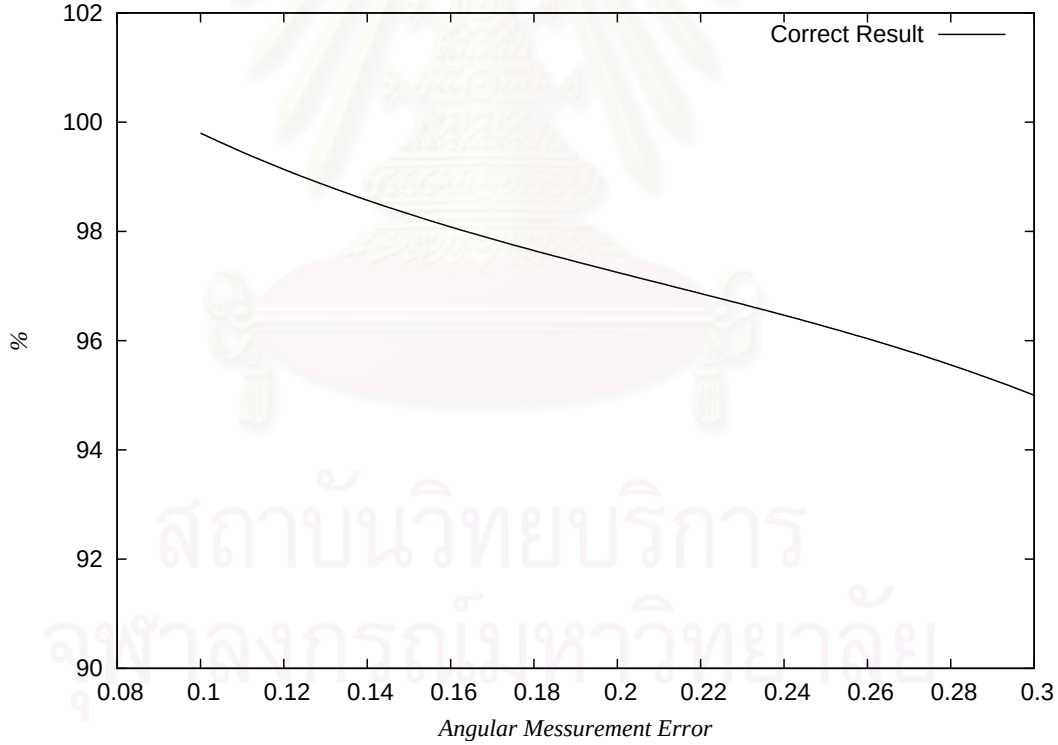
ผลการทดลองวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดมุมที่ค่าความผิดพลาดของการวัดตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.3 โดยที่แต่ละค่าจะทำการทดลอง 5 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยมาเป็นผลลัพธ์ ดังแสดงในตารางที่ ก.8

ในส่วนของร้อยละความถูกต้องของผลการทำงานจากขั้นตอนวิธีการระบุตัวตนของหุ่นยนต์

ตารางที่ ก.6: ผลการทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดมุม

ความผิดพลาดของการวัด	ร้อยละความถูกต้อง	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	ค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาด
0.10	100	138.44	8.99	84.74
0.15	99.60	138.73	13.68	74.07
0.20	97.20	145.52	16.49	67.63
0.25	96.50	136.93	20.24	67.28
0.30	95.00	143.83	27.33	58.27

