

การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์เดินบนระนาบแบบขนาน

นายณัฐดนัย ดัชนีวิรุพท์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-449-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PARALLEL PLANAR WALKING ROBOT



Mr. Natdanai Tantawiroon

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-334-449-7


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์เดินบนระนาบแบบขนาน
โดย นายณัฐดนัย ตันตวิรุพพ์
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

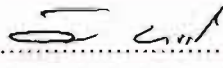
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อิทธิพล ปานงาม)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิทยา ยงเจริญ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

ณัฐดนัย ดันตทวิรุพพ์ : การออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์เดินบนระนาบแบบขนาน. (Design and Development of a Parallel Planar Walking Robot)

อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 75 หน้า. ISBN 974-334-449-7.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ได้โดยใช้ขา หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นกรอบสองกรอบที่เชื่อมต่อกันโดยใช้กลไกแบบขนาน (Parallel link mechanism) และหุ่นยนต์สามารถเดินได้โดยควบคุมการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของแต่ละกรอบสลับกัน ทำให้หุ่นยนต์ที่สร้างมีจำนวนองศาความอิสระน้อยเมื่อเทียบกับหุ่นยนต์ที่ใช้กลไกขาแต่ละขาแบบแยกอิสระคล้ายแมลง ในวิทยานิพนธ์จะกล่าวถึงการออกแบบกลไก การสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุม การหาสมการแสดงการเคลื่อนที่ (Kinematics) ของหุ่นยนต์ รูปแบบการควบคุมหุ่นยนต์ และการทดสอบ

การทดสอบหุ่นยนต์ประกอบด้วย การเคลื่อนที่ในลักษณะต่าง ๆ และการหมุนตัว หลังจากนั้นจึงวัดความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ จากการทดสอบความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่สูงสุดมีค่าไม่เกิน 1.5% ภายในระยะทางการเคลื่อนที่ 2.0 เมตร และความผิดพลาดเชิงมุมสูงสุดไม่เกิน 2.5 องศาต่อการหมุนตัว 1 รอบ งานวิจัยในอนาคตสามารถเพิ่มความถูกต้องในการเคลื่อนที่ได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensors) ต่าง ๆ เพื่อป้อนกลับข้อมูลของสภาวะแวดล้อม อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจของหุ่นยนต์อีกด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต ณัฐดนัย ดันตทวิรุพพ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4070268521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING


KEY WORD: WALKING ROBOT / PARALLEL PLANAR MECHANISM / FRAME WALKING

NATDANAI TANTAWIROON : DESIGN AND DEVELOPMENT OF A PARALLEL PLANAR WALKING ROBOT. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 75 pp. ISBN 974-334-449-7.

The design of a walking robot is studied in this research. The study includes mechanism design, kinematics design and motion controller. The walking robot consists of two parallel planar frames with will be formed a 3-DOF motion, the position in planes at centroid and a rotation angle of the plane relative to the other. The robot motion is generated by controlling the relative motion of the two planar frames. The advantage of parallel frames walking robot over the insect-like robot is the fewer degree of freedoms needed in the parallel frames walking robot. This means that fewer actuators required.

The accuracy tests of the robot itself consist of the measurement of motion error in different type of walking and turning or body rotation. The maximum error of walking in a 2-meter straight line is less than 1.5% and the error of turning or body rotation is less than 2.5 degree per revolution. This error dominated from the environment because of the lack of environment sensors such as sensors to detect robot positions relative to the reference frame.

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อนิสิต ณัฐกรณ์ ศังหศิริพันธ์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา 
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำแนะนำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้มาด้วยดีโดยตลอด ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยมาโดยตลอด ขอขอบคุณคุณ ไพรัช ตั้งพรประเสริฐที่ให้คำแนะนำด้านการจัดซื้ออุปกรณ์ต่าง ๆ ขอขอบคุณคุณ ธิตินพ ศรีทชาพร ที่ช่วยในการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขอขอบคุณคุณ มงคล เทียนวิบูลย์ ที่ให้คำแนะนำในการสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโททุกท่านที่สนับสนุนการวิจัยเสมอมา

ท้ายสุด สิ่งที่สำคัญที่สุดและจะขาดไม่ได้คือกำลังใจจากบิดามารดา ผู้วิจัยจึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ และคุณแม่ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในทุกด้านเพื่อให้การวิจัยนี้ประสบความสำเร็จ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	2
1.6 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 รูปแบบโดยทั่วไปของ Mobile robot	3
2.1.1 หุ่นยนต์สี่ขา	3
2.1.2 หุ่นยนต์หกขา	7
2.1.3 งานวิจัยด้านการออกแบบขาหุ่นยนต์	9
2.2 หุ่นยนต์ที่ใช้กลไกแบบขนาน (Parallel link robot)	10
2.3 ส่วนประกอบอื่นๆ	11
3. การออกแบบ	13
3.1 การออกแบบกลไกการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	13
3.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อน	16
3.3 อุปกรณ์ตรวจรู้ (Sensor)	17
3.3.1 การวัดตำแหน่งและความเร็ว	17
3.3.2 การวัดแรง	19
3.4 การออกแบบวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ในการควบคุม	20
3.4.1 ขนาดหน่วยความจำและความเร็วในการประมวลผล	21
3.4.2 รูปแบบการควบคุม	22
3.4.3 ตัวประมวลผล	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.5 วงจรนับมอเตอร์	24
3.4.4 วงจรอื่นๆ	24
3.4.4.1 วงจรนับขึ้น/ลง (UP/DOWN Counter)	24
3.4.4.2 วงจรควบคุมทิศทางมอเตอร์	27
3.4.4.3 วงจรอ่านสถานะของลิมิตสวิตช์	28
3.4.6 อุปกรณ์ต่อพ่วง	29
3.5 แหล่งจ่ายพลังงาน	29
4. สมการการเคลื่อนที่ (Kinematics)	30
4.1 สมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์	30
4.2 สมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์ ที่ปรับปรุงแก้ไขแล้ว	31
4.3 สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์	33
5. การควบคุม	35
5.1 การสร้างเส้นทางการเดิน	35
5.2 ตัวควบคุม	37
5.3 โปรแกรมควบคุม	40
6. การทดสอบและผลการทดสอบ	44
6.1 การทดสอบการเลื่อนตำแหน่งของหุ่นยนต์	45
6.1.1 การทดสอบการเคลื่อนที่ภายในกรอบหุ่นยนต์	45
6.1.2 การทดสอบการเดินโดยไม่มีภาระหมุนตัว	50
6.1.3 การทดสอบการเดินโดยมีภาระหมุนตัวไปในทิศทางที่จะเคลื่อนที่	57
6.2 การทดสอบการหมุนของหุ่นยนต์	60
6.3 สรุปผลการทดสอบ	64
7. ข้อเสนอแนะ	66
7.1 การเพิ่มความถูกต้องในการเคลื่อนที่	66
7.2 การเพิ่มความสามารถในการเดินบนพื้นผิวไม่ราบเรียบ	66
7.3 การเพิ่มอุปกรณ์ตรวจจับ	67
รายการอ้างอิง	68
ภาคผนวก	
ก. แผนผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุม	71
ข. แผนผังการเดินสายเชื่อมต่อสัญญาณต่าง ๆ	73
ค. ลายทองแดงของวงจรรับขึ้น/ลง และวงจรควบคุมทิศทางมอเตอร์	74
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	75

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 อุปกรณ์ขับเคลื่อนและแหล่งกำเนิดพลังงานต่าง ๆ	11
2.2 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ	12
3.1 การทำงานของ 7474 Dual flip-flop	25
3.2 การทำงานของ 7474 Dual flip-flop หลังจากกำหนดอินพุตบางตัว	25
3.3 เลขฐานสิบที่แสดงโดยเลขฐานสอง	26
3.4 การทำงานของ L298	27
6.1 ตารางเปรียบเทียบเส้นทางที่สั่งกับเส้นทางจริงของการทดสอบการเคลื่อนที่ ของกรอบ	46
6.2 เปรียบเทียบระยะทางที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2, 4.3 และสมการที่ 4.2*, 4.3* ที่ γ ต่าง ๆ	48
6.3 ตารางเปรียบเทียบเส้นทางที่สั่งกับเส้นทางจริงของการทดสอบการเดิน โดยไม่มีการหมุน ที่ระยะเวลาเคลื่อนที่ต่าง ๆ	52
6.4 ตารางเปรียบเทียบเส้นทางที่สั่งกับเส้นทางจริงของการทดสอบการเดิน โดยไม่มีการหมุน ที่ระยะก้าวต่าง ๆ	54
6.5 แสดงค่าความผิดพลาดของเส้นทางกรเดินของการทดสอบการเดิน โดยหันหน้าไปในทิศทางที่จะเดิน	60
6.6 ความผิดพลาดเชิงมุมที่ขนาดมุมก้าวต่าง ๆ	63
6.7 ตารางแสดงค่าความผิดพลาดที่สูงที่สุดในการทดสอบต่าง ๆ	65

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 การเดินที่มีการรักษาสมดุลของมนุษย์	3
2.2 จุดศูนย์กลางมวลของการเดินแบบสี่ขาและหกขา	4
2.3 ลำตัวที่แบ่งเป็นสองส่วนของ TITAN VI	4
2.4 กลไกขาของ TITAN VI	5
2.5 ลักษณะของขาแบบพีกัดทรงกลม	5
2.6 กลไกขาของ TURTLE-1	6
2.7 เส้นทางเคลื่อนที่ของปลายขาของ TURTLE-1	6
2.8 กลไกขาของ HEXAX-1	7
2.9 ระบบสายพาน คลัทช์ และ เบรก ของ HEXAX-1	7
2.10 การสร้างแบบจำลองขาของ TUM	8
2.11 การใช้พลังงานในการเดินบนทางราบ	9
2.12 ตัวอย่างขาหุ่นยนต์ที่มี 3 องศาความอิสระ	10
3.1 กลไกแบบที่ออกแบบในขั้นต้น	13
3.2 แสดงลักษณะกลไก fully parallel planar ที่มีสามองศาความอิสระ	14
3.3 แสดงแบบจำลองโครงสร้าง และ Actuator ทั้งสามตำแหน่ง.....	15
3.4 แบบจำลองที่สร้างขึ้น ภายหลังจากเปลี่ยนแปลงการยึดให้เป็นแบบ การยึดที่ปลาย ทั้งสองด้าน	16
3.5 สัญญาณของเอ็นโคเดอร์ประเภทต่าง ๆ	18
3.6 การต่อวงจรเพื่อวัดกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์	20
3.7 วงวนการควบคุมหุ่นยนต์	21
3.8 รูปแบบการควบคุม	22
3.9 รูปแบบการควบคุมโยใช้พีซี	23
3.10 สัญญาณจากเอ็นโคเดอร์	24
3.11 วงจรของลิมิตสวิตช์สองทาง	28
3.12 การต่อวงจรรับสถานะลิมิตสวิตช์	28
4.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้คำนวณสมการการเคลื่อนที่	30
4.2 ความผิดรูปของกลไก	32
4.3 รอยเชื่อมกรอบสามแฉก	32
5.1 การกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของข้อต่อ	35
5.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ	38
5.3 เส้นทางเคลื่อนที่ของข้อต่อในรูปแบบไม่ต่อเนื่อง	39
5.4 การควบคุมแบบป้อนกลับที่รับคำสั่งตำแหน่ง และความเร็ว	40

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
ก.1 การต่อวงจรถอดรหัสสัญญาณนับขึ้นและนับลงโดยใช้ไอซี 7474	71
ก.2 การต่อวงจรนับสัญญาณนับขึ้นและนับลงโดยใช้ไอซี 74193	71
ก.3 การต่อวงจรขับมอเตอร์แบบสองทิศทาง	72
ข.1 แผนผังการเดินสายเชื่อมต่อสัญญาณต่าง ๆ	73
ค.1 ลายทองแดงของวงจรมอเตอร์นับขึ้น/ลง	74
ค.2 ลายทองแดงของวงจรควบคุมทิศทางมอเตอร์	74

บทที่ 1

บทนำ



1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทแทนมนุษย์ในด้านต่างๆมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรม การก่อสร้าง หรือ การสำรวจ หนึ่งในหุ่นยนต์เหล่านี้คือ หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) สามารถทำงานสำรวจ หรือ การขนวัสดุในพื้นที่ที่เป็นอันตรายแทนคนได้ ส่วนประกอบสำคัญของหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้คือ ส่วนที่ทำหน้าที่ให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งอาจเป็นได้ทั้งลักษณะคล้ายล้อของยานพาหนะ หรือคล้ายขาของแมลง เห็นได้ว่าข้อได้เปรียบของ หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ที่ใช้ขาในการเคลื่อนที่คือ ความสามารถในการเดินไปบนภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบ มีลักษณะลาดชัน ได้ดีกว่าการใช้ล้อ ในวิทยานิพนธ์นี้ จึงขอเสนอการออกแบบ และ การสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยขาเดิน (Walking robot) ที่ใช้งานได้จริง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้โดยใช้ขา (Walking robot)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. หุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่กำหนดให้ บนพื้นราบได้ มีความผิดพลาดไม่เกิน ± 5 เซนติเมตร ต่อระยะการเคลื่อนที่ 1 เมตร และความผิดพลาดเชิงมุมไม่เกิน ± 5 องศา
2. ความเร็วในการเดินของหุ่นยนต์ได้ถึง 2 เมตรต่อนาที

อย่างไรก็ตามเพื่อความเหมาะสมของขนาดของวิทยานิพนธ์ในขั้นต้นกำหนดให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้บนพื้นราบ เป้าหมายของการพัฒนาต่อไปคือทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปบนพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบได้ และ เพิ่มระบบการมองเห็น (Vision system) เพื่อให้ระบบการควบคุมและการตัดสินใจแก้ปัญหามีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

หุ่นยนต์เดินด้วยขาที่สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการได้ และหุ่นยนต์ดังกล่าวสามารถนำไปวิจัยและพัฒนาต่อไป เช่น การมองเห็น (Vision system) และอุปกรณ์วัดแรง (Force sensor) เพื่อให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการทำงานสูงขึ้น

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีการทำงานเริ่มจากการศึกษาผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในตำรา และ วารสารต่าง ๆ เพื่อหาข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ สร้างแบบจำลอง (Model) แล้ววิเคราะห์หารูปแบบที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ หลังจากนั้นจึงสร้างต้นแบบและแก้ไขข้อบกพร่อง แล้วจึงสร้างจริง

1.6 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

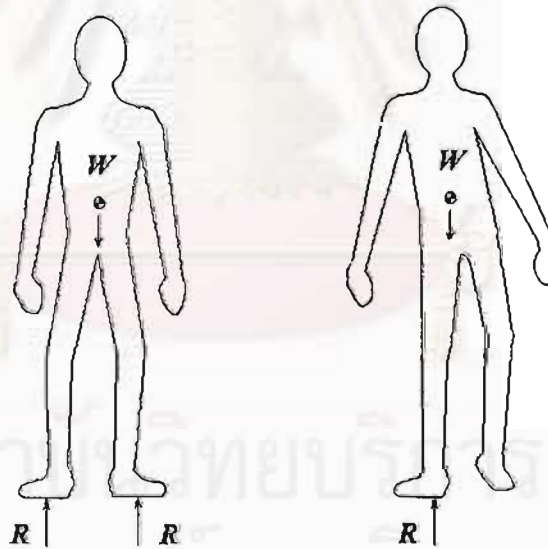
1. ออกแบบชิ้นส่วนต่างๆของหุ่นยนต์
2. ผลิตและประกอบชิ้นงานที่ได้
3. แก้ไขงานเมื่อพบข้อผิดพลาด ที่เกิดขึ้นระหว่างขั้นตอนการผลิต
4. สร้างระบบควบคุม ซึ่งประกอบด้วยส่วนวงจรไฟฟ้า และส่วนของโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. ทดลองและแก้ไขจนได้ผลงานที่เสร็จสมบูรณ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 รูปแบบโดยทั่วไปของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ได้

ลักษณะหุ่นยนต์ที่ใช้ขาในการเดิน อาจมีตั้งแต่ หนึ่งขา ไปจนถึง แปดขา โดยทั่วไปมักเป็น สี่และ หกขา เนื่องจากสามารถรักษาสมดุลไว้ได้ตลอดเวลา โดยใช้ 3 ขาวางบนพื้นในขณะที่อีก 3 ขา ทำหน้าที่ก้าวเดิน ตัวอย่างหุ่นยนต์ที่ใช้ขาที่ได้มีการค้นคว้าวิจัยมาแล้วได้แก่ MECANT I [1], TITAN VI [2], TITAN VIII [3], Hexax-I [4] และ TUM [5] ข้อดีของหุ่นยนต์ที่ใช้ขาเดินคือสามารถเคลื่อนที่ไปในภูมิประเทศที่ไม่ราบเรียบ ในกรณีหุ่นยนต์สองขา มักมุ่งเน้นไปทางด้าน การพัฒนาหุ่นยนต์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับมนุษย์ โดยอาศัยวิธีการควบคุมขั้นสูง เนื่องจาก การเดินจะเป็นลักษณะกึ่งเสถียรภาพ (quasi dynamic) กล่าวคือ ในขณะที่ก้าวเดินจะมีเพียงขาเดียวที่ตั้งอยู่บนพื้น ในกรณีของหุ่นยนต์สองขา ซึ่งจะต้องมีการรักษาสมดุล เช่นเดียวกับการเดินของมนุษย์

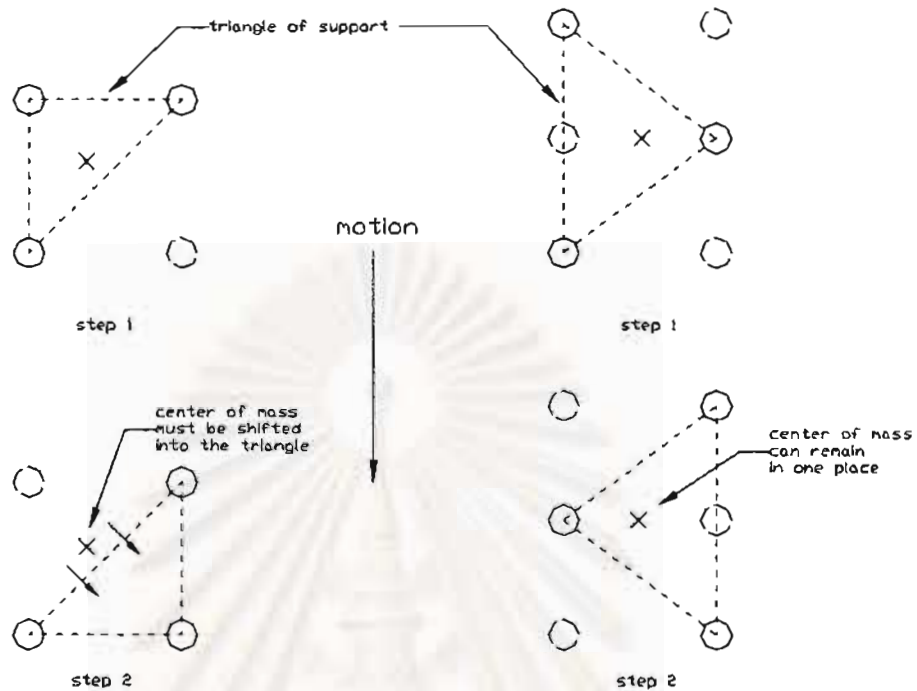


รูปที่ 2.1 การเดินที่มีการรักษาสมดุลของมนุษย์

2.1.1 หุ่นยนต์สี่ขา

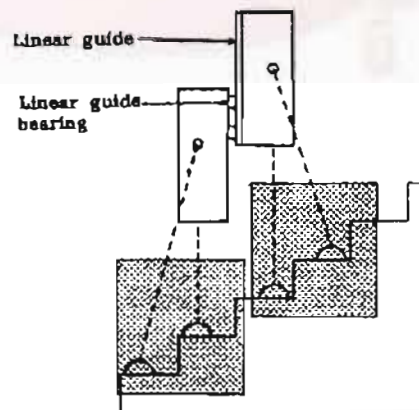
หุ่นยนต์ที่มีสี่ขาจะสามารถเดินในลักษณะสมดุลได้ โดย หนึ่งขาจะมีอิสระในการก้าวเดิน ในขณะที่อีกสามขาจะอยู่บนพื้น ดูจากรูปที่ 2.2 การรักษาสมดุล ต้องอาศัยการย้ายจุดศูนย์กลางมวล ให้อยู่ภายในพื้นที่สามเหลี่ยม ที่เกิดจากการวางตำแหน่งของขาทั้งสาม

(Triangle of support) ตลอดเวลา แต่ละขาจะมีลักษณะคล้ายแมลง ทำให้สามารถปรับท่าเดิน (Gait) ให้เหมาะสมกับพื้นผิวง่าย งานวิจัยที่ผ่านมามีได้แก่



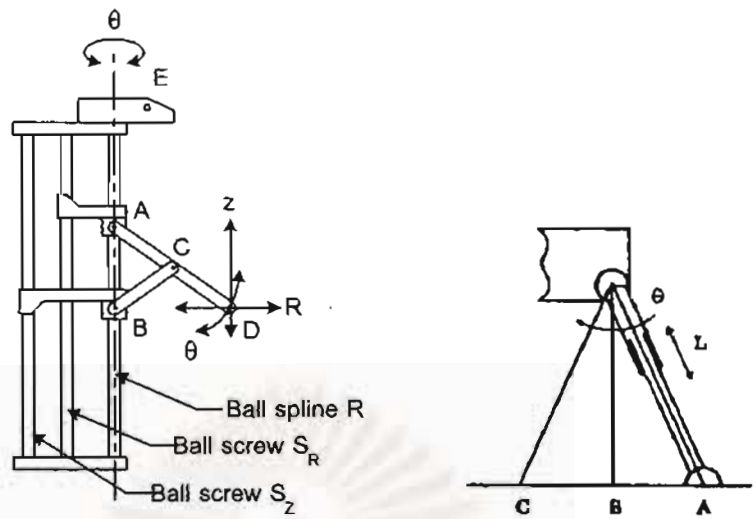
รูปที่ 2.2 [6] จุดศูนย์กลางมวลของการเดินแบบสี่ขาและทขา

TITAN VI [2] มีลักษณะพิเศษคือ ลำตัวแบ่งเป็นสองส่วน ทำให้มีประสิทธิภาพในการปรับระดับสูง และสามารถขึ้นบันไดได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 [2] ลำตัวที่แบ่งเป็นสองส่วนของ TITAN VI

กลไกขามีลักษณะเป็นพิกัดทรงกลม ร่วมกับ Evan mechanism ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 [2] กลไกขาของ TITAN VI

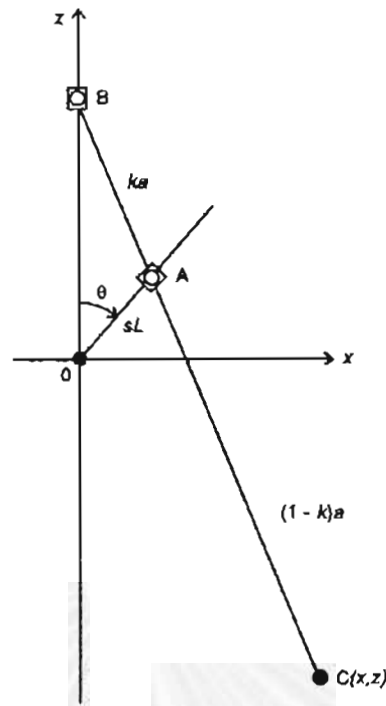
รูปที่ 2.5 [2] ลักษณะของขาแบบพิกัดทรงกลม

กำหนดให้ Link AD มีความยาวเป็นสองเท่าของ Link BC หากเคลื่อนจุด A โดยเคลื่อน Screw S_R และ S_Z ด้วยความเร็วเท่ากัน จะทำให้จุด D เคลื่อนในแนวตั้ง (แกน Z) หากให้จุด B คงที่ และเคลื่อนจุด A จะทำให้จุด D เคลื่อนที่ไปในแนวราบ (แกน R) และหากหมุน Ball spline R ไปเป็นมุม θ จะทำให้จุด D หมุนไปเป็นมุม θ เมื่อรวมการเคลื่อนที่ทั้งสามแกน จะทำให้จุดเคลื่อนที่เป็นพิกัดทรงกลม

ในการควบคุมการเดินในแนวราบจะควบคุมให้จุด D เคลื่อนที่เป็นแนวราบ แต่ในพิกัดทรงกลม หากไม่ควบคุมความยาวของขา L (ดังรูปที่ 2.5) จะทำให้มวลของหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง ซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงาน การลดพลังงานสูญเสียดังกล่าวทำได้โดยใช้กลไกที่เรียกว่า GDA (Gravitationally Decoupled Actuation) [7], [8] ซึ่งจะกล่าวถึงในภายหลัง

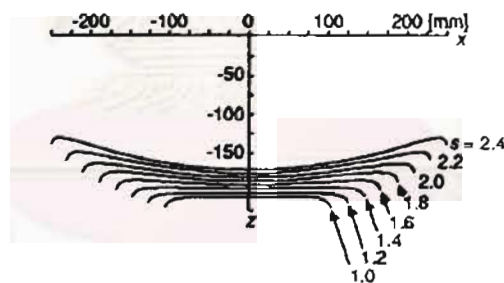
TURTLE-1 [9] มีกลไกที่ง่าย และ มีความแข็งแกร่งสูง ลักษณะกลไกเป็นดังรูปที่ 2.6





รูปที่ 2.6 [9] กลไกขาของ TURTLE-1

กลไกมีสององศาอิสระคือมุม θ และ ระยะ OA เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของจุดปลาย C โดยกำหนดความยาวของข้อต่อ OA (ค่า s จากรูปที่ 2.6) เป็นค่าหนึ่งๆ ในช่วงระหว่าง -60 องศา ถึง 60 องศา จะได้กราฟดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 [9] เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายขาของ TURTLE-1 โดยปรับพารามิเตอร์ s

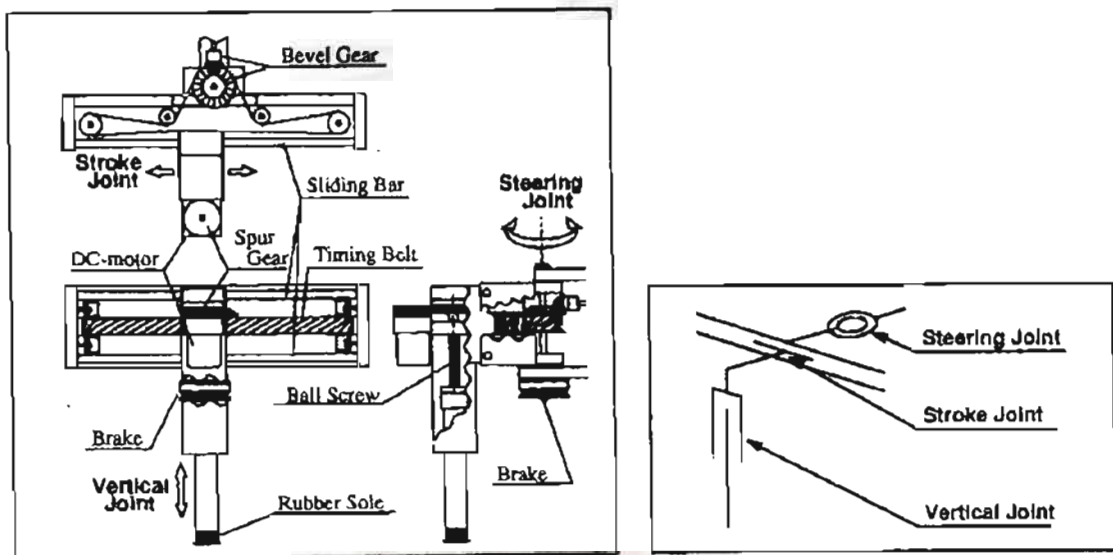
เห็นได้ว่า ช่วงค่า $1.0 \leq s \leq 1.2$ เส้นทางการเคลื่อนที่มีลักษณะ ใกล้เคียงเส้นตรงมาก ดังนั้นจึงสามารถควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวราบได้โดยใช้เพียง 1 องศาอิสระในช่วง support (การเคลื่อนที่ของขาในช่วงสัมผัสพื้น) และ ในช่วงที่ s มีค่ามาก จะใช้เป็นช่วง return (การเคลื่อนที่ของขา ขณะลอยจากพื้น)

นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ตรวจวัดแรงติดที่ปลายขาทั้งสิ้น เพื่อนำมาช่วยในการควบคุมความสมดุลในการเดินของหุ่นยนต์อีกด้วย TURTLE-1 สามารถเดินได้สองลักษณะคือ แบบ static โดยที่หุ่นยนต์จะมีเสถียรภาพตลอดเวลา เนื่องจากมีจุดรับแรง (จุดที่ขาแตะพื้น) ตั้งแต่สามจุดขึ้นไป (รูปที่ 2.2) และแบบ quasi dynamic ซึ่งมีช่วงที่มีจุดรับแรงเพียงสองจุด

2.1.2 หุ่นยนต์หกขา

หุ่นยนต์ที่มีหกขาจะสามารถเดินในลักษณะสมดุลได้ โดย จะมีขาที่มีอิสระในการก้าวเดินสามขา ในขณะที่อีกสามขาจะอยู่บนพื้น ซึ่งเห็นได้ว่า จุดศูนย์กลางมวลจะอยู่ภายใน Triangle of Support เสมอ ดังเปรียบเทียบระหว่างหุ่นยนต์ สี่และหกขาดังรูปที่ 2.2 งานวิจัยที่ผ่านมาได้แก่

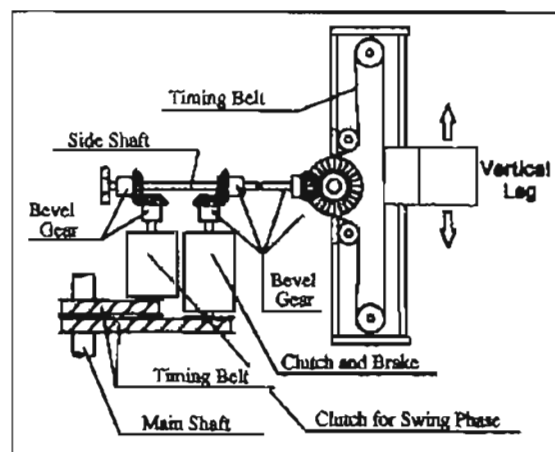
HEXAX-1 [4] เป็นหุ่นยนต์หกขาที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน เนื่องจากมีข้อดีคืออัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักดีกว่ามอเตอร์กระแสตรง มีลักษณะกลไกดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 [4] กลไกขาของ HEXAX-1

ในการส่งกำลังจากเครื่องยนต์ไปยังขา ใช้ระบบ สายพาน คลัทช์ และ เบรก ดัง

รูปที่ 2.9

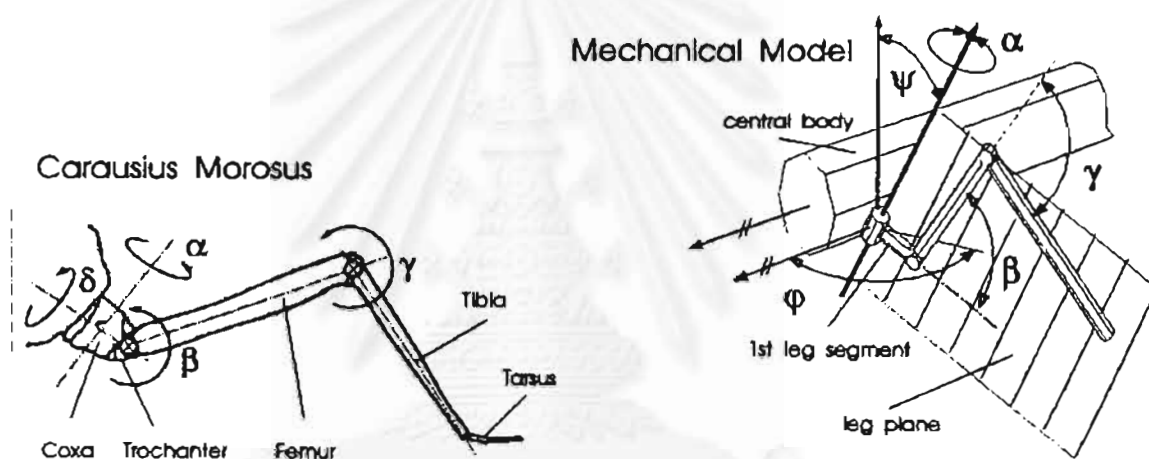


รูปที่ 2.9 [4] ระบบสายพาน คลัทช์ และ เบรก ของ HEXAX-1

สายพานจะส่งกำลังไปยังคลัทช์ เพื่อควบคุม Stroke joint ในการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และ Steering joint ในการหมุน ในการบังคับ Stroke joint และ Steering joint จะใช้ระบบเบรก กล่าวคือ หากใช้เบรกล็อค Steering joint กำลังที่ส่งไปจะไปหมุน bevel gear และขับสายพานของ Stroke joint และหากคลายเบรก Steering joint จะหมุนแทน ส่วน Vertical leg มีมอเตอร์กระแสตรงและ ball screw เป็นตัวควบคุม

ขาที่มีสามองศาอิสระ จะทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและเส้นโค้งได้ หากไม่มี Steering joint หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงได้อย่างเดียว

TUM [5] เป็นหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยการวิเคราะห์การเดินจากแมลง Walking Stick (Carausius Morosus) ลักษณะพิเศษคือขาหุ่นยนต์ซึ่งได้รับการออกแบบให้รับน้ำหนักได้มาก และมีองศาอิสระมากกว่าสาม



รูปที่ 2.10 [5] การสร้างแบบจำลองขาของ TUM จากแมลง Walking Stick

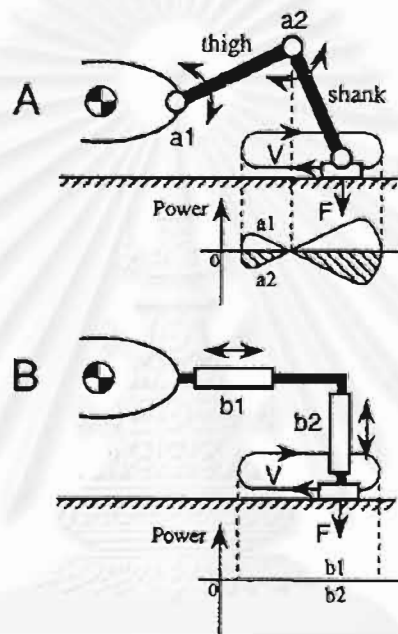
แมลงสามารถปรับรูปแบบการเดินให้เหมาะกับสภาพพื้นผิวได้โดย การหมุนขา รอบแกน δ ซึ่งก็คือการปรับค่า ψ และ φ ในการวิจัยนี้ได้ศึกษาการเดิน โดยปรับค่า ψ และ φ ต่างๆ

ในการควบคุม แต่ละขาใช้ตัวควบคุม SIEMENS 80C166 ต่อเชื่อมกันแบบอนุกรม วงจรขยายกำลัง (Power Amplifier) เพื่อควบคุมมอเตอร์สามตัว นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ เช่น Potentiometer เพื่อวัดมุมของขา, Tachometer, Strain gauge เพื่อวัดแรงที่ขากดพื้น และสวิตช์สัมผัส

2.1.3 งานวิจัยด้านการออกแบบขาหุ่นยนต์

งานวิจัยของ HIROSE [7], [8] กล่าวถึงการออกแบบขาโดยใช้หลัก GDA (Gravitationally Decoupled Actuation)

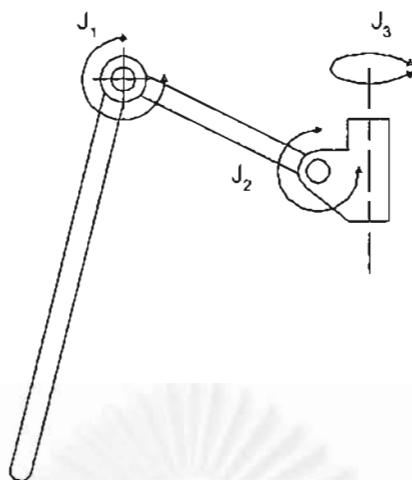
เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่บนพื้นราบ ในทางทฤษฎีจะไม่ต้องใช้กำลังในการขับเคลื่อน เนื่องจากทิศทางของความเร็ว (ทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่) ตั้งฉากกับทิศทางของแรง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นว่าผลรวมกำลังทั้งหมดที่อุปกรณ์ขับเคลื่อนจ่ายออกมาจะมีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 2.11 [7] การใช้พลังงานในการเดินบนทางราบ

พิจารณาหุ่นยนต์ A เมื่อขาเคลื่อนที่ อุปกรณ์ขับเคลื่อนทั้งสองส่ง (พลังงานเป็นบวก) หรือรับ (พลังงานเป็นลบ) แรงและความเร็วในเวลาเดียวกัน ทำให้เกิดพลังงานสูญเสีย ในขณะที่หุ่นยนต์ B มีประสิทธิภาพด้านกำลังงานสูงกว่า กล่าวคือ อุปกรณ์ขับเคลื่อน b_1 ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แต่ไม่ได้ส่งแรง ในขณะที่ที่อุปกรณ์ขับเคลื่อน b_2 รับแรงจากพื้นแต่ไม่มีการเคลื่อนที่ ในทางทฤษฎี อุปกรณ์ขับเคลื่อนทั้งสองจะไม่ส่งกำลังใดๆ เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในแนวราบ

ข้อดีของหุ่นยนต์เดินที่มีกลไกและการควบคุมแต่ละขาแยกเป็นอิสระคือ มีความสามารถในการปรับท่าเดินให้เหมาะสมกับพื้นผิว แต่ข้อด้อยที่ต้องพิจารณาคือ กลไกและการควบคุมขาหุ่นยนต์มีความสลับซับซ้อน ในกรณีที่ต้องการให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ทุกทิศทาง (3-Dimensional space) แต่ละขาของหุ่นยนต์ต้องมืองศาอิสระอย่างต่ำสามเปรียบได้กับการเคลื่อนที่ภายใน space ของ manipulator arm ดังรูปที่ 2.12 ดังนั้นถ้าหุ่นยนต์มี 6 ขา จะต้องควบคุมข้อต่อต่างๆถึง 18 แห่ง!



รูปที่ 2.12 ตัวอย่างขาคู่ขนานที่มี 3 องศาอิสระ

2.2 หุ่นยนต์ที่ใช้กลไกแบบขนาน (Parallel link robot)

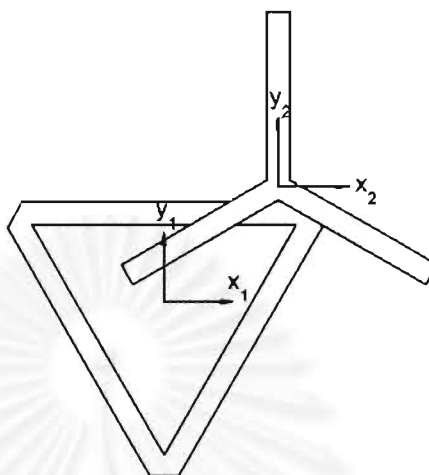
คำจำกัดความ ของกลไกแบบขนาน (Parallel) [10] คือ

1. A parallel manipulator is a closed-loop mechanism in which the end-effector is connected to the base by at least two independent kinematic chains.
2. A Fully-Parallel manipulator is a closed-loop mechanism with an n degree-of-freedom end-effector connected to the base by n independent chains, which have at most two links and are actuated by a unique prismatic or rotary actuator.

เปรียบเทียบระหว่างกลไกแบบขนานกับกลไกแบบอนุกรม (Serial) เช่น กลไกของแขนกลโดยทั่วไป ข้อต่อหนึ่งของกลไกแบบขนาน จะมีจุดต่อกับข้อต่ออื่นๆ มากกว่าสองจุดขึ้นไป แต่แบบอนุกรมมีจุดต่อเพียงจุดเดียว ซึ่งกลไกตามรูปที่ 2.12 จะเป็นแบบอนุกรมเช่นกัน

งานวิจัย [11], [12] เสนอรูปแบบของหุ่นยนต์เคลื่อนที่โดยใช้ขาซึ่งประกอบด้วยกรอบ (Frame) สองกรอบ เคลื่อนที่สัมผัสกัน โดยใช้กลไกข้อต่อแบบขนานและให้ขาแต่ละขายึดติดกับแต่ละกรอบ การเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นเมื่อให้กรอบหนึ่งเป็นกรอบอ้างอิง (reference frame) และอีกกรอบหนึ่งเคลื่อนที่สัมผัสกับกรอบอ้างอิงดังรูปที่ 2.13 ในลักษณะของการเลื่อนตำแหน่ง และ การหมุน (translation and rotation) ดังนั้น ถ้าให้กรอบอ้างอิงยึดติดกับพื้น จะทำให้เกิดการเดินในลักษณะเดียวกับการก้าวเท้าของมนุษย์นั่นเอง หุ่นยนต์ที่เดินในลักษณะนี้เรียกว่า หุ่นยนต์เดินแบบเฟรม (frame walking robot) ถึงแม้ว่าจะไม่สามารถเลือกตำแหน่งวางเท้าได้อย่างอิสระ แต่ก็มีความเสถียรภาพ โดยแต่ละกรอบยึดติดกับขาสามขา อีกทั้งเมื่อให้แต่ละขาสถาปัตยกรรมยึดติดได้อย่างอิสระ จะทำให้ควบคุมความลาดเอียงของแต่ละกรอบได้ โดยสรุปจะใช้ 2-

3 องศาความอิสระ ในการเคลื่อนที่รอบสัมผัสกันและ 6 องศาความอิสระ ของขาหุ่นยนต์ ดังนั้นจึงควบคุมข้อต่อทั้งหมดเพียง 8-9 แห่ง



รูปที่ 2.13 หุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่แบบ Relative frames

2.3 ส่วนประกอบอื่นๆ

ขนาด เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านเงินทุน เวลา สภาพการทำงาน และ อุปกรณ์ ซึ่งประกอบด้วย เครื่องกัด (Milling Machine) ขนาดเล็กจำนวนสองเครื่อง ประกอบทั้งสถานที่วิจัยมีขนาดเล็กและจุดมุ่งหมายของหุ่นยนต์ที่สร้างมีได้เพื่อบรรทุกน้ำหนักมาก การสร้างหุ่นยนต์ที่มีขนาดใหญ่ต้องใช้แรงงานและเงินทุนมาก อีกทั้งยังต้องใช้แหล่งกำเนิดพลังงานขนาดใหญ่ เช่น ไฮดรอลิกส์ (Hydraulics) หรือ นิวเมติกส์ (Pneumatics) ซึ่งไม่เหมาะสมกับสภาพการทำงานข้างต้น ดังนั้นหุ่นยนต์ที่สร้างในการวิจัยนี้จึงควรมีขนาดเล็ก

น้ำหนัก องค์ประกอบที่สำคัญของหุ่นยนต์ได้แก่ส่วนโครงสร้าง ซึ่งเป็นน้ำหนักส่วนใหญ่ของหุ่นยนต์ ส่วนอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Actuators) ส่วนอิเล็กทรอนิกส์ และส่วนของแหล่งพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ โดยทั่วไปโครงสร้างของหุ่นยนต์ควรมีน้ำหนักเบาเป็นผลให้อุปกรณ์ขับเคลื่อน และแหล่งพลังงาน มีขนาดเล็กลงด้วย

ตารางที่ 2.1 อุปกรณ์ขับเคลื่อนและแหล่งกำเนิดพลังงานต่างๆ

ขนาด	อุปกรณ์ขับเคลื่อน	แหล่งกำเนิดพลังงาน
เล็ก	มอเตอร์, เซอร์โว [13]	แบตเตอรี่
กลาง	มอเตอร์, นิวเมติกส์	แบตเตอรี่, Air pump
ใหญ่	นิวเมติกส์, ไฮดรอลิกส์, เครื่องยนต์สันดาปภายใน	Air pump, Fluid pump

ขนาดและน้ำหนักของมอเตอร์และเบตเตอร์ขึ้นอยู่กับ กำลัง(Power) ที่มอเตอร์หรือเบตเตอร์สามารถผลิต

วัสดุ วัสดุโดยทั่วไปในงานอุตสาหกรรมได้แก่ โลหะ พลาสติก และ ไม้ โลหะ โดยทั่วไปได้แก่ เหล็ก และ อลูมิเนียม การเลือกวัสดุพิจารณาถึงความแข็งแรงต่อน้ำหนัก ความสามารถในการตัดกลึง (Machinability) และความทนทาน ตารางเปรียบเทียบวัสดุชนิดต่างๆ [6] ดังนี้

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	ความแข็งแรงต่อน้ำหนัก	ความสามารถตัดกลึง	ความทนทาน
เหล็ก	ปานกลาง	ปานกลาง	ดี
อลูมิเนียม	ดี	ดี	ดี
พลาสติก	ดี	ดี	ปานกลาง
ไม้	ดี	ดี	ต่ำ

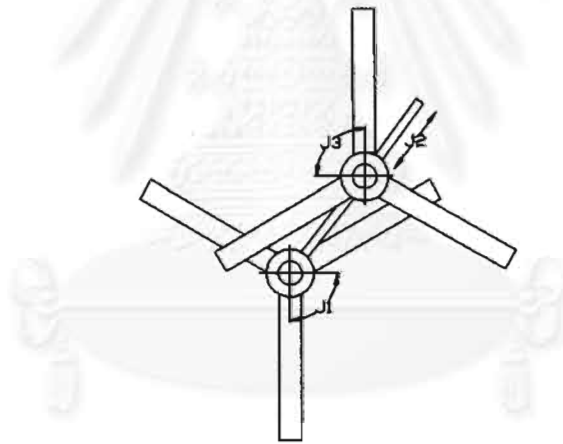
บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 การออกแบบกลไกการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ในเบื้องต้น ต้องการควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการ และสามารถหมุนตัวไปในทิศทางที่ต้องการได้ นั่นคือกรอบสองกรอบที่เคลื่อนที่สัมผัสกันประกอบด้วย องศาความอิสระ เป็น 3 ดังนั้นจึงต้องใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อน (Actuator) เช่น มอเตอร์จำนวน 3 ตัวหลักการออกแบบโดยทั่วไปคือ ให้ลักษณะของกลไกไม่มีการขัดกัน และให้มีผลลัพธ์เป็นค่าเดียว (เมื่อกำหนดค่าอินพุต ให้หนึ่งชุด คือตำแหน่งของอุปกรณ์ขับเคลื่อนทั้งสาม จะได้เอาต์พุตคือ ตำแหน่งและการหมุนของกรอบ เพียงชุดเดียว)

การออกแบบในขั้นแรกมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กลไกแบบที่ออกแบบในขั้นต้น

จะเห็นว่าหุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยการควบคุม ข้อต่อ ที่หนึ่ง และ สอง ในลักษณะของพิกัดทรงกลมและสามารถควบคุมการหมุนโดยหมุนข้อต่อที่สาม การออกแบบข้างต้นเป็นลักษณะอนุกรม โดยข้อต่อหมุนแรกต่อกับ ข้อต่อเลื่อนถัดไป แล้วจึงต่อกับข้อต่อหมุนอีกอัน ซึ่งติดกับกรอบที่สอง

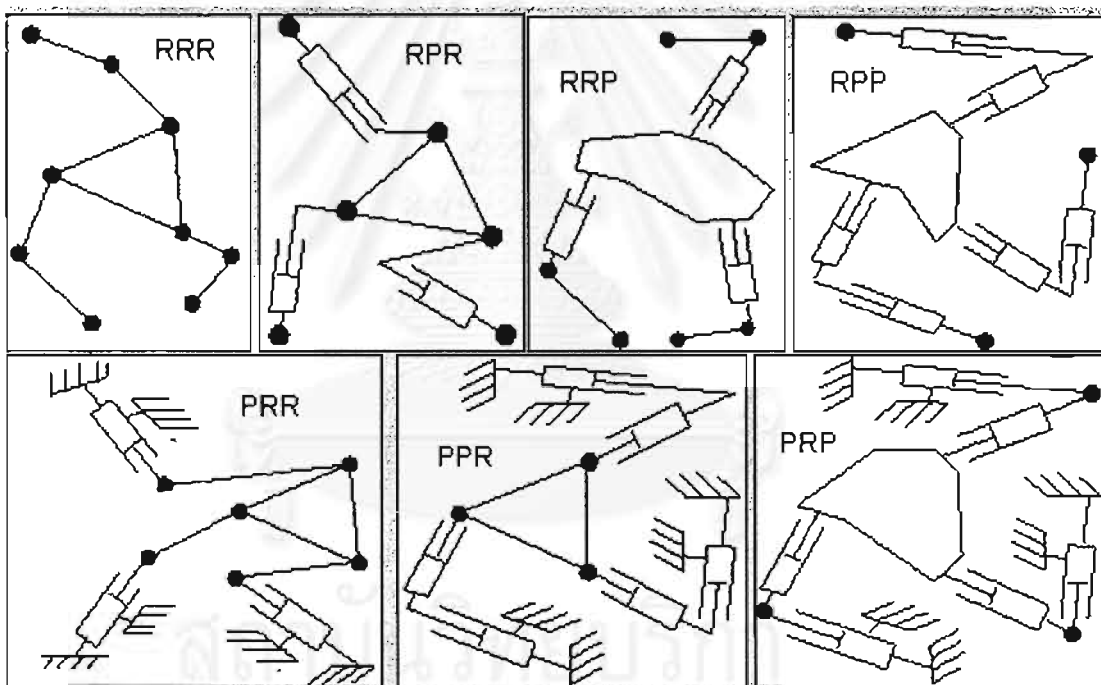
ข้อดีของการออกแบบลักษณะนี้คือ

- มีสมการการเคลื่อนที่ (Kinematics) ที่ง่าย ในรูปแบบของพิกัดทรงกลม (polar coordinates)

ข้อเสียของการออกแบบลักษณะนี้คือ

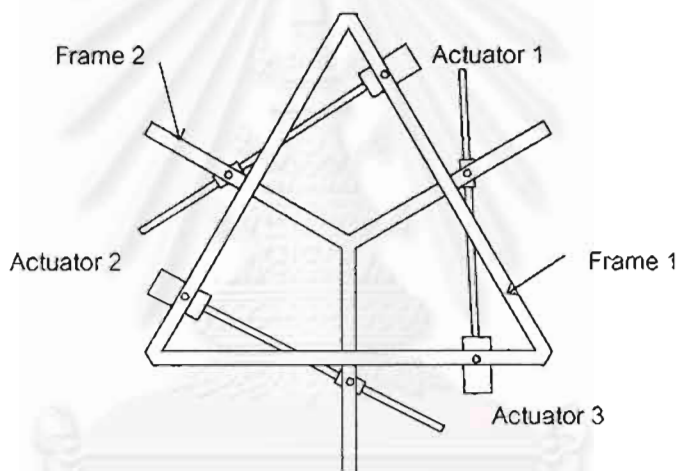
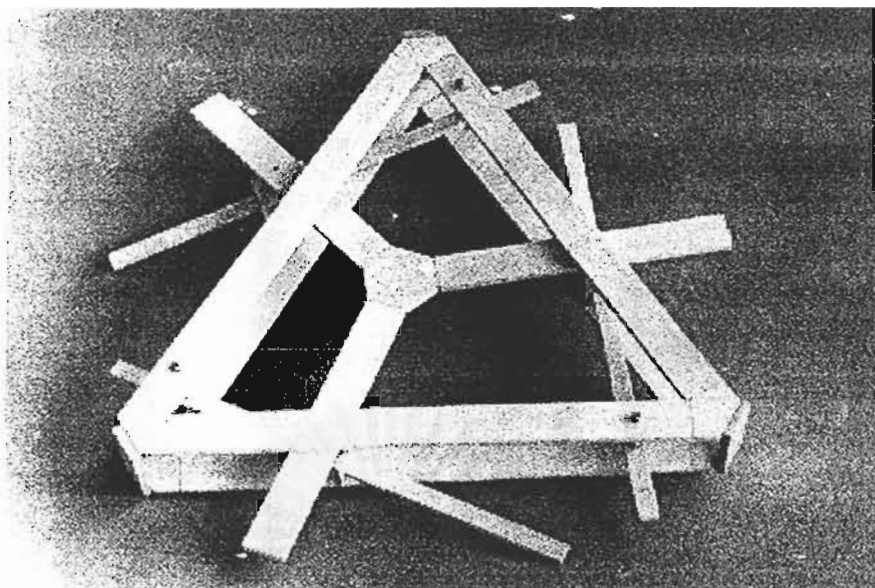
- Actuator ทั้งสามต้องรับน้ำหนักของโครงสร้างมาก โดยเฉพาะตัวที่สอง (Linear actuator) ซึ่งมีลักษณะเป็นคานยื่น (Cantilever beam) เมื่อหุ่นยนต์มีก้าวเดินยาวขึ้น จะทำให้ actuator ต้องรับน้ำหนักมากขึ้น
- ต้องใช้โปรแกรมการควบคุม Actuator แต่ละตัวต่างกัน เนื่องจากมีทั้ง ข้อต่อหมุน (revolute joint) และ ข้อต่อเลื่อน (prismatic joint)

ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการใช้กลไกแบบขนาน ซึ่งมีข้อต่อกับกรอบได้ถึงสามข้อต่อ ในกรณีของหุ่นยนต์ที่มีสามองศาความอิสระ ทำให้ข้อต่อทั้งสามแบ่งรับน้ำหนักของกรอบ กลไกแบบขนาน ที่มีสามองศาความอิสระสามารถเคลื่อนแบบเลื่อนตำแหน่ง และหมุนได้บนระนาบสองมิติ (planar) มีรูปแบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 [13] แสดงลักษณะกลไก fully parallel planar ที่มีสามองศาความอิสระ

ทดลองใช้ลักษณะกลไกแบบ RPR ตามรูปที่ 3.2 ซึ่งประกอบด้วยข้อต่อหมุนตาม (passive revolute joint) ต่อเข้ากับข้อต่อเลื่อนซึ่งเป็นตัวขับเคลื่อน (active joint) แล้วต่อกับข้อต่อหมุนตามอีกอัน ซึ่งติดอยู่กับกรอบที่สอง มีข้อต่อทั้งหมดดังกล่าวสามชุด



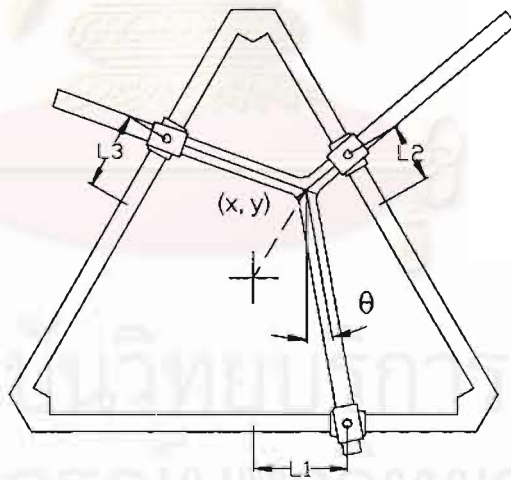
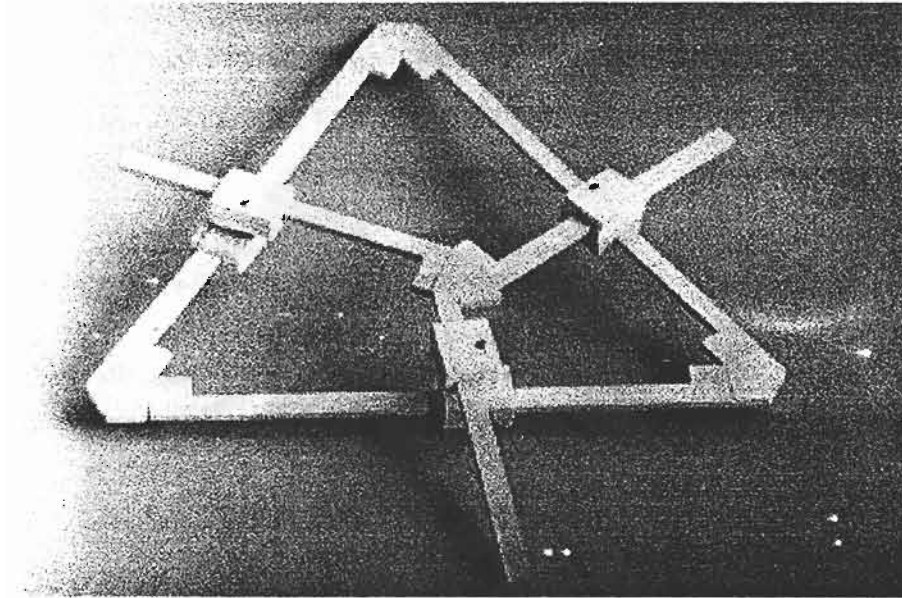
รูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลองโครงสร้าง และ Actuator ทั้งสามตำแหน่ง

จากการทำแบบจำลองกลไกดังกล่าว ตามรูปที่ 3.3 ผลปรากฏว่าข้อต่อแบบเลื่อนที่ (Prismatic joint) ทั้งสามจะแบ่งกันรองรับน้ำหนักของโครงสร้าง แทนที่จะเป็นอันเดียวดังแบบแรก และข้อต่อ ทั้งสามเป็น ข้อต่อแบบเลื่อนทั้งหมดทำให้การควบคุมทำได้ในลักษณะเดียวกัน อย่างไรก็ตามการออกแบบลักษณะนี้ก็ยังมีข้อเสียคือ

- โครงสร้างยังคงมีลักษณะของคานยื่นอยู่ ทำให้เกิดปัญหาการโก่งตัว
- มีสมการการเคลื่อนที่ที่ซับซ้อนมาก

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆแล้ว เห็นได้ว่า สมการการเคลื่อนที่ที่ซับซ้อนสามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณได้ และคอมพิวเตอร์ในปัจจุบันมีสมรรถนะสูง จึงสามารถช่วยในงานควบคุมต่างๆได้ดี

การแก้ปัญหาการโก่งตัวที่เกิดจากคานยื่น ทำได้โดยเปลี่ยนการยึดให้เป็นแบบยึดที่ปลายสองด้าน โดยใช้กลไกแบบ PRP ดังแสดงในรูปที่ 3.4 จากแบบจำลองที่ได้สร้างขึ้น แสดงให้เห็นว่า ลักษณะกลไกเช่นนี้สามารถทำงานได้ดี และสามารถลดปัญหาการโก่งตัวได้ โครงสร้างมีความสลับซับซ้อนน้อยลง และมีน้ำหนักเบาขึ้น



รูปที่ 3.4 แบบจำลองที่สร้างขึ้น ภายหลังจากเปลี่ยนแปลงการยึดให้เป็นแบบ การยึดที่ปลายทั้งสองด้าน

3.2 อุปกรณ์ขับเคลื่อน

อุปกรณ์ขับเคลื่อนโดยทั่วไปได้แก่ เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ซึ่งสามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วได้อย่างมีประสิทธิภาพ เราสามารถแบ่งประเภทเซอร์โวมอเตอร์ ตาม

ลักษณะการทำงานได้คือ DC Servo Motor และ DC Brushless Servo Motor ซึ่งมีข้อได้เปรียบ DC Servo Motor คือ สามารถจ่ายกำลังได้มากกว่า DC Servo Motor ที่มีขนาดและน้ำหนักใกล้เคียงกัน หรือกล่าวคือมีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักดีกว่า DC Servo Motor แต่ก็มีข้อเสียคือ มีราคาแพงทั้งตัวมอเตอร์และวงจรรขับ เนื่องจากการแปลงกระแสไฟที่จะส่งให้มอเตอร์ ให้เป็นรูปคลื่น 3 เฟส เรียงลำดับกันอย่างถูกต้อง ทำให้วงจรรขับมีความซับซ้อน

เนื่องจากหุ่นยนต์เดินไม่ต้องการกำลังขับและความเร็วที่สูง เมื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆ เห็นได้ว่า DC Servo Motor มีความสามารถเพียงพอในการใช้งาน และราคาไม่สูงเกินไป

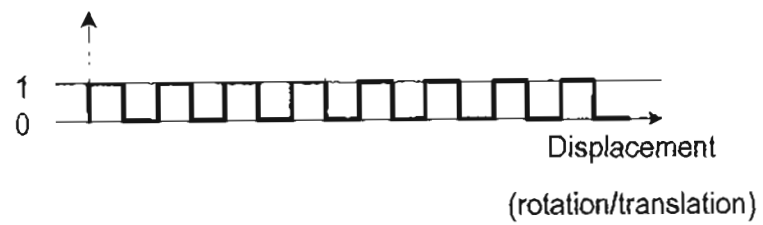
3.3 อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor)

ในการควบคุมหุ่นยนต์ต้องทราบสถานะต่างๆของหุ่นยนต์ ได้แก่ ระยะการเคลื่อนที่ของข้อต่อ สถานะของสวิทช์ต่างๆ เพื่อเป็นข้อมูลในการควบคุม

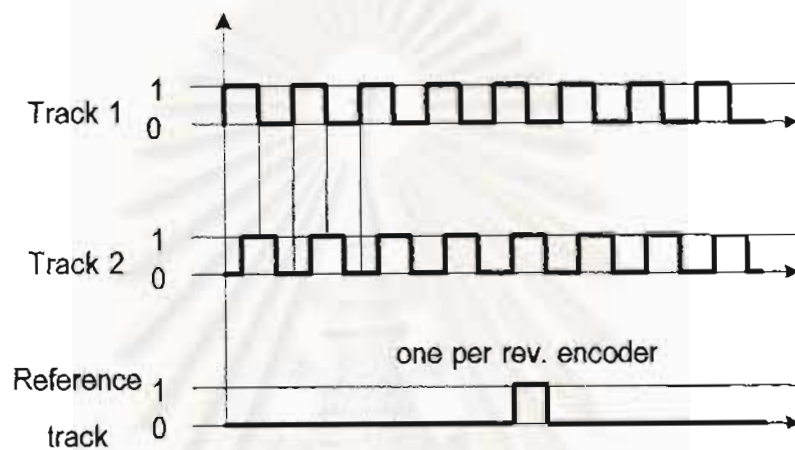
3.3.1 การวัดตำแหน่งและความเร็ว

เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจจับต่างๆติดต่อกับตัวควบคุม ซึ่งมีการทำงานแบบดิจิทัล (หัวข้อ 5.1) แต่อุปกรณ์ตรวจจับโดยทั่วไปมักมีสัญญาณแบบแอนาลอก ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์แปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิทัล แต่อุปกรณ์ประเภทตัวเข้ารหัส (เอ็นโคเดอร์, Encoder) มีสัญญาณส่งออกเป็นแบบดิจิทัลใช้วัดการเคลื่อนที่ ทั้งการเลื่อนตำแหน่งและการหมุน แบ่งเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ [14] Tachometer, Incremental encoder และ Absolute encoder ซึ่งมีลักษณะสัญญาณดังรูปที่ 3.5

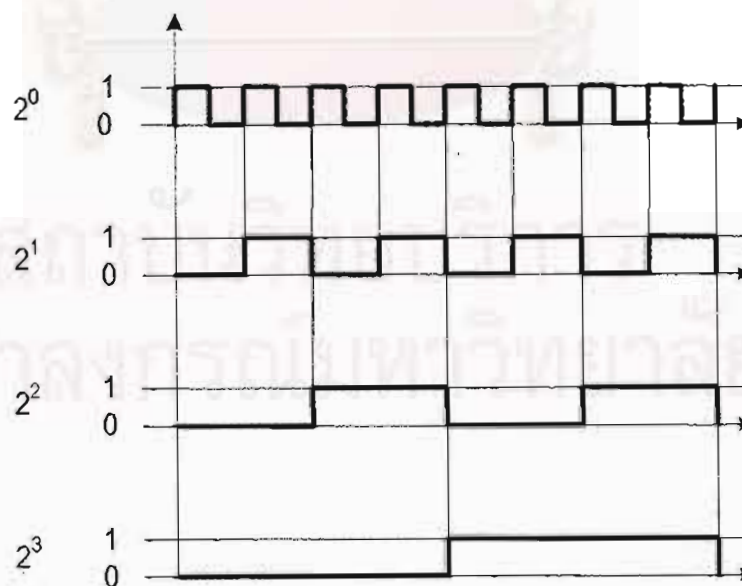
1) Tachometer encoder



2) Incremental encoder



3) Absolute encoder



รูปที่ 3.5 [14] สัญญาณของเอ็นโคเดอร์ประเภทต่าง ๆ

ลักษณะสัญญาณ 1) Tachometer encoder มีรูปแบบเป็นคลื่นรูปเหลี่ยมที่เกิดขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อมีการเลื่อนตำแหน่ง ในกรณีที่มีการเลื่อนตำแหน่งมีทิศทางเดียว การวัดตำแหน่งกระทำได้โดยการนับจำนวนคลื่นเพื่อหาระยะทางเทียบกับตำแหน่งที่เริ่มต้นนับ เห็นได้ว่าหากมีการเลื่อนตำแหน่งไปในทิศทางตรงข้ามซึ่งจะได้สัญญาณแบบเดียวกัน จะทำให้วัดตำแหน่งผิดพลาด ดังนั้น Tachometer encoder จึงเหมาะสำหรับการวัดความเร็วหรือการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียว

2) Incremental encoder สามารถวัดการเคลื่อนที่ได้ทั้งสองทิศทาง โดยใช้สัญญาณสองช่องที่มีส่วนซ้อนเหลื่อมกัน $\frac{1}{4}$ รอบ ข้อดีของ Incremental encoder คือ สามารถหมุนได้หลายรอบเท่าที่ต้องการ แต่มีข้อเสียคือ หากมีสัญญาณรบกวนที่ทำให้การนับผิดพลาด ความผิดพลาดนั้นจะคงอยู่ต่อไปถึงแม้สัญญาณรบกวนจะหายไป และหากตัวแปรที่เก็บข้อมูลตำแหน่งไว้ถูกทำลาย จะไม่สามารถวัดตำแหน่งที่ถูกกลับมาได้ เนื่องจากการวัดตำแหน่งเป็นการนับค่าสะสมเทียบกับจุดเริ่มต้นเช่นเดียวกับ Tachometer encoder

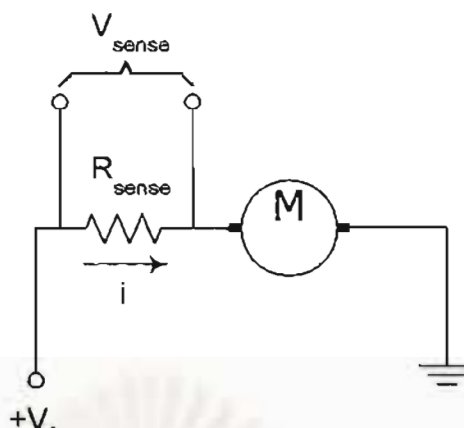
3) Absolute encoder ประกอบด้วยช่องสัญญาณหลายช่อง ส่งข้อมูลออกมาแบบขนานในลักษณะเลขฐานสอง (binary) ซึ่งแสดงตำแหน่งที่แท้จริง หากตัวแปรตำแหน่งสูญหายเนื่องจากอุบัติเหตุ เช่น ไฟฟ้าดับ เราสามารถอ่านตำแหน่งที่ถูกต้องกลับมาได้ทันทีเมื่อระบบทำงานได้ปกติ ข้อเสียคือหากเคลื่อนที่ในระยะทางไกลช่องสัญญาณต้องมีเป็นจำนวนมากและโดยทั่วไป Absolute encoder จะมีราคาสูงกว่า Incremental encoder มาก

เมื่อเปรียบเทียบอุปกรณ์ตรวจวัดต่าง ๆ เห็นได้ว่า Incremental encoder มีความเหมาะสมในการวัดตำแหน่ง เพราะสามารถหมุนได้หลายรอบ วัดได้ทั้งสองทิศทาง และมีราคาไม่แพง

3.3.2 การวัดแรง

หากสามารถวัดแรงกดที่ขาหุ่นยนต์ได้ จะสามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้มีเสถียรภาพมากขึ้นได้ โดยการแบ่งให้แต่ละขาปรับน้ำหนักเท่า ๆ กัน

เราสามารถวัดแรงที่ขาหุ่นยนต์กดบนพื้นด้วยวิธีทางอ้อม โดยการวัดกระแสของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นลงของขา หรืออีกนัยหนึ่ง คือการวัดแรงดันคร่อมตัวต้านทานที่ต่อระหว่างแหล่งจ่ายพลังงานและมอเตอร์ดังรูปที่ 3.6



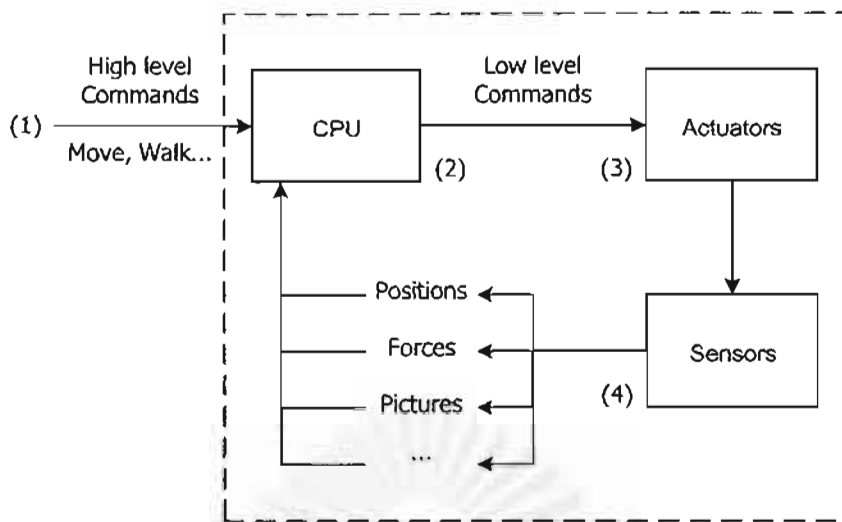
รูปที่ 3.6 การต่อวงจรเพื่อวัดกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์

3.4 รูปแบบตัวควบคุมและการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการควบคุม

ส่วนประกอบสำคัญส่วนหนึ่งของหุ่นยนต์ คือ ส่วนควบคุมและประมวลผล ซึ่งประกอบด้วย ตัวประมวลผล เช่น คอมพิวเตอร์ หรือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MicroController) ส่วนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ทำหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้ และประมวลผลในระดับล่าง เช่น วงจรนับ และ รับสถานะการทำงานของลิมิตสวิตช์ (Limit switch) เป็นต้น การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ พิจารณาปัจจัยต่างๆ คือ

1. ราคา
2. ความสามารถในการประมวลผล ได้แก่ ขนาดหน่วยความจำ และ ความเร็วของตัวประมวลผล
3. ความซับซ้อนในการประดิษฐ์ หรือ ปรับปรุงแก้ไขโปรแกรมควบคุม
4. ขนาด

หลักการควบคุมหุ่นยนต์คือการคำนวณค่าที่จะส่งไปควบคุมอุปกรณ์ขับเคลื่อน ตามคำสั่งระดับสูง เช่น คำสั่งเคลื่อนตำแหน่งหุ่นยนต์ โดยอาศัยข้อมูลที่รับเข้ามา ได้แก่ ตำแหน่งของข้อต่อเคลื่อนต่างๆ และ สถานะของสวิตช์ต่างๆ แล้วทำซ้ำไปเรื่อยๆ เรียกว่า วงวนการควบคุม (Control loop) การคำนวณดังกล่าวต้องใช้รูปแบบการประมวลผลที่ซับซ้อน เห็นได้ว่า หากหุ่นยนต์มีความสามารถสูงขึ้น มีอุปกรณ์ตรวจรู้มากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ตรวจวัดระยะด้วยแสงอินฟราเรด หรือ กล้องถ่ายภาพ การประมวลผลย่อมใช้เวลามากขึ้นตามไปด้วยวงวนการควบคุมแสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.7 วงวนการควบคุมหุ่นยนต์

3.4.1 ขนาดหน่วยความจำและความเร็วในการประมวลผล

จากรูปที่ 3.7 อุปกรณ์หมายเลข 2 ถึง 4 แสดงวงวนการควบคุม ในวงนี้ตัวประมวลผลทำหน้าที่รับข้อมูลจากภายนอก ประมวลผลข้อมูล แล้วจึงส่งสัญญาณควบคุมไปยังอุปกรณ์ขับเคลื่อน ถ้าสามารถประมวลผลได้เร็ว วงวนการควบคุมจะใช้เวลาสั้นลง ทำการการควบคุมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น ความถี่ในการสุ่มค่า (Sampling frequency) คือ

$$f_{\text{sampling}} = \frac{1}{t_{\text{sampling}}}$$

ควรมีค่ามาก แต่ในทางกลับกัน หากอัตราการเก็บข้อมูลสูงมาก การคำนวณในแต่ละช่วงอาจช้ากว่าช่วงเวลาสุ่มตัวอย่าง ซึ่งเป็นผลให้ระบบการควบคุมล้มเหลวได้ตัวอย่างการคำนวณระยะเวลาวงวนการควบคุมที่ช้าที่สุดสำหรับ Sampling frequency ค่าหนึ่ง กำหนดให้ Sampling frequency = 100 Hz.

$$t = \frac{1}{100} = 0.01 \text{ s.}$$

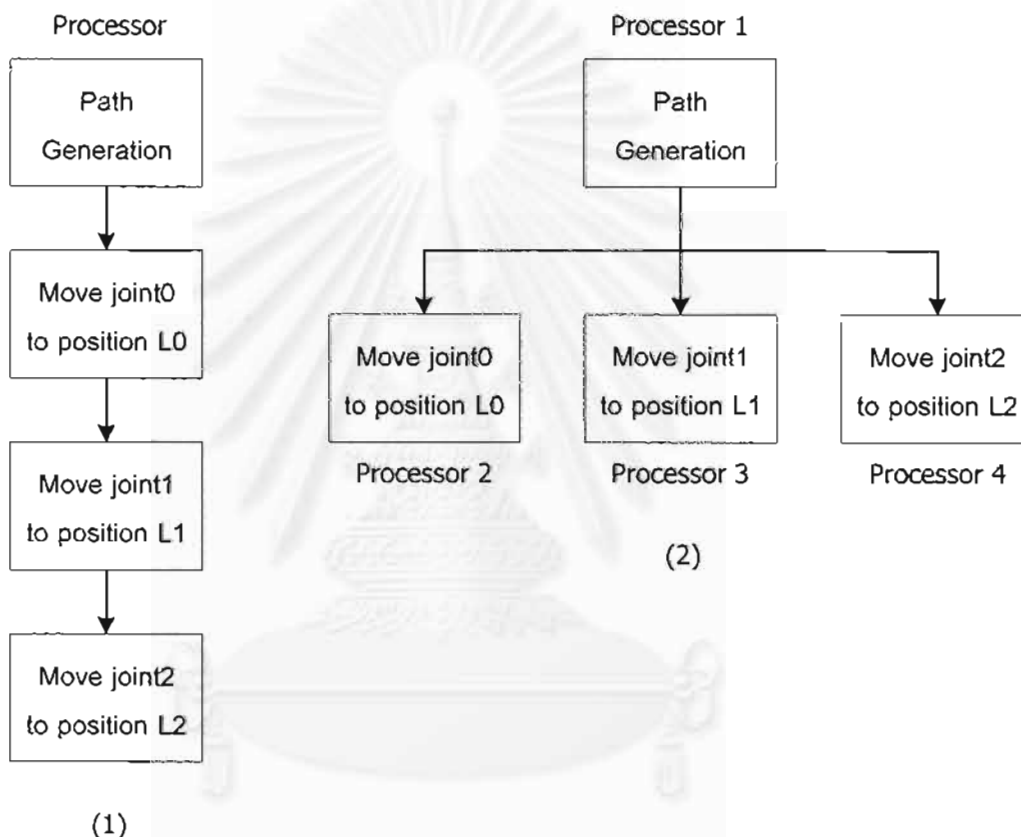
ดังนั้นเวลาประมวลผลในแต่ละวงวนจะต้องไม่เกิน 0.01 วินาที หรือ 10 ms.

การประมวลผลดังกล่าวส่วนใหญ่คือ การคำนวณฟอร์เวิร์ด และ อินเวิร์สคิเนแมติกส์ซึ่งมีความซับซ้อน การแก้ไขเพื่อให้เวลาในการประมวลผลสั้นลง คือการใช้ตาราง (Look-up table) เป็นตารางที่คำนวณค่าเอาท์พุตจากค่าที่รับเข้ามาอินพุตเก็บเอาไว้ล่วงหน้า

เมื่อมีข้อมูลเข้ามาชุดหนึ่ง ตัวประมวลผลจะค้นหาค่าที่เหมาะสมในตาราง โดยอาจใช้การประมาณค่าในช่วง (Interpolate) หรือนอกช่วง (Extrapolate) ผลที่ตามมาของการใช้ตารางคือ ตัวประมวลผลต้องมีหน่วยความจำ (memory) เป็นจำนวนมาก

3.4.2 รูปแบบการควบคุม

การควบคุมหุ่นยนต์โดยทั่วไปคือการควบคุมตำแหน่ง ความเร็ว หรือ ความเร่งของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ ดังนั้นรูปแบบการควบคุมอาจเป็นได้ดังนี้



รูปที่ 3.8 รูปแบบการควบคุม

1) แบบอนุกรม

2) แบบขนาน

การประมวลผลแบบแรก ใช้ตัวประมวลผลหนึ่งตัว แต่การทำงานต้องรอดตามลำดับ ตั้งแต่ข้อต่อหนึ่งถึงข้อต่อสามหรือแบบอนุกรม (Serial) การควบคุมอีกรูปแบบหนึ่งคือแบบขนาน (Parallel) มีตัวประมวลผลหลักเพื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยรวม เพื่อคำนวณการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ หลังจากนั้นส่งคำสั่งการเคลื่อนที่ไปให้ตัวประมวลผลระดับล่าง ซึ่งทำหน้าที่เลื่อนข้อต่อ การควบคุมแบบขนานสามารถเคลื่อนข้อต่อแต่ละอันได้พร้อมกัน จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าการควบคุมแบบอนุกรม แต่ต้องใช้ตัวประมวลผลหลายตัว

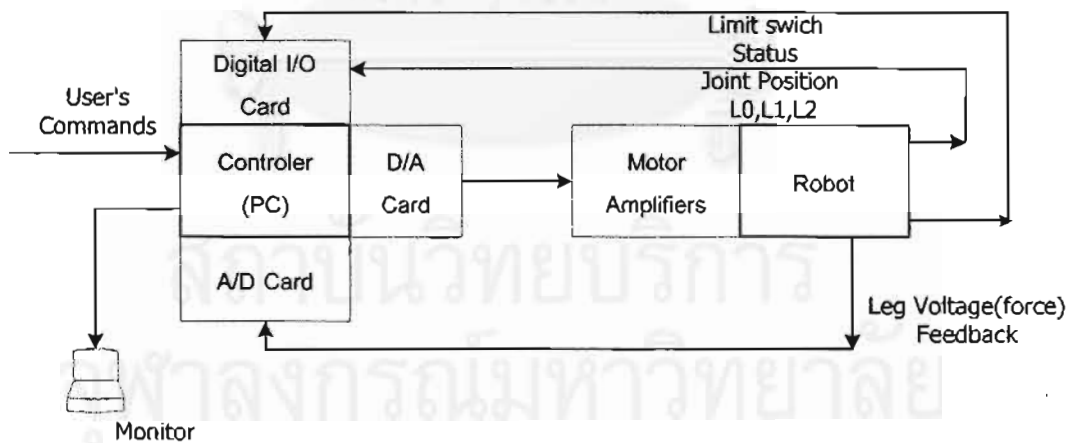
3.4.3 ตัวประมวลผล

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น การประมวลผลที่เร็วต้องใช้ตัวประมวลผลที่มีความสามารถสูง และการควบคุมแบบขนานต้องใช้ตัวประมวลผลหลายตัว ตัวประมวลผลต่าง ๆ ที่มีอยู่โดยทั่วไป ได้แก่ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal computer, PC) และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือ Single board computer

พีซี (PC) มีขนาดใหญ่และราคาสูงแต่มีความเร็วสูง ในขณะที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับการออกแบบให้ทำงานได้ด้วยตัวเองและไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ต่อพ่วง (Peripheral) ต่าง ๆ แต่มีหน่วยความจำน้อยกว่าจึงมีขนาดเล็กกว่ามากและมีราคาต่ำ สามารถใช้ได้หลายตัว

แต่เมื่อพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ แล้ว ถึงแม้ว่าไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีความเหมาะสมกับการพัฒนาไมบอยล์โรบอตมากกว่าพีซี แต่ในแง่การพัฒนาโปรแกรมบนพีซีมีความสะดวกกว่า และสามารถประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อเพิ่มความสามารถของหุ่นยนต์ได้ง่าย และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่มีในขณะนี้ ได้แก่ วงจรขยาย (Amplifier) สำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ ซึ่งควบคุมโดยสัญญาณแรงดันไฟฟ้า ซึ่งจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต่อเพิ่ม เนื่องจากผู้วิจัยสามารถหาอุปกรณ์ดังกล่าวสำหรับพีซี ได้ง่ายและมีคุณภาพสูง อีกทั้งยังสามารถหาพีซี ที่มีราคาต่ำและมีความเร็วสูงพอในการประมวลผลได้

การควบคุมโดยใช้พีซีมีรูปแบบดังนี้



รูปที่ 3.9 รูปแบบการควบคุมโดยใช้พีซี

คล้ายกับการควบคุมแบบขนาน ที่มีพีซีเป็นทั้งตัววิเคราะห์การเดินโดยรวมของหุ่นยนต์ และทำหน้าที่เคลื่อนข้อต่อ พีซีสามารถส่งสัญญาณควบคุมไปยังข้อต่อทั้งสามในระยะเวลาติดต่อกัน โดยไม่จำเป็นต้องรอการให้จบการเคลื่อนที่ตามลำดับ ภายในหนึ่งวงวนการควบคุม และรับสัญญาณเข้าเพื่อประมวลผล และส่งสัญญาณควบคุมใหม่

3.4.4 วงจรขับมอเตอร์

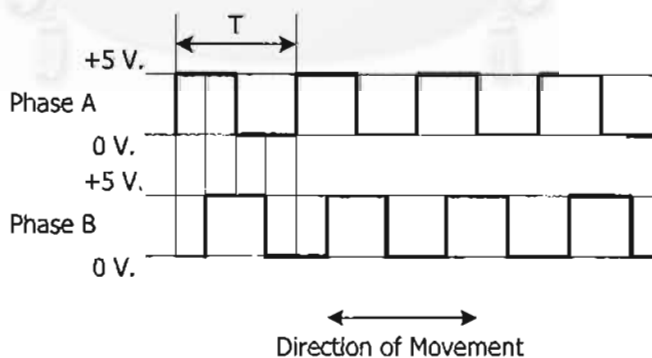
วงจรขับมอเตอร์ใช้วงจร DC Brush Servo Amplifier รุ่น 4212P จาก Copley Controls Corporation จ่ายกระแสทำงานติดต่อกันได้ 6.0 amp. และกระแสสูงสุด 12.0 amp. ที่แรงดัน 22-120 โวลต์ รายละเอียดหาได้จาก [15]

3.4.5 วงจรอื่นๆ

การออกแบบสร้างวงจรขึ้นเอง พิจารณาจากปัจจัยต่างคือ ความซับซ้อนของวงจร อุปกรณ์ที่มีจำหน่าย จุดประสงค์หลักของการสร้างวงจรเสริมคือช่วยลดการทำงานของตัวประมวลผล และความซับซ้อนของการประดิษฐ์โปรแกรมควบคุม เช่น วงจรนับ (Counter) ซึ่งทำหน้าที่สัญญาณป้อนกลับของตำแหน่งของข้อต่อเลื่อน ทางเลือกอื่นที่ไม่ใช้วงจรมับคือ ให้ตัวประมวลผลรับสัญญาณจากเอ็นโคเดอร์โดยตรง จากที่กล่าวมาแล้วว่า Incremental encoder จะส่งสัญญาณออกมาในลักษณะคลื่นรูปเหลี่ยม (square wave) ซึ่งการนำสัญญาณนี้มาใช้ในการหาตำแหน่งต้องนับจำนวนคลื่นที่ผ่านไปภายในหนึ่งวงวนการควบคุมแล้วจึงนำไปสะสมกับค่าเดิม การทำให้ค่าถูกต้องตัวประมวลผลต้องนับสัญญาณตลอดเวลาการทำงาน หากตัวประมวลผลต้องทำงานอื่นในขณะที่มีสัญญาณนับเข้ามาจะทำให้ค่าในการนับผิดพลาด

3.4.5.1 วงจรนับขึ้น/ลง (UP/DOWN Counter)

เป็นวงจรที่อ่านสัญญาณจากเอ็นโคเดอร์เพื่อบอกตำแหน่งของข้อต่อเลื่อน ลักษณะสัญญาณของ เอ็นโคเดอร์ เป็นดังนี้



รูปที่ 3.10 สัญญาณจากเอ็นโคเดอร์

ทิศทางการหมุนจากซ้ายไปขวาสัญญาณ A จะนำหน้าสัญญาณ B 90 องศา จากรูปที่ 3.10 T เป็นคาบของสัญญาณ มีค่า 360 องศา สัญญาณ A นำหน้าสัญญาณ B เป็นเวลา $T/4$ หรือ 90

องศา ในทำนองกลับกันถ้าเคลื่อนที่จากขวาไปซ้าย สัญญาณ B จะนำหน้าสัญญาณ A 90 องศาเช่นกัน จากลักษณะของสัญญาณนี้สามารถทำให้ทราบทิศทางการหมุนได้

วงจรที่สร้างขึ้น จะใช้แผงวงจรรวม (Integrated circuit, ไอซี) ที่มีจำหน่ายทั่วไปให้มากที่สุดโดยทั่วไปเป็นไอซีตระกูล TTL การแยกสัญญาณเดินหน้าหรือถอยหลังใช้ไอซี 7474 Dual D-type flip-flop [16] ซึ่งมีการทำงานตามตารางดังนี้

ตารางที่ 3.1 การทำงานของ 7474 Dual flip-flop

Inputs				Outputs	
Preset	Clear	Clock	D	Q	\bar{Q}
L	H	X	X	H	L
H	L	X	X	L	H
L	L	X	X	H*	H*
H	H	↑	H	H	L
H	H	↑	L	L	H
H	H	L	X	Q_0	\bar{Q}_0

วงจรที่ใช้งานดูได้จากภาคผนวก ก.

เลข 1 และ 2 ที่หน้าชื่อสัญญาณแสดงให้เห็นว่าเป็นขาสัญญาณของ flip-flop ตัวที่ 1 หรือ 2 (ไอซี นี้ประกอบด้วย flip-flop จำนวนสองตัว) วงจรข้างต้นมีลักษณะการทำงานดังนี้

ตารางที่ 3.2 การทำงานของ 7474 Dual flip-flop หลังจากกำหนดอินพุตบางตัว

	Preset	Clear	Clock	D	\bar{Q}
❶	H	L	X	X	H
❷	H	H	↑	H	L
❸	H	H	L	X	\bar{Q}_0

เมื่อสถานะของสัญญาณ B ซึ่งในกรณีนี้คือเป็นสัญญาณ Clock ของ flip-flop ตัวที่ 1 เป็นขอบขึ้น (Positive edge ในตารางแสดงสัญลักษณ์ ↑ หมายถึงการเปลี่ยนสถานะจากต่ำไปสูง ในทางไฟฟ้าโดยทั่วไปคือการเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าจาก 0 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ หรือแทนด้วยสัญลักษณ์ "0" และ "1" หรือ "H" และ "L") เมื่อเป็นการเดินหน้า สัญญาณ A ซึ่งนำสัญญาณ B จะมีสถานะ H ดังนั้นจาก ❷ สัญญาณนับขึ้น (Count Up Signal, $1\bar{Q}$) จะมีสถานะ L ต่อจากนั้น สัญญาณ Clear และ D (ในกรณีนี้คือสัญญาณ A) จะเปลี่ยนเป็น L จาก

สัญญาณ B จะมีสถานะ H ดังนั้นจาก ② สัญญาณนับขึ้น (Count Up Signal, $1\bar{Q}$) จะมีสถานะ L ต่อจากนั้น สัญญาณ Clear และ D (ในกรณีนี้คือสัญญาณ A) จะเปลี่ยนเป็น L จาก ① จะเห็นว่าไม่ว่าสถานะของ Clock จะเป็นเช่นใด สัญญาณ output จะเป็น H เสมอ ท้ายสุดเมื่อสัญญาณ Clear และ D กลับเป็น H อีกครั้ง จาก ③ สัญญาณ Clock ซึ่งตามหลังอยู่มีสถานะ L สัญญาณ output จะไม่เปลี่ยนแปลง

ในทำนองเดียวกันสำหรับ flip-flop ตัวที่สอง สัญญาณ B จะเปลี่ยนเป็นสัญญาณ Clear และ D ในขณะที่สัญญาณ A จะเป็นสัญญาณ Clock ในการเดินหน้า สัญญาณ Clock จะนำหน้าสัญญาณ Clear และ D ดังนั้นเมื่อสัญญาณ Clock เป็น \uparrow สัญญาณ Clear และ D จะเป็น L ดังนั้นจาก ① สัญญาณนับลง (Count Down Signal, $2\bar{Q}_0$) จะเป็น H ต่อจากนั้น เมื่อสัญญาณ Clock เป็น L สัญญาณ Clear และ D เป็น H สัญญาณเอาต์พุตจะไม่เปลี่ยนแปลง สัญญาณนับลงจะมีสถานะ H ตลอดในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

ในทำนองกลับกัน เมื่อเป็นการเคลื่อนที่ถอยหลัง สัญญาณนับลงจะเป็นเช่นเดียวกับสัญญาณนับขึ้นในกรณีเดินหน้า และสัญญาณนับขึ้นจะมีสถานะ H ตลอด

ขั้นต่อไปคือ การนำสัญญาณนับขึ้นและนับลงไปผ่านตัวนับให้ได้ผลออกมาเป็นตัวเลข ไอซีที่ทำหน้าที่นับขึ้นและลงได้แก่ 74193 Synchronous 4-bit Binary Up/Down Counter (Dual Clock with Clear) [16] วงจรที่ใช้งานดูได้จากภาคผนวก ก.

สัญญาณเอาต์พุต ที่ออกมาจาก ไอซี แต่ละตัวมี 4 สัญญาณหรือ 4 บิต แต่ละบิตมีสถานะที่เป็นได้สองสถานะคือ H และ L หรือ 0 และ 1 ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า สัญญาณเป็นลักษณะเลขฐานสอง (Binary) ซึ่งสามารถแสดงค่าเลขฐานสิบ (Decimal) ได้ตั้งแต่ 0 ถึง 15 ดังแสดงตามตารางดังนี้

ตารางที่ 3.3 เลขฐานสิบที่แสดงโดยเลขฐานสอง

บิต(Binary)	ตัวเลข(Decimal)	บิต(Binary)	ตัวเลข(Decimal)
0000	0	1000	8
0001	1	1001	9
0010	2	1010	10
0011	3	1011	11
0100	4	1100	12
0101	5	1101	13
0110	6	1110	14
0111	7	1111	15

ระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด L = 300 มิลลิเมตร
 ความละเอียดของ เอ็นโคเดอร์ r = 390 พัลส์ต่อรอบ
 ระยะ Pitch ของ Ball screw P = 4 มิลลิเมตร
 จำนวนพัลส์

$$= \frac{Lr}{P}$$

$$= \frac{300 \times 390}{4}$$

$$= 29250 \text{ Pulses}$$

จะเห็นได้ว่า 15 บิตสามารถแสดงผลได้ $2^{15} = 32768$ พัลส์ ดังนั้นจึงต้องใช้ ไอซี 74193 จำนวนสี่ตัว

3.4.5.2 วงจรควบคุมทิศทางมอเตอร์

วงจรควบคุมทิศทางของมอเตอร์ ใช้สำหรับควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของขา โดยใช้ไอซี SGS-Thomson L298 [17] วงจรที่ใช้งานดูได้จากภาคผนวก ก. เมื่อขาหุ่นยนต์แต่ละพื้น แรงกดที่ขาจะมากขึ้นทำให้ใช้กระแสในการขับมอเตอร์มากขึ้น ที่ขา 15 (ดูภาคผนวก ก.) จะต่อตัวต้านทานค่าต่ำเพื่อวัดกระแสดังกล่าวนี้ และส่งสัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวต้านทานนี้ไปยังช่องรับสัญญาณของการ์ด A/D ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป
 ตารางแสดงสถานะการทำงานเป็นดังนี้

ตารางที่ 3.4 การทำงานของ L298

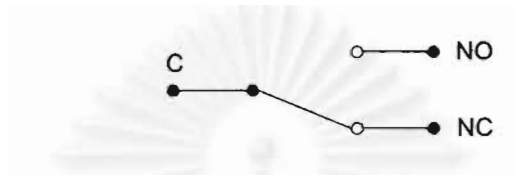
Inputs		Function
$V_{en}=H$	C = H; D = L	Forward
	C = L; D = H	Reverse
	C = D	Fast Motor Stop
$V_{en}=L$	C = X; D = X	Free Running Motor Stop

การควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของขาทำได้โดยส่งสัญญาณ 01 หรือ 10 ไปยังขา C และ D และส่งสัญญาณ 00 หรือ 11 เพื่อหยุดการเคลื่อนที่

3.4.5.3 วงจรอ่านสถานะของลิมิตสวิตช์

ลิมิตสวิตช์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบระยะปลอดภัยของกลไก เช่นระยะของข้อต่อที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อกลไกเคลื่อนที่สัมผัสลิมิตสวิตช์จะส่งสัญญาณมาที่ตัวประมวลผล เพื่อควบคุมให้กลไกหยุดการเคลื่อนที่

ลักษณะโดยทั่วไปของลิมิตสวิตช์ได้แก่ลิมิตสวิตช์สองทางแสดงในรูปที่ 3.11

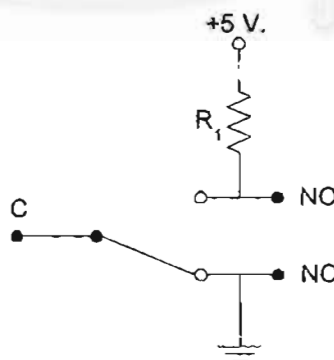


รูปที่ 3.11 วงจรของลิมิตสวิตช์สองทาง

สัญลักษณ์ด้วยย่อคือ

C	=	Common
NC	=	Normally close
NO	=	Normally open

Common เป็นขาร่วมแสดงดังรูปที่ 3.11 ก่อนกดสวิตช์วงจรระหว่าง Common กับ NC จะปิด และระหว่าง Common กับ NO จะเปิด ในทำนองกลับกัน เมื่อกดสวิตช์ วงจรระหว่าง Common กับ NC จะเปิด และ ระหว่าง Common กับ NO จะปิด การติดต่อกับตัวประมวลผลจะต่อวงจรดังรูป



รูปที่ 3.12 การต่อวงจรรับสถานะลิมิตสวิตช์

ในกรณีที่ไม่ได้กดสวิตช์ ขา Common จะต่อกับ NC ซึ่งต่อกับ Ground (ศักย์ไฟฟ้า 0 โวลต์) สัญญาณที่ส่งไปยังตัวประมวลผลจะเป็น "0" และเมื่อกดสวิตช์ขา Common จะ

ดอ์กับ NO ซึ่งมืตักยัไฟฟ้า 5 โวลต์ ดั่งนั้ันสัญญาณจะมีค่า "1" จากรูปที่ 3.12 ตัวด้านทาน R₁ เรียกว่า Pull up register [18] ทำหน้าที่ดึงให้สัญญาณ "1" มืตักยัไฟฟ้าใกล้เคียง 5 โวลต์

3.4.6 อุปกรณ์ต่อพ่วง

อุปกรณ์ต่อพ่วงกับคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการควบคุม ได้แก่ การ์ดแปลงสัญญาณแอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D) และดิจิตอลเป็นแอนาลอก (D/A) และการ์ดรับส่งข้อมูลดิจิตอล การ์ดที่ใช้ได้แก่

- การ์ด D/A Metrabyte DDA-06 [19] มีช่องสัญญาณ D/A 6 ช่อง และช่องรับส่งสัญญาณดิจิตอลขนาด 24 บิต 1 ช่อง
- การ์ด A/D Acqutek PA-CP12 [20] มีช่องสัญญาณ A/D 16 ช่อง
- การ์ด ET-PC8255 [21] มีช่องรับส่งสัญญาณดิจิตอลขนาด 24 bits 3 ช่อง

รายละเอียดของการต่อช่องสัญญาณต่าง ๆ ดูได้จากภาคผนวก ข.

3.5 แหล่งจ่ายพลังงาน

เมื่อพิจารณาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ต่างๆ ทำให้ทราบความต้องการพลังงานดังนี้

- วงจรที่สร้างขึ้นโดยใช้ ไอซี TTL ใช้แรงดัน +5 โวลต์ DC
- วงจรขับมอเตอร์ ใช้แรงดันไม่ต่ำกว่า 24 โวลต์
- ตัวประมวลผลพีซี ใช้แรงดัน ± 5 โวลต์ และ ± 12 โวลต์

พลังงานที่จ่ายให้แก่คอมพิวเตอร์มาจากสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย สำหรับคอมพิวเตอร์ทั่วไปขนาด 220 โวลต์, 230 วัตต์ และพลังงานที่จ่ายให้วงจรต่างๆมาจากแบตเตอรี่ หุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ใช้แบตเตอรี่ Panasonic Rechargeable Sealed Lead-Acid จ่ายพลังงานที่ 12 โวลต์/7 แอมป์ชั่วโมง น้ำหนัก 2.5 กิโลกรัมต่ออนุกรมเพื่อให้ได้แรงดัน 24 โวลต์เพื่อจ่ายเข้าวงจรขับมอเตอร์ ส่วนวงจรดิจิตอลที่ใช้แรงดัน 5 โวลต์จะใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 7805 [21] แปลงไฟ 24 โวลต์เป็น 5 โวลต์

บทที่ 4 สมการการเคลื่อนที่ (Kinematics)

ในการควบคุมหุ่นยนต์ต้องทราบสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นตัวบอกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่เกิดจากการควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อต่าง ๆ ในทางกลับกัน เมื่อทราบตำแหน่งของหุ่นยนต์ก็สามารถคำนวณตำแหน่งของข้อต่อต่าง ๆ ได้เช่นกัน

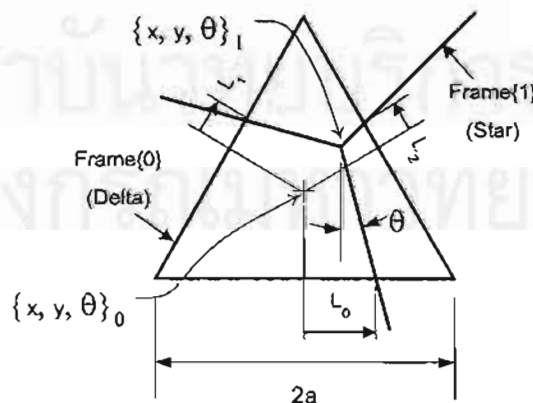
จากที่กล่าวมาข้างต้น สามารถแบ่งการคำนวณการเคลื่อนที่ได้เป็นสองส่วนคือ

- **ฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ (Forward Kinematics)** หรือสมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เป็นสมการที่ใช้คำนวณตำแหน่งกรอบ เมื่อกำหนดตำแหน่งข้อต่อภายในหุ่นยนต์
- **อินเวิร์สคิเนแมติกส์ (Inverse Kinematics)** หรือสมการการเคลื่อนที่ผกผัน เป็นสมการที่ใช้คำนวณ ตำแหน่งข้อต่อต่าง ๆ เมื่อกำหนดตำแหน่งกรอบ

การกำหนดตำแหน่งของหุ่นยนต์ กำหนดโดย ตัวแปร (x, y, θ) และตำแหน่งของข้อต่อเลื่อน กำหนดโดย (L_0, L_1, L_2) ดังแสดงในรูป 4.1

4.1 อินเวิร์สคิเนแมติกส์

เพื่อความสะดวกในการสร้างสมการจะเริ่มวิเคราะห์หาคำนวณจากสมการการเคลื่อนที่ผกผันซึ่งง่ายกว่าก่อน แล้วจึงนำสมการที่ได้ไปวิเคราะห์หาสมการการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ต่อไป



รูปที่ 4.1 การกำหนดตัวแปรที่ใช้คำนวณสมการการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.1

$$L_0 - x = \left(y + \frac{a}{\sqrt{3}} \right) \tan \theta$$

$$L_0 = x + \left(y + \frac{a}{\sqrt{3}} \right) \tan \theta \quad (4.1)$$

ในทำนองเดียวกัน

$$L_1 + \frac{\sqrt{3}y}{2} + \frac{x}{2} = \left(\frac{a}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan \theta$$

$$L_1 = \left(-\frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan \theta \quad (4.2)$$

และ

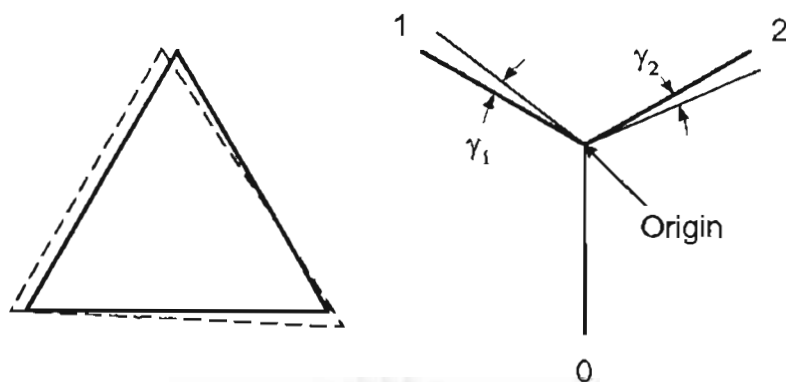
$$L_2 - \frac{\sqrt{3}y}{2} + \frac{x}{2} = \left(\frac{a}{\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan \theta$$

$$L_2 = \left(-\frac{x}{2} + \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan \theta \quad (4.3)$$

ในการประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ จะใช้สมการที่ 4.1 ถึง 4.3 เพื่อคำนวณตำแหน่งของข้อต่อเลื่อน จากตำแหน่งกรอบที่กำหนดให้

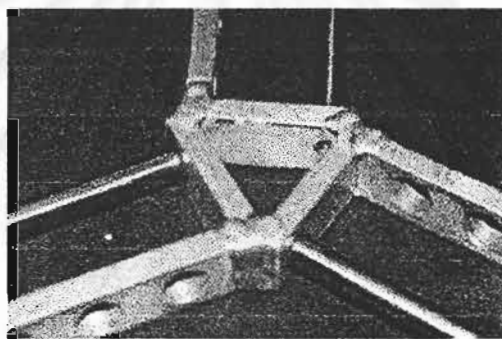
4.2 สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ ที่ปรับปรุงแก้ไขแล้ว

เนื่องจากในการสร้างหุ่นยนต์ ส่วนประกอบต่างๆย่อมมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นสมการที่หาได้จากหัวข้อ 4.1 ย่อมคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ความผิดพลาดทางด้านโครงสร้างของหุ่นยนต์ได้แก่ ความผิดพลาดเชิงมุม และระยะของกรอบ ดังแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความผิดรูปของกลไก

หุ่นยนต์ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นมีความผิดพลาดเชิงมุมของกรอบสามแฉก (Star Frame) เนื่องจากใช้วิธีการเชื่อมดังรูป



รูปที่ 4.3 รอยเชื่อมกรอบสามแฉก

ความผิดพลาดของกรอบสามเหลี่ยม (Delta frame) มีค่าน้อย เนื่องจากทั้งสามด้านของสามเหลี่ยมมีความยาวมาก (มากกว่า 40 เซนติเมตร) และแต่ละด้านมีความคลาดเคลื่อนน้อย (ไม่เกิน 1 มิลลิเมตร) ความเบี่ยงเบนจากความเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่าจะน้อย

พิจารณาความผิดพลาดเชิงมุมของกรอบ Star ให้มุมคลาดเคลื่อนเป็น γ_1 และ γ_2 และกำหนดให้จุดศูนย์กลาง (x, y, θ) ผ่านแกนที่ 0 ซึ่งเป็นแกนที่ไม่มี ความคลาดเคลื่อนเชิงมุม จะได้สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ดังนี้

$$L'_0 = L_0$$

$$L'_0 = x + \left(y + \frac{a}{\sqrt{3}} \right) \tan \theta \quad (4.1)^*$$

$$L'_1 = \left(-\frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan(\theta + \gamma_1) \quad (4.2)^*$$

$$L'_2 = \left(-\frac{x}{2} + \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan(\theta + \gamma_2) \quad (4.3)^*$$

4.3 สมการพอร์เวียร์ดคิเนแมติกส์

จากหัวข้อที่ 4.1 นำสมการ 4.3 ลบออกจากสมการ 4.2

$$L_2 - L_1 = \sqrt{3}y - \sqrt{3}x \tan \theta \quad (4.4)$$

จาก (4.1)

$$\sqrt{3}L_0 = \sqrt{3}x + \sqrt{3}y \tan \theta + a \tan \theta$$

แทนค่าเพื่อหา x คูณ $\tan \theta$ เข้ากับ (3.1)

$$(L_2 - L_1) \tan \theta = \sqrt{3}y \tan \theta - \sqrt{3}x \tan^2 \theta$$

นำไปลบออกจาก 4.1 จะได้

$$\begin{aligned} \sqrt{3}L_0 - (L_2 - L_1) \tan \theta &= \sqrt{3}x + \sqrt{3}x \tan^2 \theta + a \tan \theta \\ x &= \frac{\sqrt{3}L_0 - (L_2 - L_1) \tan \theta - a \tan \theta}{\sqrt{3}(1 + \tan^2 \theta)} \end{aligned} \quad (4.5)$$

ในทำนองเดียวกันคูณ $\tan \theta$ เข้ากับ (4.1)

$$\sqrt{3}L_0 \tan \theta = \sqrt{3}x \tan \theta + \sqrt{3}y \tan^2 \theta + a \tan^2 \theta$$

นำมาบวกกับ (4.4)

$$\begin{aligned} \sqrt{3}L_0 \tan \theta + L_2 - L_1 &= \sqrt{3}y + \sqrt{3}y \tan^2 \theta + a \tan^2 \theta \\ y &= \frac{\sqrt{3}L_0 \tan \theta + L_2 - L_1 - a \tan^2 \theta}{\sqrt{3}(1 + \tan^2 \theta)} \end{aligned} \quad (4.6)$$

เพื่อหา $\tan \theta$ สมการ 4.1, 4.2 และ 4.3 มาบวกกัน

$$\begin{aligned} L_0 + L_1 + L_2 &= \sqrt{3}a \tan \theta \\ \tan \theta &= \frac{L_0 + L_1 + L_2}{\sqrt{3}a} \end{aligned} \quad (4.7.1)$$

หรือ

$$\theta = \arctan\left(\frac{L_0 + L_1 + L_2}{\sqrt{3}a}\right) \quad (4.7.2)$$

เพื่อความสะดวกในการประดิษฐ์โปรแกรม จึงใช้สมการ (4.6) เพื่อคำนวณค่า $\tan\theta$ ก่อน แล้วจึงใช้ค่าที่ได้และสมการ (4.5) และ (4.6) เพื่อคำนวณตำแหน่งต่อไป การแทนค่าสมการ (4.7.1) ลงในสมการ (4.5) และ (4.6) จะทำให้สมการมีความซับซ้อน

บทที่ 5

การควบคุม

จากหัวข้อ 3.4.3 ได้กล่าวถึงรูปแบบการควบคุมแบบตัวประมวลผลเดี่ยว โดยตัวประมวลผลจะทำหน้าที่ ประมวลผลระดับบนคือ การวิเคราะห์เส้นทางการเดิน และ ระดับล่างคือ การควบคุมแต่ละข้อต่อให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งด้วยความเร็วที่กำหนด

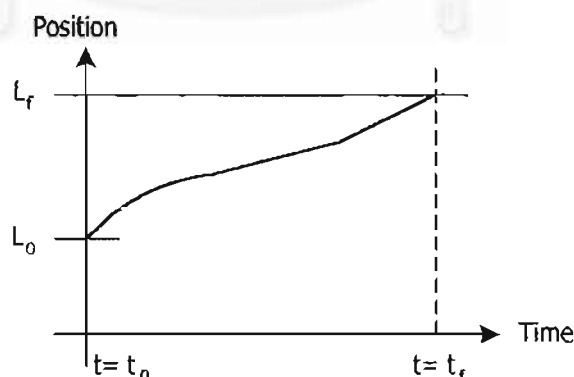
ในบทนี้จะกล่าวถึงสามส่วนใหญ่ ๆ คือ

1. การสร้างเส้นทางการเดิน
2. ตัวควบคุม
3. การเขียนโปรแกรมควบคุม

5.1 การสร้างเส้นทางการเดิน

การสร้างเส้นทางการเดินเริ่มต้นจาก การกำหนดพิกัดบนระนาบที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป แล้วคำนวณระยะเวลาการเคลื่อนที่ของข้อต่อด้วยสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ จากหัวข้อที่ 4.1 หลังจากนั้นกำหนดความเร็วในการเคลื่อนที่ หรืออีกนัยหนึ่งคือกำหนดระยะเวลาการเคลื่อนที่ไปยังจุดหมาย

พิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของข้อต่อ

ต้องการให้ข้อต่อเลื่อนจากตำแหน่ง L_0 ไปยังตำแหน่ง L_f ภายในระยะเวลา t_f รูปแบบเส้นทางที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่แบบ Cubic Polynomial [22] และ แบบเส้นตรงที่เชื่อมต่อกันด้วยเส้นโค้งแบบ Parabola ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้เส้นทางแบบ Cubic Polynomial

รูปแบบของ Cubic Polynomial เป็นดังนี้

$$L(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (5.1)$$

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ทั้งสี่ ต้องใช้สี่เงื่อนไขคือ

1) ที่เวลาเริ่มต้นและสุดท้าย ข้อต่ออยู่ที่ตำแหน่ง L_0 และ L_f ตามลำดับ

$$\begin{aligned} L(0) &= L_0, \\ L(t_f) &= L_f \end{aligned} \quad (5.2)$$

2) ที่เวลาเริ่มต้นและสุดท้าย ความเร็วเป็นศูนย์

$$\begin{aligned} \dot{L}(0) &= 0, \\ \dot{L}(t_f) &= 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

จากสมการที่ (5.1) สามารถหาความเร็วและความเร่งของเส้นทางได้คือ

$$\begin{aligned} \dot{L}(t) &= a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2, \\ \ddot{L} &= 2a_2 + 6a_3 t \end{aligned} \quad (5.4)$$

รวมสมการที่ 5.1, 5.2, 5.3 และ 5.4 เข้าด้วยกันจะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} L_0 &= a_0, \\ L_f &= a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3, \\ 0 &= a_1, \\ 0 &= a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

แก้สมการที่ 5.5 จะได้ค่าของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\begin{aligned} a_0 &= L_0, \\ a_1 &= 0, \\ a_2 &= \frac{3}{t_f^2}(L_f - L_0), \\ a_3 &= -\frac{2}{t_f^3}(L_f - L_0) \end{aligned} \quad (5.6)$$

โดยใช้สมการ 5.6 เราสามารถคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่แบบ cubic ที่เชื่อมระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดปลายการเคลื่อนที่ ในกรณีที่ความเร็วเริ่มต้นและสิ้นสุดมีค่าเป็นศูนย์

หากความเร็วเริ่มต้นและสิ้นสุดไม่เป็นศูนย์ ในกรณีการเคลื่อนที่ผ่านจุดหลายจุดอย่างต่อเนื่อง การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์มีกระบวนการเช่นเดียวกับกรณีข้างต้น โดยเปลี่ยนเงื่อนไขที่ 5.3 ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{L}(0) &= \dot{L}_0, \\ \dot{L}(t_f) &= \dot{L}_f \end{aligned} \quad (5.7)$$

จากสมการข้างต้นจะได้สมการแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ดังนี้

$$\begin{aligned} L_0 &= a_0, \\ L_f &= a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3, \\ \dot{L}_0 &= a_1, \\ \dot{L}_f &= a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \end{aligned} \quad (5.8)$$

แก้สมการข้างต้นจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\begin{aligned} a_0 &= L_0, \\ a_1 &= \dot{L}_0, \\ a_2 &= \frac{3}{t_f^2} (L_f - L_0) - \frac{2}{t_f} \dot{L}_0 - \frac{1}{t_f} \dot{L}_f, \\ a_3 &= -\frac{2}{t_f^3} (L_f - L_0) + \frac{1}{t_f^2} (\dot{L}_f + \dot{L}_0) \end{aligned} \quad (5.9)$$

โดยอาศัยสมการที่ 5.9 ร่วมกับสมการที่ 5.1 และ 5.3 เราสามารถคำนวณเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง ด้วยความเร็วที่กำหนดที่จุดเชื่อมต่อ

5.2 ตัวควบคุม

ตัวควบคุมที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) [23] โดยอาจเป็นได้ทั้งการควบคุมตำแหน่งหรือความเร็ว

ข้อดีของการควบคุมแบบพีไอดี คือ สามารถสร้างได้ง่าย และไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะทางพลศาสตร์ (Dynamics) ของระบบ ข้อเสียของการควบคุมแบบพีไอดี คือ การไม่ทราบ Dynamics ของระบบ ทำให้การควบคุมไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร งานวิจัยด้านการ

คำนวณหาแบบจำลอง Dynamic ของกลไกแบบขนาน [24] มีความซับซ้อน และในงานด้านหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ไม่ต้องการการตอบสนองที่เร็วมาก ดังนั้นตัวควบคุมแบบพีไอดีจึงเหมาะสมกับงานวิจัยนี้

ลักษณะตัวควบคุมแบบพีไอดีเป็นดังนี้

$$D(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (5.10)$$

หรือ

$$D(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

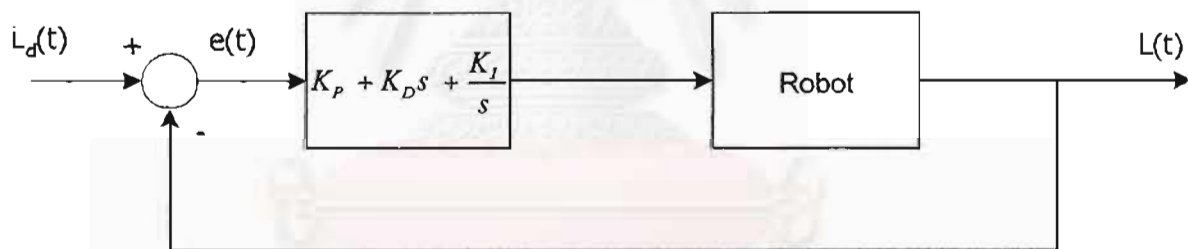
เมื่อ

K_p = อัตราขยายเชิงสัดส่วน หรือ Proportional gain

T_I = Integral time หรือ Reset time

T_D = ช่วงเวลาอนุพันธ์ หรือ Derivative time

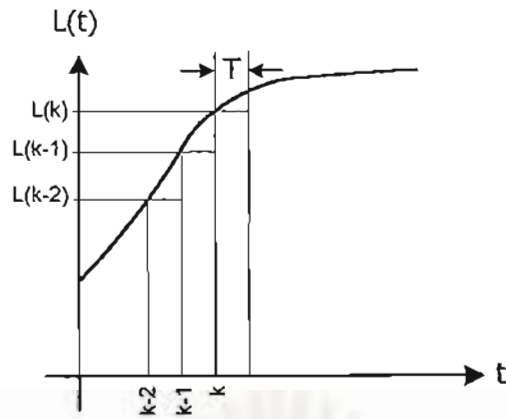
รูปแบบการควบคุมแบบป้อนกลับของระบบเป็นดังนี้



รูปที่ 5.2 การควบคุมแบบป้อนกลับ

เห็นได้ว่า $e(t)$ เป็นสัญญาณผิดพลาดมีค่าเป็น $L_d(t) - L(t)$ โดยที่ $L_d(t)$ เป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้จากสมการ 6.1 และ $u(t)$ เป็นสัญญาณควบคุมที่จะส่งไปยังหุ่นยนต์

เนื่องจากระบบควบคุมมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง(discrete) [25] ดังรูปที่ 5.3 ดังนั้นจึงแปลงระบบควบคุมตามรูปที่ 5.2 ให้เป็นรูปแบบไม่ต่อเนื่องดังนี้



รูปที่ 5.3 เส้นทางการเคลื่อนที่ของข้อต่อในรูปแบบไม่ต่อเนื่อง

การควบคุมแบบสัดส่วน

การควบคุมเชิงสัดส่วนแบบไม่ต่อเนื่องมีลักษณะเดียวกับแบบต่อเนื่อง (continuous)

Continuous

$$D(s) = K_p \Rightarrow u(t) = K_p e(t)$$

Discrete

$$u(k) = K_p e(k) \quad (5.11)$$

การควบคุมแบบอนุพันธ์

เราสามารถประมาณการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งได้จาก

Continuous

$$D(s) = K_D s \Rightarrow u(t) = K_D \dot{e}(t)$$

Discrete

$$u(k) = K_D \frac{(e(k) - e(k-1)))}{T} \quad (5.12)$$

การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral)

การแปลงระบบควบคุมแบบอินทิกรัลทำได้โดยการหาผลรวมค่าผิดพลาดก่อนหน้าทั้งหมด

Continuous

$$D(s) = \frac{K_I}{s} \Rightarrow u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt$$

Discrete

$$\begin{aligned} u(k) &= K_I T (e(k) + e(k-1) + e(k-2) + \dots + e(1) + e(0)) \\ u(k) &= K_I T e(k) + u(k-1) \end{aligned} \quad (5.13)$$

การควบคุมแบบพีไอดี

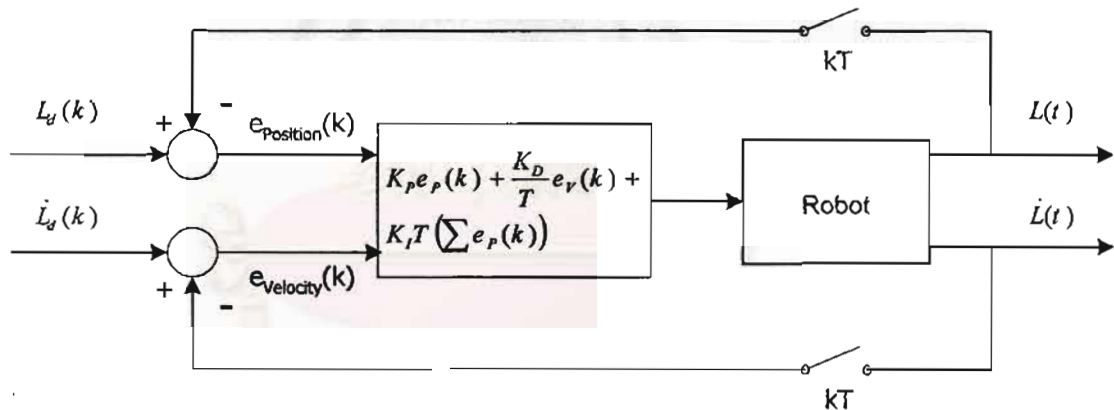
นำสัญญาณควบคุมทั้งสามแบบมารวมกันจะได้ตัวสัญญาณควบคุมแบบ พีไอดี ดังนี้

$$u(k) = K_p e(k) + K_D \frac{(e(k) - e(k-1))}{T} + K_I T \left(\sum_{i=0}^{k-1} e(i) + e(k) \right) \quad (5.14)$$

เมื่อพิจารณาสมการที่ 5.12 เห็นได้ว่า

$$\begin{aligned} u(k) &= K_D \frac{(e(k) - e(k-1))}{T} \\ &= K_D \frac{(L_d(k) - L(k) - (L_d(k-1) - L(k-1)))}{T} \\ &= K_D \frac{(L_d(k) - L_d(k-1) - (L(k) - L(k-1)))}{T} \\ u(k) &= K_D \frac{(\dot{L}_d(k) - \dot{L}(k))}{T} \end{aligned}$$

เห็นได้ว่า \dot{L}_d เป็นความเร็วที่คำนวณได้จาก 5.4 และ \dot{L} เป็นความเร็วป้อนกลับ ดังนั้นระบบควบคุมสามารถเขียนในรูปแบบใหม่ได้คือ



รูปที่ 5.4 การควบคุมแบบป้อนกลับที่รับคำสั่งตำแหน่ง และความเร็ว

การหาค่าเกณฑ์ที่ใช้ในการควบคุม ใช้วิธีหาจากการทดลองโดยพิจารณาผลตอบสนองของข้อต่อ

ค่าที่ใช้ในการทดสอบในบทที่ 6 คือ $K_p = 4.0$, $\frac{K_D}{T} = 20.0$, $K_I = 0.15$

5.3 โปรแกรมควบคุม

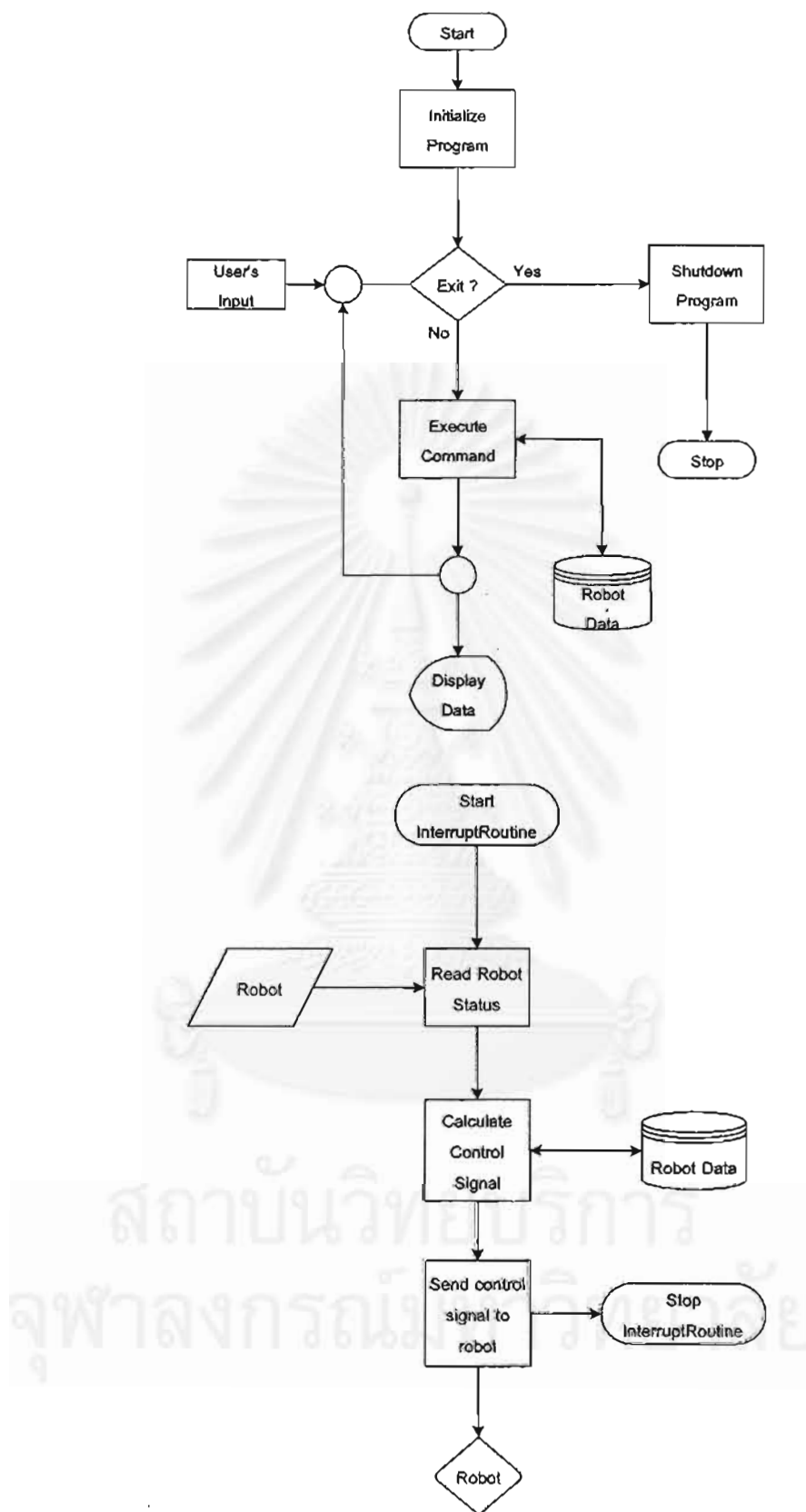
โปรแกรมเพื่อควบคุมหุ่นยนต์มีส่วนประกอบหลักคือ

1. ส่วนกำหนดค่าเริ่มต้น

2. ส่วนวงวนการทำงานหลัก ซึ่งประกอบด้วย การรับข้อมูลจากผู้ใช้ การอ่านข้อมูลจากหน่วยบันทึกเพื่อควบคุม และการแสดงผล
3. ส่วนปิดการทำงานของโปรแกรม

เมื่อโปรแกรมเริ่มต้นการทำงาน จะกำหนดค่าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการคำนวณ เช่น ตำแหน่งเริ่มต้นของข้อต่อ และ หน่วยบันทึก หรือ จอเนื้อหาที่หน่วยความจำเพื่อเก็บตัวแปร หลังจากนั้นจะเข้าสู่วงวนการทำงานหลัก ซึ่งทำหน้าที่รับคำสั่งจากผู้ใช้ เช่น คำสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ อ่านข้อมูลของหน่วยบันทึกได้แก่ตำแหน่งของข้อต่อ และ สถานะของสวิตช์ต่าง ๆ เพื่อประมวลผลแล้วส่งสัญญาณควบคุมไปยังวงจรขับมอเตอร์ ท้ายสุดจึงแสดงผลต่าง ๆ ขึ้นทางจอภาพ ซึ่งจะทำงานวนไปตลอดจนกระทั่งได้รับคำสั่งให้หยุดการทำงาน หากคำสั่งของผู้ใช้เป็นคำสั่งหยุดการทำงาน โปรแกรมจะเข้าสู่ส่วนปิดการทำงาน ซึ่งจะคืนหน่วยความจำและส่งสัญญาณควบคุมให้หยุดการเคลื่อนที่ของข้อต่อ

ส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของโปรแกรมคืออินเทอร์รัปทีน (Interrupt Routine) ซึ่งเป็นส่วนของโปรแกรมที่อยู่นอกเหนือจากโปรแกรมหลัก ในระหว่างการทำงานของโปรแกรมหลักหากมีเหตุการณ์เฉพาะ (event) เหตุการณ์หนึ่งเกิดขึ้น โปรแกรมจะไปทำงานในส่วน อินเทอร์รัปทีนเมื่อจบการทำงานในส่วนนี้แล้วจึงกลับไปทำงานในส่วนโปรแกรมหลักเช่นเดิม



รูปที่ 5.5 แผนผังการไหลแสดงการทำงานของโปรแกรม และอินเทอร์รัพท์ rutin

การใช้งานอินเตอร์รัพทูทีนในการควบคุมหุ่นยนต์ คือการอ่านข้อมูล และประมวลผลเพื่อส่งสัญญาณควบคุมออกไป ซึ่งเหตุการณ์ในกรณีนี้คือสัญญาณนาฬิกาจากการ์ด PA-CP12 [19] ซึ่งจะอินเตอร์รัพทุกช่วงเวลาเก็บข้อมูล (sampling) ทำให้มีการประมวลผลสัญญาณควบคุมใหม่ในเวลาเท่ากันทุก sampling

หากไม่มีอินเตอร์รัพทูทีน และทำการอ่านข้อมูล และประมวลผลภายในวงวนหลัก จะทำให้มีความผิดพลาด เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการคำนวณภายในวงวนอาจไม่เท่ากันทุกครั้ง ทำให้ช่วงเวลาที่ส่งสัญญาณควบคุมไปไม่เท่ากัน และเมื่อประดิษฐ์โปรแกรมเพิ่มจากเดิม จะทำให้ผลตอบสนองที่ได้เปลี่ยนแปลงไป

ต่อไปเป็นขั้นตอนการทำงานของอินเตอร์รัพทูทีน

เริ่มต้นการทำงานของอินเตอร์รัพทูทีน ครั้งที่ k

{

อ่านข้อมูลต่าง ๆ จากหุ่นยนต์

{

- สถานะสวิตช์
- แรงกดจากขาหุ่นยนต์
- ตำแหน่งของข้อต่อ $\Rightarrow L(k)$

}

คำนวณตำแหน่งที่ต้องการ $\Rightarrow L_d(k)$

หาความเร็วข้อต่อ

{

$$\dot{L}(k) = L(k) - L(k-1)$$

}

คำนวณความเร็วที่ต้องการ $\Rightarrow \dot{L}_d(k)$

คำนวณสัญญาณควบคุม

{

$$e(k) = L_d(k) - L(k)$$

$$u(k) = K_r(e(k) - e(k-1)) + K_D(\dot{L}_d(k) - \dot{L}(k)) + K_e e(k) + \text{sumerror}(k-1)$$

}

เก็บค่าตัวแปรใหม่

{

$$e(k-1) = e(k)$$

$$L(k-1) = L(k)$$

$$\dot{L}(k-1) = \dot{L}(k)$$

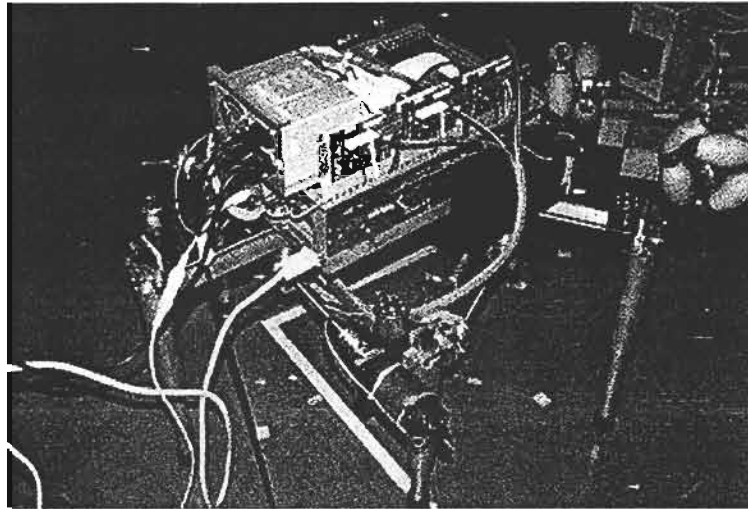
$$\text{sumerror}(k) = \text{sumerror}(k-1) + K_e e(k)$$

}

} จบการทำงาน กลับสู่โปรแกรมหลัก

บทที่ 6

การทดสอบและผลการทดสอบ



รูปที่ 6.1 หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้น

เป้าหมายของการทดสอบหุ่นยนต์ เพื่อต้องการทราบว่า หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติตามข้อกำหนดหรือไม่ ข้อกำหนดดังกล่าว (บทที่ 1) คือ

1. หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นมีความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ไม่เกิน \pm ร้อยละ 5 (ความผิดพลาดไม่เกิน 5 เซนติเมตร ต่อระยะทางการเคลื่อนที่ 1 เมตร)
2. ความผิดพลาดเชิงมุมไม่เกิน ± 5 องศา ต่อการหมุนหนึ่งรอบ (360 องศา)
3. ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์ถึง 2 เมตรต่อนาที

การทดสอบแบ่งเป็นรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. การทดสอบการเคลื่อนจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดใด ๆ หรือ การเลื่อนตำแหน่ง (Translation) ซึ่งสามารถแบ่งย่อยได้ดังนี้
 - การเลื่อนตำแหน่งภายในกรอบ วัดตำแหน่งและความเร็วของกรอบ ความเร็วที่ได้จะเป็นความเร็วเฉลี่ยของหุ่นยนต์
 - การเลื่อนตำแหน่งใด ๆ เป็นตำแหน่งซึ่งมีระยะห่างออกไปภายนอกกรอบ การเคลื่อนที่จึงต้องเลื่อนแต่ละกรอบสลับกัน ในลักษณะของการเดินอย่างแท้จริง ซึ่งจะทดสอบการเดินในสองลักษณะคือ การเลื่อนตำแหน่งไปในทิศทางที่ต้องการโดยตรง และ การหมุนทิศด้านหน้าของหุ่นยนต์ให้ตรงกับทิศทางการเคลื่อนที่ก่อนแล้วจึงเคลื่อนที่
2. การทดสอบการหมุน โดยหมุนเป็นมุมต่าง ๆ กัน มุมมากที่สุดคือ 360 องศา

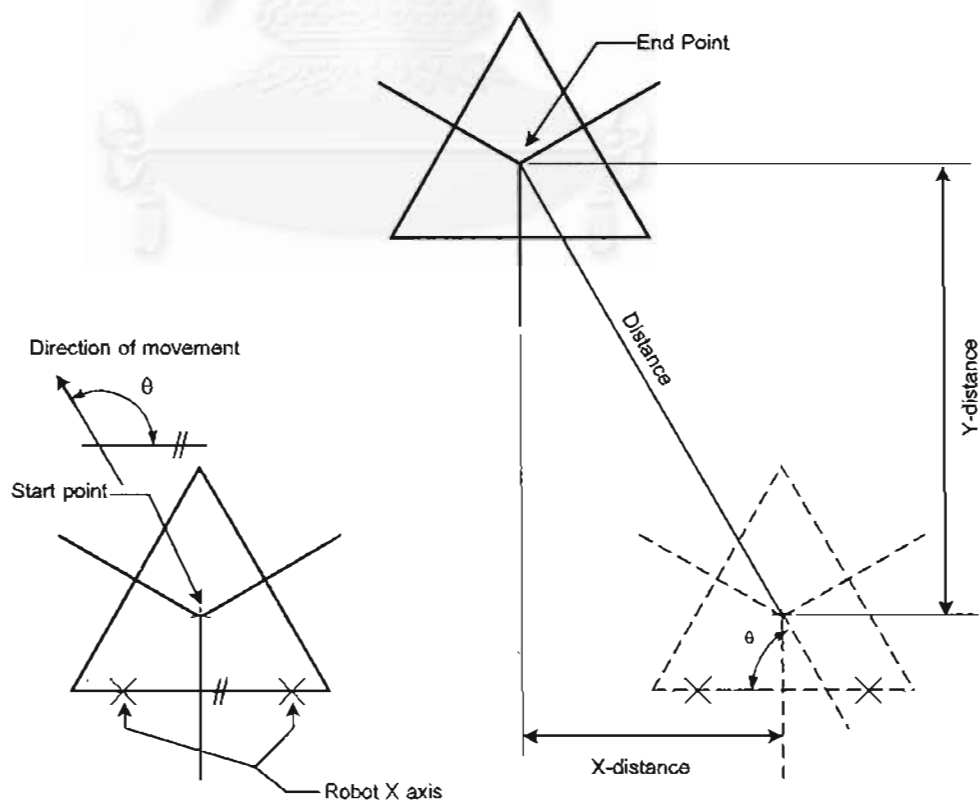
6.1 การทดสอบการเลื่อนตำแหน่งของหุ่นยนต์

6.1.1 การทดสอบการเคลื่อนที่ภายในกรอบหุ่นยนต์

การวัดผลการทดสอบเลื่อนตำแหน่งของหุ่นยนต์ ใช้หัวเลเซอร์ขนาดเล็กซึ่งติดกับตัวหุ่นยนต์ เพื่อแสดงตำแหน่งบนพื้นของจุดเริ่มต้นและจุดปลายการเคลื่อนที่ เพื่อวัดระยะทางการเคลื่อนที่ การวัดทิศทางการเคลื่อนที่ เริ่มจากหาแกนหลักในแนว X ของหุ่นยนต์ และวัดมุมของเส้นระยะทางกับแกนหลักดังกล่าว แล้วจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณหาการเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y ของหุ่นยนต์ ในกรณีการเคลื่อนที่ไม่เกินขอบเขตของกรอบหุ่นยนต์ จะวัดระยะในแกน X และ Y โดยตรง



รูปที่ 6.2 หัวเลเซอร์ขนาดเล็กที่ใช้ในการวัดตำแหน่งของหุ่นยนต์เทียบกับพื้น



รูปที่ 6.3 ขั้นตอนการวัดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ในการทดลองนี้จะสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางต่าง ๆ โดยแปรผันระยะเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างจุด ทิศทางที่เคลื่อนที่ได้แก่ทิศทาง 0 45 90 135 180 องศาและทิศทาง -45 -90 -135 องศา ในการทดลองจะเคลื่อนที่เป็นช่วง ๆ เพื่อวัดตำแหน่ง ระยะห่างของแต่ละช่วงคือ 20 มิลลิเมตร โดยกระทำการทดสอบซ้ำสองครั้งเพื่อให้ข้อมูลที่ได้น่าเชื่อถือมากขึ้น กราฟแสดงผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.4 ในหน้าถัดไป

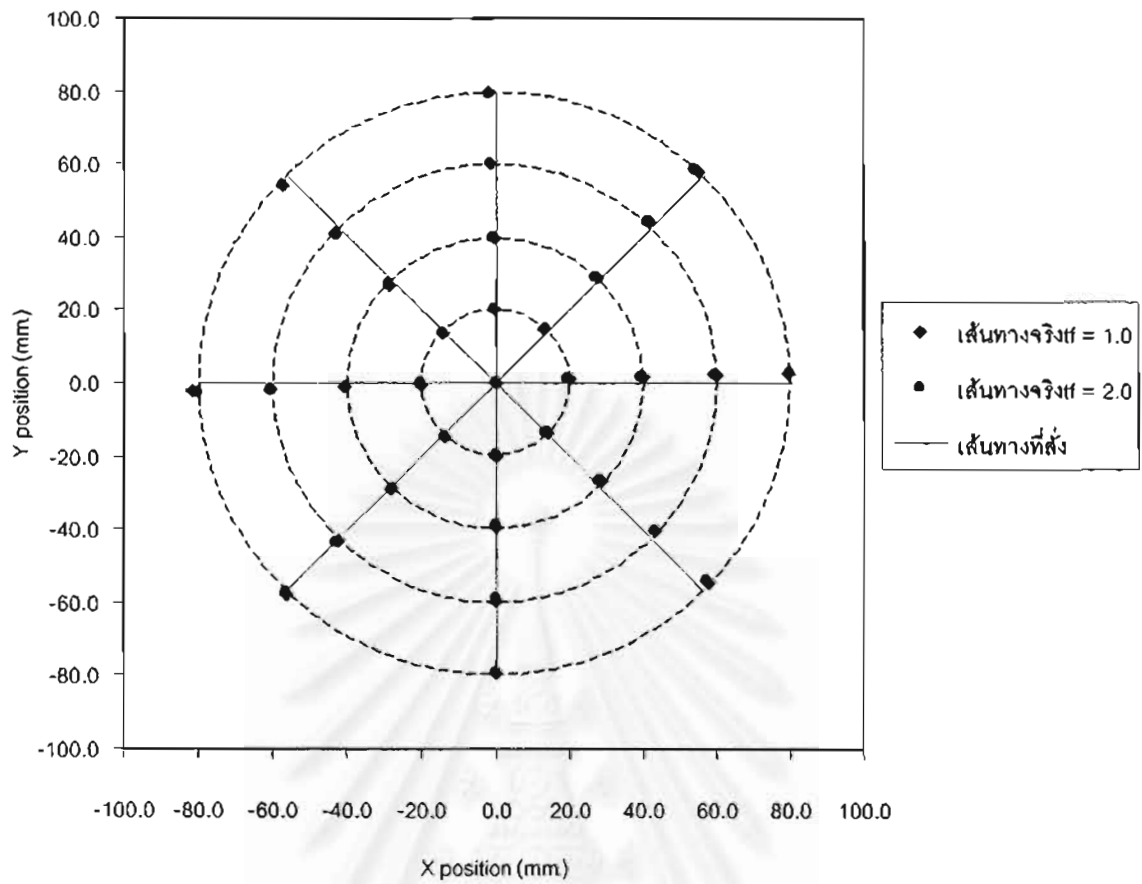
นำเส้นทางที่วัดได้จากรูปที่ 6.4 มาเปรียบเทียบกับสมการแสดงเส้นทางที่สั่งสมการแสดงเส้นทางที่วัดได้คำนวณโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด สมการจะอยู่ในรูป $y = mx + c$ เมื่อกำหนดให้เส้นทางผ่านจุด (0, 0) (ที่จุด (0, 0) มีความผิดพลาดเป็นศูนย์) สมการจะลดรูปเป็น $y = mx$

ตารางที่ 6.1 ตารางเปรียบเทียบเส้นทางที่สั่งกับเส้นทางจริงของการทดสอบการเคลื่อนที่ของกรอบ

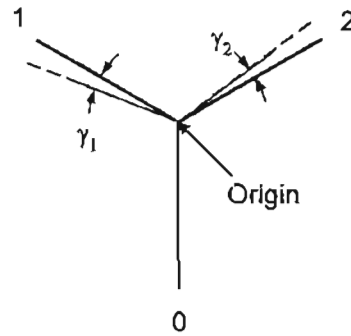
มุมของเส้นทางที่สั่ง	Tf = 2.0			Tf = 1.0		
	มุมของเส้นทางที่วัดได้	มุมผิดพลาด	ค่า R ² ของเส้นทางที่วัด	มุมของเส้นทางที่วัดได้	มุมผิดพลาด	ค่า R ² ของเส้นทางที่วัด
0	1.9	1.9	0.9503	2.0	2.0	0.9245
45	47.2	2.2	0.9999	46.4	1.4	0.9994
90	91.4	1.4	0.9999	91.2	1.2	0.9165
135	136.7	1.7	0.9999	136.8	1.8	0.9999
180	181.7	1.7	0.9146	181.5	1.5	0.9726
-135	-134.5	0.5	0.9998	-134.3	0.7	0.9998
-90	-89.5	0.5	0.6974	-89.5	0.5	0.7747
-45	-43.2	1.8	0.9998	-43.3	1.7	0.9998

จากตารางที่ 6.1 พบว่าความผิดพลาดของเส้นทางการเคลื่อนที่ในการทดลองที่ความเร็วแตกต่างกันมีลักษณะเดียวกันคือ ทิศทาง 0 องศา มีความผิดพลาดประมาณ 2 องศา ทิศทาง 90 และ 180 องศา มีความผิดพลาดประมาณ 1.5 องศา ความผิดพลาดเป็นผลจากความผิดรูปของกลไก ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนที่ 4.2 การพิจารณาแนวโน้มความผิดพลาดเนื่องมาจากความผิดรูปมีดังนี้

พิจารณาสมการที่ 4.1* ถึง 4.3*



รูปที่ 6.4 เส้นทางการเคลื่อนที่ของกรอบหุ่นยนต์ระยะเวลาการเคลื่อนที่ระหว่างจุด 2.0 และ 1.0 วินาที



$$L'_0 = x + \left(y + \frac{a}{\sqrt{3}} \right) \tan \theta \quad (4.1)^*$$

$$L'_1 = \left(-\frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} + \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan(\theta + \gamma_1) \quad (4.2)^*$$

$$L'_2 = \left(-\frac{x}{2} + \frac{\sqrt{3}y}{2} \right) + \left(\frac{a}{\sqrt{3}} - \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} \right) \tan(\theta + \gamma_2) \quad (4.3)^*$$

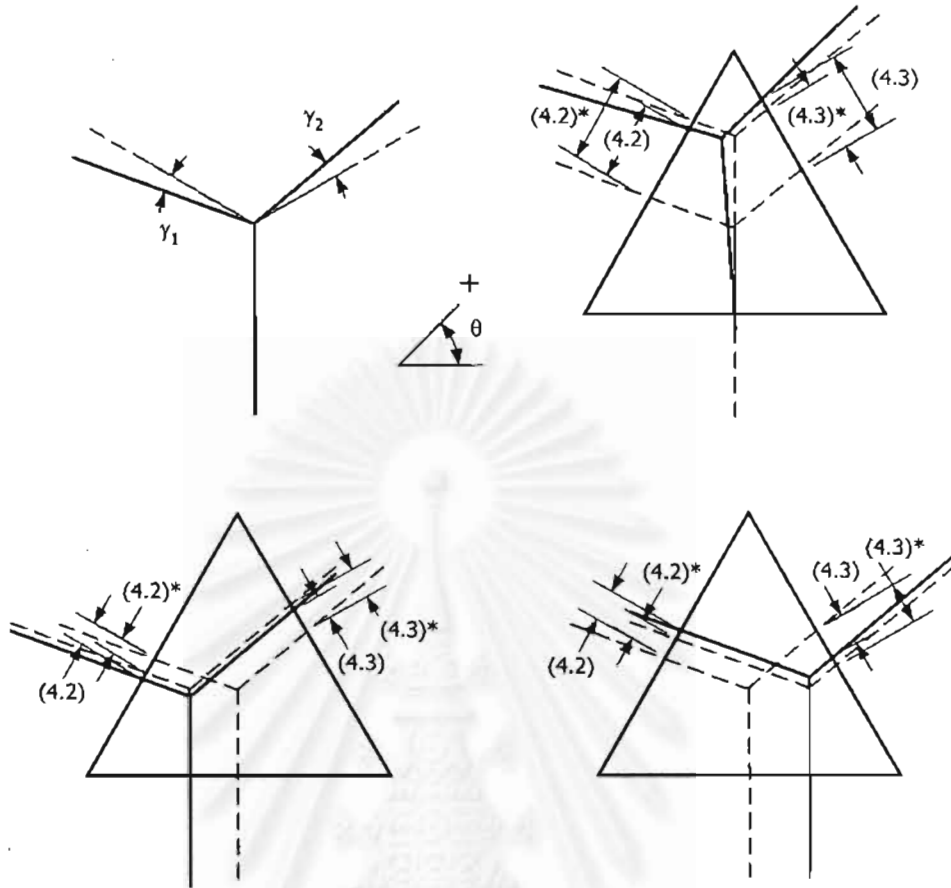
พิจารณาค่ามุมผิดพลาด γ_1 และ γ_2 เมื่อ γ_1 เป็นบวก จะทำให้ $\tan(\gamma_1)$ เป็นบวก ดังนั้นระยะทางการเคลื่อนที่ของแกน L'_1 จากการเคลื่อนที่รอบในแนว X (ที่ Y และ θ เป็นศูนย์) มีค่าน้อยกว่า L_1 ที่คำนวณจากสมการ 4.2 หากเคลื่อนที่ในแนว Y ระยะทาง L'_1 จะมากกว่า L_1 ที่คำนวณจากสมการ 4.2 ในทำนองกลับกันหาก $\tan(\gamma_1)$ เป็นลบ ระยะ L'_1 จะมากและน้อยกว่า L_1 ในการเคลื่อนที่ในแกน X และ Y ตามลำดับ ในกรณี L'_2 ผลที่ได้จะตรงข้ามกับ L'_1 สรุปดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.2 เปรียบเทียบระยะทางที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2, 4.3 และสมการที่ 4.2*, 4.3* ที่ γ ต่าง ๆ

แนวการเคลื่อนที่	ค่า γ		L'_1	L'_2
X	γ_1	+	-	
		-	+	
	γ_2	+		+
		-		-
Y	γ_1	+	+	
		-	-	
	γ_2	+		-
		-		+

ระยะทางมากกว่าเดิมแสดงโดยเครื่องหมาย + และน้อยกว่าเดิมแสดงโดยเครื่องหมาย -

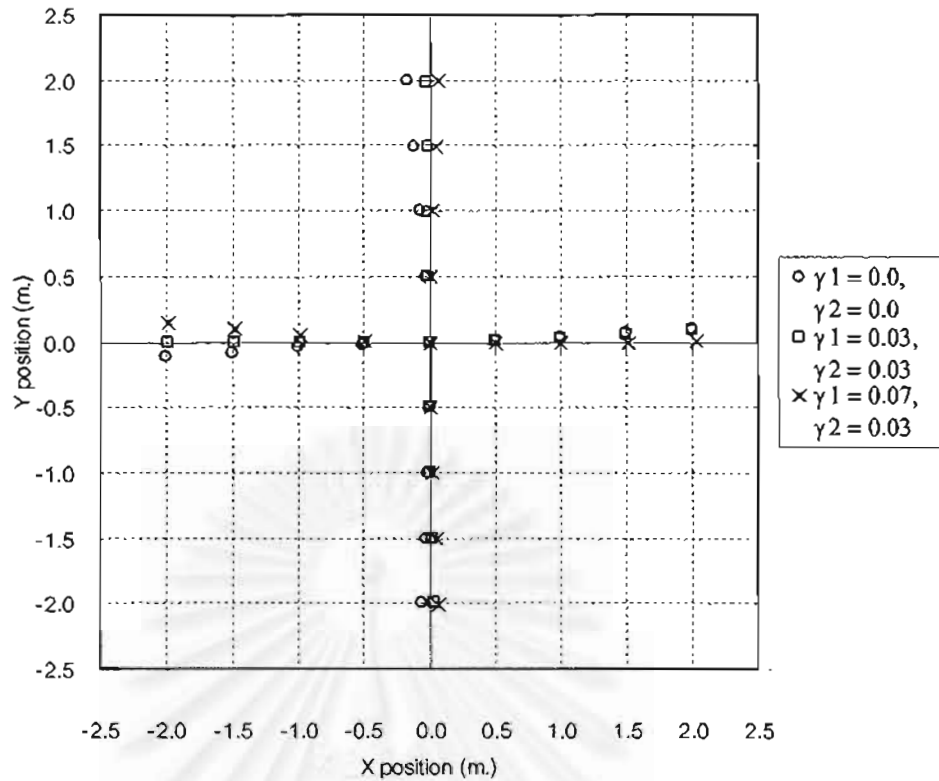
พิจารณาพบว่าหาก γ_1 และ γ_2 มากกว่าศูนย์



รูปที่ 6.5 ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่เนื่องจากความผิดรูปกรอบเมื่อค่า γ_1 และ γ_2 เป็นบวก

จากตารางที่ 6.2 การเคลื่อนที่แนว Y L'_1 จะมากขึ้นและ L'_2 จะน้อยลง ทำให้แนวโน้มความผิดพลาดเชิงมุมของกรอบเป็นบวก และเป็นลบในการเคลื่อนที่ในแนว Y ในกรณีการเคลื่อนที่ในแนว X L'_1 จะน้อยลงและ L'_2 จะมากขึ้น ทำให้มีความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแกน Y ในทิศทางบวก และกรณีการเคลื่อนที่ในทิศทาง $-X$ จะมีผิดพลาดในแกน Y ในทิศทางลบดังแสดงในรูปที่ 6.5 และสอดคล้องกับรูปที่ 6.6 ซึ่งแสดงถึงเส้นทางการเดินของหุ่นยนต์ที่คำนวณโดยใช้สมการการเคลื่อนที่ที่ชดเชยค่า γ_1 และ γ_2 ต่าง ๆ กัน (สมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3) ความผิดรูปของกลไกของหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นคือ $\gamma_1 > 0$ และ $\gamma_2 > 0$ ผลการทดลองทั้งหมดต่อจากนี้ไปใช้ค่า $\gamma_1 = 0.03$ และ $\gamma_2 = 0.03$

ความผิดพลาดดังกล่าวจะทำให้มีความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทั้งในแนวแกน X , Y และมุม ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่โดยรวมของหุ่นยนต์ผิดพลาด อีกทั้งความผิดพลาดนี้จะมากขึ้นเมื่อเคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางไกล



รูปที่ 6.6 เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ควบคุมการเดินทางโดยใช้สมการ การเคลื่อนที่ที่ซัดเซยค่า γ_1 และ γ_2 ต่าง ๆ กัน

6.1.2 การทดสอบการเดินทางโดยไม่มีการหมุนตัว

ในการทดลองนี้จะสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางต่าง ๆ เช่นเดียวกับการ ทดสอบข้างต้น โดยแปรผันระยะเวลาในการเคลื่อนที่ในขณะที่ระยะก้าวเท่ากัน และแปรผันระยะ ก้าวเดินโดยความเร็วคงที่

กำหนดให้ระยะก้าวในการทดลองคือ 80 มิลลิเมตร ดังนั้นความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ

$$V_{avg} = \frac{\text{steplength}}{t_f} = \frac{80}{1.2}$$

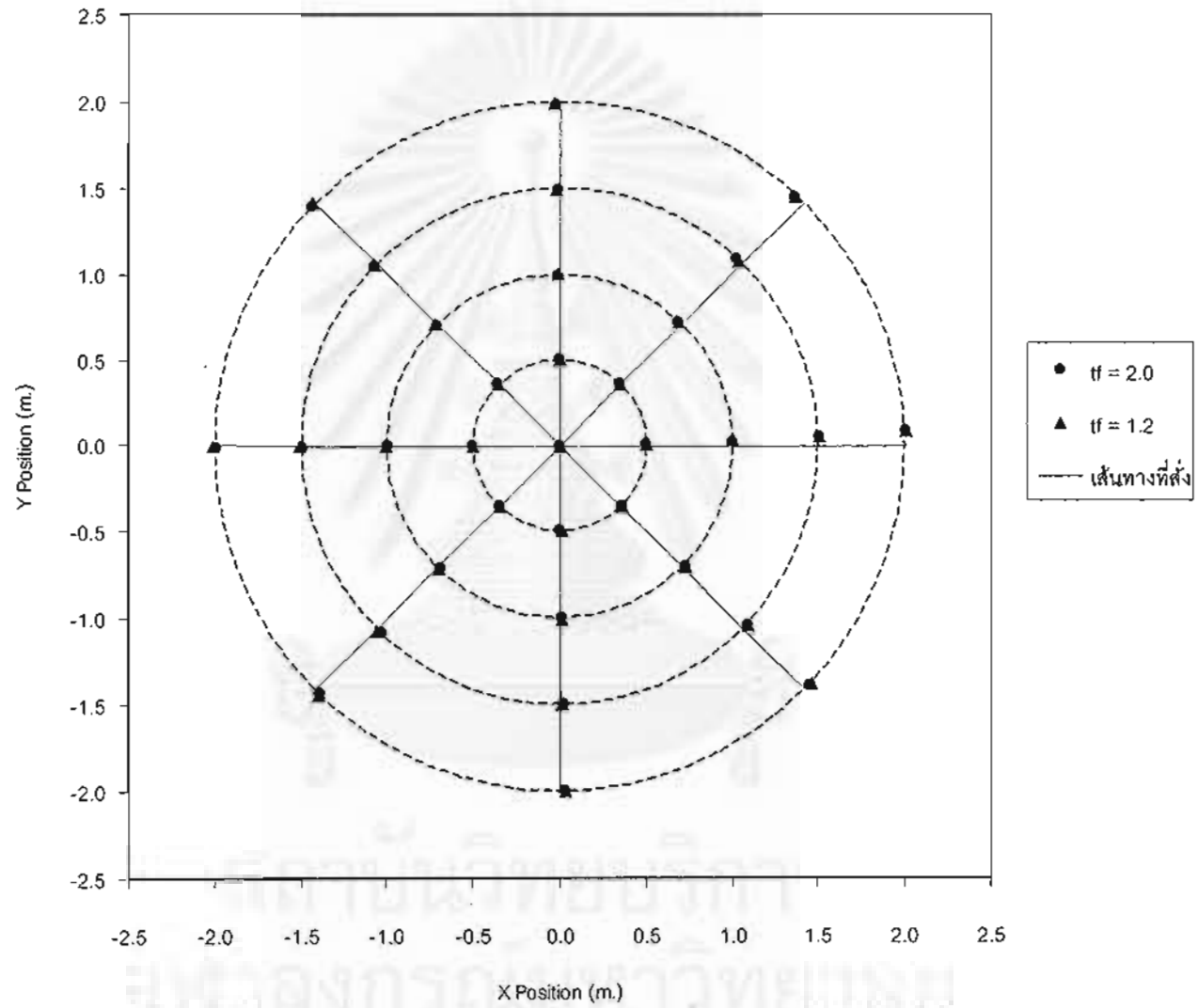
$$t_f = 1.2 \text{ s.} \quad = 66.67 \text{ mm/s.}$$

$$= 4 \text{ m/min.}$$

$$t_f = 2.0 \text{ s.} \quad V_{avg} = 40 \text{ mm/s.}$$

$$= 2.4 \text{ m/min.}$$

ทดสอบในทิศทางเคลื่อนที่ต่าง ๆ คือทิศทาง 0 45 90 135 180 และทิศทาง -45 -90 -135 องศา โดยหยุดเป็นช่วง ๆ เพื่อวัดระยะ ระยะห่างแต่ละช่วงคือ 0.5 เมตร การทดสอบนี้จะกระทำ ซ้ำสามครั้ง ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 6.7 ในหน้าถัดไป



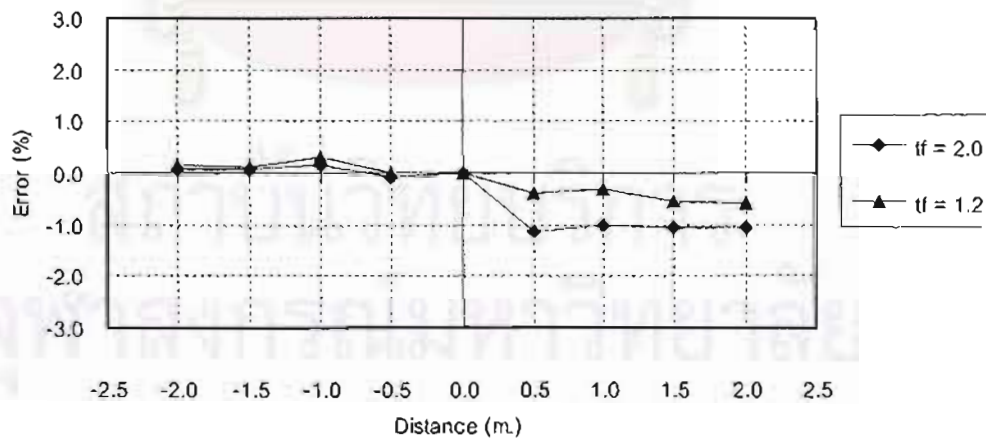
รูปที่ 6.7 เส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในทิศทางต่าง ๆ โดยแปรผันระยะเวลาการเคลื่อนที่ระหว่างจุด

ใช้วิธีการข้างต้น (กำลังสองน้อยที่สุด) ในการหาสมการแสดงเส้นทางการเดินของหุ่นยนต์เช่นเดียวกับตอนที่ 6.1.1

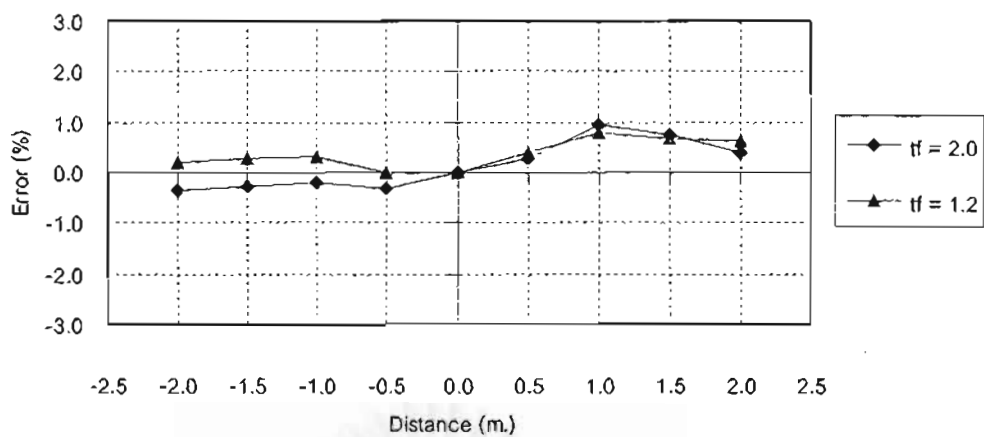
ตารางที่ 6.3 ตารางเปรียบเทียบเส้นทางที่สั่งกับเส้นทางจริงของการทดสอบการเดิน โดยไม่มีการหมุนที่ระยะเวลาเคลื่อนที่ต่าง ๆ

มุมของเส้นทางที่สั่ง	Tf = 2.0			Tf = 1.2		
	มุมของเส้นทางที่วัดได้	มุมผิดพลาด	ค่า R ² ของเส้นทางที่วัด	มุมของเส้นทางที่วัดได้	มุมผิดพลาด	ค่า R ² ของเส้นทางที่วัด
0	1.9	1.9	0.9158	2.0	2.0	0.9151
45	46.5	1.5	0.9997	46.2	1.2	0.9998
90	90.6	0.6	0.8789	91.0	1.0	0.8568
135	135.7	0.7	0.9999	135.5	0.5	0.9999
180	180.4	0.4	0.9672	180.3	0.3	0.7371
-135	-133.9	1.1	0.9999	-134.4	0.6	0.9998
-90	-89.1	0.9	0.9785	-89.2	0.8	0.8984
-45	-43.8	1.2	0.9999	-43.4	1.6	0.9998

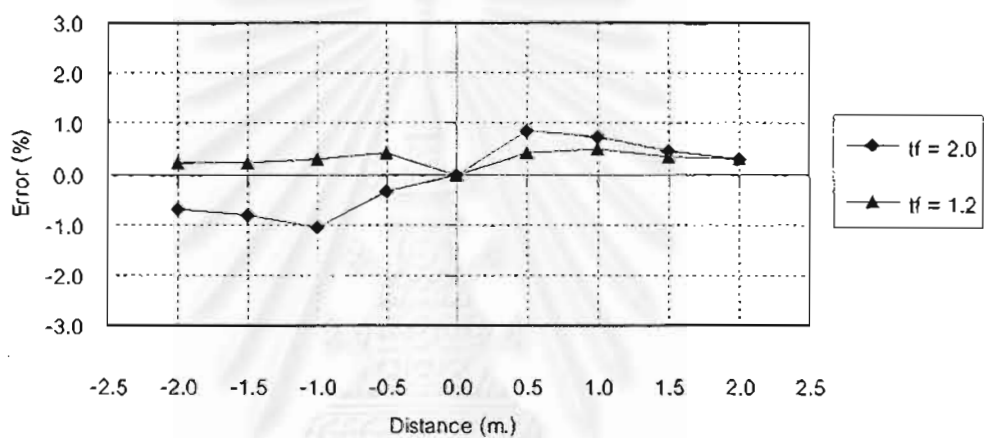
จากตารางที่ 6.3 เห็นได้ว่าความเบี่ยงเบนของทิศทางการเคลื่อนที่ของการทดลองที่ความเร็วต่างกันมีค่าน้อย แสดงให้เห็นว่าความเร็วไม่มีผลต่อความผิดพลาดของทิศทาง รูปที่ 6.8 ถึง 6.11 เป็นกราฟแสดงความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่เป็นร้อยละ



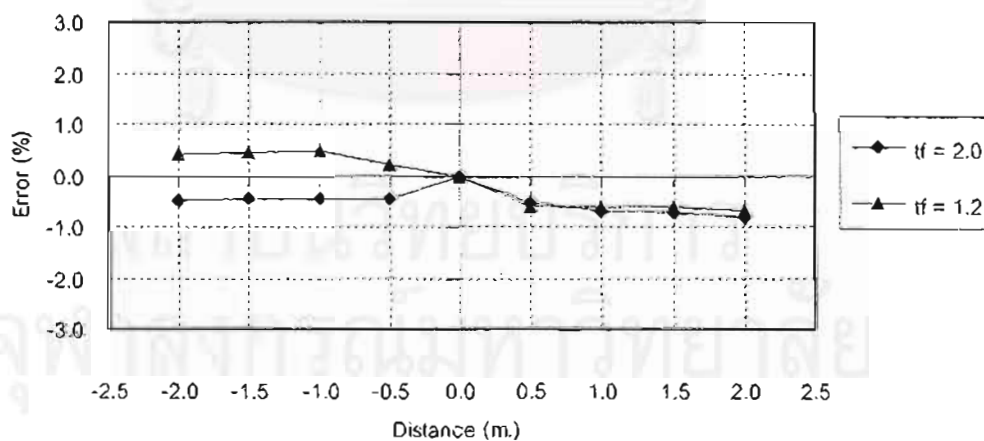
รูปที่ 6.8 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ 90 และ -90 องศา



รูปที่ 6.9 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ที่ศทางการเคลื่อนที่ 135 และ -45 องศา



รูปที่ 6.10 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ที่ศทางการเคลื่อนที่ 180 และ 0 องศา



รูปที่ 6.11 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ที่ศทางการเคลื่อนที่ 45 และ -135 องศา

จากรูปที่ 6.8 ถึง 6.11 ความผิดพลาดของระยะทางเป็นร้อยละมีแนวโน้มเป็นค่าคงที่ตลอดระยะทางการเคลื่อนที่ และความผิดพลาดในแต่ละการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันแต่ในบางกรณีมีค่าแตกต่างกันมาก เป็นผลจากความไม่แข็งแกร่งของกลไกและความเอียงของกรอบหุ่นยนต์ เนื่อง

มาจากไม่มีอุปกรณ์ตรวจวัดความเอียงของกรอบ หากกรอบมีความเอียงในขณะที่ขาและพื้นจะทำให้กรอบมีการเลื่อนตำแหน่งเล็กน้อยเนื่องจากแต่ละขาและพื้นไม่พร้อมกัน

กราฟในรูปที่ 6.12 ในหน้าถัดไปเป็นการทดสอบการเคลื่อนที่โดยแปรผันระยะก้าวเดิน ระยะก้าวที่ใช้ในการทดสอบคือ 40 และ 80 มิลลิเมตร ด้วยความเร็วเท่ากัน และเคลื่อนที่เป็นช่วง ช่วงละ 0.5 เมตรเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบคือ 20 มิลลิเมตรต่อวินาที (2.4 เมตรต่อนาที)

$$\text{Steplength} = 40 \text{ mm.} \quad t_f = \frac{\text{steplength}}{V_{\text{avg}}} = \frac{40}{20}$$

$$= 2.0 \text{ s.}$$

$$\text{Steplength} = 80 \text{ mm.}$$

$$t_f = 1.0 \text{ s.}$$

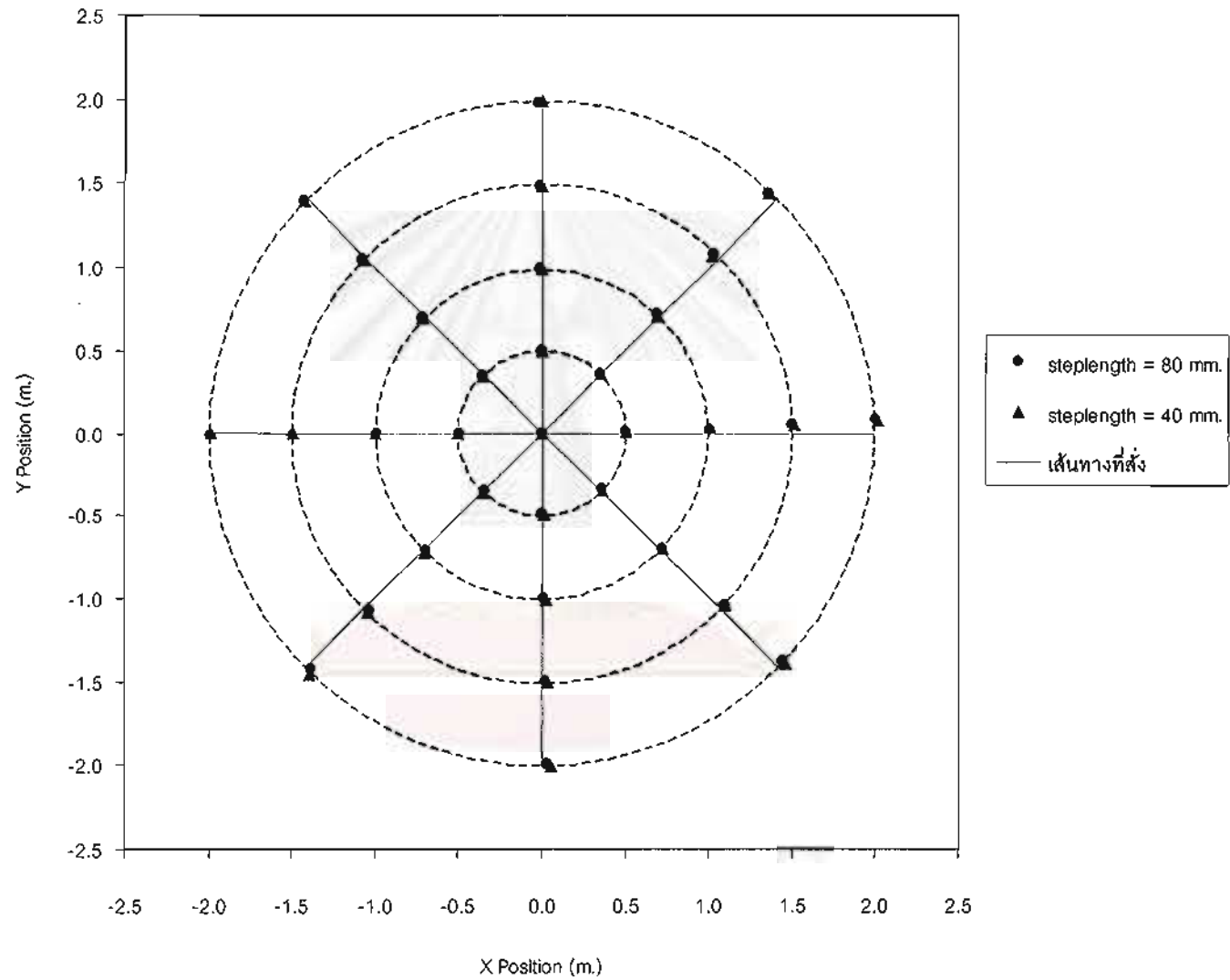
เห็นได้ว่า หากเดินด้วยระยะก้าวระยะก้าว 40 มิลลิเมตรจะใช้จำนวนก้าว 13 ก้าวในระยะทาง 0.5 เมตรโดยก้าวสุดท้ายมีระยะ 20 มิลลิเมตร และระยะก้าว 80 มิลลิเมตรจะใช้จำนวนก้าว 7 ก้าว

ใช้วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด ในการหาสมการแสดงเส้นทางการเดินของหุ่นยนต์เช่นเดียวกับตอนที่ 6.1.1

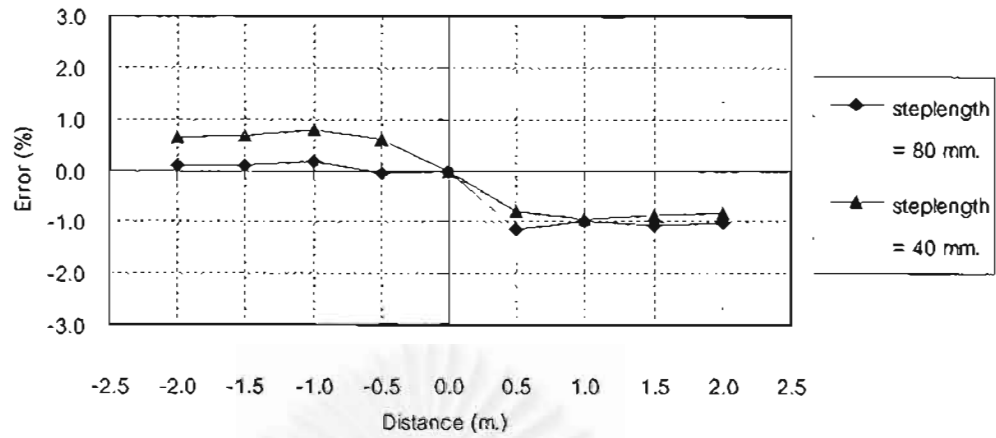
ตารางที่ 6.4 ตารางเปรียบเทียบเส้นทางที่สั่งกับเส้นทางจริงของการทดสอบการเดิน โดยไม่มีการหมุนที่ระยะก้าวต่าง ๆ

มุมของเส้นทางที่สั่ง	ระยะก้าว 80 มม.			ระยะก้าว 40 มม.		
	มุมของเส้นทางที่วัดได้	มุมผิดพลาด	ค่า R ² ของเส้นทางที่วัด	มุมของเส้นทางที่วัดได้	มุมผิดพลาด	ค่า R ² ของเส้นทางที่วัด
0	1.9	1.9	0.9158	2.0	2.0	0.9602
45	46.5	1.5	0.9997	46.4	1.4	0.9996
90	90.6	0.6	0.8789	91.2	1.2	0.9165
135	135.7	0.7	0.9999	135.6	0.6	0.9999
180	180.4	0.4	0.9672	180.3	0.3	0.6406
-135	-133.9	1.1	0.9999	-133.7	1.3	0.9999
-90	-89.1	0.9	0.9785	-88.5	1.5	0.9804
-45	-43.8	1.2	0.9999	-43.8	1.2	0.9997

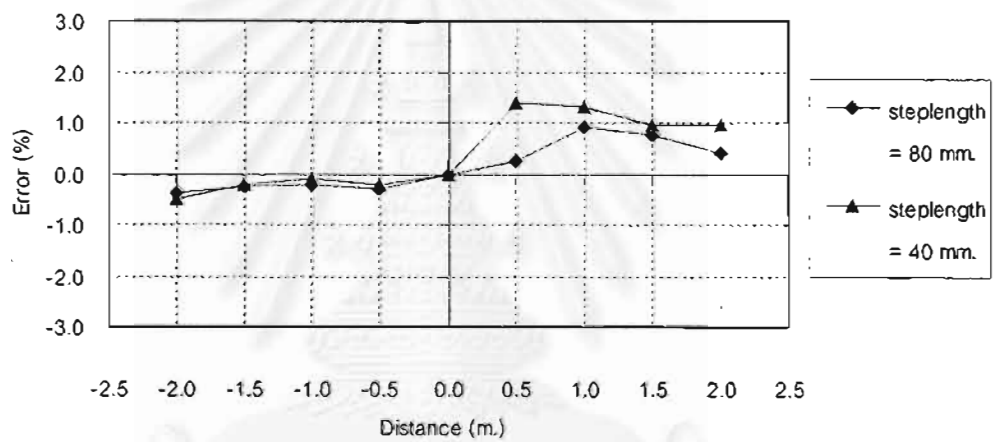
จากตารางที่ 6.4 เห็นได้ว่าความเบี่ยงเบนของทิศทางเคลื่อนที่ของการทดลองที่ความเร็วต่างกันมีค่าน้อยเช่นกัน ดังนั้นความระยะก้าวจึงไม่มีผลต่อความผิดพลาดของทิศทาง รูปที่ 6.13 ถึง 6.16 เป็นกราฟแสดงความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่เป็นร้อยละ



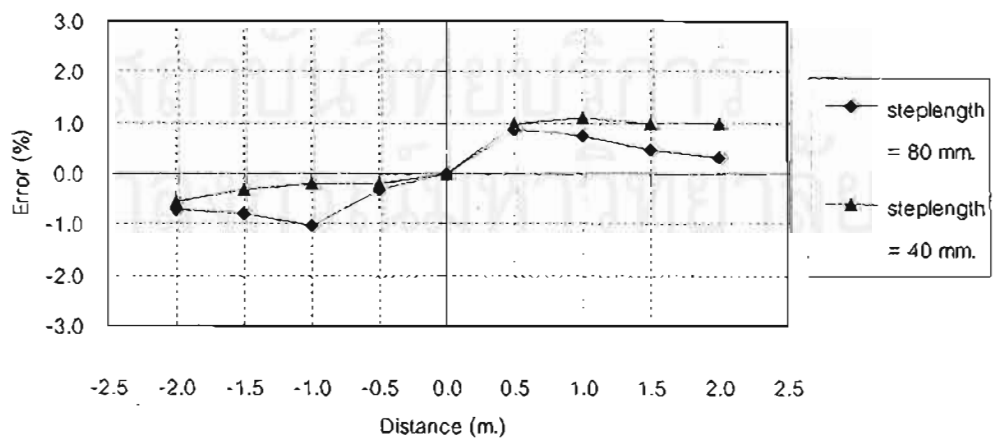
รูปที่ 6.12 เส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในทิศทางต่าง ๆ โดยแปรผันระยะก้าวเดิน



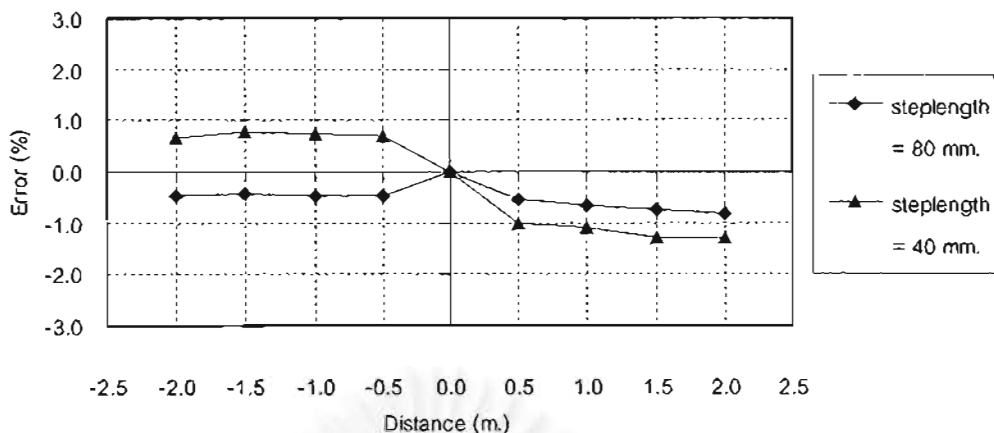
รูปที่ 6.13 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ 90 และ -90 องศา



รูปที่ 6.14 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ 135 และ -45 องศา



รูปที่ 6.15 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ 180 และ 0 องศา

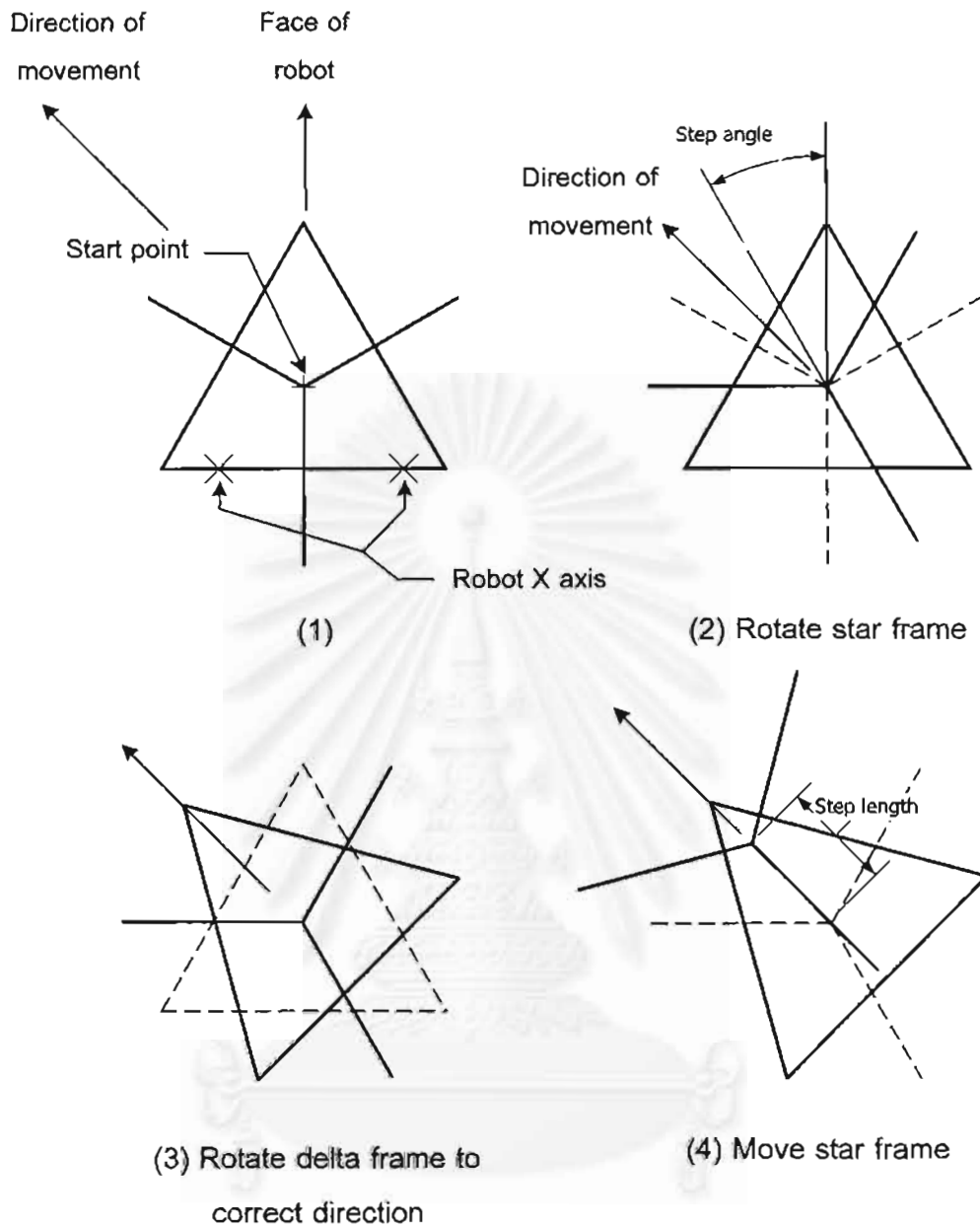


รูปที่ 6.16 ความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่ ทิศทางการเคลื่อนที่ 45 และ -135 องศา

จากรูปที่ 6.13 ถึง 6.16 แนวโน้มความผิดพลาดของระยะทางเป็นร้อยละมีค่าคงที่เช่นเดียวกัน และการเดินที่ระยะก้าวสั้นกว่า (จำนวนก้าวในการเดินมากกว่า ที่ระยะทางการเดินเท่ากัน) จะมีความผิดพลาดสูงกว่าเนื่องจาก ความผิดพลาดสะสมเนื่องจากความไม่แข็งแรงของกลไก แต่ในบางกรณีที่มีความผิดพลาดของระยะทางในการเดินด้วยระยะก้าวสั้นมีความผิดพลาดน้อย เป็นผลจากความผิดพลาดสะสมดังกล่าวอาจส่งผลไปในทางตรงข้าม ทำให้ความผิดพลาดที่มีค่ามากในการทดสอบการเดินด้วยระยะก้าวยาวมีค่าน้อยลงได้ แต่ความผิดพลาดนี้จะมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันของการเดินในแต่ละทิศทางและระยะก้าวแต่ละค่า คืออาจเป็นบวกทั้งหมด (เช่นทิศทาง -90 องศาในรูปที่ 6.13) หรือเป็นลบทั้งหมด (เช่นทิศทาง 90 องศาในรูปที่ 6.13)

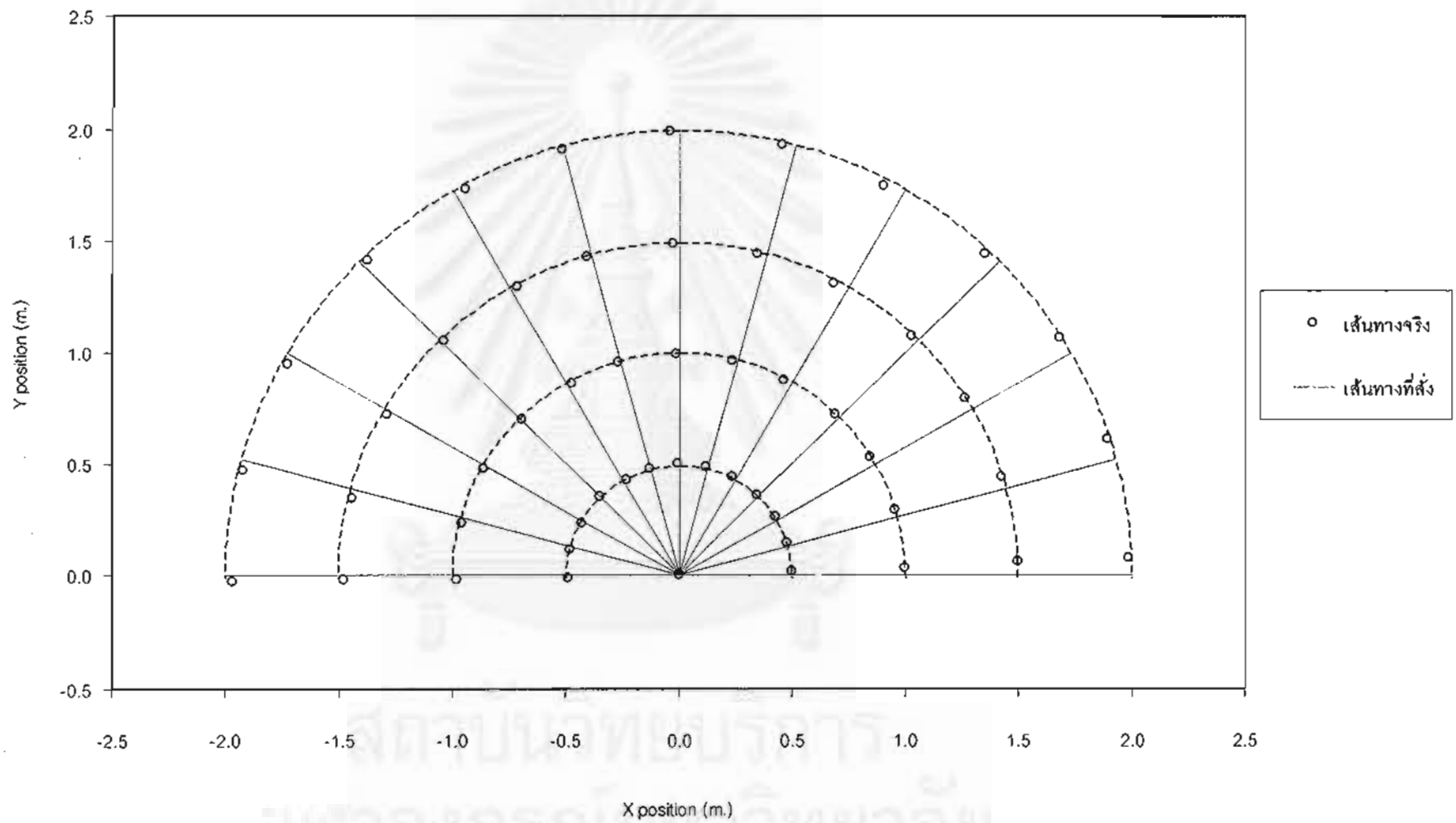
6.1.3 การทดสอบการเดินโดยมีการหมุนตัวไปในทิศทางที่จะเคลื่อนที่

การเดินโดยหมุนตัวให้หุ่นยนต์หันหน้าไปในทิศทางที่จะเดิน จะมีระยะก้าวเดินสูงกว่าการเดินโดยไม่หันเล็กน้อย ทำให้ใช้จำนวนก้าวและเวลาในการเดินน้อยกว่าการเดินแบบไม่หมุนตัวเล็กน้อยในระยะทางการเดินเท่ากัน ขั้นตอนในการเดินเป็นดังรูปที่ 6.17 เริ่มจากการหมุนกรอบใดกรอบหนึ่งไปเป็นมุมก้าว (Step angle) ตามที่กำหนดไว้ (2) หากทิศทางที่จะเดินมากกว่ามุมก้าว จะต้องหมุนกรอบอีกกรอบสลับกันจนได้ทิศทางที่ถูกต้อง (3) แล้วจึงเคลื่อนกรอบด้วยระยะก้าว (Step length) ตามที่กำหนด (4)



รูปที่ 6.17 ขั้นตอนการเดิน โดยมีการหมุนตัว

ในการทดสอบต่อไปนี้จะใช้ระยะก้าว 120 มิลลิเมตร และ ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ระหว่างจุด 3 วินาที ดังนั้นหุ่นยนต์จะมีความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ที่ $120/3 = 40$ มิลลิเมตรต่อวินาที หรือ 2.4 เมตรต่อวินาที ทิศทางที่ใช้ทดสอบเริ่มจาก 0 องศา แล้วเพิ่มทีละ 15 องศา จนถึงมุม 180 องศา ผลการทดสอบการเดินโดยหันหน้าไปในทิศทางที่จะเดินแสดงในรูปที่ 6.18 ในหน้าถัดไป



รูปที่ 6.18 เส้นทางเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในทิศทางต่าง ๆ เดินโดยหันหน้าไปในทิศที่จะเดิน

ในการทดสอบนี้จะหาสมการเส้นทางการเดิน เพื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ได้จากการทดสอบการเดินแบบไม่มีการหมุน จากตารางที่ 6.3

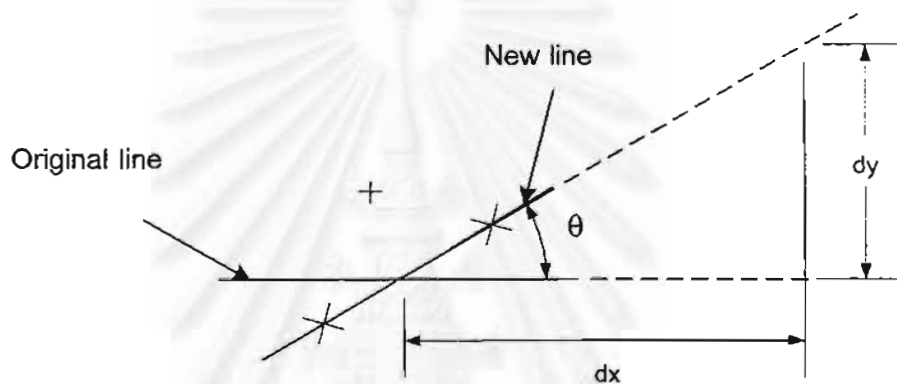
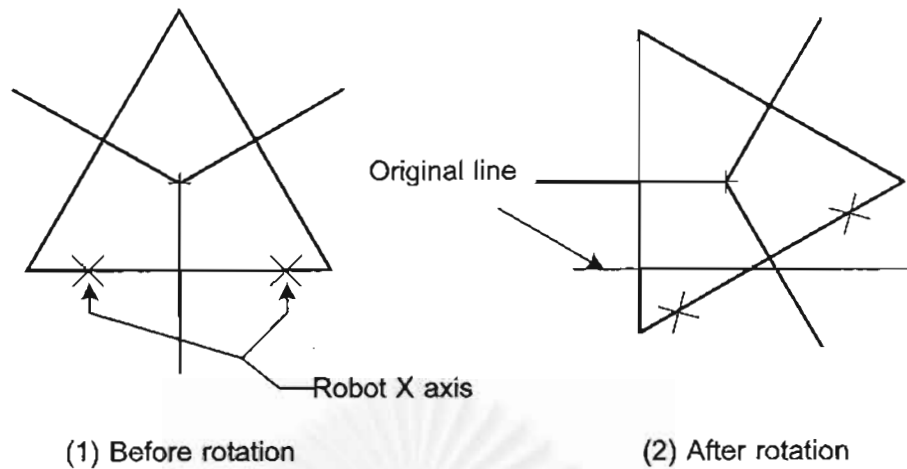
ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความผิดพลาดของเส้นทางการเดินของการทดสอบการเดิน โดยหันหน้าไปในทิศทางที่จะเดิน

มุมเส้นทาง ที่สั่ง (องศา)	มุมเส้นทาง ที่วัดได้ (องศา)	มุมผิดพลาด	ค่า R^2 ของ สมการเส้น ทางที่วัด	มุมผิดพลาดจาก ตาราง 6.3
0	2.2	2.2	0.9753	1.9
15	17.4	2.4	0.9988	-
30	32.2	2.2	0.9997	-
45	46.5	1.5	0.9996	1.5
60	62.4	2.4	0.9997	-
75	76.6	1.6	0.9992	-
90	91.0	1.0	0.8496	0.6
105	105.5	0.5	0.9983	-
120	118.7	-1.3	0.9998	-
135	134.5	-0.5	0.9997	0.7
150	151.1	1.1	0.9998	-
165	166.4	1.4	0.9998	-
180	180.9	0.9	0.9188	0.4

จากตารางที่ 6.5 พบว่าทิศทางการเคลื่อนที่แบบมีการหมุนมีความผิดพลาดสูงกว่าการเดินโดยไม่มีการหัน เนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแบ่งเป็นความผิดพลาดในการหมุน และ ความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ในทิศทาง 90 และ -90 องศา

6.2 การทดสอบการหมุนของหุ่นยนต์

การทดสอบการหมุนของหุ่นยนต์ ทำได้โดยการสั่งให้หุ่นยนต์หมุนด้วยมุมขนาดต่าง ๆ แล้ววัดมุมที่หุ่นยนต์หมุนจริง เราสามารถวัดมุมที่หุ่นยนต์หมุนไปจริงโดยวัดเทียบตำแหน่งบนแกน X ของหุ่นยนต์สองตำแหน่งก่อนและหลังการหมุน ขั้นตอนการวัดแสดงดังรูปที่ 6.19

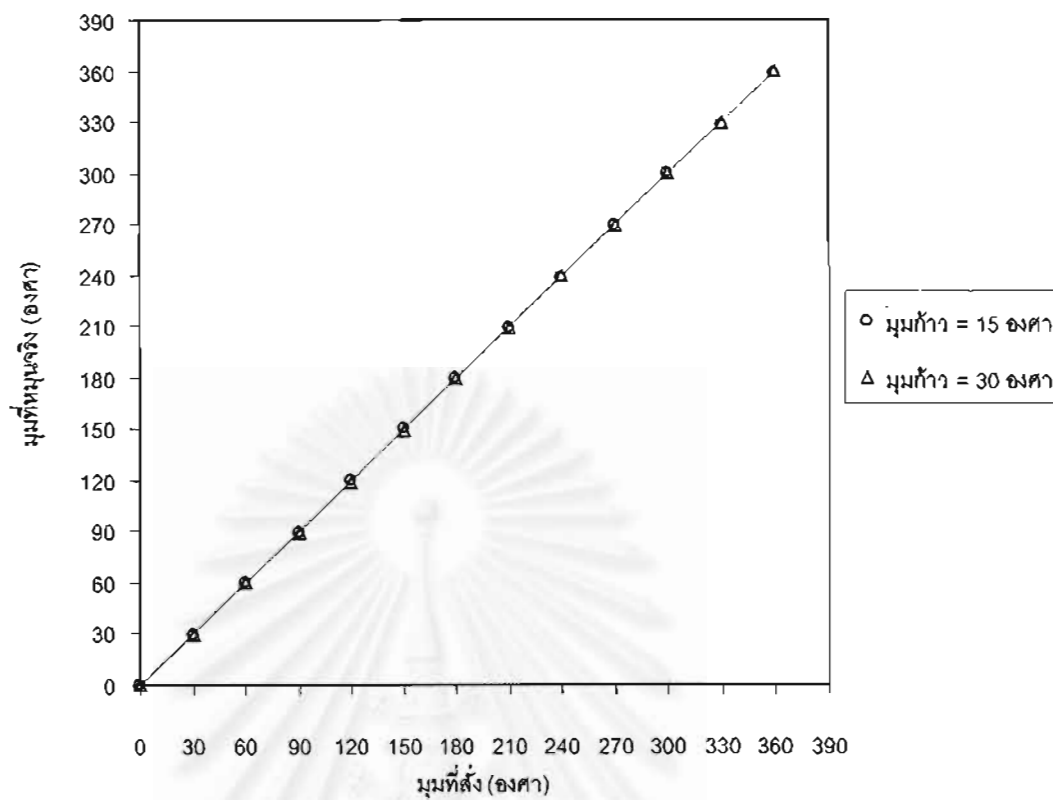


รูปที่ 6.19 การวัดมุมที่หุ่นยนต์หมุนจริง

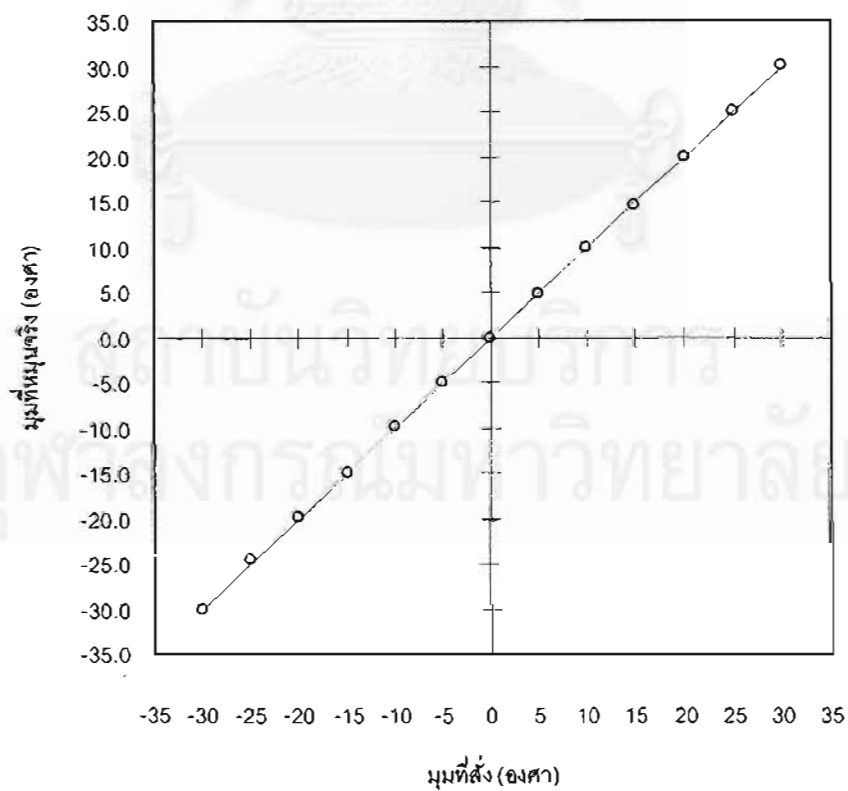
จากรูปที่ 6.19 คำนวณมุมได้จาก

$$\theta = \arctan\left(\frac{dy}{dx}\right)$$

การทดสอบแบ่งเป็นสองส่วนคือ มุมไม่เกิน 30° ซึ่งเป็นมุมมากที่สุดที่กรอบทั้งสองจะหมุนสัมพันธ์กันได้ และ มุมเกิน 30° ซึ่งต้องยกขาและหมุนแต่ละกรอบสลับกัน เช่นเดียวกับการเดินทดสอบที่มุมก้าว 15 และ 30 องศา ที่มุมก้าว 15 องศา มุมที่หมุนไปจะเริ่มจาก 0 องศา แล้วเพิ่มทีละ 15 องศาโดยหยุดการหมุนเป็นช่วง ๆ ช่วงละ 30 องศาเพื่อวัดมุม มุมที่วัดมาได้จะเป็นมุมของการหมุนที่ 30 60 90 ... 360 องศา จำนวนก้าวทั้งหมดในการหมุน 1 รอบ (360 องศา) คือ 24 ก้าว และกรณีมุมก้าว 30 องศาจะใช้จำนวนก้าว 12 ก้าว การทดสอบทั้งสองกรณีใช้ความเร็วเชิงมุม 15 องศาต่อวินาที ผลการทดสอบการหมุนแสดงในรูปที่ 6.20 และ 6.21

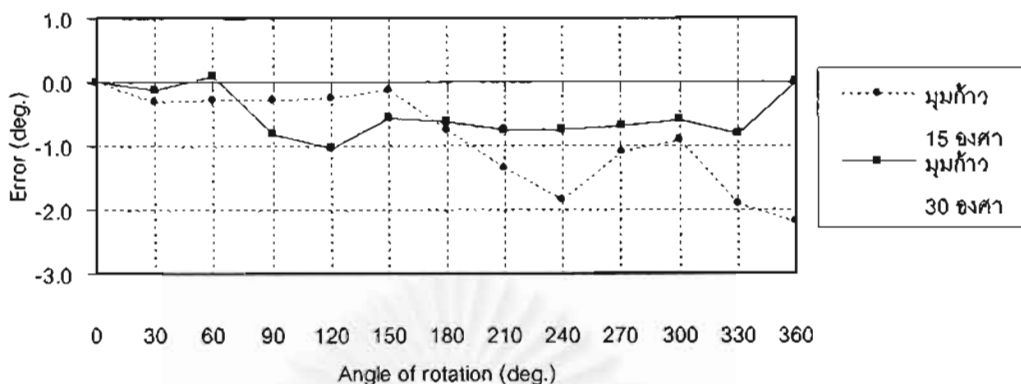


รูปที่ 6.20 การหมุนของหุ่นยนต์ มุมมากกว่า 30 องศา ระยะก้าวการหมุนเป็นมุมต่าง ๆ



รูปที่ 6.21 การหมุนของหุ่นยนต์ มุมไม่เกิน 30 องศา

รูปที่ 6.22 และ 6.23 แสดงค่าความผิดพลาดของการหมุนที่มุมต่าง ๆ เป็นองศา

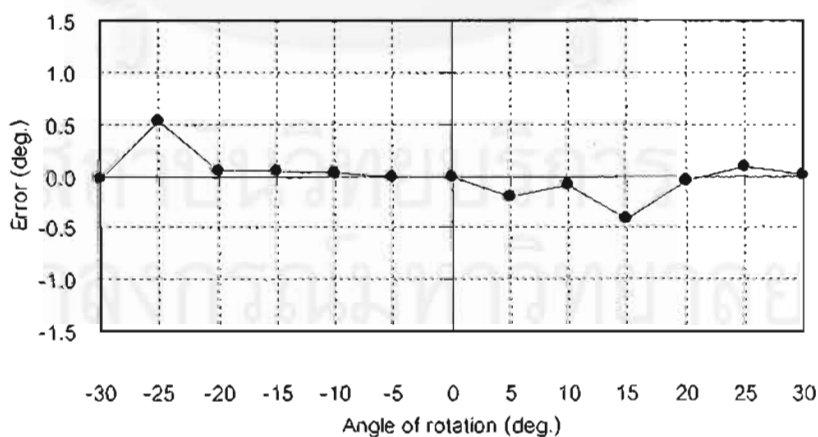


รูปที่ 6.22 ความผิดพลาดเชิงมุมในการหมุนของหุ่นยนต์ มุมหมุนเกิน 30 องศา

จากรูปที่ 6.22 พบว่าความผิดพลาดเชิงมุมในการหมุนตัวของหุ่นยนต์ ที่มุมก้าว 15 องศาจะมากกว่าความผิดพลาดที่มุมก้าว 30 องศา เนื่องจากใช้จำนวนก้าวในการหมุนมากเมื่อหมุนไปเป็นมุมเท่ากัน เช่นเดียวกับการทดสอบในตอนที่ 6.1.2

ตารางที่ 6.6 ความผิดพลาดเชิงมุมที่ขนาดมุมก้าวต่าง ๆ

ความผิดพลาดเชิงมุม (องศา)	
มุมก้าว 15 องศา	มุมก้าว 30 องศา
-2	-1



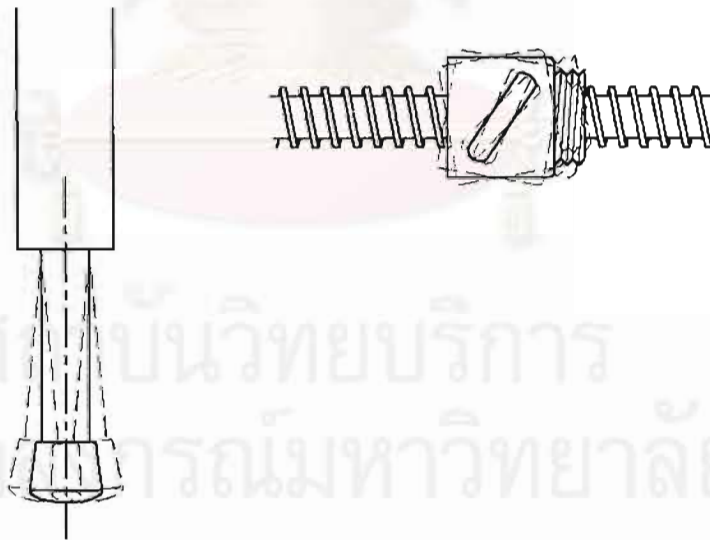
รูปที่ 6.23 ความผิดพลาดเชิงมุมในการหมุนของหุ่นยนต์มุมหมุนไม่เกิน 30 องศา

จากรูปที่ 6.23 พบว่าความผิดพลาดเชิงมุมที่มากที่สุดคือ 0.5 องศา ที่มุม -25 องศา และความผิดพลาดโดยทั่วไปไม่เกิน ± 0.5 องศา จากสมการที่ 4.1 ถึง 4.3 เห็นได้ว่าความผิดพลาดเชิงมุม

เป็นผลมาจากความผิดพลาดของกรอบหุ่นยนต์เช่นเดียวกันกับความผิดพลาดเชิงทิศทาง และ ระยะทาง พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ที่มีผลต่อมุมคือความกว้างของกรอบสามเหลี่ยม หรือ $2a$ ดังรูปที่ 4.1 หากค่า a ที่ใช้ในการคำนวณน้อยกว่าค่า a ของกรอบจริง จะทำให้มุมที่หมุนมีค่าน้อยกว่ามุมที่ต้องการจริง และในทำนองกลับกัน หากค่า a ที่ใช้ในการคำนวณมากกว่าค่า a ของกรอบจริง จะทำให้มุมที่หมุนมีค่ามากกว่ามุมที่ต้องการจริง ค่า a ที่ใช้ในการทดสอบคือ 327.0

6.3 สรุปผลการทดสอบ

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยต่างๆ เช่น ระยะเวลาก้าว (ความเร็ว) และ ระยะก้าว พบว่า ความเร็วในการเคลื่อนที่ไม่มีความสัมพันธ์กับความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของข้อต่อเป็นการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งความผิดพลาดของตำแหน่งปลายไม่ขึ้นกับความเร็ว ในกรณีแปรผันระยะก้าว พบว่า ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเป็นร้อยละของระยะทางการเคลื่อนที่มีค่าลดลงเมื่อระยะก้าวมากขึ้น อธิบายได้ว่าเมื่อหุ่นยนต์ใช้ระยะก้าวในการเดินมากขึ้น จำนวนก้าวในการเดินจะลดลง ความผิดพลาดสะสมที่เกิดจากการก้าวของหุ่นยนต์จะลดลง ความผิดพลาดดังกล่าวได้แก่ ความไม่แข็งแกร่งของกลไกเช่น ขา และ บอลสกรูว์ ความไม่แข็งแกร่งของกลไกส่งผลให้การวางตัวของหุ่นยนต์มีความคลาดเคลื่อน ในขณะที่ขาหุ่นยนต์แต่ละพื้น



รูปที่ 6.24 ความไม่แข็งแกร่งของกลไก

ทั้งนี้ความผิดพลาดของทิศทางการเคลื่อนที่ที่ไม่มีความสัมพันธ์กับระยะ เนื่องมาจากความผิดพลาดของระยะทางขึ้นอยู่กับความผิดรูปของกลไกเป็นส่วนใหญ่

ปัจจัยที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ได้แก่

1. ความผิดรูปของกลไก

2. ความไม่แข็งเกร็งของกลไก
3. ความผิดพลาดเนื่องจากการควบคุม เนื่องมาจากความละเอียดของอุปกรณ์วัดตำแหน่ง และความคลาดเคลื่อนของจุดที่ข้อต่อเคลื่อนที่ไปจริงจากจุดที่ตั้ง เนื่องจากแรงเสียดทาน

ตารางที่ 6.7 แสดงค่าความผิดพลาดสูงสุดในการทดสอบในลักษณะต่าง ๆ และค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 6.7 ตารางแสดงค่าความผิดพลาดที่สูงที่สุดในการทดสอบต่าง ๆ

ค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์	$\gamma_1 = 0.03, \gamma_2 = 0.03, a = 327.0$	
ความเร็วเฉลี่ยสูงสุดในการทดสอบ	4 เมตรต่อวินาที ความผิดพลาดของทิศทางสูงสุด 2 องศา ความผิดพลาดของระยะทางสูงสุด $\pm 1\%$ ของระยะทาง	
การเดินทางโดยไม่มีภาระ		
ความผิดพลาดของทิศทางสูงสุด	2 องศา	ระยะก้าว 40 มิลลิเมตร ระยะเวลาการเคลื่อนที่ 0.8 วินาที
ความผิดพลาดของระยะทางสูงสุด	$\pm 1.5\%$ ของระยะทาง	
การเดินทางโดยหันหน้าไปในทิศทางที่จะเดิน		
ความผิดพลาดของทิศทางสูงสุด	2.5 องศา	ระยะก้าว 120 มิลลิเมตร ระยะเวลาการเคลื่อนที่ 3.0 วินาที
การหมุน		
ความผิดพลาดเชิงมุม	-2.5 องศา ที่มุมหมุน 360 องศา	มุมก้าว 15 องศา

บทที่ 7

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้อาจแบ่งได้ดังนี้

1. การปรับปรุงความถูกต้องในการเคลื่อนที่ในแบบต่าง ๆ
2. การเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่ไม่ราบเรียบ
3. การเพิ่มความสามารถในการตัดสินใจ โดยการเพิ่มอุปกรณ์ตรวจรู้ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

7.1 การเพิ่มความถูกต้องในการเคลื่อนที่

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 6 ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ส่วนใหญ่มาจากความผิดรูปของกลไก ดังนั้นหากสามารถสร้างกลไกที่มีความผิดรูปน้อยมาก หรือสามารถจำลองความผิดรูปออกมาเป็นสมการได้ใกล้เคียงกับความจริง จะสามารถลดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ได้

1. เปลี่ยนวิธีการยึดกรอบสามแฉกจากการเชื่อม เป็นการยึดด้วยสลักเกลียว โดยสามารถปรับความคลาดเคลื่อนของมุมได้เล็กน้อย
2. ทดลองหาค่า γ_1 และ γ_2 ที่มีความถูกต้องมากขึ้น
3. หาคความกว้างของกรอบสามเหลี่ยม (2a) ที่มีความถูกต้องมากขึ้น

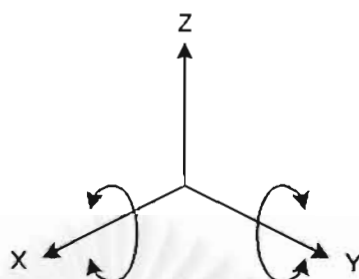
การปรับปรุงนี้จะช่วยเพิ่มความถูกต้องของการเคลื่อนที่แบบไม่มีการป้อนกลับ (การสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการ โดยไม่มีการวัดตำแหน่งที่เคลื่อนที่จริงกลับมาเปรียบเทียบ ผิดกับกรณีการควบคุมแบบป้อนกลับ) มีความถูกต้องมากขึ้น

โดยทั่วไปการการนำร่องของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ได้ จะใช้อุปกรณ์วัดตำแหน่งอื่น ๆ ช่วยในการวัดตำแหน่งจริง เช่นระบบหาดำแหน่งด้วยดาวเทียม (Global Positioning System, GPS และ Local Positioning System, LPS) หรือการหาดำแหน่งโดยใช้เข็มทิศร่วมกับเอ็นโคเดอร์ [26] ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์สามารถปรับตัวได้ดีในสภาวะที่จะทำให้เกิดความไม่แน่นอนในการเคลื่อนที่ เปรียบได้กับเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับ

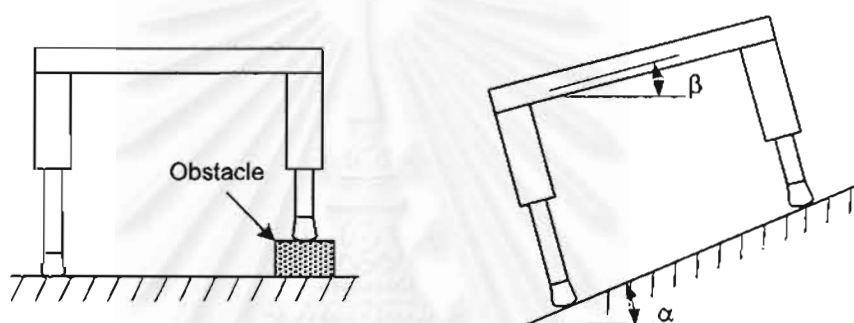
7.2 การเพิ่มความสามารถในการเดินบนพื้นผิวไม่ราบเรียบ

หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถข้ามสิ่งกีดขวางที่มีความสูงไม่เกินระยะเคลื่อนที่ของขา แต่สำหรับสิ่งกีดขวางที่มีความสูงมากกว่า หรือพื้นที่ที่มีความลาดชัน ต้องควบ-

คุมระนาบของกรอบหุ่นยนต์ด้วย ดังนั้นจึงต้องติดอุปกรณ์วัดความเอียงของระนาบ [11] และ อุปกรณ์วัดระยะขาคู่หุ่นยนต์ด้วย ระนาบสามารถหมุนได้ในสองแกนดังรูปที่ 8.1



รูปที่ 7.1 การหมุนของกรอบหุ่นยนต์ในสองแกน



รูปที่ 7.2 การเดินข้ามสิ่งกีดขวางและการเดินบนทางลาดชัน

อีกหนทางในการเพิ่มความสามารถในการเดินบนพื้นที่ลาดชันคือ การเปลี่ยนกลไกจากกลไกแบบขนานบนระนาบ ที่มีสามองศาความอิสระ เป็นกลไกแบบขนานที่มีหกองศาความอิสระ เช่นกลไกแบบสจิวัด (Steward Platform) [24]

7.3 การเพิ่มอุปกรณ์ตรวจจับ

การเพิ่มอุปกรณ์ตรวจจับต่าง ๆ จะทำให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการตัดสินใจสูงขึ้น เช่นการหลบเลี่ยงสิ่งกีดขวาง การวางแผนการเคลื่อนที่ (Path planning) ระบบที่ใช้คือระบบการมองของหุ่นยนต์ (Robot vision) โดยใช้กระบวนการทางภาพ (Image Processing) เพื่อวิเคราะห์พื้นที่หรือสิ่งกีดขวาง หรืออาจใช้ระบบโซนาร์หาระยะทาง (Sonar Range Finder System) เพื่อหาระยะทางระหว่างสิ่งกีดขวางและหุ่นยนต์ [26]

รายการอ้างอิง

- [1] Hartikainen, K. K.; Halme, A. J.; Lehtinen, H.; and Koskinen, K. O. MECANT I: A Six Legged Walking Machine for Research Purposes in Outdoor Environment. Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 1 (1992): 157-163.
- [2] Shigeo Hirose, Kan Yoneda, Kazuhiko Arai and Tomoyoshi Ibe. Design of Prismatic Quadruped Walking Vehicle TITAN VI. Fifth International Conference on Advanced Robotics. Vol. 1 (1991): 723-728.
- [3] Keisuke Arikawa and Shigeo Hirose. Development of Quadruped Walking Robot TITAN-VIII. Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 1 (1996): 208-214.
- [4] Hisato Kobayashi and Katsuhiko Inagaki. Development of a Hexapod Walking Robot: "Hexax-I". Proc. of the IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems. Vol. 3 (1991): 1545-1549.
- [5] Weidemann, H. J.; Pfeiffer, F.; and Eltze, J. The Six-Legged TUM Walking Robot. Proc. of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 2 (1994): 1026-1033.
- [6] Willard S. MacDonald. Design and Implementation of Multilegged Walking Robot. **Senior Honors Thesis**. Laboratory of Perceptual Robotics, University of Massachusetts-Amherst, 1994.
- [7] Keisuke Arikawa and Shigeo Hirose. Study of Walking Robot for 3 Dimensional Terrain (Optimization of walking motion based on GDA and Coupled Drive). IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol.1 (1995): 703-708.
- [8] Shigeo Hirose. A New Design Criterion in Robotic Mechanism (Prevention of Negative, Power Consumption). Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 1 (1993): 131-135.
- [9] Hironari Adachi, Noriho Koyachi and Eiji Nakano. Mechanism and Control of a Quadruped Walking Robot. IEEE Control Systems Magazine. Vol. 8 (October 1988): 14-19.
- [10] Merlet, J-P. Parallel manipulators: state of the art and perspectives [Web page, www.sopinria.fr/sagapersonnel/merlet/Etat/etat_de_lart99.html] Sophia-Antipolis: INRIA, 1996

- [11] Toshio Fukada, Yuji Adachi, Haruo Hoshino, Kazuhiro Kosuke, Isao Matsunaga and Fumihito Arai. Posture Control of 6-leg Walking Robot. Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Vol. 1 (1995): 1006-1011.
- [12] Yusuke Ota, Yoshihiko Inagaki, Ken Yoneda and Shigeo Hirose. Research on a Six-Legged Walking Robot with Parallel Mechanism. Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vol. 1 (1998): 241-248.
- [13] Ernest O. Doebelin. Mearurement Systems Application and Design. 4th edition. Singapore: McGraw-Hill, 1990.
- [14] Model 4122, 4212 DC Brush Servo Amplifiers User's Manual. (n.p.): Copley Controls Corporation.
- [15] คู่มือ/เทียบเบอร์ ไอซี TTL. กรุงเทพมหานคร: ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2521.
- [16] L298 Dual Full-Bridge Driver Datasheet. (n.p.): STMicroelectronics, 2000.
- [17] Neil Storey. Electronics A systems approach. USA: Addison-Wesley, 1992.
- [18] DDA-06 Manual. (n.p.): Metrabyte Corporation, 1985.
- [19] PA-CP12 A/D D/A and Digital I/O Card User's Manual. (n.p.): Acqutek Corporation, 1994.
- [20] คู่มือ ET-PC8255 ET-PC Serial. (ม.ป.ท.): บริษัท อีทีที จำกัด.
- [21] LM 78xx Series Voltage Regulators Datasheet. (n.p.): National Semiconductor, 1999.
- [22] John J. Craig. Introduction to Robotics Mechanics and Control. 2nd edition. USA: Addison-Wesley, 1989.
- [23] รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. การควบคุมระบบพลศาสตร์. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [24] Kok-Meng Lee and Dharman K. Shah. Kinematic Analysis of a Three-Degree-of-Freedom In-Parallel Actuated Manipulator. IEEE Journal of Robotics and Automation 5 (1998): 354-360.
- [25] Gene F. Franklin, J. David Powell, Michael L. Workman. Digital Control of Dynamic Systems. 2nd edition. USA: Addison-Wesley, 1990.
- [26] He Kezhong, Sun Haihang, Guo Muhe and Wang Hong. Research of Intelligent Mobile Robot Key Techniques. Proc. Of IEEE International Conference on Industrial Technology, pp. 503-507, 1996.



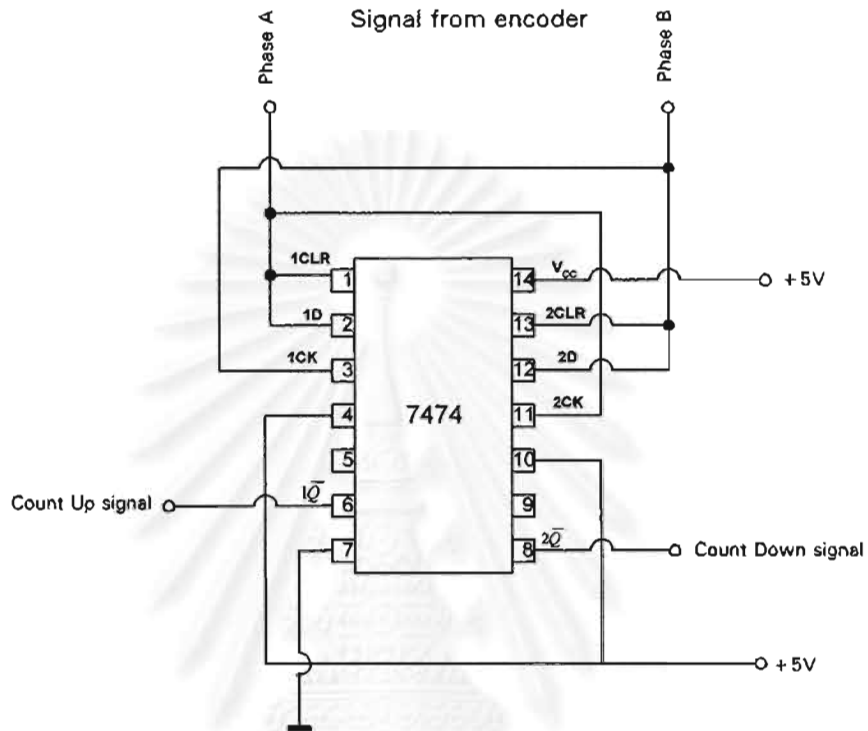
ภาคผนวก

สถาบันวิทย์บริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

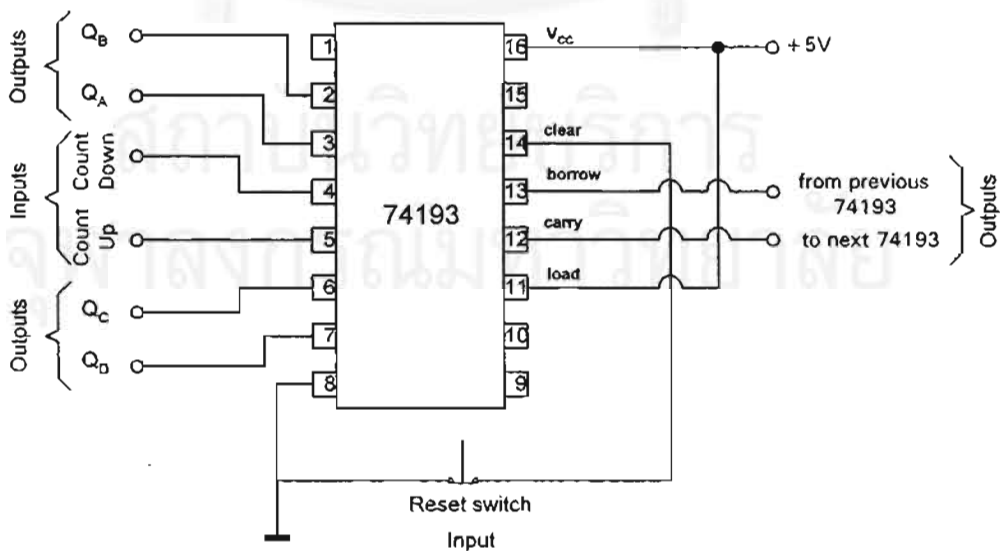
ภาคผนวก ก.

แผนผังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุม

ก.1 วงจรนับขึ้น/ลง (UP/DOWN Counter)

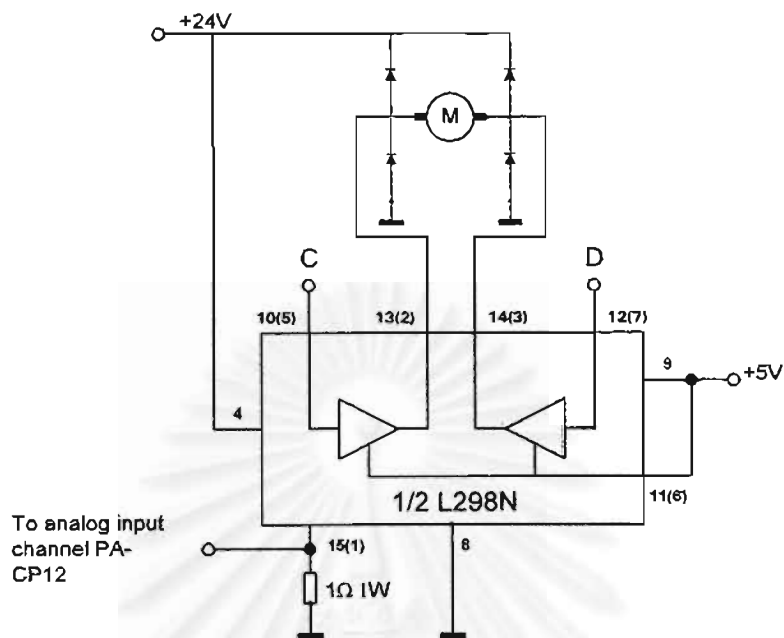


รูปที่ ก.1 การต่อวงจรถอตที่สัญญาณนับขึ้นและนับลงโดยใช้ไอซี 7474



รูปที่ ก.2 การต่อวงจรนับสัญญาณนับขึ้นและนับลงโดยใช้ไอซี 74193

ก.2 วงจรขับมอเตอร์แบบสองทิศทาง

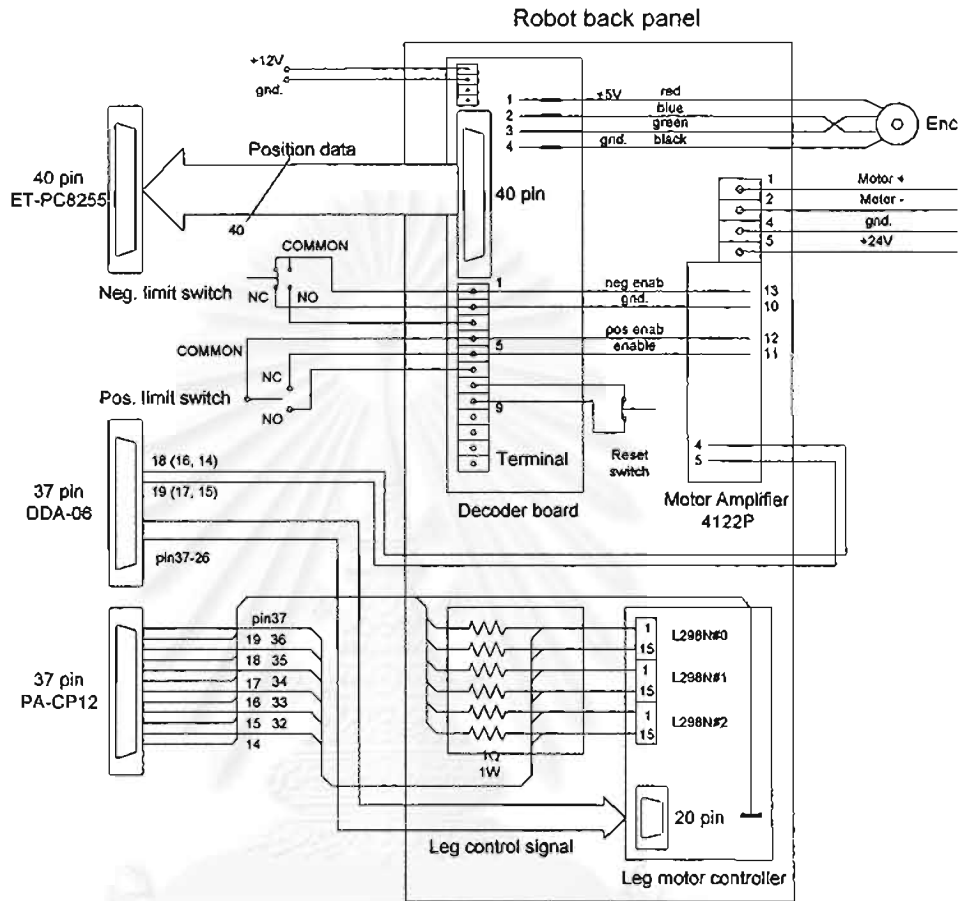


รูปที่ ก.3 การต่อวงจรถับมอเตอร์แบบสองทิศทาง

จากรูปที่ ก.2 หมายเลขของขาภายในวงเล็บมีลักษณะการต่ออุปกรณ์เช่นเดียวกับหมายเลขของขาภายนอกวงเล็บ ไอซี L298N สามารถขับมอเตอร์สองตัวได้ทั้งสองทิศทาง สถานะการทำงานดูได้จากตารางที่ 3.4

ภาคผนวก ข.

แผนผังการเดินสายเชื่อมต่อสัญญาณต่าง ๆ

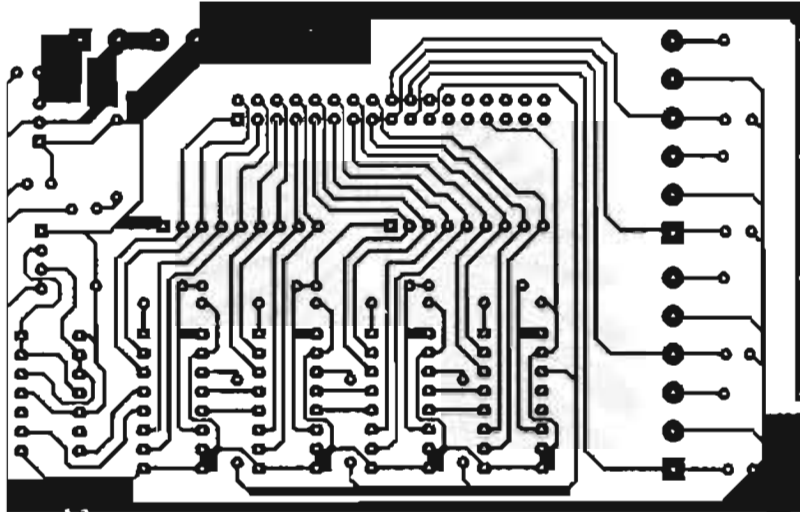


รูปที่ ข.1 แผนผังการเดินสายเชื่อมต่อสัญญาณต่าง ๆ

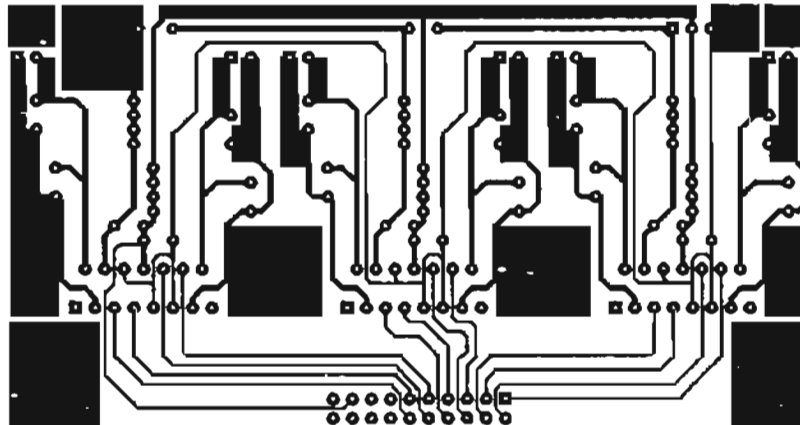
การเชื่อมต่อดังในรูป ข.1 แสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้แก่วงจรนับขึ้น/ลง วงจรขับมอเตอร์ ลิ้มิต สวิตช์ และเอ็นโคเดอร์เพียงหนึ่งชุดจากอุปกรณ์ทั้งหมดสามชุด อุปกรณ์ที่เหลืออีกสองชุดมี ลักษณะการต่อเช่นเดียวกัน โดยเปลี่ยนหมายเลขขาสัญญาณเป็นหมายเลขที่แสดงในวงเล็บ

ภาคผนวก ค.

ลายทองแดงของวงจรนับขึ้น/ลง และวงจรควบคุมทิศทางมอเตอร์



รูปที่ ค.1 ลายทองแดง (มองจากด้านอุปกรณ์) ของวงจรนับขึ้น/ลง



รูปที่ ค.2 ลายทองแดง (มองจากด้านอุปกรณ์) ของวงจรควบคุมทิศทางมอเตอร์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐดนัย ดันทวิรุพท์ เกิดเมื่อวันที่ 18 พฤษภาคม ปีพ.ศ. 2520 เป็นชาว กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนพันธะวัฒนา เมื่อสำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่หก ได้สอบเข้าศึกษาต่อชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย หลังจากนั้น ได้เข้าศึกษาต่อในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำเร็จได้ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกลในปีการศึกษา 2539 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีพ.ศ. 2540



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย