

อิมเมจจาโคเขียนแบบปรับตัวโดยวิวัฒนาการสำหรับแขนหุ่นยนต์ในสามมิติ



นาย คทา ประดิษฐ์วงศ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์

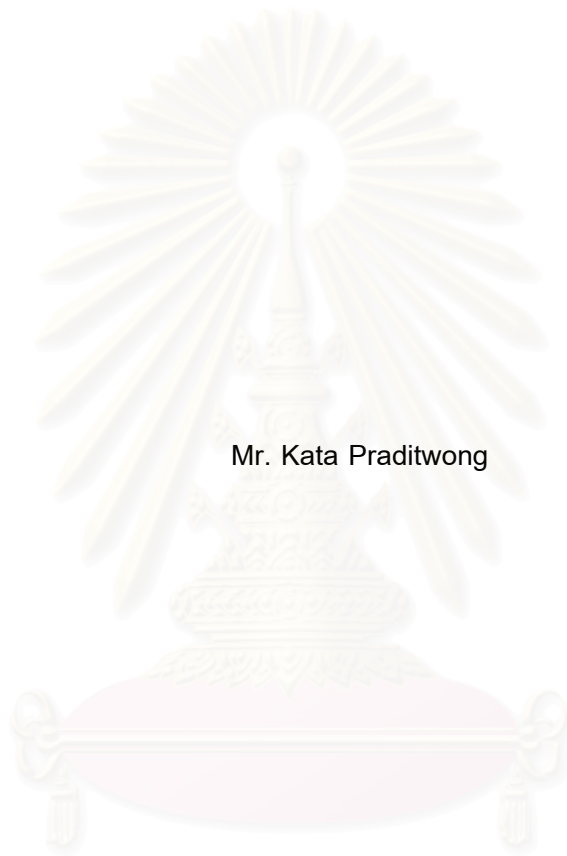
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0322-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN ADAPTIVE IMAGE JACOBIAN BY EVOLUTION FOR A ROBOT ARM
IN THREE DIMENSIONS



Mr. Kata Praditwong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Computer Science

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0322-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวโดยวิวัฒนาการสำหรับแขนหุ่นยนต์ในสามมิติ
โดย นายคทา ประดิษฐ์วงศ์
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญเสริม กิจศิริกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สีปสกุล พิภพมงคล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล)

สถาบันนวัตกรรมการบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

คทา ประดิษฐวงศ์ : อิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวโดยวิวัฒนาการสำหรับแขนหุ่นยนต์ในสามมิติ
(AN ADAPTIVE IMAGE JACOBIAN BY EVOLUTION FOR A ROBOT ARM IN
THREE DIMENSIONS.) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา, 48 หน้า. ISBN
974-03-0322-6

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงการทำงานของควบคุมของแขนหุ่นยนต์แบบที่ไม่มีการ
ปรับเทียบ ระบบหุ่นยนต์ใช้กล้องสองตัวมาเป็นข้อมูลเข้าและส่งคำสั่งออกไปควบคุมการทำงานของแขน
หุ่นยนต์ที่มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับสาม การเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ใช้อิมเมจจาโคเบียนมาเป็น
ข้อมูลที่สำคัญในคำนวณหาการควบคุมของแขนหุ่นยนต์ งานวิจัยนี้เสนอวิธีการปรับอิมเมจจาโคเบียนโดย
ใช้กลวิธีเชิงวิวัฒนาการ การทดลองเปรียบเทียบการควบคุมโดยใช้ระบบที่อิมเมจจาโคเบียนคงที่กับระบบ
อิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัว การตัดสินใจจำนวนครั้งในการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายและความผิดพลาด
ของวิถี การทดลองมีการเปรียบเทียบผลของการเคลื่อนที่เมื่อขนาดของก้าวมีค่าต่างกัน ในงานวิจัย
นี้มีการทดลองทั้งในแบบจำลองและแขนหุ่นยนต์จริง วิธีที่นำเสนอนี้สามารถลดความผิดพลาดของวิถี ใน
แบบจำลองลดลง 87 เปอร์เซ็นต์ และในการทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริงลดลง 46 เปอร์เซ็นต์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมคอมพิวเตอร์.....
สาขาวิชา วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์.....
ปีการศึกษา 2544.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม.....

417024162121 : MAJOR COMPUTER SCIENCE

KEY WORD: ROBOT / EVOLUTION STRATEGY / IMAGE JACOBIAN

KATA PRADITWONG: AN ADAPTIVE IMAGE JACOBIAN BY EVOLUTION FOR A
ROBOT ARM IN THREE DIMENSIONS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
PRABHAS CHONGSTITVATANA, Ph.D, 48 pp. ISBN 974-03-0322-6.

The aim of this work is to improve the control of an uncalibrated robotic arm. Two cameras are used as the input of the system. The output is the command to control a three degree of freedom robotic arm. The image Jacobian is used in the control system. This work presents an adaptive image Jacobian method using an evolution strategy. The experiment compares two control methods one is the fixed image Jacobian and another is the adaptive image Jacobian. The metrics for comparison are the number of move for the robotic arm to reach a target and the error of the trajectory. The experiment also compares the results from the different step size. The experiment is carried out both with the simulation and with the real robot. The proposed method can reduce the error of the trajectory in the simulation 87 % and in the real robot 46 %.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Computer Engineering.....

Fields of study Computer Science.....

Academic year 2001.....

Student's signature.....

Advisor's signature.....

Co-Advisor's signature..... -

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือจากหลายๆ ท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ดร. ประภาส จงสถิตยวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาด้วยดีตลอดและขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. สมชาย ประสิทธิ์จตุระกุล อ.ดร. สืบสกุล พิภพมงคล และ ผศ.ดร. บุญเสริม กิจศิริกุล ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำแนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบคุณ อ.ดร. รัชทิน จันทรเจริญ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเฟื้อแขนงทุนยนต์ในการวิจัย และสละเวลาช่วยเหลือและให้คำแนะนำในการทำการทดลองกับแขนงทุนยนต์

ขอบคุณ อ.ดร. ปานใจ ธารทัศนวงศ์ ผู้อำนวยการศูนย์คอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรที่ให้ ยืมกล้องที่ใช้ในการทดลองแขนงทุนยนต์

ขอบคุณสมาชิกห้องปฏิบัติการระบบอัจฉริยะ (Intelligent Systems Lab) ทุกท่านที่ได้ให้คำ ปรึกษาและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยชิ้นนี้

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 ผลงานที่ตีพิมพ์จากงานวิจัย	2
1.7 เนื้อหาและรูปแบบการนำเสนอวิทยานิพนธ์.....	2
2 กลวิธีเชิงวิวัฒนาการ.....	3
2.1 ฟังก์ชันเป้าหมาย.....	3
2.2 กลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ (1+1)	3
2.3 กลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ ($\mu+1$).....	5
2.4 กลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ ($\mu+\lambda$) และ (μ,λ).....	6
2.5 สรุปท้ายบท.....	10
3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
3.1 อิมเมจจาโคเบียน	11
3.2 การเคลื่อนไหวแขนโดยใช้อิมเมจจาโคเบียน	12
3.3 ระบบที่มีการปรับอิมเมจจาโคเบียน	14
3.4 สรุปท้ายบท.....	15
4 การทดลองในแบบจำลอง.....	16
4.1 สภาพแวดล้อมในการทดลอง.....	16
4.2 วิธีการวัดประสิทธิภาพ	17
4.3 ขนาดของก้าว.....	18

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 ระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่.....	19
4.5 ระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัว	20
4.6 การทดลองในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์.....	24
4.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	31
4.8 สรุปท้ายบท.....	33
5 การทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริง.....	34
5.1 สภาพแวดล้อม	34
5.2 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	34
5.3 แขนหุ่นยนต์และตัวควบคุม.....	35
5.4 กล้อง.....	36
5.5 การทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริง.....	37
5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	43
5.7 สรุปท้ายบท.....	44
6 การสรุปผลการทดลอง	45
6.1 สรุปผลการวิจัย	45
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	45
รายการอ้างอิง.....	47
ประวัติผู้เขียน	48

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 แสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4	25
4.2 แสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4	25
4.3 แสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10	25
4.4 แสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10.....	25
4.5 ค่าตัวสถิติทดสอบของจำนวนครั้งของการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4	32
4.6 ค่าตัวสถิติทดสอบของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4	32
4.7 ค่าตัวสถิติทดสอบของจำนวนครั้งของการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10.....	32
4.8 ค่าตัวสถิติทดสอบของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดก้าวเป็น 1/10	33
4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้นของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4	33
4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้นของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10 ...	33
5.1 แสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/2	39
5.2 แสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/2.....	40
5.3 แสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4	40
5.4 แสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4.....	40
5.5 ค่าตัวสถิติทดสอบของจำนวนครั้งของการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/2	43
5.6 ค่าตัวสถิติทดสอบของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/2	43
5.7 ค่าตัวสถิติทดสอบของจำนวนครั้งของการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4	43
5.8 ค่าตัวสถิติทดสอบของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดก้าวเป็น 1/4	43

5.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความถี่ของค่าความผิดพลาดของวิธีโดยขนาดของก้าวเป็น $1/2$ 44

5.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความถี่ของค่าความผิดพลาดของวิธีโดยขนาดของก้าวเป็น $1/4$ 44



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนวิธีการกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ (1+1)	4
2.2 ขั้นตอนวิธีการกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ ($\mu+1$)	6
2.3 แสดงวงรีของการกระจายพันธุ์ที่ $n=2$, $n_{\sigma}=2$, $n_{\alpha}=1$	7
2.4 ขั้นตอนวิธีการกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ (μ, λ)	9
3.1 ระบบแขนหุ่นยนต์และกล้อ.....	11
3.2 แขนแบบ SCARA.....	14
4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	16
4.2 แสดงการเคลื่อนที่ของปลายแขนเข้าสู่เป้าหมาย.....	17
4.3 วิธีคิดระยะทางระหว่างจุดกับเส้นตรง.....	18
4.4 แผนภูมิสายงานแสดงการทำงานของระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่.....	20
4.5 แผนภูมิสายงานแสดงการทำงานของระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัว	21
4.6 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่ต้องการไปและตำแหน่งที่ไปจริง.....	21
4.7 รูปที่ใช้ในการคิดการเคลื่อนแขนจาก f_1 ไป f_0 เพื่อหาค่าความเหมาะสม.....	23
4.8 กราฟแสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4	26
4.9 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4	26
4.10 กราฟแสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10	27
4.11 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10	27
4.12 เส้นทางการเคลื่อนแขนในเส้นทางที่ 1	28
4.13 เส้นทางการเคลื่อนแขนในเส้นทางที่ 2	29
4.14 เส้นทางการเคลื่อนแขนในเส้นทางที่ 3	29
4.15 เส้นทางการเคลื่อนแขนในเส้นทางที่ 4	30
4.16 เส้นทางการเคลื่อนแขนในเส้นทางที่ 5	30
4.17 เส้นทางการเคลื่อนแขนในเส้นทางที่ 6	31
5.1 สภาพแวดล้อมการทำงานกับแขนหุ่นยนต์จริง	34
5.2 แขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง	35
5.3 ตัวควบคุมแขนหุ่นยนต์	36
5.4 การวางแขนหุ่นยนต์และกล้อ	36
5.5 กล้อที่ใช้ในการทดลอง	36
5.6 ภาพถ่ายที่มองเห็นจากกล้อทั้งสอง	38
5.7 ภาพที่ได้จากการหาสีแดงจากภาพถ่าย	38

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ได้กัล้องทั้งสองโดยระบบอิมเมจจาโคเบียงคองที่และมีขนาดก้าวเป็น $1/4$	39
5.9 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ได้จากกัล้องทั้งสองโดยระบบอิมเมจจาโคเบียงคองแบบปรับตัวและมีขนาดก้าวเป็น $1/4$	39
5.10 กราฟแสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น $1/2$	41
5.11 กราฟแสดงความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น $1/2$	41
5.12 กราฟแสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น $1/4$	42
5.13 กราฟแสดงความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น $1/4$	42

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

การทำงานของระบบแขนหุ่นยนต์ให้ทำงานนั้นจำเป็นต้องรู้เกี่ยวกับรูปแบบของแขนและกลอง รวมถึงการจัดวางของทั้งสองอย่าง ซึ่งจะต้องมีความแม่นยำในการวัด เพื่อนำค่าเหล่านี้มาทำการสร้างสมการของการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ (kinematics equation) เพื่อมาใช้ในการขยับแขนหุ่นยนต์ แต่ในการใช้งานจริงนั้นค่าต่างๆ ที่มีการติดตั้งอยู่นี้มีโอกาสที่เปลี่ยนแปลงได้เสมอ ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆ ต้องสร้างสมการของการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ใหม่ ซึ่งแนวคิดแบบนี้ทำให้ระบบยุ่งยากในการใช้ในโลกรจริงในบางกรณี ดังนั้นจึงมีระบบที่ไม่ต้องมีการปรับเทียบ (uncalibrated system) เกิดขึ้นมาเพื่อแก้ไขแนวทางเดิม โดยไม่ต้องพึ่งความรู้เกี่ยวกับระบบแขน ระบบกลองและการจัดวาง ซึ่งก็ไม่มีสร้างสมการของการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ แต่แนวความคิดนี้ก็ใช้อิมเมจจาโคเบียน มาเป็นตัวชี้้นำในการเคลื่อนไหวแขน ได้มีการทดลองโดยใช้ระบบนี้จริงซึ่งก็ได้ผล แต่อิมเมจจาโคเบียนนั้นเกิดจากการประมาณแล้วค่าที่ได้จะถูกต้องเฉพาะในบริเวณแคบๆ และใกล้ๆ จุดที่ทำการประมาณ แม้มีข้อจำกัดแต่ในการประมาณค่าอิมเมจจาโคเบียนที่จุดเริ่มต้นและใช้ค่านีมาขยับแขนที่ละน้อยๆ ก็สามารถทำให้แขนเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายได้โดยใช้ค่าเดียวตลอดการเคลื่อนที่ดังที่มีการทดลองใน Conkie และ Chongstitvatana (1990) ในวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสร้างระบบที่มีการปรับค่าของอิมเมจจาโคเบียน โดยมีการปรับค่าอิมเมจจาโคเบียนทุกครั้งที่มีการเคลื่อนที่ของปลายแขน ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีการหาความสัมพันธ์ของอิมเมจจาโคเบียนที่จุดต่างๆ ได้อย่างถูกต้อง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการ (evolution strategy) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้แรงบันดาลใจจากแนวทางวิวัฒนาการของธรรมชาติมาปรับปรุงการทำงานอิมเมจจาโคเบียนให้ดีขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อเสนอแนวทางปรับปรุงระบบแขนหุ่นยนต์ที่ไม่มีการปรับเทียบ (uncalibrated system) ที่ใช้อิมเมจจาโคเบียนมาเป็นตัวนำทางและใช้กลยุทธ์เชิงวิวัฒนาการมาปรับปรุงอิมเมจจาโคเบียน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ทำการศึกษาโดยใช้แขนหุ่นยนต์ที่เคลื่อนไหวใน 3 มิติ ที่มีระดับขั้นความเสรีเท่ากับสาม (degree of freedom = 3) แต่ละจุดให้เซอร์โวมอเตอร์ในการควบคุมการเคลื่อนไหว และโดยอาศัยภาพจากกล้อง 2 ตัวมาเป็นข้อมูลเข้า

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีของแขนหุ่นยนต์
2. ศึกษาทฤษฎีเชิงวิวัฒนาการ
3. สร้างชุดทดลอง
4. ออกแบบวิธีการทดลอง
5. ทำการทดลองและเก็บผลการทดลอง
6. สรุปผลการวิจัยและทำรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพื่อเป็นแนวทางในการนำเทคนิคของวิวัฒนาการมาใช้ในการสร้างโปรแกรมอัตโนมัติเพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ใน 3 มิติ

1.6 ผลงานที่ตีพิมพ์จากงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ตีพิมพ์และนำเสนอในงานประชุมวิชาการ The Second Asian Symposium On Industrial Automation And Robotics เมื่อวันที่ 17-18 พฤษภาคม พ.ศ.2544 กรุงเทพฯ ในบทความเรื่อง AN UNCALIBRATED VISUAL SERVOING USING EVOLUTION STRATEGIES TO ESTIMATE IMAGE JACOBIAN โดยผู้นำเสนอ คือ Kata Praditwong และ Prabhas Chongstitvatana

1.7 เนื้อหาและรูปแบบการนำเสนอวิทยานิพนธ์

เนื้อหาต่อกันเป็นดังนี้ บทที่ 2 จะนำเสนอเรื่องการทำงานของกลวิธีเชิงวิวัฒนาการ บทที่ 3 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับอิมเมจจาโคเบียน บทที่ 4 อธิบายวิธีการทดลองในแบบจำลองและผลการทดลอง บทที่ 5 อธิบายการทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริงและผลการทดลอง บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและกล่าวถึงข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

กลวิธีเชิงวิวัฒนาการ

กลวิธีเชิงวิวัฒนาการ (evolution strategy) ถูกพัฒนาโดย Rechenberg และ Schwefel ที่มหาวิทยาลัยเทคนิคเบอร์ลิน ในปี ค.ศ. 1964 โดยที่การประยุกต์ใช้งานครั้งแรกใช้กับงานที่พัฒนารูปร่างที่สามารถบดของท่อ เพื่อให้ลดการสูญเสียพลังงานให้น้อยที่สุด กลวิธีเชิงวิวัฒนาการในบทนี้ได้นำมาจากหนังสือของ Winter, Periaux และ Cuesta (1995)

กลวิธีเชิงวิวัฒนาการเป็นเทคนิคหนึ่งในสาขาการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (evolutionary computation) ซึ่งได้เลียนแบบการวิวัฒนาการแบบธรรมชาติ โดยพยายามเก็บสิ่งที่คาดว่าจะป็นคำตอบเอาไว้ แล้วใช้ตัวดำเนินการทางวิวัฒนาการมากระทำต่อไปเรื่อยๆ หลายๆ รุ่นจนกระทั่งได้คำตอบ สำหรับกลวิธีเชิงวิวัฒนาการนั้นได้มีการเสนอแบบย่อยๆ อีกหลายแบบ ซึ่งจะนำเสนอต่อไป

2.1 ฟังก์ชันเป้าหมาย

กลวิธีเชิงวิวัฒนาการเป็นวิธีการที่ใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งเป็นจำนวนจริงที่ต่อเนื่องกัน โดยมีการกำหนดฟังก์ชันเป้าหมาย (f) ให้อยู่ในรูป

$$f^* := f(\vec{x}^*) = \min\{f(\vec{x}) \mid \vec{x} \in M \subseteq \mathbb{R}^n\} \quad (2.1)$$

โดยที่ f ต้องการหาเวกเตอร์ \vec{x} ที่เป็นจำนวนจริงขนาด n มิติ ที่ทำให้ค่าของ f มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งเวกเตอร์ \vec{x} ที่สามารถใช้ได้ก็จะอยู่ในเซต M ซึ่งเป็นซับเซตเวกเตอร์ขนาด n มิติของจำนวนจริง โดยนิยามเซต M ดังนี้

$$M = \{\vec{x} \in \mathbb{R}^n \mid g_j(\vec{x}) \geq 0 \forall j \in \{1, \dots, q\}\} \quad (2.2)$$

นั่นคือ เวกเตอร์ \vec{x} นั้นจะใช้ได้ก็ต่อเมื่อ ต้องทำให้ $g_1(\vec{x}) \geq 0, \dots, g_q(\vec{x}) \geq 0$ ทั้งหมดนั้นดังนั้น g_j คือ ฟังก์ชันที่เป็นการบังคับของเซตของ \vec{x} ที่เป็นไปได้

2.2 กลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ (1+1)

กลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบนี้เป็นแบบแรกที่ใช้เมื่อปี ค.ศ 1964 โดยมีการใช้ขั้นตอนการทำงานของกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ (1+1) ดังต่อไปนี้

```

t := 0;
initialize P(t) = {(x̄, σ)};
evaluate f(x̄);
while (T(P(t)) = 0) do
    (x̄, σ) := mut((x̄, σ));
    evaluate f(x̄);
    if(f(x̄) ≤ f(x̄))
        then P(t+1) := {(x̄, σ)};
        else P(t+1) := P(t);
    t := t + 1;
od

```

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนวิธีกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ (1+1)

ประชากรที่ใช้การทำงานนิยามดังนี้

$$\vec{a} = (\vec{x}, \sigma) \in \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}_+ \quad (2.3)$$

โดยเรียก \vec{x} ว่าเป็นค่าตัวแปรเป้าหมายซึ่งเป็นเวกเตอร์ที่มีขนาด n มิติและมี σ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เมื่อเริ่มต้นจะทำการสร้างประชากรโดยการสุ่ม 1 ตัวแล้ววัดค่าความดี (fitness) โดยใช้ฟังก์ชันเป้าหมาย หลังจากนั้นจะใช้ตัวกระทำการกลายพันธุ์ (mutation) เพื่อสร้างประชากรอีก 1 ตัวและวัดค่าความดี จากนั้นนำค่าความดีมาเปรียบเทียบกันแล้วเลือกประชากรตัวที่ดีกว่ามาเป็นประชากรให้รุ่นต่อไป โดยทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าเงื่อนไข T ให้ค่าที่เป็นจริงจึงจะเลิกทำซ้ำ

ตัวกระทำการกลายพันธุ์นั้นมีการทำงานดังนี้

$$\vec{a} = (\vec{x}, \sigma) := \text{mut}((\vec{x}, \sigma)) = \text{mu}_x(\vec{x}, \text{mu}_\sigma(\sigma)) = \text{mu}_x(\vec{x}, \tilde{\sigma}) = (x_1 + z_1, \dots, x_n + z_n) \quad (2.4)$$

โดย $z_i \sim N_i(0, \sigma^2)$ ฟังก์ชัน mu_σ ทำการปรับค่า σ ซึ่งจะใช้กฎ 1/5 ของความสำเร็จ กำหนดให้ p เป็นอัตราส่วนของการสร้างประชากรตัวใหม่โดยใช้ mut แล้วให้ประชากรที่ดีกว่าเดิม กับจำนวนที่ใช้ mut ทั้งหมด ถ้า $p > 1/5$ ก็จะปรับค่า σ เพิ่มขึ้นถ้า $p < 1/5$ จะปรับค่า σ ลดลง และถ้า $p = 1/5$ ค่า σ เป็นค่าเดิม โดยค่า C ที่ใช้ก็จะมีค่าเป็น 0.817 การปรับจะทำทุกๆ k รุ่นดังสมการ (2.5)

$$\tilde{\sigma} := \mu_{\sigma}(\sigma) = \begin{cases} \sigma/C & p > 1/5 \\ \sigma \cdot C & p < 1/5 \\ \sigma & p = 1/5 \end{cases} \quad (2.5)$$

ส่วนการกลายพันธุ์ของตัวแปรเป้าหมายเป็นการบวกสมาชิกทุกตัวในของตัวแปรเป้าหมายด้วยตัวเลขสุ่ม z ซึ่งเป็นเลขสุ่มที่มีการกระจายแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น $\tilde{\sigma}$

2.3 กลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ $(\mu+1)$

กลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบนี้ได้ทำการเริ่มใช้ประชากรหลายๆ ตัวขึ้นมา $\mu > 1$ ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากสร้างประชากร μ วัดค่าความดีของทุกตัวหลังจากนั้นสร้างประชากรตัวใหม่ 1 ตัวพร้อมทั้งวัดค่าความดี จากนั้นเลือกประชากรที่ดี μ จาก $\mu+1$ ไปเป็นประชากรในรอบต่อไป สำหรับ σ Rechenberg ไม่ได้บอกวิธีการปรับ ส่วนที่เพิ่มเติมจากกลวิธีเดิมก็คือ มีตัวกระทำการไขว้เปลี่ยน (recombination) ซึ่งนิยามดังนี้

$$\text{rec} = \text{re} \circ \text{co} \quad (2.6)$$

การไขว้เปลี่ยนประกอบด้วย 2 งานย่อยคือ re ที่เลือกประชากรมา o ตัวและ co นำประชากรที่เลือกมาสร้างประชากรตัวใหม่ 1 ตัว และรูปแบบในการไขว้เปลี่ยนที่จะสร้างประชากรมาใหม่นั้นได้มีแบบต่างๆ ดังนี้

$\omega=0$: ไม่มีการไขว้เปลี่ยน เมื่อเลือกประชากรมา 1 ตัวจาก re แล้วก็ใช้ประชากรตัวนั้นเป็นตัวใหม่เลย

$\omega=1$: การไขว้เปลี่ยนแบบเฉลี่ยทั้งหมด ค่าของสมาชิกตัวที่ i ในตัวแปรเป้าหมายของประชากรตัวใหม่เกิดจากค่าเฉลี่ยของสมาชิกตัวที่ i ของประชากรที่ถูกเลือก

$$b'_i = \frac{1}{o} \sum_{k=1}^o b_{k,i} \quad (2.7)$$

$\omega=2$: การไขว้เปลี่ยนแบบเฉลี่ยภายในกลุ่ม เลือกประชากร 2 ตัวจาก o ตัวที่เลือกมาแล้ว ค่าของสมาชิกตัวที่ i ในตัวแปรเป้าหมายของประชากรตัวใหม่เกิดจากค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่สุ่มมาคูณกับค่าของสมาชิกตัวที่ i ของประชากร 2 ตัวที่เลือกมาดังสมการ

$$b'_i = u_i b_{k_1,i} + (1-u_i) b_{k_2,i} \quad (2.8)$$

โดยที่ $u_i \sim U([0,1])$ หรือ $u_i = 0.5$ และ $k_1, k_2 \sim U(\{1, \dots, \varrho\})$

$\omega=3$: การไขว้เปลี่ยนแบบไม่ต่อเนื่อง ค่าสมาชิกตัวที่ i ในตัวแปรเป้าหมายเกิดจากการเลือกสุ่มสมาชิกตัวที่ i ของประชากรที่เลือกไว้ก่อนมาใส่

$$b'_i = b_{k_i, i} \quad (2.9)$$

เมื่อ $k_i \sim U(\{1, \dots, \varrho\})$

กลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ $(\mu+1)$ มีขั้นตอนดังด้านล่างนี้

```

t := 0;
initialize  P(t) = {x̄1, ..., x̄μ};
evaluate    f(x̄1), ..., f(x̄μ);
while      (T(P(t)) = 0) do
    x̃ := mut(rec(P(t)));
    evaluate f(x̃);
    P(t+1) := selμμ+1 ({x̃} ∪ P(t));
    t := t + 1;
od

```

รูปที่ 2.2 ขั้นตอนวิธีกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ $(\mu+1)$

2.4 กลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ $(\mu+\lambda)$ และ (μ,λ)

Schwefel ได้เสนอกลวิธีแบบใหม่ขึ้นมา เพื่อให้การปรับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทนทานและเหมาะสมกับกรณีต่างๆ ไปมากขึ้น ประชากรนั้นได้เปลี่ยนเป็นดังนี้ $\vec{a} = (\vec{x}, \vec{\sigma}, \vec{\alpha}) \in I$ โดย I นิยามดังนี้

$$I = \mathbb{R}^{n_\sigma} \times \mathbb{R}_+^{n_\sigma} \times [-\pi, \pi]^{n_\alpha} \quad (2.10)$$

\vec{x} เป็นตัวแปรเป้าหมายที่เป็นเวกเตอร์และเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดความดีของฟังก์ชันเป้าหมาย

$\vec{\sigma}$ เป็นเวกเตอร์ของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเหมือนกับกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบก่อน

$\vec{\alpha}$ เป็นเวกเตอร์ของมุม

สำหรับขนาดของเวกเตอร์ $\vec{\sigma}$ และ $\vec{\alpha}$ สำหรับใช้ปรับ \vec{x} ขึ้นกับลักษณะของปัญหา สำหรับค่าที่มีการใช้โดยทั่วไปๆ ไม่มีดังนี้

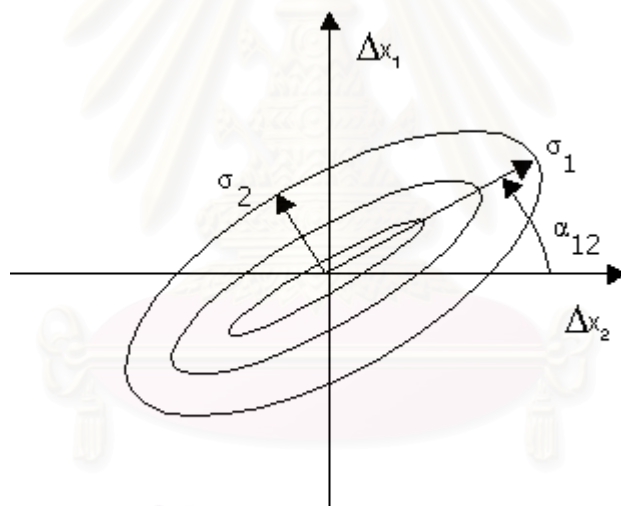
$n_{\sigma}=1, n_{\alpha}=0$: มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพียงตัวเดียวไว้สำหรับการควบคุมการกลายพันธุ์ทุกสมาชิก \vec{x}

$n_{\sigma}=n, n_{\alpha}=0$: มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_i สำหรับการควบคุมการกลายพันธุ์ x_i แต่ละตัว

$n_{\sigma}=n, n_{\alpha}=n \cdot (n-1)/2$: การกลายพันธุ์แบบสหสัมพันธ์ (correlated mutation) และมีเมทริกซ์ของความแปรปรวนร่วมสมมาตร (complete covariance matrix) ในประชากรแต่ละตัว

$n_{\sigma}=2, n_{\alpha}=n-1$: มีทิศทางหนึ่งซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปอย่างอิสระในปริภูมิของคำตอบที่ถูกกำหนดโดยค่าความแปรปรวน 2 ตัวที่มีทิศทางที่ตั้งฉากกัน

สำหรับกรณีการกลายพันธุ์แบบเกี่ยวพันกัน ในโดยเฉพาะ $n=2, n_{\sigma}=2, n_{\alpha}=1$ แสดงดังรูปที่ 2.1 โดยที่บนเส้นวงรีนั้นแสดงถึงโอกาสที่เท่ากันของความน่าจะเป็นที่จะเกิดการกลายพันธุ์



รูปที่ 2.3 แสดงวงรีของการกลายพันธุ์ที่ $n=2, n_{\sigma}=2, n_{\alpha}=1$

เนื่องจากประชากรได้มีโครงสร้างที่เปลี่ยนไป ดังนั้นตัวกระทำการกลายพันธุ์มีการนิยามที่เปลี่ยนไปเช่นกันคือ มีการกลายพันธุ์ของ $\vec{\sigma}$ และ $\vec{\alpha}$ ก่อนหลังจากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการปรับค่า \vec{x} ดังนิยามข้างล่างนี้

$$(\vec{\tilde{x}}, \vec{\tilde{\sigma}}, \vec{\tilde{\alpha}}) := \text{mut}(\vec{x}, \vec{\sigma}, \vec{\alpha}) = \text{mu}_x \circ (\text{mu}_{\sigma} \times \text{mu}_{\alpha})(\vec{x}, \vec{\sigma}, \vec{\alpha}) = (\vec{x}, \text{mu}_{\sigma}(\vec{\sigma}), \text{mu}_{\alpha}(\vec{\alpha})) \quad (2.11)$$

ฟังก์ชัน mu_{σ} นิยามดังนี้

$$\vec{\sigma} := \text{mu}_\sigma(\vec{\sigma}) := (\sigma_1 \exp(z_1 + z_0), \dots, \sigma_{n_\sigma} \exp(z_{n_\sigma} + z_0)) \quad (2.12)$$

โดยที่ $z_0 \sim N(0, \tau_0^2), z_i \sim N(0, \tau^2) \forall i \in \{1, \dots, n_\sigma\}$ ซึ่ง τ_0 และ τ เป็นค่าคงที่ซึ่งมีการกำหนดไว้ก่อน ซึ่ง Schwefel เรียกว่า อัตราการเรียนรู้ (learning rate) การกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ขึ้นขึ้นอยู่กับลักษณะฟังก์ชันเป้าหมาย

ฟังก์ชัน mu_α นิยามดังนี้

$$\vec{\alpha} := \text{mu}_\alpha(\vec{\alpha}) := (\alpha_1 + z_1, \dots, \alpha_{n_\alpha} + z_{n_\alpha}) \quad (2.13)$$

โดยที่ $z_0 \sim N(0, \beta^2) \forall i \in \{1, \dots, n_\alpha\}$ และจากการทดลองนั้นจะให้ค่าของ β ประมาณ 0.0873 หรือเป็นมุมประมาณ 5 องศา ค่าของ α เป็นค่าของมุมซึ่งค่าที่เป็นไปได้ต้องอยู่ในช่วง $-\pi$ ถึง π

ฟังก์ชัน mu_x นิยามดังนี้

$$\vec{x} := \text{mu}_x(\vec{x}) := (x_1 + \text{cor}_1(\vec{\sigma}, \vec{\alpha}), \dots, x_n + \text{cor}_n(\vec{\sigma}, \vec{\alpha})) \quad (2.14)$$

โดยที่ cor เป็นเมทริกซ์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\text{cor} = T \cdot \vec{z} \quad (2.15)$$

ซึ่ง $z_i \sim N(0, \sigma_i^2) \forall i \in \{1, \dots, n_\sigma\}$

สำหรับ T ซึ่งเป็นเมทริกซ์สามารถคำนวณจาก

$$T = \prod_{p=1}^{n_\sigma-1} \prod_{q=p+1}^{n_\sigma} T_{pq}(\vec{\alpha}_j) \quad (2.16)$$

โดย $j = (1/2)(2n_\sigma - p)(p+1) - 2n_\sigma + q$

เมทริกซ์ T นี้มีขนาด $n_\sigma \times n_\sigma$ สมาชิกตัวที่ $T_{pp} = T_{qq} = \cos(\vec{\alpha}_j)$ และ $T_{pq} = -T_{qp} = -\sin(\vec{\alpha}_j)$ ส่วนสมาชิกที่อยู่บนเส้นทแยงมุมที่เหลือเป็น 1 ส่วนสมาชิกที่เหลือตัวอื่นๆ ก็เป็น 0 ซึ่งรูปทั่วไปก็เป็นดังนี้

$$T_{pq}(\alpha_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & & \dots & & 0 \\ 0 & 1 & & & & \cdot \\ \cdot & & \dots & & & \cdot \\ \cdot & & \cos(\vec{\alpha}_j) & & -\sin(\vec{\alpha}_j) & \cdot \\ \cdot & & & 1 & & \cdot \\ \cdot & & & & 1 & \cdot \\ \cdot & & \sin(\vec{\alpha}_j) & & \cos(\vec{\alpha}_j) & \cdot \\ & & & & & \dots \\ & & & & & 1 & 0 \\ 0 & & & \dots & & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

สำหรับขั้นตอนวิธีในการทำงานของกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ (μ, λ) ดังนี้

```
t := 0;
initialize P(t) = {x1, ..., xμ};
evaluate f(x1), ..., f(xμ);
while (T(P(t)) = 0) do
  P̃ := empty_set;
  for i := 1 to λ do
    (x̃, σ̃, α̃) := mut(rec(P(t)));
    evaluate f(x̃);
    P̃ := P̃ ∪ {(x̃, σ̃, α̃)};
  od
  P(t+1) := selμλ(P̃);
  t := t + 1;
```

รูปที่ 2.4 ขั้นตอนวิธีกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ (μ, λ)

สำหรับกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบ (μ, λ) แตกต่างจาก $(\mu + \lambda)$ ในส่วนของทางเลือกประชากรไปเป็นประชากรรุ่นใหม่คือ แบบ $(\mu + \lambda)$ จะเลือกประชากร μ ตัวจาก $\mu + \lambda$ ตัว นั่นคือรวมประชากรในรุ่นเดิมกับส่วนที่เกิดใหม่มารวมกันแล้วเลือก ส่วน (μ, λ) เลือก μ ตัวจาก λ ตัว นั่นคือเลือกเฉพาะประชากรส่วนที่เกิดขึ้นมาใหม่เท่านั้น โดยที่ทั้ง 2 แบบนั้นต้องมีข้อบังคับดังนี้ $\mu < \lambda$

2.5 สรุปท้ายบท

กลวิธีเชิงวิวัฒนาการนั้นเป็นวิธีการค้นหาคำตอบแบบหนึ่งที่ใช้แนวทางเลียนแบบวิวัฒนาการทางธรรมชาติ โดยใช้ประชากรที่คาดว่าเป็นคำตอบจำนวนหนึ่งมาใช้ตัวกระทำการกลายพันธุ์ เพื่อสร้างประชากรใหม่ขึ้นมาทำซ้ำเป็นรุ่นๆ ไป นอกจากนี้ยังมีการสร้างระบบที่ทำให้การค้นหามีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นโดยมีการกำหนดทิศทางของการค้นหาและขอบเขตที่ต้องการค้นด้วย และมีการเสนอกลวิธีแบบต่างๆ เพื่อให้มาปรับใช้กับแต่ละปัญหาด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

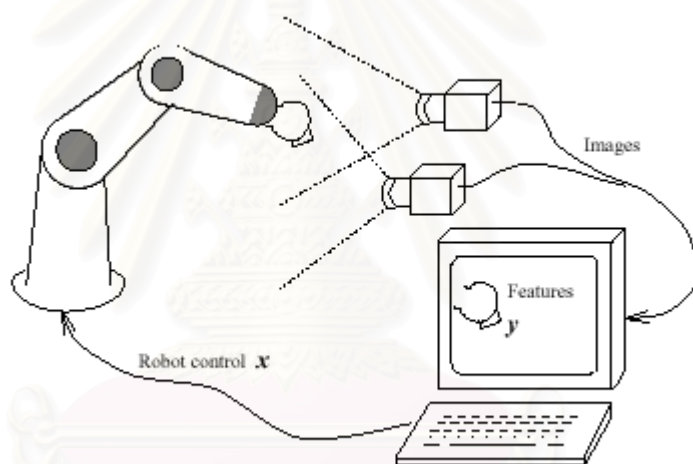
บทที่ 3

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงนิยามอิมเมจจาโคเบียนและงานวิจัยที่มีการใช้อิมเมจจาโคเบียนในการเคลื่อนไหวของแขนรวมถึงระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวโดยใช้เทคนิคต่างๆ

3.1 อิมเมจจาโคเบียน

Jagersan และ Nelson (1994) ได้ทำการสร้างระบบแขนหุ่นยนต์ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบแขนหุ่นยนต์และกล้อง

ให้ x เป็นเวกเตอร์ในการบอกตำแหน่งของปลายแขนโดยใช้ค่ามุมต่างๆ ของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นการบอกตำแหน่งของปลายแขนในระบบของแขนหุ่นยนต์ และ y เป็นเวกเตอร์ที่บอกตำแหน่งของปลายแขนที่ปรากฏบนภาพจากกล้องหรือเป็นการบอกตำแหน่งในระบบของกล้อง ดังนั้นความสัมพันธ์ที่บอกถึงการแปลงของระบบของแขนหุ่นยนต์กับระบบของกล้องได้ดังนี้

$$y=f(x) \quad (3.1)$$

ในแบบเดิมนั้น การหาฟังก์ชัน f ได้ต้องรู้จัก 2 ฟังก์ชัน คือ กล้องหรือฟังก์ชันการมองเห็นของกล้องเป็น h ซึ่งทำหน้าที่แปลงจากระบบของกล้องไปเป็นตำแหน่งในโลกจริง และฟังก์ชัน g ที่ทำการแปลงจากระบบของแขนหุ่นยนต์ไปเป็นตำแหน่งบนโลกจริง ดังนั้นจะได้สมการดังนี้

$$f^{-1} = g(h(\cdot)) \quad (3.2)$$

สำหรับระบบที่ไม่ต้องมีการปรับเทียบกับตำแหน่งในโลกจริงนั้นสามารถหาการแปลงได้ โดยให้ขนาดของ x เป็น n และขนาดของ y เป็น m ให้ตัวแปลงจากระบบของแกนหุ่นยนต์เป็นระบบของกล้องเป็นดังนี้ $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ สามารถเขียนอยู่ในรูปของการขยายของเทเลอร์แบบหลายมิติ (multidimensional Taylor expansion) ซึ่งในรูปการประมาณเชิงเส้นที่ตำแหน่ง x_0 ก็จะได้

$$f(x) = f(x_0) + J(x_0)(x - x_0) + R_2(x_0, x) \quad (3.3)$$

เมื่อฟังก์ชัน f เรียบพอ ในส่วนของ R_2 จะเล็กมากๆ สำหรับ $x \approx x_0$ และให้เรียกว่า J เป็นอิมเมจจาโคเบียน ซึ่งนิยามดังนี้

$$(J_{j,i}) = \frac{\partial f_j}{\partial x_i} \quad (3.4)$$

โดยที่อิมเมจจาโคเบียนแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของระบบของกล้องเมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยบนระบบของแกนหุ่นยนต์ เมื่อให้ $y = f(x)$, $y_0 = f(x_0)$, $\Delta y = y - y_0$ และ $\Delta x = x - x_0$ ก็จะได้สมการดังนี้

$$\Delta y \approx J \Delta x \quad (3.5)$$

3.2 การเคลื่อนไหวแขนโดยใช้อิมเมจจาโคเบียน

Conkie และ Chongstivatana (1990) ได้เสนอการทดลองของระบบที่ไม่มีการปรับเทียบ โดยมีแขนหุ่นยนต์มีสามข้อต่อและกล้อง 2 ตัวที่สามารถจับภาพของปลายแขนและเป้าหมายตลอดการทดลอง กำหนดให้ที่จุดที่มีค่าพิกัด (x, y, z) ซึ่งสังเกตได้จากกล้องที่ 1 อยู่ที่จุด (x_L, y_L) และกล้องที่ 2 อยู่ที่จุด (x_R, y_R) โดยให้แกน y ของกล้องทั้งสองขนานกัน ดังนั้นสามารถบอกค่าพิกัดของจุดนั้นในระบบกล้องทั้งสองว่า $p = (x_L, x_R, y_L)$ และที่จุดเดียวกันนั้นในระบบของแขนหุ่นยนต์เองมีการบอกพิกัดจุดที่ปลายแขนโดยมุมต่างๆ ในแขนในกรณีนี้มีระดับชั้นความเสรีเป็นสาม ให้ $m = (m_1, m_2, m_3)$ เป็นพิกัดของจุดนั้นโดยระบบของแขนหุ่นยนต์ ดังนั้นจะได้ว่า

$$\Delta m = J^{-1} \Delta p \quad (3.6)$$

โดยที่ $\Delta m = m^g - m^c$ ซึ่ง m^g เป็นตำแหน่งของเป้าหมายในระบบของแขนหุ่นยนต์ m^c เป็นตำแหน่งปัจจุบันของปลายแขนในระบบของแขนหุ่นยนต์

$\Delta p = p^g - p^c$ ซึ่ง p^g เป็นตำแหน่งของเป้าหมายในระบบของกล้อง และ p^c เป็นตำแหน่งปัจจุบันของปลายแขนในระบบของกล้อง

J^{-1} เป็นเมทริกซ์ที่แปลงค่าจากระบบของกล้องไปยังระบบของแขนหุ่นยนต์ โดยให้

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\Delta x_L}{\Delta m_1} & \frac{\Delta x_L}{\Delta m_2} & \frac{\Delta x_L}{\Delta m_3} \\ \frac{\Delta x_R}{\Delta m_1} & \frac{\Delta x_R}{\Delta m_2} & \frac{\Delta x_R}{\Delta m_3} \\ \frac{\Delta y_L}{\Delta m_1} & \frac{\Delta y_L}{\Delta m_2} & \frac{\Delta y_L}{\Delta m_3} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

ในการเริ่มต้นสร้างอิมเมจจาโคเบียนนั้น ใช้การวัดความเปลี่ยนแปลงของปลายแขนหุ่นที่ได้จากระบบของกล้องกับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของแขนเพียงเล็กน้อย ในการทดลองจะมีการเคลื่อนปลายแขนโดยการขยับข้อต่อที่กำหนดโดย m_1 ไปเล็กน้อย หลังจากนั้นก็วัดค่าที่เปลี่ยนไปของรูปที่ได้จากกล้อง ทั้งสองตัวมาหาค่าของ Δx_L , Δx_R และ Δy_L ก็จะได้ค่าทั้งหมดในสดมภ์แรก หลังจากนั้นขยับแขนกลับไปจุดเริ่มต้นแล้วขยับข้อต่อที่กำหนดโดย m_2 ไปเล็กน้อยแล้ววัดหาค่า Δx_L , Δx_R และ Δy_L จะได้ค่าทั้งหมดในสดมภ์ที่สองแล้วขยับกลับจุดเริ่มต้นจากนั้นทำกับข้อต่อที่กำหนดโดย m_3 แล้ววัดค่าต่างๆ ก็จะได้ค่าในสดมภ์ที่สาม

งานวิจัยนี้มีทดลองกับแขนจริง การทดลองแรกเป็นการนำรูปสามเหลี่ยม 2 รูปมาแตะกัน โดยวางรูปสามเหลี่ยมรูปแรกให้ยอดตั้งขึ้น และอีกอันหนึ่งนั้นติดอยู่ที่ปลายแขนโดยที่ติดให้ยอดสามเหลี่ยมชี้ลงด้านล่าง สำหรับอีกการทดลองเป็นการนำกล้องสี่เหลี่ยมมาวางซ้อนกัน 3 ชั้นและยกออกทีละกล้อง

Chancharoen และ Sangveraphunsiri (1999) ได้ทำการทดลองการเคลื่อนปลายแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยใช้อิมเมจจาโคเบียน มีการนิยามขนาดของก้าว (step size) ดังนี้

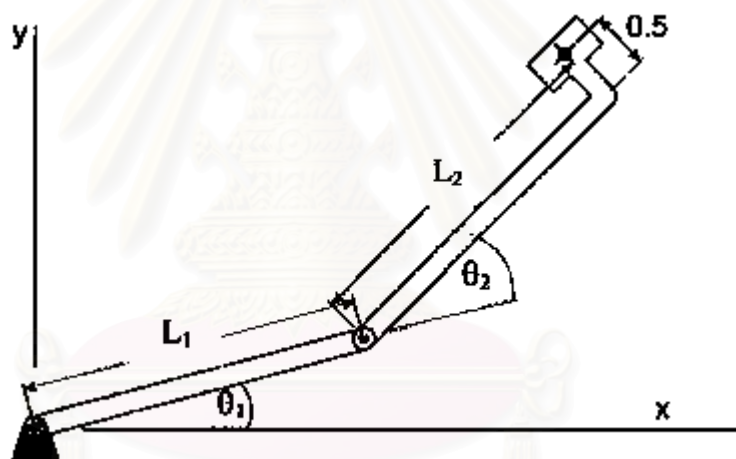
$$\Delta q = k \cdot J_q^{-1} \Delta f \quad (3.8)$$

$\Delta f = f^g - f^c$ โดยที่ f^g ตำแหน่งของเป้าหมายที่อยู่ในระบบของกล้อง และ f^c เป็นตำแหน่งปัจจุบันของปลายแขนหุ่นยนต์ในระบบของกล้อง

$\Delta q = q^o - q^c$ โดยที่ q^o เป็นตำแหน่งของปลายแขนที่เป้าหมายที่คูณด้วย k ในระบบของแกนหุ่นยนต์ และ q^c เป็นตำแหน่งปัจจุบันของปลายแขนในระบบแกนหุ่นยนต์

โดยที่ k มีค่าน้อยกว่า 1 นั่นคือถ้า k เป็น 0.5 แปลว่า จากสมการปลายแขนมีการเคลื่อนที่เพียงครึ่งเดียวของระยะทางที่จะไป

การทดลองนี้จำลองในระบบคอมพิวเตอร์โดยใช้ MATLAB และมีแขนแบบ SCARA ดังรูปที่ 3.2 โดยที่ L_1 มีค่าเป็น 10 และ L_2 มีค่าเป็น 10 ในการทดลองมีการกำหนดค่าขนาดก้าวต่างๆ คือ 0.01, 0.1 และ 0.2 โดยขนาดก้าวที่เล็กจะทำให้การเคลื่อนไหวของแขนดีกว่าแต่จะใช้จำนวนครั้งมากกว่าด้วย การทดลองที่ 2 ใช้แขนที่มีความยาวแตกต่างกัน โดย แบบที่ 1 มี L_1 มีค่าเป็น 10 และ L_2 มีค่าเป็น 10 ซึ่งได้จากการทดลองที่แล้ว แบบที่ 2 มี L_1 มีค่าเป็น 8 และ L_2 มีค่าเป็น 12 แบบที่ 3 มี L_1 มีค่าเป็น 12 และ L_2 มีค่าเป็น 8 ซึ่งทั้งหมดสามารถใช้ระบบเดียวกันมาใช้ในการทำงานได้นั้นคือ ระบบที่ใช้กันสามารถใช้ได้กับแขนทุกแบบ นั่นคือ วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องรู้เกี่ยวกับรูปแบบของแขนและขนาดความยาวของแต่ละส่วนของปลายแขน แสดงว่าวิธีการนี้สามารถใช้กับแขนรูปแบบใดๆ ก็ได้



รูปที่ 3.2 แขนแบบ SCARA

3.3 ระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัว

Jagersan และ Nelson (1994) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบวิธีการเคลื่อนแขน 2 ระบบคือแบบที่มีการปรับอิมเมจจาโคเบียนและแบบไม่มีการปรับอิมเมจจาโคเบียน การปรับอิมเมจจาโคเบียนนั้นใช้วิธีการของบรอยเดน (Broyden method) เพื่อปรับอิมเมจจาโคเบียนทุกครั้งที่มีการเคลื่อนแขน ในการทดลองหนึ่งของบทความนี้ มีการเปรียบเทียบ 2 ระบบโดยแขนมีทั้ง 3 และ 6 ระดับชั้นความเสรี ในการทดลองนี้ได้มีการรวบรวมการสร้างอิมเมจจาโคเบียนโดยใช้การบวกด้วยเมทริกซ์ที่สุ่มมา โดยที่ระบบที่มีปรับอิมเมจจาโคเบียนนั้นมีความทนทานต่อการรบกวนได้ทั้งการเข้าสู่เป้าหมายและการวัดความผิดพลาดของวิถี

นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ในงานของระบบ เช่น การนำชิ้นส่วนที่เป็นสามเหลี่ยม สีเหลี่ยมหรือวงกลมใส่ลงในช่องที่เจาะไว้ตามแบบที่สอดคล้องกัน มีการควบคุมมือหุ่นยนต์เพื่อเปลี่ยนหลอดไฟฟ้า

Piepmeier, McMurray และ Lipkin (1999) ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการปรับอิมเมจจาโคเบียนโดยใช้ วิธีไดนามิกบรอยเดน (Dynamic Broyden's method) ซึ่งเป้าหมายมีการเคลื่อนที่ในระหว่างการทดลองด้วย งานวิจัยนี้ใช้แขนที่มี 2 ท่อนโดยเคลื่อนไหวในแนวระนาบเท่านั้น โดยการทดลองก็จะทำการเคลื่อนไหวแขนตามเป้าหมายที่เคลื่อนที่วงรี ค่าความผิดพลาดจากเป้าหมายโดยเฉลี่ยประมาณ 1.31 จุดภาพ (pixel) นอกจากนี้ยังมีการทดลองเปรียบเทียบความเร็วที่เคลื่อนของเป้าหมายกับความผิดพลาด เมื่อเป้าหมายมีการเคลื่อนที่เร็วขึ้นความผิดพลาดจากเป้าหมายก็มีมากขึ้น

3.4 สรุปท้ายบท

งานวิจัยที่นำเสนอในบทนี้ได้กล่าวถึง การนิยามอิมเมจจาโคเบียน การเคลื่อนปลายแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยไม่มีการปรับเทียบ (uncalibrated system) ใช้อิมเมจจาโคเบียนเป็นตัวคำนวณ วิธีการปรับอิมเมจจาโคเบียนโดยใช้วิธีบรอยเดน ซึ่งมีทั้งเป้าหมายอยู่นิ่งและเป้าหมายเคลื่อนที่ และการประยุกต์ใช้ระบบในการทำงานควบคุมแขนหุ่นยนต์เพื่อทำงาน

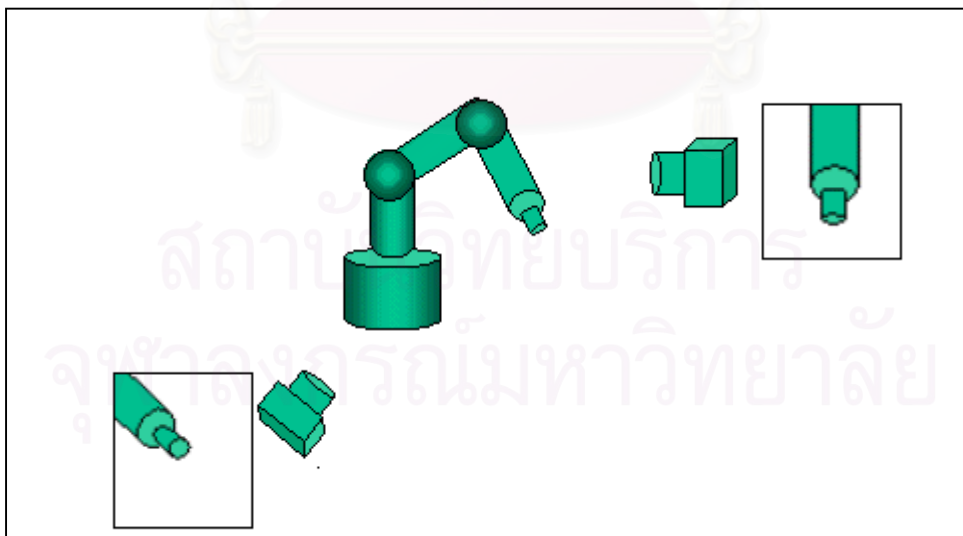
บทที่ 4

การทดลองในแบบจำลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึง สภาพแวดล้อมในการทดลองในแบบจำลอง วิธีการปรับอิมเมจจาโคเบียน และวิธีการวัดผลที่เปรียบเทียบระหว่างระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัว (adaptive Jacobian) และระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่ (fixed Jacobian)

4.1 สภาพแวดล้อมในการทดลอง

ในระบบประกอบด้วยแขนหุ่นยนต์ 1 อันและกล้อง 2 ตัว ดังรูปที่ 4.1 โดยการทำงานของแขนคือพยายามเคลื่อนปลายแขนให้เข้าสู่เป้าหมาย ซึ่งปลายแขนและตัวเป้าหมายต้องมองเห็นได้จากกล้องทั้งสอง ตลอดเวลาที่ทดลอง ให้ปลายแขนในระบบของกล้องที่ 1 อยู่ที่จุด (x_L, y_L) และในระบบกล้องที่ 2 อยู่ที่จุด (x_R, y_R) โดยให้แกน y ของกล้องทั้งสองขนานกัน กำหนดพิกัดของจุดนั้นในระบบกล้องทั้งสองว่า (x_L, x_R, y_L) และระบบของแขนหุ่นยนต์ให้ใช้ค่าของมุมในข้อต่อต่างๆ ในแขนเป็น (m_1, m_2, m_3) ในการทดลองนี้ต้องการเปรียบเทียบวิธีการเคลื่อนไหวแขนแบบที่มีการปรับค่าอิมเมจจาโคเบียนว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าระบบที่อิมเมจจาโคเบียนคงที่หรือไม่ การทดลองแบ่งเป็น 2 ชุดคือ การควบคุมของแขนแบบที่อิมเมจจาโคเบียนคงที่กับแบบที่มีการปรับอิมเมจจาโคเบียนโดยใช้กลวิธีเชิงวิวัฒนาการ

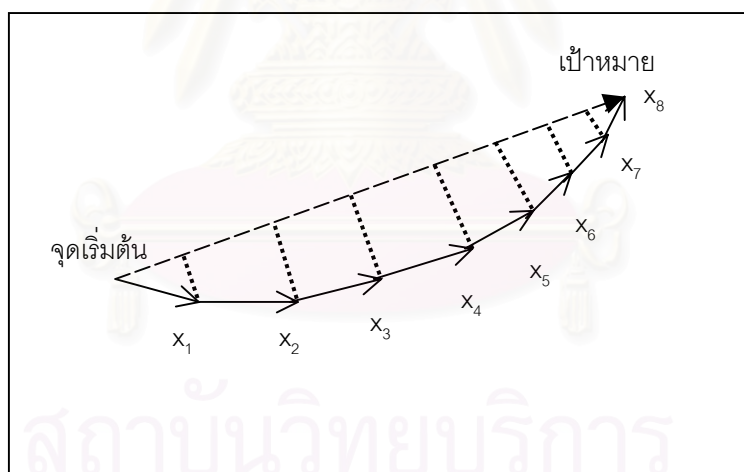


รูปที่ 4.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2 วิธีการวัดประสิทธิภาพ

การวัดผลว่าวิธีใดดีกว่าใช้ตัววัด 2 ตัวคือ 1) จำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลื่อนปลายแขนเข้าสู่เป้าหมายและ 2) ความผิดพลาดของวิถี (trajectory error) การวัดความผิดพลาดของวิถีโดยวัดระยะห่างระหว่างทางเดินของปลายแขนกับเส้นทางอุดมคติที่เป็นเส้นตรงระหว่างจุดเริ่มต้นจนถึงเป้าหมายนั้นคือถ้าวิถีที่ทำให้แขนเดินทางได้ใกล้เคียงกับแนวเส้นตรงของจุดเริ่มต้นไปสู่เป้าหมายก็จะเป็นวิธีที่ดีกว่าสำหรับการหาค่าความผิดพลาดของวิถีมีรายละเอียดดังนี้

จากรูปที่ 4.2 การเดินทางของปลายแขนนั้นจะเดินทางไปในแนวเส้นโค้ง จะไม่เดินทางเป็นแนวเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นไปยังเป้าหมายแต่เส้นทางที่เป็นอุดมคตินั้นคือเส้นทางที่เป็นเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นถึงจุดเป้าหมาย ในการทดลองการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์นั้นจะเดินทางไปทีละน้อยๆ จนถึงเป้าหมาย ความผิดพลาดของวิถีได้จากค่าเฉลี่ยของระยะทางระหว่างจุดที่ใช้ตลอดการเคลื่อนแขนและเส้นทางในอุดมคติ จากรูปที่ 4.2 มีการเคลื่อนแขน 8 ครั้งทำให้ปลายแขนเข้าสู่เป้าหมาย โดยการเคลื่อนแขนครั้งแรกปลายแขนจะหยุดที่ x_1 จากนั้นก็จะหาระยะทางระหว่างจุด x_1 กับเส้นทางอุดมคติแล้วเคลื่อนแขนต่อไปก็หยุดที่จุด x_2 ก็จะหาระยะทางเหมือนกัน เมื่อเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายแล้วก็นำค่าระยะทางนั้นมาหาค่าเฉลี่ยก็จะได้ค่าความผิดพลาดของวิถี



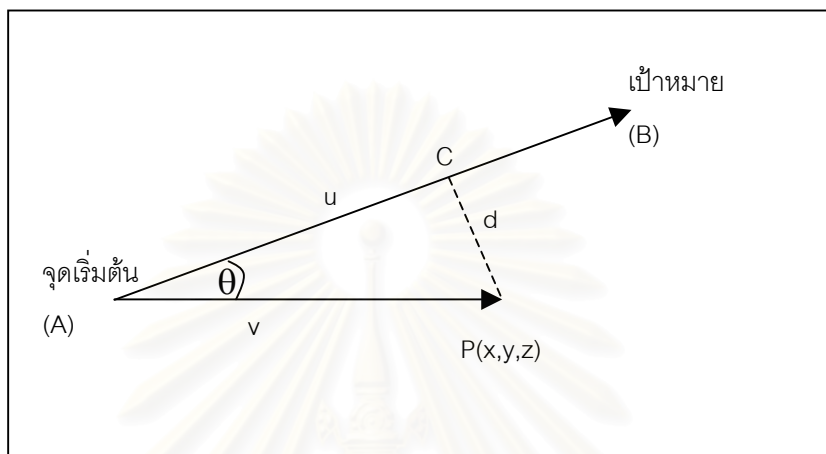
รูปที่ 4.2 แสดงการเคลื่อนที่ของปลายแขนเข้าสู่เป้าหมาย

สำหรับการหาระยะทางระหว่างจุดกับเส้นนั้น พิจารณารูปที่ 4.3 ให้ $u = B-A$ เป็นเวกเตอร์จากจุดเริ่มต้นไปยังเป้าหมาย ให้ $v = P-A$ เป็นเวกเตอร์จากจุดเริ่มต้นไปยังจุด P ที่ปลายแขนหยุดอยู่ และให้ d เป็นระยะทางจากจุด P มายังจุด C ที่อยู่บนเวกเตอร์ u

$$|u \times v| = |u||v|\sin\theta \quad (4.1)$$

เมื่อแก้สมการก็จะได้

$$d = |v| \sin \theta = \frac{|u \times v|}{|u|} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.3 วิธีคิดระยะทางระหว่างจุดกับเส้นตรง

การวัดผลของทั้ง 2 ระบบจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อยคือ ระบบอิมเมจจาโคเป็นวงที่เป็นวิธีการแบบขั้นตอนวิธีเชิงกำหนด (deterministic algorithm) ทุก ๆ ครั้งที่มีการเคลื่อนไหวของปลายแขนเข้าสู่เป้าหมายถ้าจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็นคู่เดียวกันแล้วการเคลื่อนที่ทุกครั้งจะเหมือนกัน แต่วิธีที่มีการปรับอิมเมจจาโคเป็นวงนั้นเป็นวิธีแบบขั้นตอนวิธีเชิงสุ่ม (randomized algorithm) การทดลองแต่ละครั้งจะมีการเคลื่อนไหวแขนที่แตกต่างกันแม้ว่าจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็นคู่เดียวกัน ดังนั้นต้องมีการทดลองซ้ำ ๆ กันและใช้ค่าเฉลี่ยมาเปรียบเทียบกับค่าของระบบอิมเมจจาโคเป็นวงที่ ในการทดลองนี้จะทำซ้ำ 100 ครั้งในแต่ละจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดคู่เดียวกัน

ในการทดลองเคลื่อนไหวแขนนั้นจะเลือกตัวแทนมา 6 เส้นทางโดยการสุ่มเลือกจุดเริ่มต้นและจุดเป้าหมายขึ้นมา เพื่อหลีกเลี่ยงการเอนเอียงเข้าข้างวิธีใดวิธีหนึ่ง นอกจากนั้นจะได้ขนาดระยะทางจากจุดเริ่มต้นจนถึงเป้าหมายที่มีความยาวที่ต่างกันด้วย ซึ่งจะเกิดความหลากหลายของการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

4.3 ขนาดของก้าว

อิมเมจจาโคเป็นวงเกิดจากการประมาณ ดังนั้นค่าที่ได้จะถูกต้องในเพียงบริเวณเล็กๆ ที่ใกล้กับจุดที่ทำการประมาณ ดังนั้นการเคลื่อนที่ของปลายแขนที่จะเคลื่อนที่เพียงครั้งเดียวจากจุดเริ่มต้นไปสู่

เป้าหมายจะมีความผิดพลาด การเคลื่อนที่จึงควรเคลื่อนที่ทีละน้อยเข้าหาเป้าหมาย ซึ่งจาก Chanchareon และ Sangveraphunsiri (1999) การเคลื่อนที่ทีละเล็กลงๆ จะมีความผิดพลาดโดยรวมน้อยกว่า และจากงานวิจัยนั้นได้นิยามว่า $\Delta q = s \cdot J^{-1} \Delta f$ แต่ในงานวิจัยนี้นิยามความแตกต่างของขนาดของก้าว (step size) อีกแบบหนึ่ง โดยเน้นการแบ่งระยะทางที่ต้องการไปจากการมองเห็นเป็นหลัก

$$\Delta q = J^{-1}(s \cdot \Delta f) \quad (4.3)$$

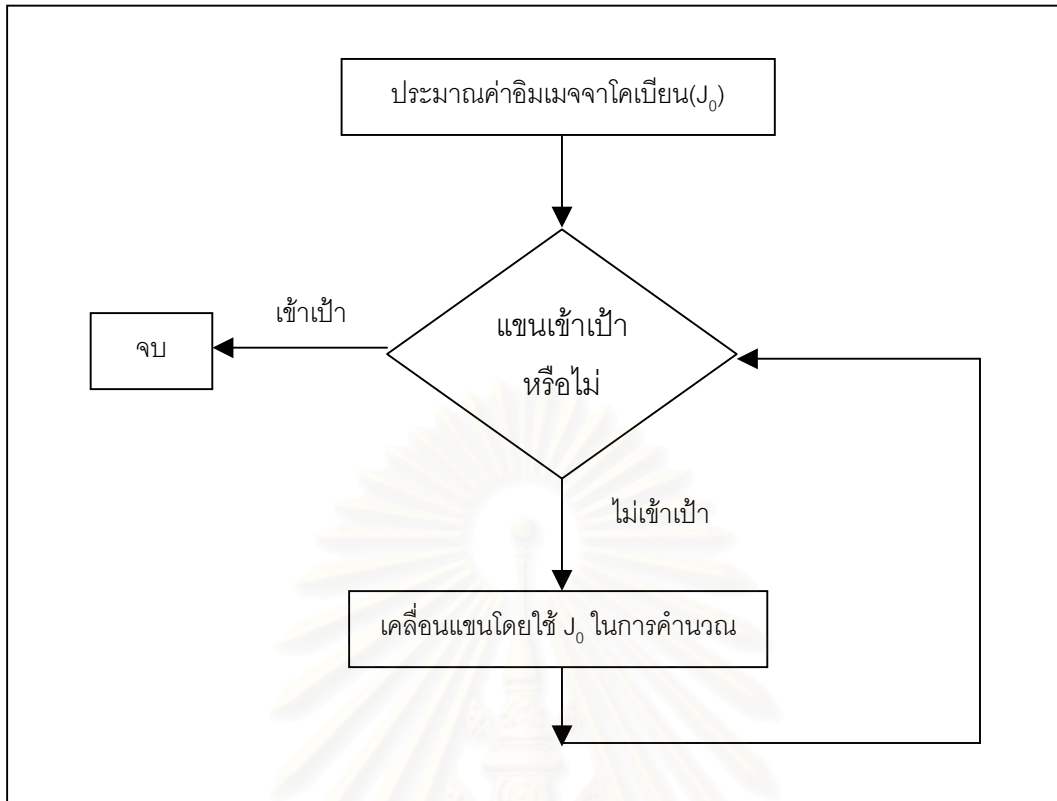
$\Delta f = f^d - f^c$ โดยที่ f^d ตำแหน่งของเป้าหมายที่อยู่ในพิกัดของกล้อง และ f^c เป็นตำแหน่งปัจจุบันของปลายแขนหุ่นยนต์ในพิกัดของกล้อง

$\Delta q = q^d - q^c$ โดยที่ q^d เป็นตำแหน่งของปลายแขนที่เป้าหมายที่คิดจาก $s \cdot \Delta f$ ในพิกัดแขนหุ่นยนต์ และ q^c เป็นตำแหน่งปัจจุบันของปลายแขนในพิกัดแขนหุ่นยนต์

s คือ ขนาดของก้าว ถ้าขนาดของก้าวเป็น 1 หมายความว่าเราจะทำการเคลื่อนที่แขนเข้าสู่เป้าหมายให้เท่ากับระยะทางที่มองจากกล้อง ซึ่งก็จะเคลื่อนที่เพียงครั้งเดียว แต่ถ้า s เป็น 1/4 แปลว่าจะมีเคลื่อนที่ของแขนเข้าสู่เป้าหมายเพียง 1/4 ของระยะทางที่เห็นจากกล้อง ในการทดลองจะเปรียบเทียบระหว่างขนาดของก้าวที่เป็น 1/4 กับ 1/10 ว่ามีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการเคลื่อนที่ของปลายแขนในทั้งสองวิธีอย่างไร การที่กำหนดขนาดของก้าวเป็นสัดส่วนกับระยะทางที่เหลืออยู่เนื่องจากเหตุผลที่ว่าเมื่อปลายแขนยังอยู่ห่างจากเป้าหมายมากจะได้ขยับได้ระยะทางมาก ถ้าปลายแขนอยู่ใกล้กับเป้าหมายขึ้นระยะทางของการขยับก็จะน้อยลงเพื่อให้ไม่มีการขยับออกไปเลยเป้าหมาย เพราะถ้าขยับแขนเลยเป้าหมายขยับกลับกับทิศทางเดิมอาจจะทำให้เกิดการแกว่ง (oscillation) ได้ทำให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่อย่างไม่มีประสิทธิภาพ

4.4 ระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่

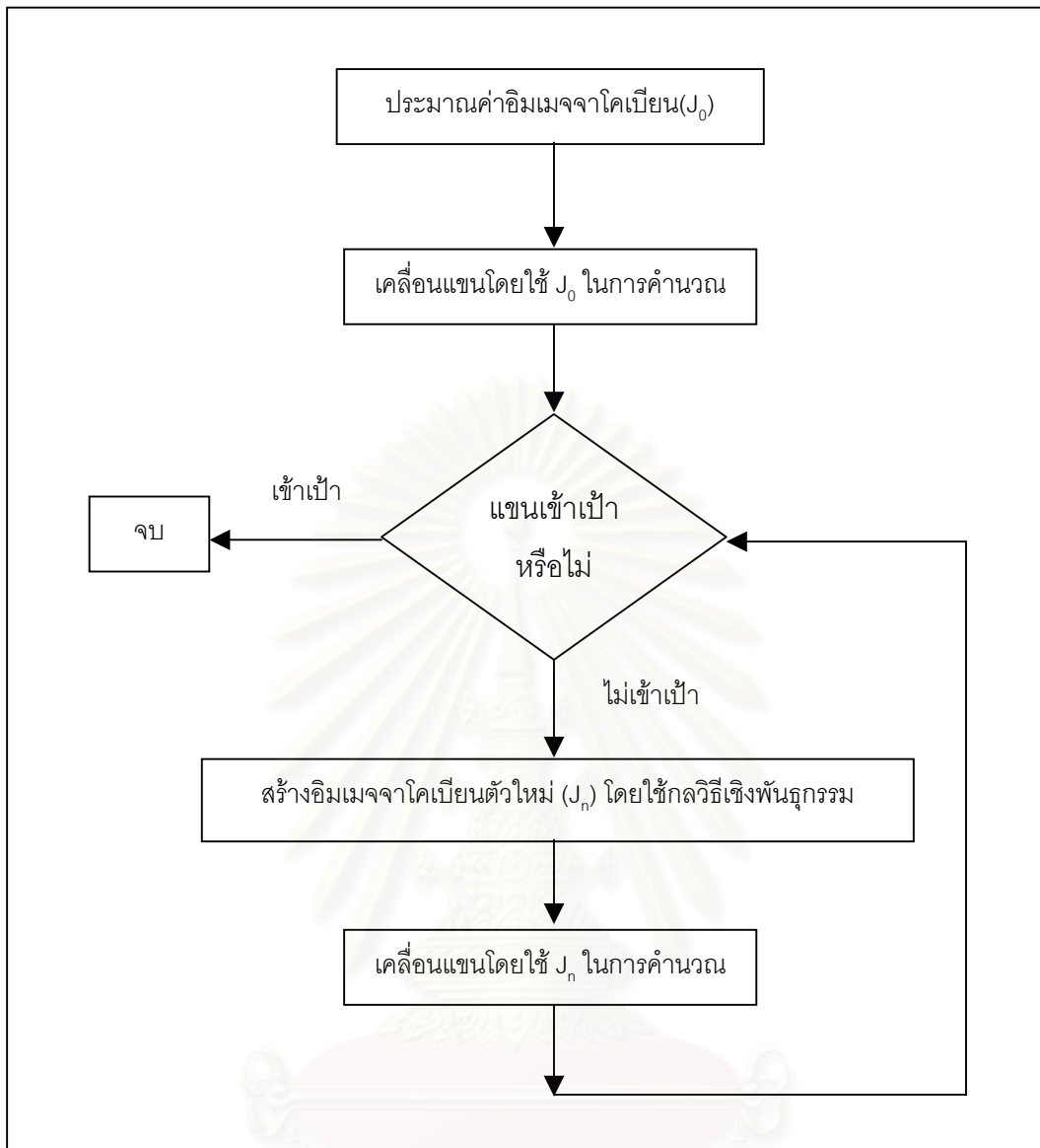
จากรูปที่ 4.4 ระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่นั้นจะเริ่มโดยการประมาณค่าของอิมเมจจาโคเบียนที่จุดเริ่มต้นโดยใช้วิธีใน Conkie และ Chongstitvatana (1990) โดยเติมค่าในสมการ 3.7 ค่าของสมาชิกในสมการที่ 1 เกิดจากการขยับแขนที่ข้อที่ 1 ไปเล็กน้อยแล้วหาค่าผลต่างของตำแหน่งของปลายแขนที่เปลี่ยนไปในระบบกล้องแล้วหารด้วยขนาดของมุมที่ข้อที่ 1 ที่เปลี่ยนแปลงไป จากนั้นขยับแขนกลับมายังจุดเริ่มต้นแล้วทำเหมือนกันกับอีก 2 สมการ โดยที่สมาชิกในสมการที่ 2 เกิดจากการขยับแขนในข้อที่ 2 และสมการที่ 3 ก็เกิดจากการขยับข้อที่ 3 จากนั้นก็นำอิมเมจจาโคเบียนที่ได้ (J_0) มาใช้เคลื่อนปลายแขนโดยใช้สมการที่ 4.3 และไม่มีการเปลี่ยนค่าอิมเมจจาโคเบียนนั้นเลยตลอดการทดลอง



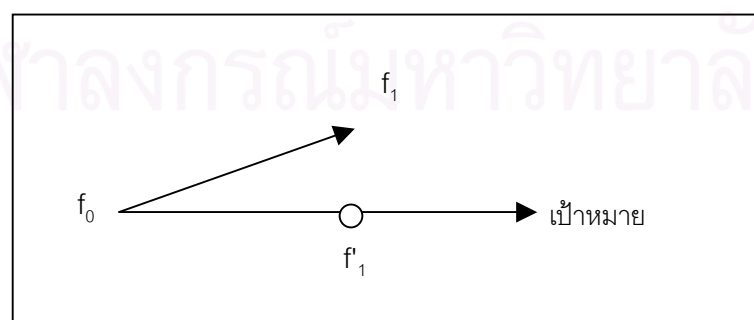
รูปที่ 4.4 แผนภูมิสายงานแสดงการทำงานของระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่

4.5 ระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัว

จากรูปที่ 4.5 การทำงานของระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวเริ่มโดยประมาณค่าของอิมเมจจาโคเบียนที่จุดเริ่มต้นโดยใช้วิธีเดียวกับระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่ ต่อมาเคลื่อนแขนออกจากจุดเริ่มต้นโดยใช้อิมเมจจาโคเบียน 1 ครั้งหลังจากนั้นหาค่าอิมเมจจาโคเบียนใหม่โดยใช้วิธีกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแล้วใช้อิมเมจจาโคเบียนตัวใหม่มาทำการเคลื่อนแขนต่อไปอีก 1 ครั้งแล้วเข้าไปยังกระบวนการกลวิธีเชิงวิวัฒนาการต่อไปอีก สำหรับกลวิธีเชิงวิวัฒนาการที่ใช้เป็นแบบ (1+1) ซึ่งให้ประชากรคืออิมเมจจาโคเบียนเป็นตัวแปรเป้าหมาย ตัวกระทำการกลายพันธุ์ก็จะบวกด้วยเมทริกซ์ขนาด 3×3 สมาชิกแต่ละตัวเกิดจากค่าที่สุ่มมาโดยมีการกระจายแบบปกติโดยมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็น σ โดยมีการปรับค่า σ ทุกๆ 20 รุ่น กลวิธีเชิงวิวัฒนาการนั้นจะทำสิ้นสุดที่รุ่นที่ 100 และค่าเริ่มต้นของค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานนั้นจะใช้ระยะทางตั้งแต่จุดเริ่มต้นจนถึงเป้าหมายที่วัดจากกล่องทั้งสองบวกกันหารด้วยระยะจากจุดปัจจุบันจนถึงเป้าหมายจากกล่องทั้งสองบวกกัน ดังนั้นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานจะมีค่ามากที่สุดก็เป็นหนึ่ง หลังจากนั้นจะมีการลดลงเรื่อยๆ เมื่อเคลื่อนที่เข้าใกล้จุดเป้าหมาย



รูปที่ 4.5 แผนภูมิสายงานแสดงการทำงานของระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัว



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของตำแหน่งที่ต้องการไปและตำแหน่งที่ไปจริง

จากรูปที่ 4.6 สัญลักษณ์ที่จะใช้ในการอธิบายต่อไปนี้ f หมายถึงการอ้างอิงในพิกัดของกล่อง และ q เป็นการอ้างอิงในพิกัดของแขนหุ่นยนต์ ถ้าสัญลักษณ์ที่มี ' อยู่ด้านบน หมายถึงจุดนั้นไม่มีอยู่จริง หรืออยู่ในเฉพาะการคำนวณไม่มีการเคลื่อนไปยังจุดนั้นจริงๆ ซึ่งจุดนั้นสามารถอ้างได้ทั้งพิกัดของกล่อง และพิกัดของแขนหุ่นยนต์ การปรับอิมเมจจาโคเบียนเริ่มจากตำแหน่ง f_0 ต้องการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง f_1 ซึ่งจะหาระยะทางที่ต้องการไปในพิกัดของกล่องได้จากสมการต่อไปนี

$$\Delta f' = f_0 - f_1' \quad (4.4)$$

ที่ตำแหน่ง f_0 มีอิมเมจจาโคเบียนที่เหมาะสมเป็น J_0 ได้โดยการประมาณ ซึ่งจะสามารถคำนวณว่าต้องมีการเคลื่อนที่ไปอีกเท่าใดจึงจะไปถึงจุด f_1' โดยเป็นดังนี้

$$\Delta q = J_0^{-1} \bullet \Delta f' \quad (4.5)$$

ที่ตำแหน่ง f_0 มีค่าพิกัดของหุ่นยนต์เป็น q_0 ดังนั้นตำแหน่งที่แขนจะเคลื่อนต่อไปคือ

$$q_1 = q_0 + \Delta q \quad (4.6)$$

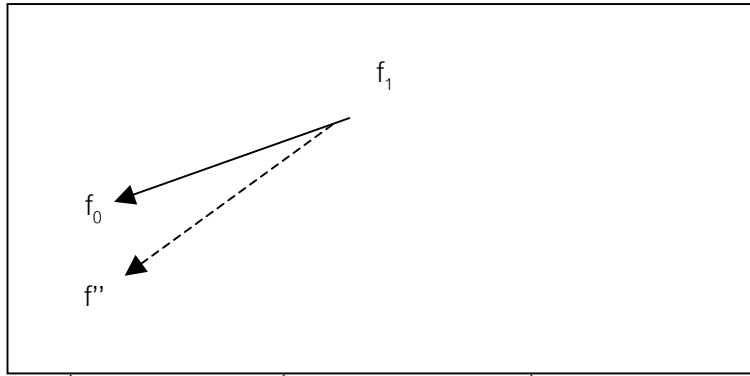
ซึ่งเมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนไปจริงๆ แล้ว จะไม่ตกในตำแหน่งที่ f_1' ตามที่ต้องการเนื่องจากที่ตำแหน่ง f_0 อิมเมจจาโคเบียนที่เหมาะสมนั้นได้จากการประมาณ ดังนั้นการเคลื่อนที่ไม่ตรงเป้าหมายพอดีเป็นเรื่องที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ และตำแหน่งที่ปลายแขนอยู่จริงๆ ตอนนีเมื่อมองจากพิกัดของกล่องแล้วจะมีค่าเป็น f_1

ที่ตำแหน่ง f_1 ต้องมีการปรับอิมเมจจาโคเบียน เนื่องจากอิมเมจจาโคเบียน J_0 จะถูกต้องในจุดที่ทำกรประมาณดังนั้น เมื่อมีการเปลี่ยนจุดต้องมีการเปลี่ยนค่าด้วย ซึ่งใช้กลวิธีเชิงวิวัฒนาการ โดยเริ่มจากประชากรตัวแรกคือ J_0 ต่อมาจึงสร้างประชากรตัวใหม่มาคือ J_1 โดยสมการต่อไปนี

$$J_1(i,j) = J_0(i,j) + z \quad (4.7)$$

$z \sim N(0, \sigma^2)$ ค่าของ z เป็นเลขสุ่มที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และค่าความแปรปรวนเป็น σ^2

จากนั้นสิ่งที่ต้องทำต่อไปคือ การเลือกประชากรตัวที่ดี 1 ตัวจาก J_0 หรือ J_1 มาเป็นประชากรในรุ่นต่อไป ซึ่งการให้ค่าความเหมาะสมของประชากรทั้งสองนี้ มีแนวความคิดดังนี้คือ อิมเมจจาโคเบียนตัวที่เหมาะสมยอมทำให้การเคลื่อนที่ของปลายแขนไปยังจุดที่ต้องการในพิกัดของกล่องได้อย่างถูกต้องหรือใกล้เคียงที่สุด



รูปที่ 4.7 รูปที่ใช้ในการคิดการเคลื่อนแขนจาก f_1 ไป f_0 เพื่อหาค่าความเหมาะสม

จากแนวคิดที่กล่าวมานั้น จากรูปที่ 4.7 เส้นทางเคลื่อนที่จาก f_0 ไป f_1 ที่ผ่านมานั้นจะเป็นตัวทดสอบอิมเมจจากโคเปียน เนื่องจากเป็นเส้นทางที่เป็นข้อมูลจริงในขณะนี้ โดยเริ่มจากตำแหน่งปัจจุบัน f_1 ต้องการเคลื่อนที่ไปยัง f_0 ดังนั้นจะคำนวณหาระยะที่ต้องเคลื่อนที่ไปยัง f_0 ในพิกัดของกล้องได้ดังนี้

$$\Delta f = f_0 - f_1 \quad (4.8)$$

ตอนนี้จะคำนวณหาค่าความเหมาะสมของ J_0 ที่ตำแหน่ง f_1 ก่อน โดยคำนวณการเคลื่อนที่ของปลายแขนที่ต้องไปในพิกัดของหุ่นยนต์

$$\Delta q'' = J_0^{-1} \cdot \Delta f \quad (4.9)$$

ดังนั้นตำแหน่งของปลายแขนที่ต้องไปคำนวณได้จาก

$$q'' = q_1 + \Delta q'' \quad (4.10)$$

ที่ตำแหน่งของปลายแขนในพิกัด q'' นี้ไม่ได้มีการเคลื่อนที่จริง จะสมมติว่าถ้าเคลื่อนที่แล้วปลายแขนจะไปตกอยู่ที่ตำแหน่ง f'' ในพิกัดของกล้อง ซึ่งถ้ารู้ f_0 และ f'' ก็สามารถบอกได้ว่า 2 จุดนี้ห่างกันด้วยขนาดเท่าไร แต่สิ่งที่ต้องการคือไม่ต้องการเคลื่อนกลับไป ดังนั้นแทนที่จะหาระยะทางระหว่างจุดทั้งสองจากพิกัดของกล้อง ก็จะทำให้การหาระยะทางระหว่างจุด f_0 กับ f'' ในพิกัดของแขนหุ่นยนต์แทน นั่นคือหาค่า $q'' - q_0$ สำหรับในแขนหุ่นยนต์ในแบบจำลองสามารถหาได้อยู่แล้ว แต่ให้ระบบแขนหุ่นยนต์จริงนั้น การเคลื่อนแขนหุ่นยนต์มักจะคิดเป็นตำแหน่งเปรียบเทียบคือ เคลื่อนไปจากตำแหน่งปัจจุบันอีกด้วยค่าที่กำหนด ดังนั้นเพื่อความสะดวกที่จะไม่ต้องคอยถามระบบแขนหุ่นยนต์ว่าตำแหน่งนี้ในพิกัดของแขนเป็นเท่าไร จึงจะทำให้อยู่รูปของผลต่างของ q

การคิดเริ่มจากนำค่า q_1 จากสมการ 4.6 มาแทนลงในสมการที่ 4.10 ซึ่งจะได้

$$q'' = q_0 + \Delta q + \Delta q'' \quad (4.11)$$

$$q'' - q_0 = \Delta q + \Delta q'' \quad (4.12)$$

ซึ่งจากสมการที่ 4.12 ตัว Δq ก็รู้ซึ่งได้จากการเคลื่อนที่จาก f_0 มา f_1 ที่เป็นตำแหน่งปัจจุบัน ส่วน $\Delta q''$ ได้จากการคำนวณโดยตรง ดังนั้นตรงความต้องการ แต่ค่าความเหมาะสมสนใจแต่ขนาดไม่ได้สนใจทิศทางดังนั้น จึงใส่ค่าสัมบูรณ์ทั้งสองข้างก็จะได้

$$\text{fitness} = | \Delta q + \Delta q'' | \quad (4.13)$$

จากนั้นก็ทำซ้ำกับอิมเมจจาโคเบียน J_1 แล้วเลือกตัวที่ดีที่สุดระหว่าง J_0 กับ J_1 ไปเป็นประชากรรุ่นต่อไปแล้วทำซ้ำกระบวนการนี้ 100 รุ่น อิมเมจจาโคเบียนตัวที่ได้ในรุ่นสุดท้ายจะใช้คิดคำนวณหาการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายในครั้งต่อไป ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ที่จริง

4.6 การทดลองในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

การทดลองในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ได้ใช้ MATLAB และใช้เครื่องมือ Robotics Toolbox ของ Corke (1996) มาใช้สร้างแขนหุ่นยนต์และกล้อง โดยแขนหุ่นยนต์ที่จำลองนั้นใช้ PUMA560 ที่มี 6 ระดับขั้นความเร็ว การทดลองนี้จะใช้การสุ่มจุดเริ่มต้นและเป้าหมายแล้วค่อยนำเส้นทางนั้นมาทดลองกับวิธีการเคลื่อนที่ของแขนทั้งสองแบบโดยมีเส้นทาง 6 เส้นทาง เส้นทางที่สุ่มขึ้นมา นั้น เส้นทางที่ 1 และ 2 มีระยะห่าง 10 เซนติเมตร สำหรับเส้นทางที่ 3 และ 4 มีระยะห่างกัน 20 เซนติเมตร สุดท้ายเส้นทางที่ 5 และ 6 มีระยะห่าง 30 เซนติเมตร เส้นทางทั้ง 6 เส้นทางนี้ ถูกนำมาทดสอบกับวิธีการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ทั้งสองวิธีและแต่ละวิธีมีการทดสอบที่มีขนาดของก้าวเป็น 1/4 และ 1/10 และในวิธีที่มีการปรับอิมเมจจาโคเบียนนั้นมีการทดลองซ้ำ 100 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาเป็นตัวแทนเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีอิมเมจจาโคเบียนคงที่ ตารางที่ 4.1 ถึงตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองที่ใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
Fixed Jacobian	22	17	21	21	33	24
Adaptive Jacobian	17	16	19	19	21	21
STD	0	0.5	0.1	0.2	0.1	0.5

ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
Fixed Jacobian	0.49	0.29	0.64	0.60	1.42	2.01
Adaptive Jacobian	0.16	0.08	0.17	0.19	0.5	0.66
STD	0.03	0.008	0.03	0.03	0.07	0.11

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4

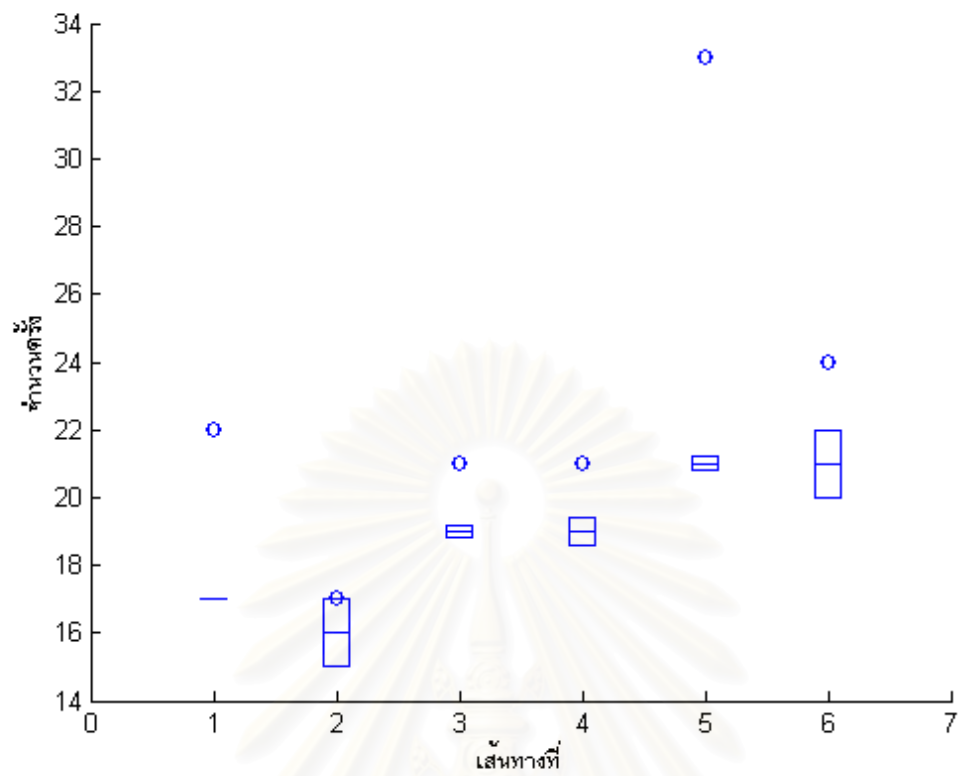
เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
Fixed Jacobian	57	46	56	57	86	65
Adaptive Jacobian	44	44	51	51	55	55
STD	0.22	0	0	0.35	0.3	0.2

ตารางที่ 4.3 แสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10

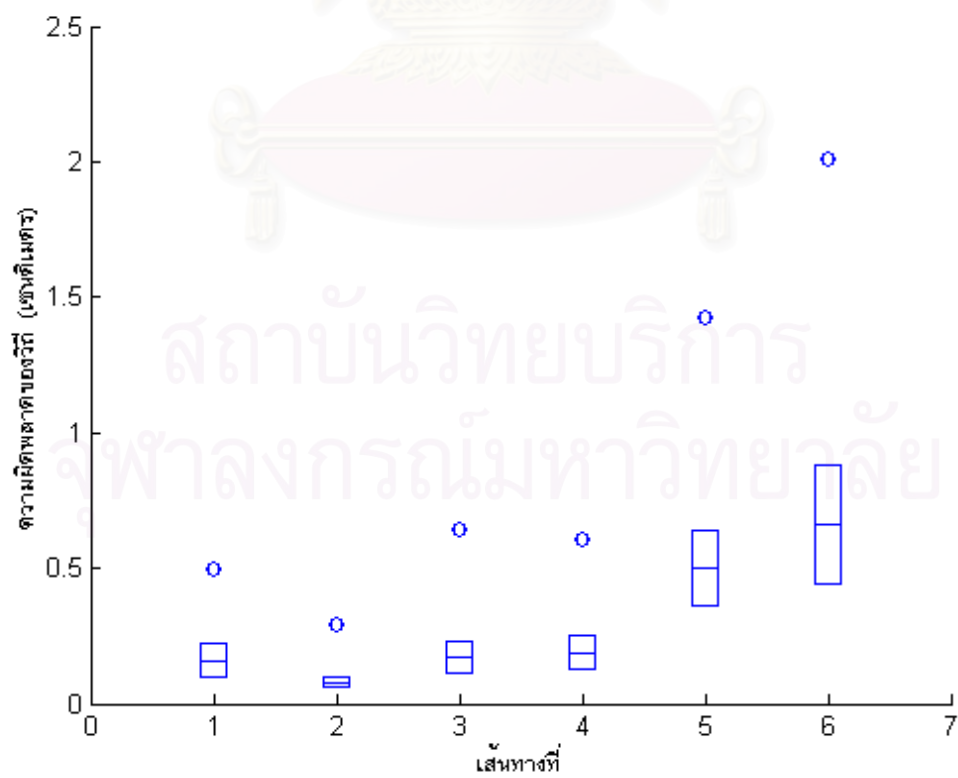
เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
Fixed Jacobian	0.47	0.27	0.59	0.56	1.36	1.85
Adaptive Jacobian	0.06	0.03	0.04	0.08	0.19	0.25
STD	0.01	0.003	0.01	0.02	0.03	0.04

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10

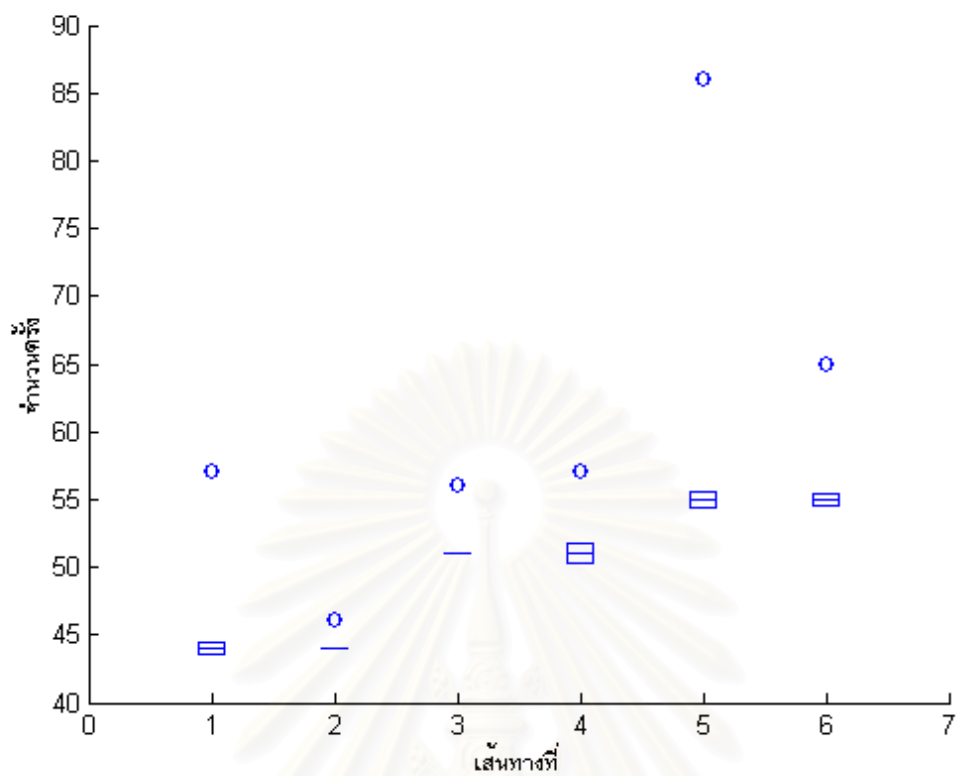
การเปรียบเทียบระหว่างระบบทั้งสองนั้น ระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวนอกจากดูที่ค่าเฉลี่ยและต้องมีการนำค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมาพิจารณาด้วยนั่นคือ ต้องดูขอบเขตของค่าที่เป็นไปได้ในการทดลองนี้จะดูที่ขอบเขตที่ 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน จากรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.11 วงกลมเป็นข้อมูลของระบบที่มีอิมเมจจาโคเบียนคงที่ ส่วนที่เป็นสีเหลี่ยมเป็นข้อมูลของระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัว ขนาดของความสูงของสีเหลี่ยมนี้มีค่าเท่ากับ 4 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยเส้นที่อยู่ตรงกลางของรูปสีเหลี่ยมนั้นเป็นค่าเฉลี่ยแล้ววัดขึ้นไปอีก 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานก็จะเป็นขอบบนของสีเหลี่ยม และวัดลงมาอีก 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานก็จะเป็นขอบล่าง การที่ต้องใช้การบวกลบถึง 2 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานก็เพื่อให้เห็นชัดเจน



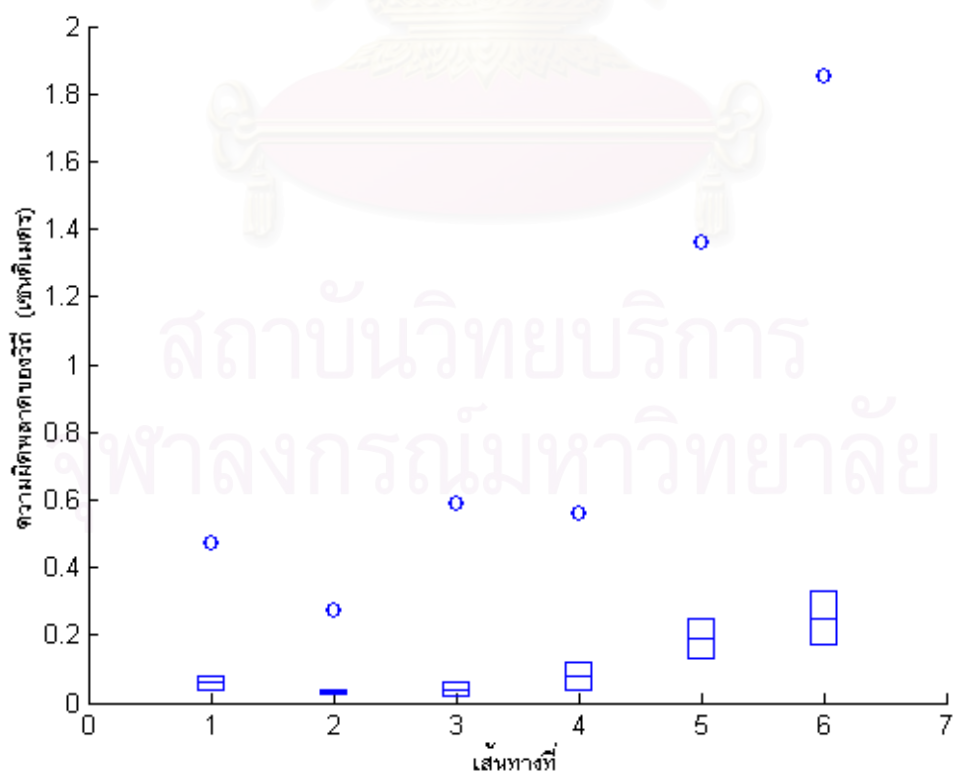
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของวิธีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4



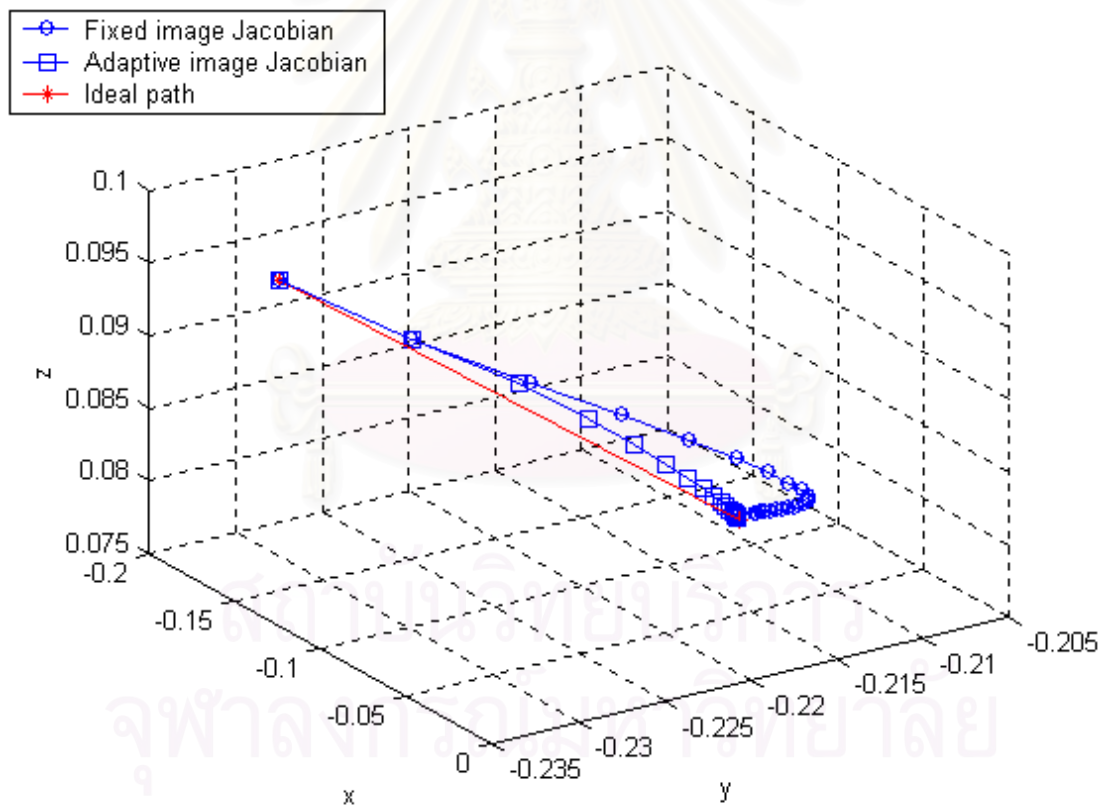
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10



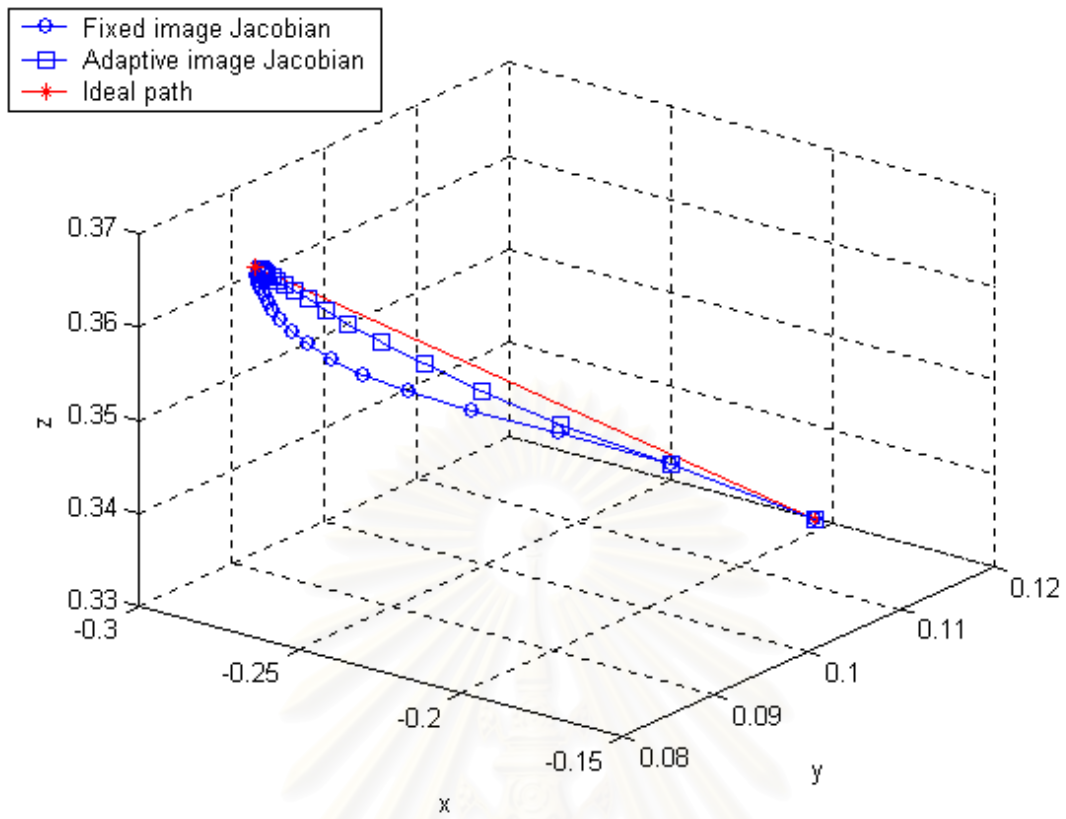
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของวิธีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10

จากรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.10 จำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลื่อนแขนหุ่นยนต์เข้าสู่เป้าหมายของระบบ ทั้งสองนั้นค่าไม่ได้มีความแตกต่างกัน เนื่องจากระยะเวลาของการเคลื่อนที่แต่ละครั้งถูกจำกัดโดยขนาดของก้าว ทำให้จำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลื่อนแขนของทั้งสองวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน

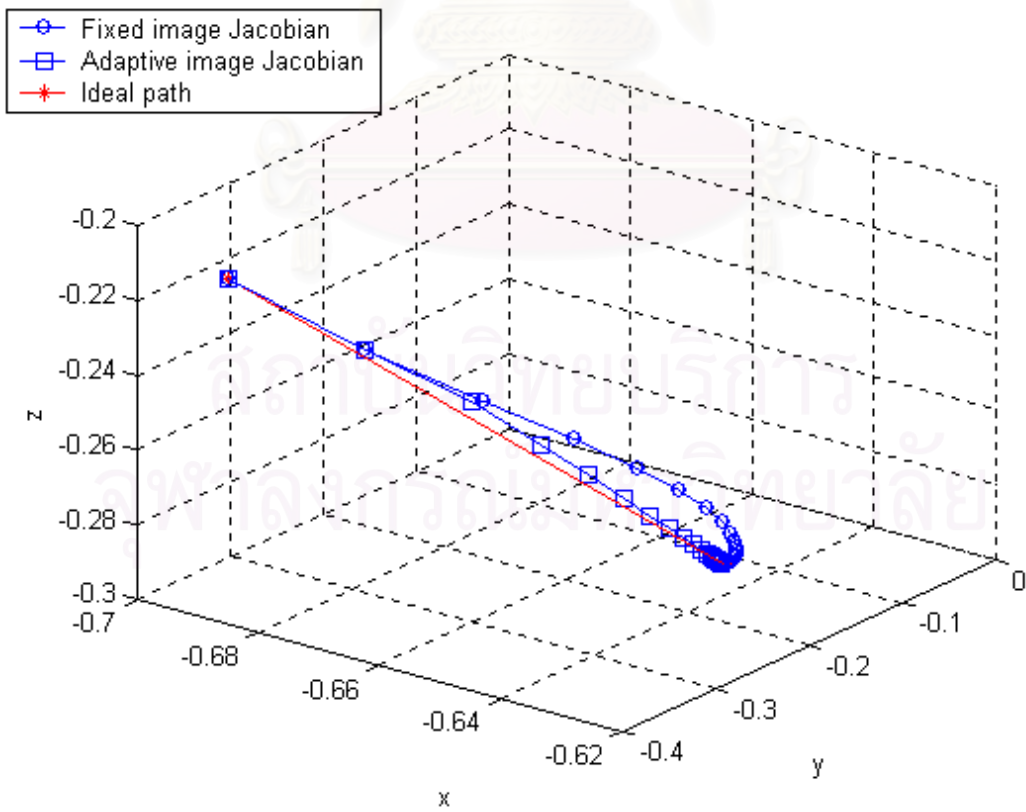
จากรูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.11 ความผิดพลาดของวิธีนี้ระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวนั้นก็ดีกว่าระบบที่อิมเมจจาโคเบียนคงที่แต่ในขนาดของก้าวเป็น $1/4$ นั้นจะเห็นไม่ชัดแต่ในขนาดของก้าวเป็น $1/10$ นั้นเห็นได้ชัดกว่า เมื่อมีการเปรียบเทียบระหว่างขนาดก้าวทั้งสองจะเห็นได้ว่าเมื่อมีขนาดก้าวที่เล็กจะทำให้ค่าของความผิดพลาดของวิธีทำให้ลดลง การปรับอิมเมจจาโคเบียนที่มีมากจะส่งผลต่อความผิดพลาดของวิธีที่ลดลงอย่างมาก เนื่องจากการปรับอิมเมจจาโคเบียนมีการปรับทุกครั้งที่มีการเคลื่อนแขน ดังนั้นเมื่อขนาดของก้าวเล็ก ทำให้จำนวนก้าวมากขึ้นการปรับอิมเมจจาโคเบียนมีมากขึ้นตามผลก็คือค่าความผิดพลาดของวิธีลดลงอย่างเห็นได้ชัด รูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.17 แสดงการเปรียบเทียบของวิถีการเคลื่อนที่ของปลายแขนของทั้งสองระบบและเส้นทางในอุดมคติ



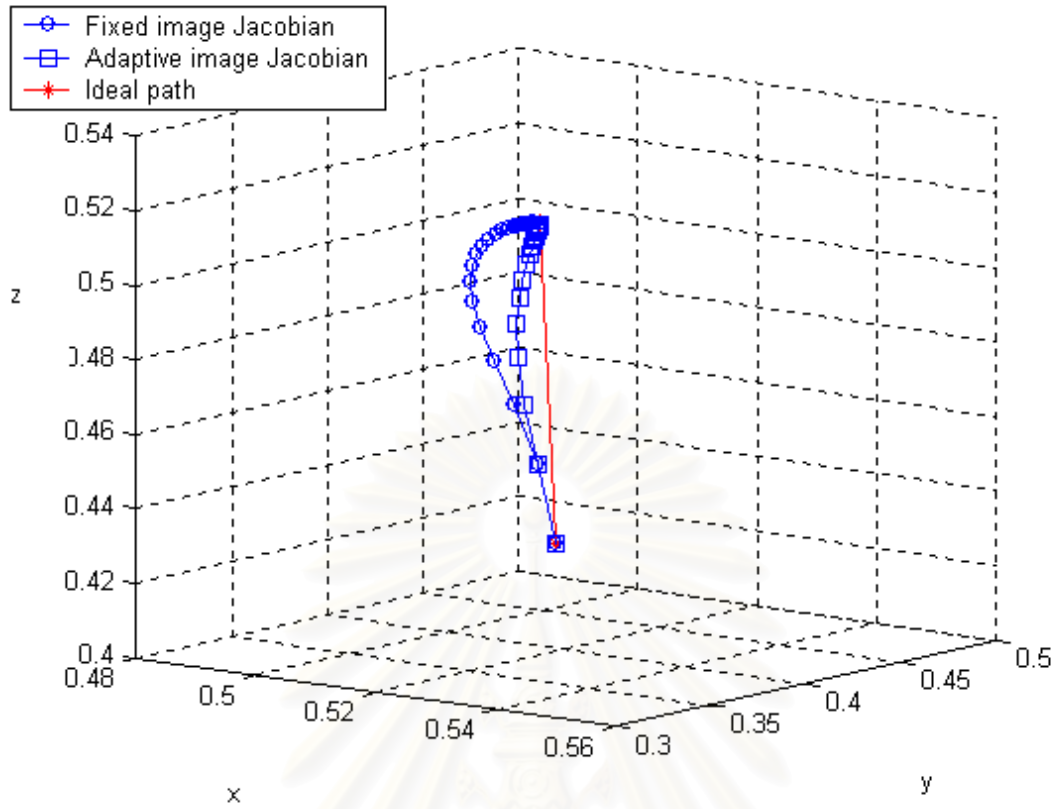
รูปที่ 4.12 เส้นทางการเคลื่อนแขนในเส้นทางที่ 1



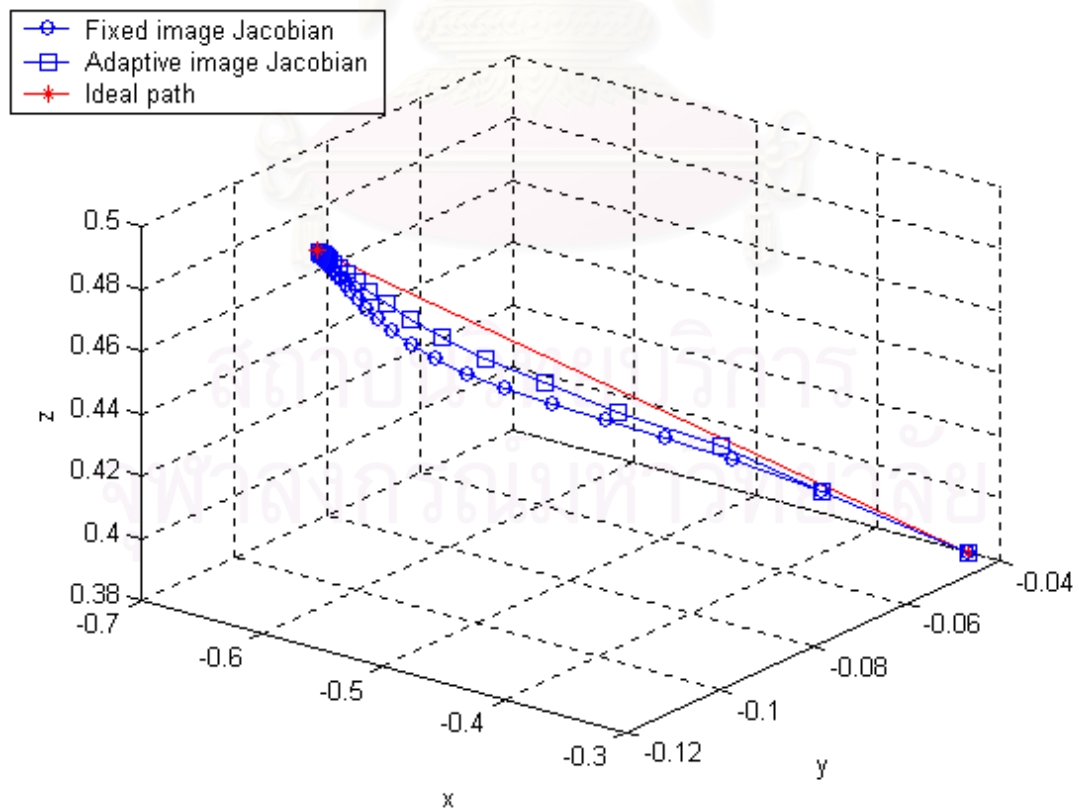
รูปที่ 4.13 เส้นทางการเคลื่อนขนในเส้นทางที่ 2



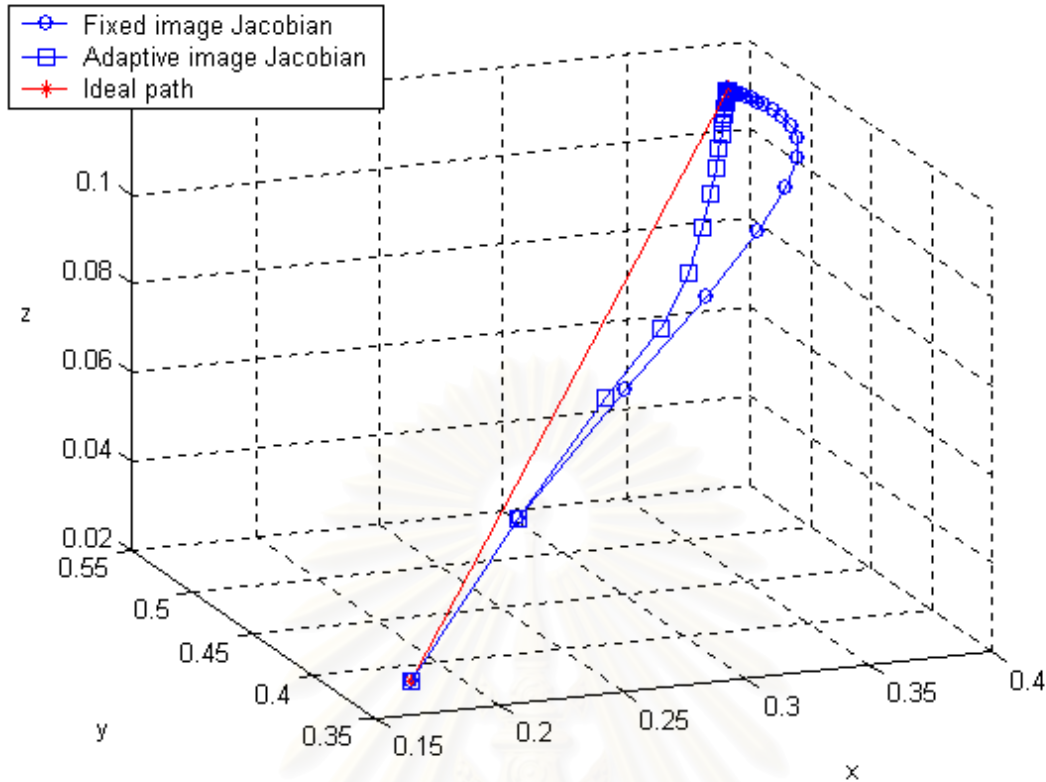
รูปที่ 4.14 เส้นทางการเคลื่อนขนในเส้นทางที่ 3



รูปที่ 4.15 เส้นทางการเคลื่อนขนในเส้นทางที่ 4



รูปที่ 4.16 เส้นทางการเคลื่อนขนในเส้นทางที่ 5



รูปที่ 4.17 เส้นทางการเคลื่อนแขนในเส้นทางที่ 6

4.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการยอมรับผลการทดลองที่มีว่าระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบปรับตัวนั้นมีค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งในการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายดีกว่าจำนวนครั้งในการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายของวิธีอิมเมจจาโคเป็นคงที่ ต้องใช้วิธีการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของประชากร มีขั้นตอนดังนี้

1. ตั้งสมมติฐานว่าง (null hypothesis) ที่ใช้สัญลักษณ์เป็น H_0 เพื่อที่จะปฏิเสธ
 H_0 : ระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบปรับตัวมีค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งในการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมาย \bar{x} เท่ากับจำนวนครั้งในการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายของระบบที่ไม่มีระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบปรับตัวด้วยสัญลักษณ์ μ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$H_0 : \bar{x} = \mu$$
2. ตั้งสมมติฐานแทน (alternative hypothesis) ใช้สัญลักษณ์เป็น H_1 ถ้า H_0 ถูกปฏิเสธก็จะยอมรับสมมติฐานนี้แทน และการตั้งสมมติฐานแทนจะมีผลต่อการกำหนดวิธีการทดสอบสมมติฐานด้วย

$$H_1 : \bar{x} < \mu$$
3. เลือกระดับนัยสำคัญ (α) การทดลองจะเลือกระดับนัยสำคัญเป็น 0.05

4. เลือกตัวสถิติทดสอบ

$$T = \frac{\bar{x} - \mu}{S / \sqrt{n}}$$

เมื่อ S เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง

n เป็นจำนวนตัวอย่าง

การที่สามารถเลือกวิธีทดสอบทางสถิติแบบนี้ได้ เนื่องจากกลุ่มตัวอย่างมีขนาดใหญ่ (มากกว่า 30) ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าตัวอย่างมีการกระจายแบบปกติ

5. กำหนดบริเวณวิกฤติ เนื่องจากสมมติฐานแทนอยู่ในรูป $\bar{x} < \mu$ ดังนั้นจึงเป็นการทดสอบทางเดียวและกำหนดบริเวณวิกฤติเป็น $T < -t_{\alpha}$ ด้วยจำนวนระดับขั้นความเสรีเป็น $n-1$ ในที่นี้ $-t_{\alpha}$ มีเป็นค่าเป็น -1.6604 สำหรับค่าบริเวณวิกฤตินี้ขึ้นกับค่าระดับนัยสำคัญและจำนวนตัวอย่างที่ใช้ทดสอบ ดังนั้นในวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดลองในแบบจำลองทั้งหมดจึงสามารถใช้ค่าบริเวณวิกฤติเพียงค่าเดียวเป็น -1.6604

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
ค่าตัวสถิติทดสอบ	$-\infty$	-20	-200	-10	-1200	-60

ตารางที่ 4.5 ค่าตัวสถิติทดสอบของจำนวนครั้งของการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4

จากตารางที่ 4.5 ข้อมูลของตัวสถิติทดสอบในเส้นทางที่ 1 ถึง 6 ตกอยู่ในบริเวณวิกฤติ ดังนั้น จึงสามารถปฏิเสธสมมติฐานว่างและยอมรับสมมติฐานแทน นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งของการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายของระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวมีค่าน้อยกว่าค่าของจำนวนครั้งของการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายของระบบที่อิมเมจจาโคเบียนคงที่อย่างมีนัยสำคัญในทุกเส้นทางที่ใช้ทดสอบ ตารางอื่นๆ ก็ทำเช่นเดียวกัน ซึ่งมีค่าดังนี้

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
ค่าตัวสถิติทดสอบ	-110	-262.5	-156.67	-136.67	-131.43	-122.73

ตารางที่ 4.6 ค่าตัวสถิติทดสอบของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
ค่าตัวสถิติทดสอบ	-590.91	$-\infty$	$-\infty$	-171.43	-1033.33	-500

ตารางที่ 4.7 ค่าตัวสถิติทดสอบของจำนวนครั้งของการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
ค่าตัวสถิติทดสอบ	-410	-800	-550	-240	-390	-400

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวสถิติทดสอบของค่าความผิดพลาดของวิธีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10

จากข้อมูลในตารางที่ 4.5 ถึง 4.8 ค่าตัวสถิติทดสอบตกอยู่ในบริเวณวิกฤตทั้งหมด ดังนั้นผลการทดลองจึงสรุปได้ว่าระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบปรับตัวสามารถลดจำนวนครั้งที่เคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายและลดค่าความผิดพลาดของวิธีอย่างมีนัยสำคัญ

สำหรับค่าความผิดพลาดของวิธีที่ลดลงของระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบปรับตัว มีการคิดค่าความดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบคงที่ โดยใช้การคำนวณดังนี้ นำค่าความผิดพลาดของวิธีในระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบคงที่ที่ตั้งลบด้วยค่าความผิดพลาดของวิธีของระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบปรับตัว แล้วหารด้วยค่าความผิดพลาดของวิธีของระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบคงที่

ซึ่งสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
เปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้น	67.35	72.41	73.44	68.33	64.79	67.16	68.91

ตารางที่ 4.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้นของค่าความผิดพลาดของวิธีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
เปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้น	87.23	88.89	93.22	85.71	86.03	86.49	87.93

ตารางที่ 4.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้นของค่าความผิดพลาดของวิธีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/10

จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้นของค่าความผิดพลาดของวิธีของขนาดของก้าวที่เล็กกว่า จะมีค่าความดีขึ้นมากกว่าขนาดของก้าวที่มีขนาดใหญ่

4.8 สรุปท้ายบท

ในบทนี้ได้อธิบายรายละเอียดถึงสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองในแบบจำลอง ข้อจำกัดในการทดลอง วิธีการเคลื่อนปลายแขนที่ใช้อิมเมจจาโคเป็นแบบคงที่และแบบปรับตัว และอธิบายการใช้กลวิธีเชิงวิวัฒนาการในการปรับอิมเมจจาโคเป็นและวิธีการวัดผล มีผลการทดลองของทั้งสองระบบในแบบจำลอง ซึ่งมีการเปรียบเทียบขนาดของก้าวที่แตกต่างกันด้วย

บทที่ 5

การทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสภาพแวดล้อมที่ใช้ทดลองกับแขนหุ่นยนต์ และรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ และการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ในการทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริง

5.1 สภาพแวดล้อม

การทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริงนั้น ต้องใช้อุปกรณ์ดังนี้ คอมพิวเตอร์ แขนหุ่นยนต์ ตัวควบคุม แขนหุ่นยนต์ และกล้อง 2 ตัว โดยคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมหลักทั้งกล้องและตัวควบคุมแขนหุ่นยนต์จะเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ แขนหุ่นยนต์จะเชื่อมต่อกับตัวควบคุมอีกต่อหนึ่ง ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 สภาพแวดล้อมการทำงานกับแขนหุ่นยนต์จริง

5.2 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองของแขนจริงโปรแกรมประกอบด้วย 3 ส่วนคือ ส่วนที่ทำงานของระบบอิมเมจจาโค เบียนคองทีและระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัว และส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ที่เป็นกล้องและตัวควบคุม แขนหุ่นยนต์ โปรแกรมส่วนที่ทำงานของระบบอิมเมจจาโคเบียนคองทีและระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวที่เขียนด้วย MATLAB จากการทดลองในแบบจำลองนั้นมีการแก้ไขเล็กน้อยเกี่ยวกับการนำข้อมูลเข้าและการนำข้อมูลออกจากเดิมที่เป็นการทำงานในแบบจำลองมาเป็นอุปกรณ์จริง

โปรแกรมที่เขียนเพิ่มเติม คือ การเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อกับตัวควบคุมแขนหุ่นยนต์ โดยมี 2 ส่วนคือ การส่งคำสั่งที่ออกทางพอร์ตแบบอนุกรมและส่วนของการรับข้อมูลจากตัวควบคุมแขนหุ่นยนต์

จากทางพอร์ตแบบอนุกรมเช่นกัน โปรแกรมอีกส่วนหนึ่งคือส่วนที่ใช้ติดต่อกับกล้องทั้งสองตัว ในส่วนนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน คือ ส่วนที่ถ่ายรูปจากกล้องมาเก็บเป็นไฟล์ และ ส่วนที่อ่านภาพจากไฟล์และนำภาพมาผ่านกระบวนการเพื่อให้ได้ตำแหน่งของปลายแขน โปรแกรมที่ใช้ในการถ่ายรูปนั้นได้ใช้เครื่องมือจากบริษัท Logitech ชื่อว่า QuickCam SDK มาใช้ร่วมกับ Visual C++ ส่วนของการหาตำแหน่งของปลายแขนใช้ MATLAB มาพัฒนา

5.3 แขนหุ่นยนต์และตัวควบคุม

ในการทดลองจริงนั้น ได้ใช้แขนหุ่นยนต์แบบ A255 ของบริษัท CRS corporate ซึ่งมีระดับชั้นความเร็วเป็น 5 ดังในรูปที่ 5.2 และใช้การควบคุมแขนหุ่นยนต์ทำการเขียนโปรแกรมส่งคำสั่งส่งผ่านทางพอร์ตแบบอนุกรม ไปยังตัวควบคุมในรูป 5.3 ซึ่งตัวควบคุมจะทำการตีความคำสั่งและสั่งให้แขนทำตามคำสั่งที่ส่งมา รวมถึงมีการรับข้อมูลจากตัวควบคุมแขนหุ่นยนต์ซึ่งรายงานสถานะของหุ่นยนต์เมื่อส่งคำสั่งออกไปตาม ซึ่งข้อมูลมาทางพอร์ตแบบอนุกรม ข้อมูลที่เข้ามาเป็นสายของอักขระ ต้องมีส่วนที่จัดการแปลงสายของอักขระมาอยู่ในรูปที่สามารถนำมาใช้งานได้สะดวก

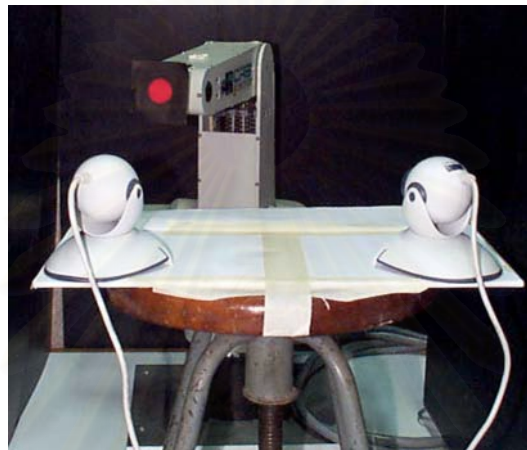


รูปที่ 5.2 แขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการติดตั้งระบบมีการสร้างฉากสีดำล้อมแขนหุ่นยนต์ไว้ แล้วมีกระดาษสีแดงติดไว้ที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ในการบอกตำแหน่งของปลายแขนนั้นจะใช้การค้นหาส่วนที่เป็นสีแดง แล้วหาจุดกึ่งกลางของส่วนที่เป็นสีแดงก็จะได้ตำแหน่งของปลายแขน สาเหตุที่ใช้กระดาษสีแดงติดไว้ เนื่องจากถ้าทำเป็นรูปขาวดำนั้นแล้วแยกเป้าหมายจากฉากด้วยค่าอัตราส่วนจะทำได้ยากเพราะตัวแขนเองมีทั้งส่วนที่เป็นทั้งสีขาวและสีดำ ถ้าทำให้แขนเป็นสีแดงเท่านั้นนั้นอาจต้องทำทาสีหรือแปะกระดาษสีบนแขนหุ่นยนต์ ซึ่งมีความยุ่งยากและอาจก่อให้เกิดปัญหาในการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ และเหตุผลอีกข้อหนึ่งก็คือกล้องมีความสามารถถ่ายรูปสีได้จึงทำได้ด้วยวิธีนี้สะดวกกว่า การวางกล้องและแขนหุ่นยนต์อยู่ในรูปที่ 5.4 กล้องทั้งสองได้วางอยู่บนเก้าอี้เพื่อให้สามารถจับภาพของปลายแขนได้สะดวก



รูปที่ 5.3 ตัวควบคุมแขนหุ่นยนต์



รูปที่ 5.4 การวางแขนหุ่นยนต์และกล้อง

5.4 กล้อง

กล้องของบริษัท Logitech รุ่น QuickCam Pro ซึ่งมีการเชื่อมต่อด้วยช่องทาง USB สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในการถ่ายภาพได้ใช้เครื่องมือที่บริษัท Logitech ได้ทำแจกทางอินเทอร์เน็ตที่เรียกว่า QuickCam SDK มาใช้ร่วมกับ Visual C++ มาพัฒนาต่อเพื่อให้ถ่ายรูปจากกล้องทั้งสองแล้วเก็บลงไฟล์ ซึ่งได้กำหนดรูปแบบของไฟล์ภาพไว้เป็นแบบ bitmap



รูปที่ 5.5 กล้องที่ใช้ในการทดลอง

5.5 การทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริง

ในการทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริง ปัญหาในการตั้งเป้าหมายให้หุ่นยนต์ ถ้ามีใช้สิ่งของมาตั้งจะทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการบังเป้าโดยแขนหุ่นยนต์ ในการทดลองนี้เลยใช้การเคลื่อนแขนไปยังเป้าหมายแล้วใช้กล้องถ่ายภาพแล้วทำการวิเคราะห์หาจุดกึ่งกลางแล้วเก็บตำแหน่งของเป้าหมายไว้ในโปรแกรมเลย เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการบังเป้าโดยแขนหุ่นยนต์

เกณฑ์ตัดสินว่าปลายแขนถึงเป้าหมายแล้ว ในการทดลองนี้ได้กำหนดระยะทางระหว่างปลายแขนและเป้าหมาย โดยเป็นผลบวกของจำนวนจุดภาพ (pixel) ที่ปลายแขนห่างจากเป้าหมายไปแนวแกน X และแกน Y ของทั้งสองกล้อง ซึ่งแขนจะถึงเป้าหมายก็ต่อเมื่อระยะทางที่กล่าวถึงมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 15 จุดภาพ (pixel)

กระบวนการค้นหาตำแหน่งของปลายแขน เริ่มจากกล้องทั้งสองถ่ายภาพจะได้ภาพดังรูปที่ 5.6 แล้วหลังจากนั้นจะทำการค้นหาสีแดง โดยถ้าส่วนที่เป็นสีแดงในภาพจะถูกให้เป็นสีขาว ถ้าเป็นสีอื่นๆ ก็จะเป็นสีดำจะได้ดังรูปที่ 5.7 จากนั้นจะทำการค้นหาจุดกึ่งกลางของส่วนที่เป็นสีขาว ก็จะเก็บเป็นตำแหน่งไว้สำหรับวิธีการค้นหาสีแดงจากรูป เริ่มจากการตรวจสอบว่าภาพที่ได้รับมานั้นเป็น bitmap หรือไม่ ถ้าเป็น bitmap จะตรวจสอบว่ามีจุดใดที่เป็นสีแดง โดยนำค่าของสีแดงมาเทียบกับค่าของสีเขียวและสีน้ำเงิน ถ้าค่าของสีแดงมากกว่าค่าของสีเขียวเกิน 30/255 และค่าของสีแดงมากกว่าค่าของสีน้ำเงินเกิน 30/255 ซึ่งค่าที่ใช้นี้ได้จากการทดลอง เนื่องจากรูปมีขนาดใหญ่คือ 640x480 จุดภาพ (pixel) แต่วงกลมสีแดงมีขนาดเล็กกว่ามากดังนั้น จึงใช้วิธีตรวจสอบแบบคร่าวๆ ก่อน โดยตรวจแถวที่ 1 ก่อนถ้าไม่เจอจุดสีแดงเลยก็จะข้ามไปอีก 20 แถวแล้วค่อยตรวจ ถ้าไม่เจอก็จะข้ามไปอีก 20 แถวแล้วค่อยตรวจ จนกว่าจะหมด แต่ถ้าเจอก็จะเก็บค่าแถวที่ก่อนหน้านี้เป็นจุดเริ่มต้นของวงกลม แล้วตรวจแบบเดิมจนถึงแถวที่ไม่เจอจุดสีแดงเลยทั้งแถวก็จะเก็บค่าของแถวนั้นว่าเป็นตำแหน่งที่สิ้นสุดของวงกลม จากนั้นจึงตรวจทุกจุดบนทุกแถวที่อยู่ระหว่างเส้นเริ่มต้นและเส้นที่สิ้นสุดของวงกลม โดยผลลัพธ์ออกเป็นภาพขาวดำ โดยจุดที่เป็นสีแดงจากรูปที่ให้มาจะเป็นจุดสีขาวในภาพใหม่ ส่วนสีอื่นๆ จะเป็นสีดำทั้งหมด จากนั้นจึงนำตำแหน่งของจุดสีขาวที่เป็นตำแหน่งของแถวมาหาค่าเฉลี่ย ก็จะได้ตำแหน่งของแถวของจุดกึ่งกลางวงกลม และตำแหน่งของสดมภ์มาหาค่าเฉลี่ย ก็จะได้ตำแหน่งของสดมภ์ของจุดกึ่งกลางวงกลม ด้วยวิธีนี้การค้นหาวงกลมสีแดงจะทำได้ประมาณนาทีละ 6 รูป



รูปที่ 5.6 ภาพถ่ายที่มองเห็นจากกล้องทั้งสอง

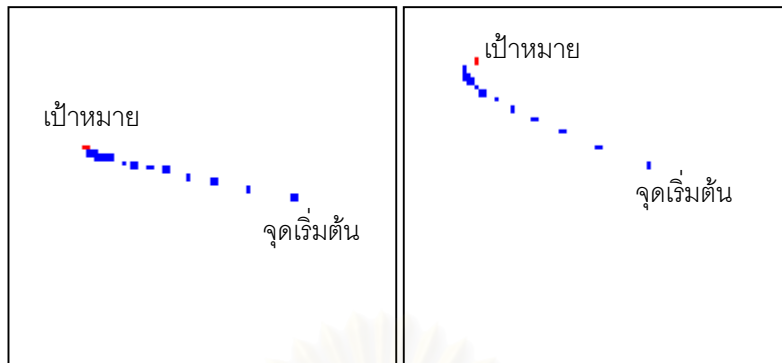


รูปที่ 5.7 ภาพที่ได้จากการหาสีแดงจากภาพถ่าย

การทดลองกับแขนหุ่นยนต์นี้ ไม่ได้ใช้การซูมจุดเริ่มต้นและเป้าหมายแบบการทดลองในแบบจำลอง เนื่องจากในการทดลองกับแขนหุ่นยนต์ มีข้อจำกัดเกี่ยวกับการมองเห็นภาพของกล้องที่ต้องเห็นปลายแขนจากจุดเริ่มต้นกับเป้าหมายได้ตลอดการทดลองและข้อจำกัดของตำแหน่งของปลายแขนที่หุ่นยนต์ทำได้ จึงต้องกำหนดตำแหน่งจุดเริ่มต้นและปลายแขนให้อยู่ภายในข้อจำกัดของอุปกรณ์ด้วยการเคลื่อนที่ของแขนทั้งสองแบบโดยมีเส้นทาง 6 เส้นทาง วิธีมีการทดสอบที่มีขนาดของก้าวเป็น $1/2$ และ $1/4$ และในวิธีที่มีการปรับอิมเมจจาโคเบียนนั้นมีการทดลองซ้ำ 10 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาเป็นตัวแทนเพื่อเปรียบเทียบกับวิธีอิมเมจจาโคเบียนคงที่

การกำหนดขนาดของก้าวในแบบจำลองกับแขนหุ่นยนต์จริงมีความแตกต่างกัน เนื่องจากความละเอียดของภาพที่กล้องถ่ายมาได้ นั้นมีความละเอียดไม่พอที่จะทดลองด้วยขนาดก้าว $1/10$ แต่การทดลองนี้ต้องการเปรียบเทียบผลว่าขนาดของก้าวมีผลกับค่าความผิดพลาดวิธีหรือไม่ จึงกำหนดขนาดของที่สามารถทำการทดลองแล้วได้ผล

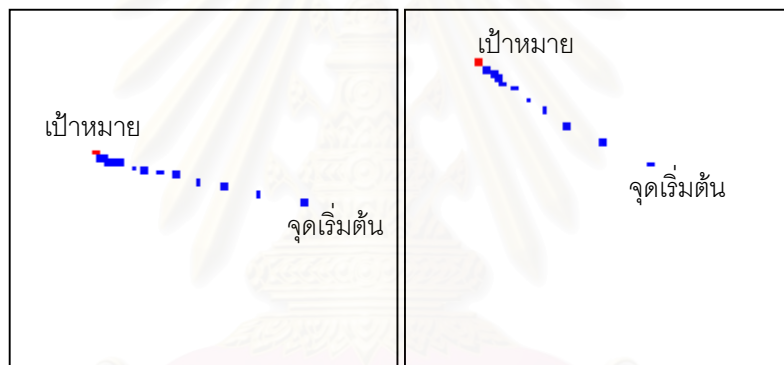
รูปที่ 5.8 และ 5.9 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ของทั้งสองระบบที่มองจากกล้องทั้งสอง โดยจุดที่เห็นในภาพแทนจุดกึ่งกลางปลายแขนที่กล้องมองเห็น ตารางที่ 5.1 ถึงตารางที่ 5.4 แสดงผลการทดลองของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวจะมีเส้นทางในการเคลื่อนที่ปลายแขนใกล้เคียงกับเส้นทางอุดมคติมากกว่าระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่



ก) กล้องทางซ้าย

ข) กล้องทางขวา

รูปที่ 5.8 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ได้กล้องทั้งสอง โดยระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่และมีขนาดก้าวเป็น 1/4



ก) กล้องทางซ้าย

ข) กล้องทางขวา

รูปที่ 5.9 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ได้จากกล้องทั้งสอง โดยระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวและมีขนาดก้าวเป็น 1/4

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
Fixed Jacobian	4	3	3	5	4	5
Adaptive Jacobian	4	3	4	4	4	5
STD	0.48	0.32	0.42	0	0.57	1.45

ตารางที่ 5.1 แสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/2

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
Fixed Jacobian	0.17	0.25	0.35	0.29	0.83	0.55
Adaptive Jacobian	0.08	0.22	0.25	0.18	0.59	0.43
STD	0.01	0.01	0.07	0.02	0.11	0.04

ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น1/2

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
Fixed Jacobian	7	6	8	9	9	12
Adaptive Jacobian	8	8	9	9	10	10
STD	0.67	0.70	0.74	0.70	0.52	1.10

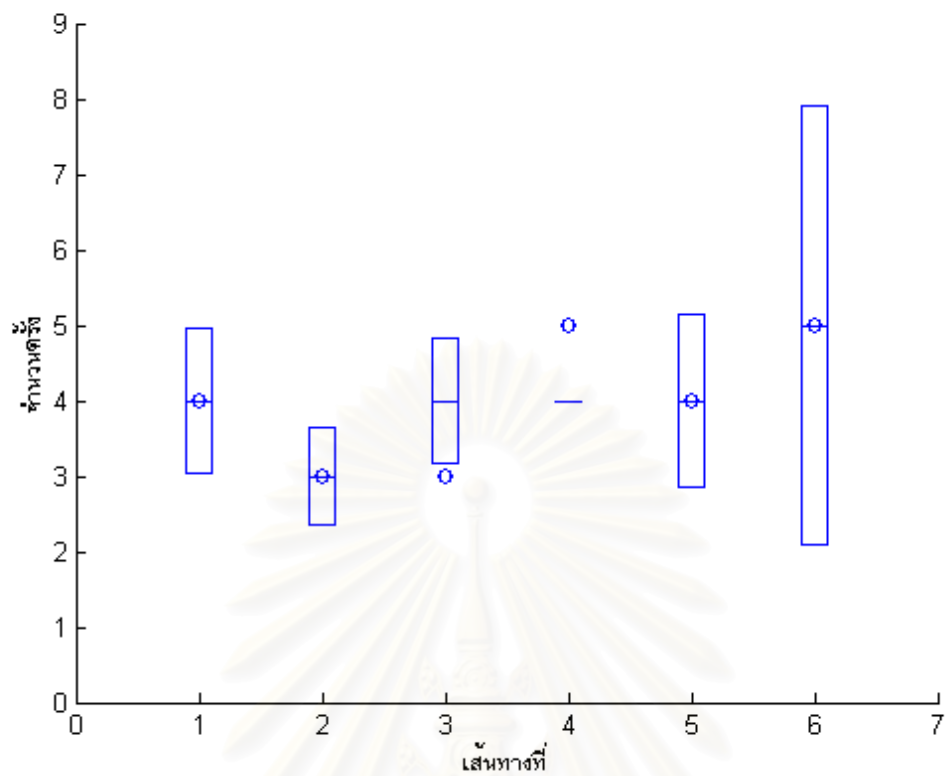
ตารางที่ 5.3 แสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น1/4

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
Fixed Jacobian	0.08	0.26	0.31	0.21	0.71	0.53
Adaptive Jacobian	0.05	0.15	0.15	0.11	0.31	0.30
STD	0.02	0.04	0.02	0.03	0.06	0.06

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น1/4

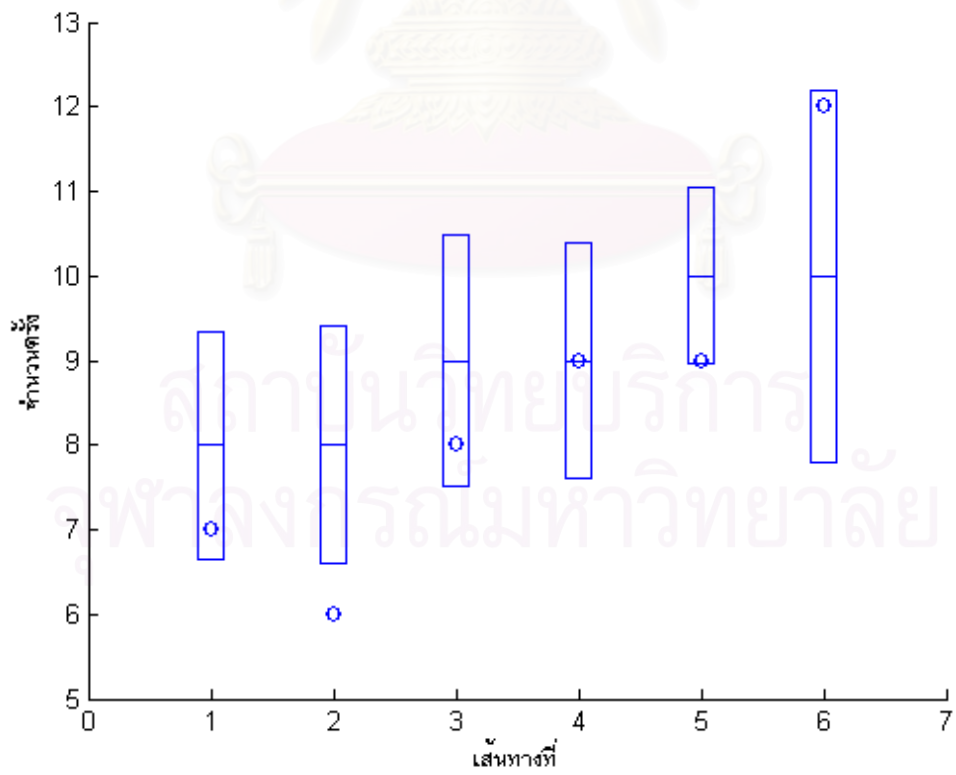
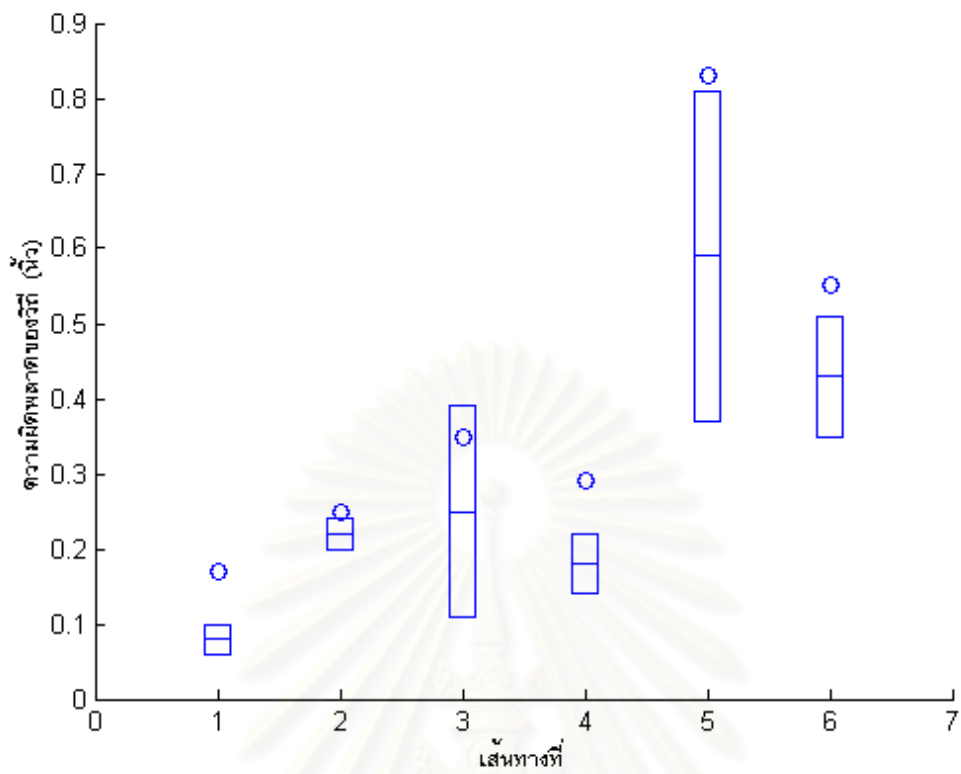
จากตาราง 5.1 ถึง 5.4 ได้มาทำเป็นกราฟในรูปที่ 5.10 ถึง 5.13 กราฟทั้ง 4 รูปได้ใช้รูปแบบเดียวกับบทที่แล้วเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของทั้งสองระบบ ในระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวนั้นสามารถทำให้ความผิดพลาดของวิถีลดลงแต่จำนวนครั้งในการเคลื่อนแขนไปจนถึงเป้าหมายไม่ได้ลดลง และขนาดของก้าวที่เล็กจะทำให้ค่าความผิดพลาดของวิถีลดลงมากกว่าขนาดก้าวที่ใหญ่ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลการทดลองในแบบจำลองที่แสดงในบทที่แล้ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



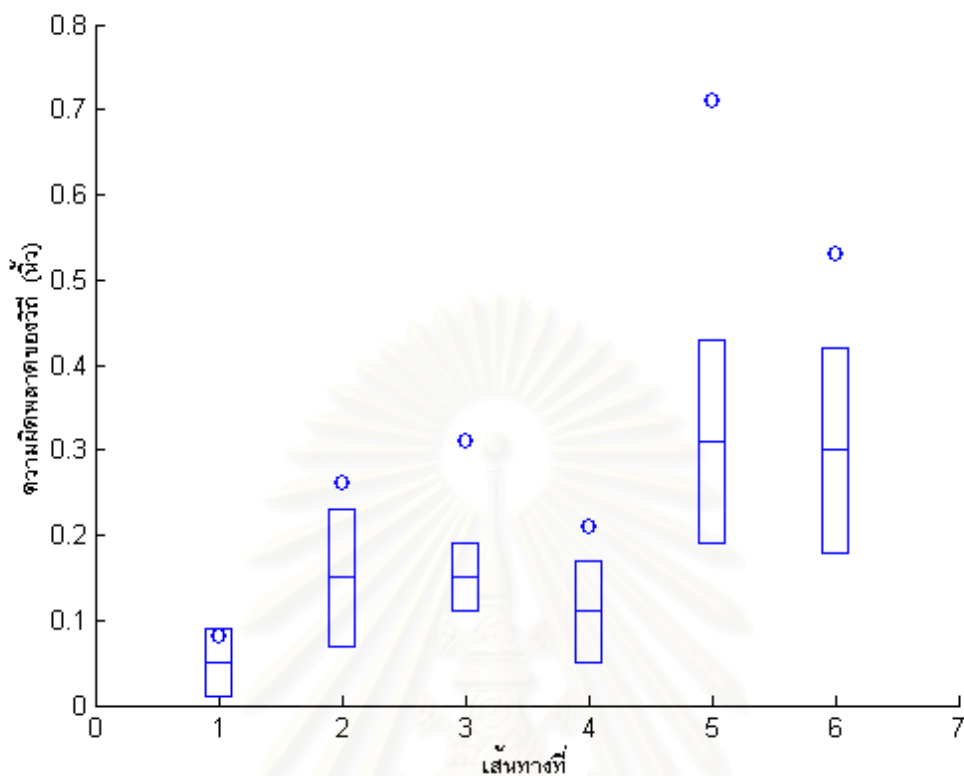
รูปที่ 5.10 กราฟแสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น $1/2$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความผิดพลาดของวิธีโดยขนาดของก้าวเป็น $1/2$

รูปที่ 5.12 กราฟแสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวนั้นเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น $1/4$



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงความผิดพบตามวิธีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4

5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการทดลองกับแขนจริง เนื่องจากจำนวนประชากรเป็น 10 จึงไม่สามารถบอกได้ว่าประชากรมีการกระจายแบบปกติจำเป็นต้องมีการทดสอบด้วย โดยใช้การทดสอบด้วยวิธี Kolmogorov-Smirnov ซึ่งการทดลองในแขนหุ่นจริงนั้น มีเฉพาะตารางที่แสดงจำนวนครั้งในการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดก้าวเป็น 1/2 และเฉพาะเส้นทางที่ 1, 2 และ 3 เท่านั้นที่ไม่ได้มีการกระจายแบบปกติ ดังนั้นการทดสอบ 3 เส้นทางนี้จะต้องใช้วิธีทดสอบแบบ Wilcoxon จากหนังสือของ Kitchens (1998)

ผลการทดสอบทางสถิติ สำหรับมีเพียงเส้นทางที่ 1 เท่านั้นที่จำนวนครั้งเฉลี่ยของจำนวนครั้งของการเคลื่อนไหวแขนเข้าสู่เป้าหมายของระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบปรับตัวน้อยกว่าจำนวนครั้งของระบบอิมเมจจาโคเป็นคงที่อย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอีก 2 เส้นทางนั้นบอกไม่ได้

สำหรับเส้นทางที่เหลือมีการกระจายแบบปกติ จึงสามารถคิดค่าทางสถิติแบบเดียวกับในการทดลองในแบบจำลอง แต่เปลี่ยนการกำหนดบริเวณวิกฤติ $-t_\alpha$ มีเป็นค่าเป็น -1.8331 เนื่องจากจำนวนตัวอย่างของการทดลองทั้งสองไม่เท่ากัน

เส้นทางที่	4	5	6
ค่าตัวสถิติทดสอบ	$-\infty$	0	0

ตารางที่ 5.5 ค่าตัวสถิติทดสอบของจำนวนครั้งของการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/2

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
ค่าตัวสถิติทดสอบ	-28.46	-9.49	-4.52	-17.39	-6.90	-9.49

ตารางที่ 5.6 ค่าตัวสถิติทดสอบของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/2

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
ค่าตัวสถิติทดสอบ	4.72	9.04	4.27	0	6.08	-5.75

ตารางที่ 5.7 ค่าตัวสถิติทดสอบของจำนวนครั้งของการเคลื่อนแขนเข้าสู่เป้าหมายโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6
ค่าตัวสถิติทดสอบ	-4.74	-8.70	-25.30	-10.54	-21.08	-12.12

ตารางที่ 5.8 ค่าตัวสถิติทดสอบของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4

จากตารางค่าตัวสถิติทดสอบเห็นว่าเฉพาะส่วนที่เป็นค่าความผิดพลาดของวิถีเท่านั้นที่สรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของระบบอิมเมจจาโคเป็นแบบปรับตัวมีค่าน้อยกว่าค่าของระบบอิมเมจจาโคเป็นคงที่

การคิดค่าความดีขึ้นของค่าความผิดพลาดใช้วิธีการเช่นเดียวกันกับการทดลองในแบบจำลองซึ่งสรุปได้ดังตารางต่อไปนี้

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
เปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้น	52.94	12	28.57	37.93	28.92	21.82	30.36

ตาราง 5.9 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้นของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/2

เส้นทางที่	1	2	3	4	5	6	ค่าเฉลี่ย
เปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้น	37.50	42.31	51.61	47.62	56.34	43.40	46.46

ตาราง 5.10 แสดงเปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้นของค่าความผิดพลาดของวิถีโดยขนาดของก้าวเป็น 1/4

ความสัมพันธ์ของขนาดของก้าวกับความดีขึ้นเหมือนกับการทดลองในแบบจำลอง คือเปอร์เซ็นต์ของความดีขึ้นของค่าความผิดพลาดของวิถีของขนาดของก้าวที่เล็กกว่าจะมีค่าความดีขึ้นมากกว่าขนาดของก้าวที่มีขนาดใหญ่

5.7 สรุปท้ายบท

ในบทนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดของสภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองกับแขนหุ่นยนต์จริง วิธีการติดตั้งระบบ การปรับเปลี่ยนสภาพแวดล้อมบางอย่างซึ่งไม่ตรงกันระหว่างแบบจำลองกับของจริง บอกรถึงข้อจำกัดในการทดลอง ผลการทดลองของทั้งสองระบบและการเปรียบเทียบผลการทดลองเมื่อมีขนาดของก้าวที่แตกต่างกันด้วย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การสรุปผลการทดลอง

ในบทนี้จะสรุปผลการทดลองที่ได้ทำผ่านมา และเสนอข้อเสนอนะที่ได้จากการทำการทดลอง ทั้งในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และการทดลองในแขนหุ่นยนต์จริง

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิธีการเคลื่อนไหวแขนหุ่นยนต์แบบที่มีการปรับปรุงอิมเมจจาโคเบียนที่เสนอในงานวิจัยนี้ สามารถลดค่าความผิดพลาดของวิถีได้มากกว่าระบบที่เป็นแบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่ โดยขนาดของก้าว มีผลกับค่าความผิดพลาดของวิถีเช่นกัน โดยขนาดของก้าวที่เล็กมีค่าความผิดพลาดของวิถีที่น้อยกว่า ขนาดของก้าวที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีความจริงในแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ขนาดของก้าวลดลงมาได้เพียงค่าหนึ่งเท่านั้น ถ้าลดลงมาหลังจากนั้นการเคลื่อนไหวของแขนจะมีปัญหา เนื่องจากความละเอียดของภาพจากกล้องจะไม่สามารถสังเกตการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของปลายแขน เมื่อมีการขยับไปไม่มาก ถ้ามีการใช้ขนาดก้าวที่เล็กลงค่าความดีขี้นนั้นเพิ่มขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. นำจะลองนำเทคนิคอื่นๆ ที่เป็นการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ เช่น นำกลวิธีเชิงวิวัฒนาการแบบอื่นๆ หรือขั้นตอนเชิงวิวัฒนาการหรือการโปรแกรมเชิงวิวัฒนาการมาลองใช้ในระบบที่มีการปรับปรุงอิมเมจจาโคเบียน
2. การเริ่มต้นการเคลื่อนไหวแขนหุ่นยนต์นั้นอาจจะไม่เริ่มต้นจากอิมเมจจาโคเบียนที่ได้จากการประมาณ โดยอาจเริ่มต้นจากการสุ่มขึ้นมาหรือสร้างด้วยวิธีอื่นๆ แล้วพัฒนาจนได้อิมเมจจาโคเบียนตัวที่ใกล้เคียงตัวที่ถูกต้องเรื่อยๆ จนกระทั่งแขนเคลื่อนเข้าสู่เป้าหมาย
3. พัฒนาวิธีการที่สามารถนำความรู้ที่ใช้การปรับปรุงอิมเมจจาโคเบียนที่เกิดขึ้นในเคลื่อนที่ครั้งที่แล้ว มาข้อมูลที่ช่วยให้การปรับปรุงหาอิมเมจจาโคเบียนในตำแหน่งปัจจุบัน เพื่อให้พัฒนาการค้นหาอิมเมจจาโคเบียนตัวใหญ่ทำได้ดีคุณภาพและรวดเร็วยิ่งขึ้น และเป็นการใช้ข้อมูลในอดีตอย่างคุ้มค่า
4. มีการสร้างสภาพแวดล้อมให้ยากขึ้น โดยอาจจะมีการกำหนดให้เป้าหมายมีการเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเดิมไปเรื่อยๆ หรืออาจจะให้มีอุปสรรคมาบังเป้าหมาย
5. นำมีการวิเคราะห์เกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนอิมเมจจาโคเบียน ซึ่งในนี้ไม่ได้กล่าวถึง เนื่องจากการวิเคราะห์ที่ทำไปแล้วนั้นไม่ได้แสดงแนวโน้มใดๆ ของการเปลี่ยนแปลงอิมเมจจาโคเบียน โดยสังเกตจากการจากค่าของสมาชิกทั้งหมดในอิมเมจจาโคเบียน ว่าในแต่ละตัวไม่ได้มีแนวโน้มหรือทิศทางที่

จะปรับเปลี่ยนให้เป็นตัวที่ดีขึ้นที่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า ซึ่งอาจจะต้องศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับเมทริกซ์ว่าน่าจะสามารถมาใช้บ่งชี้แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงนี้ได้

6. การเปลี่ยนตำแหน่งของกล่องจะมีผลในการประมาณค่าอิมเมจจาโคเบียน ดังนั้นการประมาณหาอิมเมจจาโคเบียนต้องระวังในทิศทางที่ขยับแล้วทำให้ข้อมูลการเคลื่อนแขนบางตัวขาดหายไป ซึ่งมีข้อน่าสนใจว่าในการมองจากกล่องไม่ว่ากล่องจะตั้งที่ตำแหน่งใดๆ จะมีบางทิศทางมีเมื่อมีการขยับแล้วกล่องจะมองไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงหรือเห็นการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าความเป็นจริง ซึ่งน่าจะเป็นลักษณะของความเชื่อมั่นที่ให้กับแต่ละทิศทาง ถ้าการเลือกทิศทางของการเคลื่อนแขนให้ไปในทิศทางที่มีความเชื่อมั่นมากๆ อิมเมจจาโคเบียนที่ได้น่าจะให้ผลของการควบคุมแขนหุ่นยนต์ที่ดีขึ้น การทดลองที่น่าจะพิสูจน์ว่าถ้ามีการเปลี่ยนแปลงวิธีการประมาณอิมเมจจาโคเบียนหลายๆ แบบในระบบอิมเมจจาโคเบียนคงที่ แล้วลองทดสอบว่ามีผลกับค่าความผิดพลาดของวิถีอย่างไรและค่าความผิดพลาดของวิถีที่น้อยที่สุดนั้น เมื่อเทียบกับค่าในระบบอิมเมจจาโคเบียนแบบปรับตัวเป็นอย่างไร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- Chancharoen, R., and Sangveraphunsiri, V. An Image Based Visual Servo Control For Industrial Robots. Proceedings of The First Asian Symposium on Industrial Automation and Robotics, pp. 107-110. Bangkok, Thailand, 1999.
- Conkie, A., and Chongstivatana P. An Uncalibrated Stereo Visual Servo System. Proceedings of the British Machine Vision Conference, pp. 277-280. Oxford, 1990.
- Corke, P. I. A robotics toolbox for MATLAB, IEEE Robotics and Automation, pp. 24-32, March 1996.
- Jagersand, M., Fuentes, O., and Nelson, R. Experimental Evaluation of Uncalibrated Visual Servoing for Precision Manipulation. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp. 2874-2880. New Mexico, 1997.
- Kitchens L. J. Exploring Statistics: A Modern Introduction to Data Analysis And Interface, 2nd ed. The United States of America: Duxbury Press, 1998.
- Piepmeyer, J. A., McMurray, G. V., and Lipkin, H. A Dynamic Quasi-Newton Method for Uncalibrated Visual Servoing. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation, pp. 1595-1600. Michigan, 1999.
- Winter, G., Periaux, J., Cuesta, P. Genetic Algorithms in Engineering and Computer Science, England: John Wiley & Sons, 1995.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายคทา ประดิษฐ์วงศ์ เกิดวันที่ 29 พฤษภาคม พ.ศ. 2517 จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต เกียรตินิยมอันดับ 2 สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2538 เข้ารับราชการเป็นอาจารย์สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2541 เข้าศึกษาต่อที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