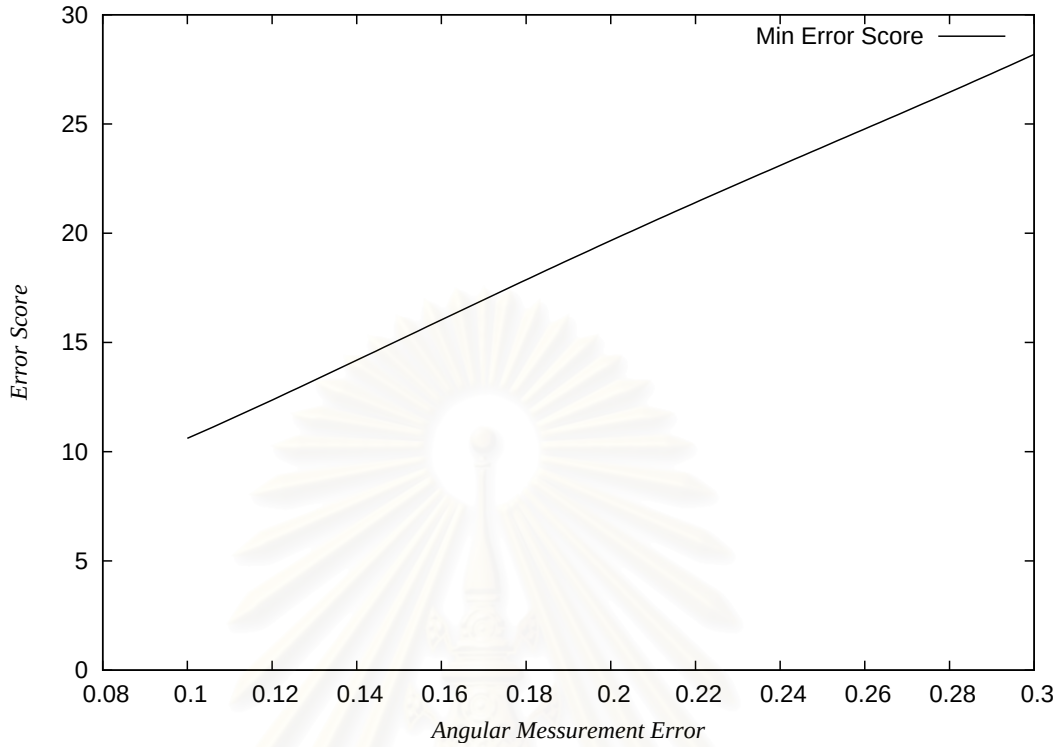
แสดงให้เห็นว่า อยู่ในระดับประมาณร้อยละ 95 ถึง 100 แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีการระบุตัวตนของหุ่นยนต์สามารถทำงานได้ดี แม้ในสภาวะที่มีความผิดพลาดทางการวัดมุมเกิดขึ้น ร้อยละความถูกต้องมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความผิดพลาดทางการวัด ทั้งนี้เนื่องมาจากความผิดพลาดทางการวัดที่สูงขึ้น จะทำให้หุ่นยนต์ที่เป็นหุ่นยนต์เป้าหมายมีค่าความผิดพลาดสูงขึ้น และอาจจะทำให้หุ่นยนต์ตัวอื่นๆ มีคะแนนความผิดพลาดต่ำลงจนได้รับการเลือกแทนหุ่นยนต์เป้าหมาย ความสัมพันธ์นี้แสดงในรูปที่ ก.10



รูปที่ ก.10: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดมุมกับค่าร้อยละความถูกต้อง

ความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ยและค่าความผิดพลาดการวัดมุมเป็นไปดังรูปที่ ก.11 จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดต่ำสุดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตามค่าความผิดพลาดทางการวัดมุม เนื่องจากคะแนนความผิดพลาดของหุ่นยนต์ตัวที่เป็นเป้าหมาย มีโอกาสที่จะห่างจากค่าที่ถูกต้องซึ่งคือ 0 มากยิ่งขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการเพิ่มค่าความผิดพลาดทางการวัดมุมค่าความผิดพลาด

ต่ำสุดเฉลี่ยจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ ก.11: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการวัดกับค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ย

ก.5.4 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการระบุชนิด

การทดลองนี้วัดความถูกต้องของการระบุตัวตนในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการระบุชนิด โดยหุ่นยนต์แต่ละตัวอาจจะระบุตัวหุ่นยนต์รอบข้างได้ไม่ถูกต้อง เป้าหมายการทดลองนี้เพื่อทดสอบเสถียรภาพของจั้นตอนวิธีการระบุตัวตนในกรณีที่มีความผิดพลาดในการระบุชนิด การทดลองนี้ใช้หุ่นยนต์ 60 ตัว แบ่งออกเป็น 5 ประเภทเท่าๆ กัน ตำแหน่งเริ่มต้นของการจำลองเหตุการณ์แต่ละครั้งเป็นการสุ่ม และแต่ละครั้งที่ทำการทดสอบจะทำการเก็บค่าความถูกต้องของการทำงานไว้ ทำการทดลอง 100 ครั้งต่อค่าความผิดพลาดของการวัดค่าหนึ่ง ๆ

ค่าความผิดพลาดของการวัดนี้มีการนิยามแตกต่างจากค่าความผิดพลาดทางการวัดในการทดลองก่อนๆ กล่าวคือ ค่าความผิดพลาดของการวัดระยะทางและการวัดมุมจะเป็นการเพิ่มความผิดพลาดที่มีการกระจายตัวแบบปกติ ไปบนข้อมูลการวัดที่ถูกต้อง โดยที่ข้อมูลเหล่านี้เป็นข้อมูลต่อเนื่อง ผิดกับค่าชนิดของหุ่นยนต์ที่เป็นข้อมูลวิยุต การเพิ่มความผิดพลาดของการระบุชนิดนั้นจะเป็นการระบุชนิดของหุ่นยนต์เป็นชนิดอื่นที่ต่างจากชนิดที่ถูกต้อง โดยความน่าจะเป็นที่หุ่นยนต์จะเกิดความผิดพลาดทางการระบุตัวตนถูกระบุเป็นตัวแปรต้นของการทดลอง

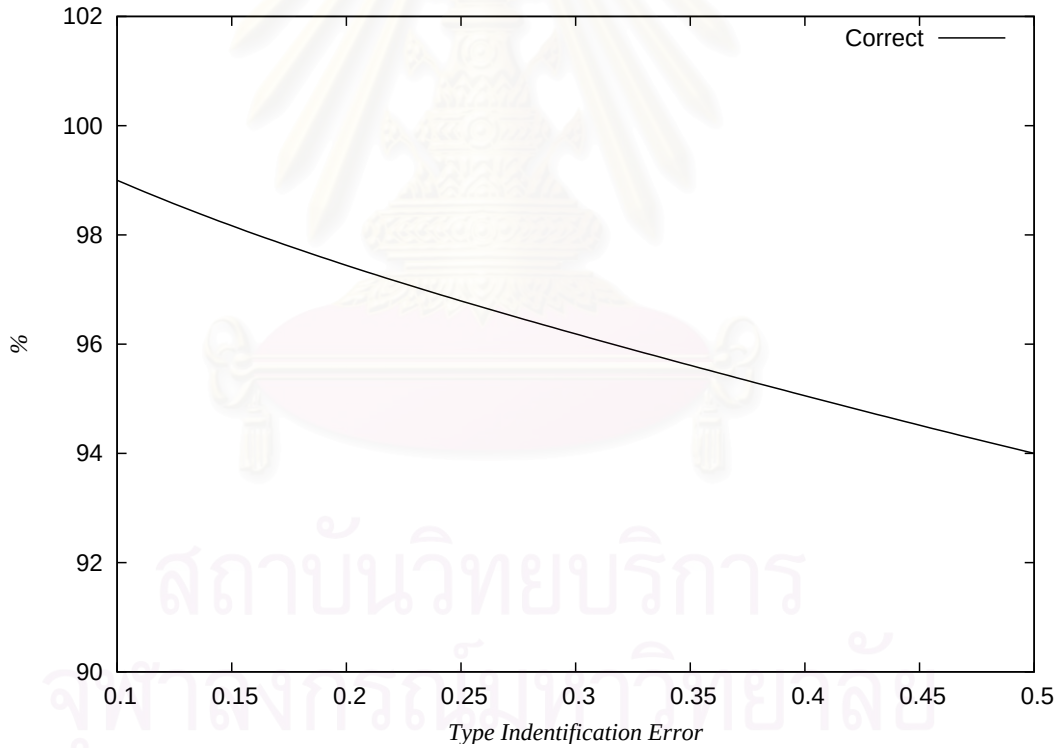
ผลการทดลองวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการ

ระบุชนิดที่ค่าความผิดพลาดของการระบุชนิดตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5โดยที่แต่ละค่าจะทำการทดลอง 5 ครั้งและหาค่าเฉลี่ยมาเป็นผลลัพธ์ ดังแสดงในตารางที่ ก.7

ตารางที่ ก.7: ผลการทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการระบุชนิด

ความผิดพลาดของการวัด	ร้อยละความถูกต้อง	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	ค่าความผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ยความแตกต่างของความผิดพลาด
0.10	99.0	130.48	5.38	74.71
0.20	97.2	141.75	10.81	78.92
0.30	96.2	128.91	18.22	68.34
0.40	95.0	151.06	24.97	72.35
0.50	94.0	148.02	29.32	64.28

เมื่อพิจารณาในส่วนของความถูกต้องในการทำงานขั้นตอนการระบุตัวตนของหุ่นยนต์ จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์สามารถระบุตัวตนได้อย่างถูกต้องในระบุสูง คือร้อยละ 99 ถึงร้อนละ 94 แม้ในขณะที่โอกาสการเกิดความผิดผลาดใรการระบุตัวตนจะสูงถึง 50



รูปที่ ก.12: กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความผิดพลาดของการระบุชนิดกับค่าร้อยละความถูกต้อง

ในส่วนของความถูกต้องของการทำงานขั้นตอนการระบุตัวตนของหุ่นยนต์ จะเห็นได้ว่าหุ่นยนต์สามารถระบุตัวตนได้อย่างถูกต้องในระบุสูง คือร้อยละ 99 ถึงร้อนละ 94 แม้ในขณะที่โอกาสการเกิดความผิดผลาดใรการระบุตัวตนจะสูงถึง 50

ก.5.5 การทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดหลายแบบ

ในการทดลองนี้ต้องการทดสอบการทำงานของขั้นตอนการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์ในสภาพที่ใกล้เคียงความจริงมากยิ่งขึ้น เนื่องจากข้อผิดพลาดของการตวรจวัดแต่ละแบบอาจะกิดขึ้นได้พร้อมๆ กัน ซึ่งคือ ความผิดพลาดทางการวัดระยะทาง ความผิดพลาดทางการวัดมุม และความผิดพลาดทางการระบุชนิด ค่าความผิดพลาดทั้งสามได้นิยามไปแล้วในการทดลองก่อนหน้านี้

การทดลองนี้ใช้หุ่นยนต์ 60 ตัว แบ่งออกเป็น 5 ประเภทเท่าๆ กัน ตำแหน่งเริ่มต้นของการจำลองเหตุการณ์แต่ละครั้งเป็นการสุ่ม และทดสอบร่วมกับค่าความผิดพลาดทั้งสามแบบเป็นชุดๆ แต่ละชุดจะประกอบด้วยค่าความผิดพลาดทั้งสามชนิดเท่าๆกัน และจะทดสอบกับค่าความผิดพลาดแต่ละชุดตั้งแต่น้อยไปหามาก ตั้งแต่ 0.05 ไปถึง 0.3

ตารางที่ ก.8: ผลการทำงานของวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์หลายตัวในสภาวะที่มีข้อผิดพลาดทางการวัดระยะทาง

ความผิดพลาดของการวัดระยะทาง	ความผิดพลาดของการวัดมุม	ความผิดพลาดของการระบุชนิด	ร้อยละความถูกต้อง	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย	ค่าความผิดพลาดผิดพลาดต่ำสุดเฉลี่ย
0.05	0.05	0.05	99.5	133.19	10.02
0.10	0.10	0.10	96.6	140.12	18.62
0.15	0.15	0.15	94.8	141.30	27.81
0.20	0.20	0.20	93.5	144.32	42.44
0.25	0.25	0.25	90.0	142.69	42.42
0.30	0.30	0.30	84.0	152.79	46.72

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีระบุตัวตนของหุ่นยนต์สามารถทำงานได้แม้จะมีความผิดพลาดจากการวัดทั้งสามแบบพร้อมๆกัน ในการทดลองความถูกต้องของผลลัพธ์อยู่ที่ร้อยละ 99.5 ถึงร้อยละ 84 แม้ในกรณีที่ให้ค่าความผิดพลาดทั้งสามสูงถึงชนิดละ 0.3 ซึ่งหมายความว่าค่าการวัดระยะทางและการวัดจะมีการกระจายแบบปกติด้วยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.3 เท่าของค่าที่ถูกต้อง และมีความน่าจะเป็น 0.3 ที่หุ่นยนต์จะระบุชนิดของหุ่นยนต์รอบข้างผิด ขั้นตอนวิธียังสามารถระบุตัวตนได้ถูกต้องถึงกว่าร้อยละ 80 ความสัมพันธ์ของความถูกต้องของผลลัพธ์ ความสัมพันธ์ระหว่าง

ก.6 สรุปผลการทดลอง

การทดลองการทำงานของการระบุตัวตนของหุ่นยนต์ในบทนี้ต้องการทดลองประสิทธิภาพการทำงานในภาวะที่ใกล้เคียงกับการทำงานจริง คือมีความผิดพลาดเกิดขึ้นซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาการระบุตัวตนผิดพลาดขึ้นได้ การทดลองนี้จำลองความผิดพลาดสามลักษณะที่อาจเกิดขึ้นได้ คือ ความผิดพลาดในการวัดระยะทาง ความผิดพลาดในการวัดมุม และความผิดพลาดในการระบุชนิด

ในแง่ของความถูกต้องของผลการทำงานขั้นตอนการระบุตัวตนเมื่อมีความผิดพลาดทางการ

วัดเกิดขึ้นเพียงอย่างใดอย่างหนึ่ง จะมีความถูกต้องมากกว่าร้อยละ 90 แม้ว่าจะให้ค่าความผิดพลาดทางการวัดสูงมากกล่าวคือ การกระจายของค่าที่วัดได้มีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงถึงครึ่งหนึ่งของค่าที่ถูกต้อง แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีการระบุตัวตนของกลุ่มหุ่นยนต์มีคุณสมบัติทนทานต่อการเกิดข้อผิดพลาดสูงซึ่งเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในสถานการณ์จริง ในการทดลองการเกิดความผิดพลาดทางการวัดทุกชนิดพร้อมกัน แนวโน้ม ในกรณีที่ความผิดพลาดสูงสุดขั้นตอนวิธียังสามารถระบุตัวตนได้ถูกต้องร้อยละ 84 ซึ่งแสดงว่าแม้ในสถานการณ์ที่เกิดความผิดพลาดพร้อมกันทุกอย่าง ขั้นตอนวิธียังสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง ทำให้ขั้นตอนวิธีที่เสนอนี้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานแม้กับตัวรับรู้ที่มีความผิดพลาดสูง

จะสังเกตได้ว่าในการคำนวณความผิดพลาดที่ใช้ในที่นี้ใช้ค่าที่วัด จากการวัดเพียงครั้งเดียวเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของการผิดพลาดในการวัดกับผลลัพธ์ ซึ่งหากมีความผิดพลาดจะมีผลโดยตรงกับผลลัพธ์ เราสามารถเพิ่มความถูกต้องของการทำงาน ได้โดยใช้การวัดมากกว่าหนึ่งครั้งมาทำการเฉลี่ยหรือผ่านตัวกรองแบบต่างๆ ก็จะสามารถเพิ่มความถูกต้องของการทำงานในการระบุตัวตนนี้ได้อีก จึงเห็นได้ว่าขั้นตอนวิธีนี้เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการทำงานจริง ทั้งในด้านความถูกต้องและการทนต่อความผิดพลาด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนัฐพล บุญภินนท์ เกิดเมื่อ วันที่ 1 พฤศจิกายน 2526 ที่ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษา ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยม อันดับสอง) สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2547 และเข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรม ศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ณ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปีการศึกษา 2548

มีความสนใจในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติโดยเฉพาะงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานร่วมกันของหุ่นยนต์หลายตัว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย