

การควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ

นายมงคล เทียนวิบูลย์



สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

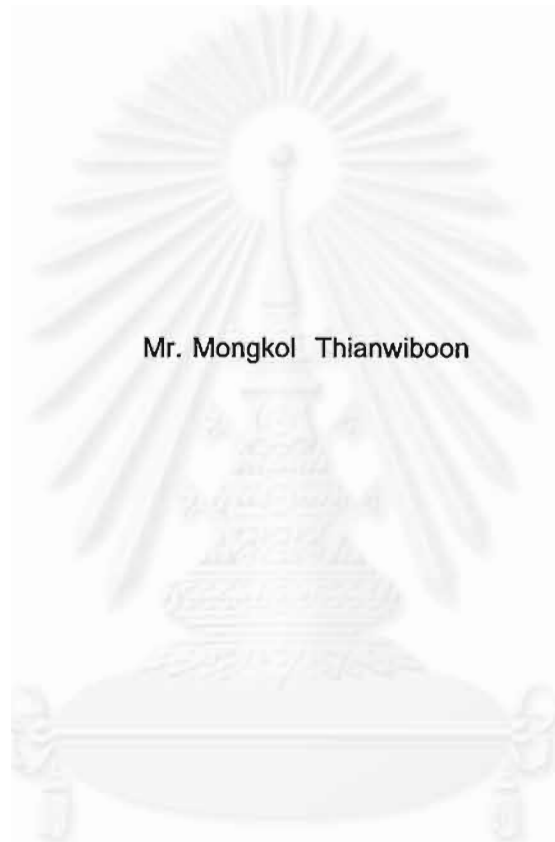
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-334-445-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CONTROL OF AN OMNI-DIRECTIONAL WHEELED MOBILE ROBOT



Mr. Mongkol Thianwiboon

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

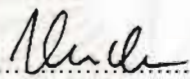
Academic Year 1999

ISBN 974-334-445-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์
โดย
ภาควิชา
อาจารย์ที่ปรึกษา

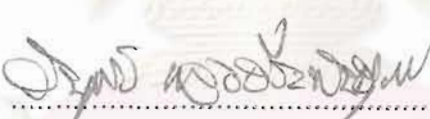
การควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ
นายมงคล เทียนวิบูลย์
วิศวกรรมเครื่องกล
รองศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

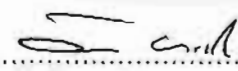
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท



..... 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)

มงคล เทียนวิบูลย์ : การควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ
(CONTROL OF AN OMNI-DIRECTIONAL WHEELED MOBILE ROBOT)
อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 107 หน้า. ISBN 974-334-445-4.

งานวิจัยนี้เป็นส่วนของการพัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ ที่สามารถเคลื่อนที่ทั้งในแนวหน้า-หลัง แนวด้านข้าง และหมุนรอบตัวเอง หรือ การเคลื่อนที่ที่เกิดจากการรวมกันของการเคลื่อนที่ทั้งสามแบบได้อย่างอิสระ โดยใช้ตัวประมวลผลมากกว่าหนึ่งตัว ทำการควบคุมแบบขนาน กล่าวคือใช้ตัวประมวลผลกลางจำนวนหนึ่งตัวส่งคำสั่งไปยังตัวประมวลผลของแต่ละล้อจำนวนสี่ตัว

การทดสอบประกอบด้วยการหาผลตอบสนองของแต่ละล้อที่มีต่อคำสั่งความเร็วที่มีลักษณะเป็นฟังก์ชันขั้นขนาดต่างๆ เคลื่อนที่ในลักษณะแนวเส้นตรง พบว่าความผิดพลาดของระยะทางการเคลื่อนที่สูงสุดมีค่าไม่เกิน 5.4% ภายในระยะการเคลื่อนที่ 1.5 เมตร ด้วยความเร็วไม่เกิน 0.6 เมตรต่อวินาที ความผิดพลาดเชิงมุมเมื่อหมุนรอบตัวเอง มีค่าไม่เกิน 6.6% ต่อการหมุนรอบตัวเอง 1 รอบ ด้วยความเร็วไม่เกิน 2.1 เรเดียนต่อวินาที ทำการเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม และ แปดเหลี่ยม เพื่อหาผลของความผิดพลาดสะสมที่มีต่อตำแหน่งสุดท้าย โดยที่ความผิดพลาดสะสมดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้เพื่ออ้างอิงกับสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นหัวข้อที่วิจัยได้ในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา.....2542

ลายมือชื่อนิสิต.....มงคล เทียนวิบูลย์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

407 03772 21 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: MOBILE ROBOT / OMNI-DIRECTIONAL

MONGKOL THIANWIBOON : CONTROL OF AN OMNI-DIRECTIONAL WHEELED
MOBILE ROBOT

THESIS ADVISOR : ASSO.PROF. VIBOON SANGVEERAPHUNSIRI, Ph.D, 107 pp.
ISBN 974-334-445-4.

This research is to develop an omni-directional wheeled mobile robot which can move in forward-backward direction, lateral and rotation or combination of these three motion. We develop a parallel control architecture for controlling the robot. The motion of the robot is actuated by four DC servomotors connected to the wheels. Each motor will be controlled by one processor. The central processor will responsible for sending the command to each wheel's local processor.

The experiments consist of measuring transient response of each wheels with respect to the different magnitude step functions. The motion error will be investigated from straight-line motion, rotating motion and combination of both straight line and rotating motion. For the 1.5 meter straight-line with speed setting below 0.6 m/s and rotating at fixed position with speed setting below 2.1 rad/sec, the maximum error is 5.4% and 6.6% respectively. The motion in close-trajectory such as square and octagon are also investigated. Most of the errors are effect by the environment conditions such as slip. This error can be reduced by incorporate more sensors for detecting environment to improve perceptual acuity which can be the research topics in the future.

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา.....2542

ลายมือชื่อนิสิต.....มณฑล.....เจ้าหน้าที่.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของท่านอาจารย์ รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ประกอบการวิจัยต่างๆ และให้ความรู้เรื่องหุ่นยนต์ และระบบควบคุมอัตโนมัติ ทั้งยังให้คำแนะนำ และช่วยคิดเห็นต่างๆของการวิจัยมาด้วยดีโดยตลอด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณแหล่งข้อมูลทุกแหล่ง ที่ได้เอื้อประโยชน์ในการค้นคว้าสำหรับงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณเป็นพิเศษสำหรับ Patrick Fred Muir ที่ได้กรุณาส่งวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาเอกฉบับสมบูรณ์มาให้จากต่างประเทศ

ขอบคุณ สุวิทย์ กิระวิทยา นิสิตภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยออกแบบ และสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบ LoNoTech 1 ให้ความรู้ทั้งด้านวงจรไฟฟ้า และการเขียนโปรแกรม ขอขอบคุณ ชยสร สอนสมจิตร นิสิตภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ช่วยเขียนโปรแกรมสร้างสัญญาณ PWM ในการปรับความเร็วมอเตอร์ ขอขอบคุณ อุดมศักดิ์ ไช้ศรีทอง นิสิตภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ให้คำปรึกษาในด้านวงจรไฟฟ้า และรายละเอียดปลีกย่อยอื่นๆ

ขอบคุณเพื่อนๆของผู้วิจัยทุกคนที่ให้อกำลังใจมาตลอด และเนื่องจากได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาโดยไม่มีเงื่อนไขใดๆ จากบริษัท NSS จำกัด จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา และพี่สาว ซึ่งสนับสนุนทั้งในด้านการเงิน และให้อกำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด จนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

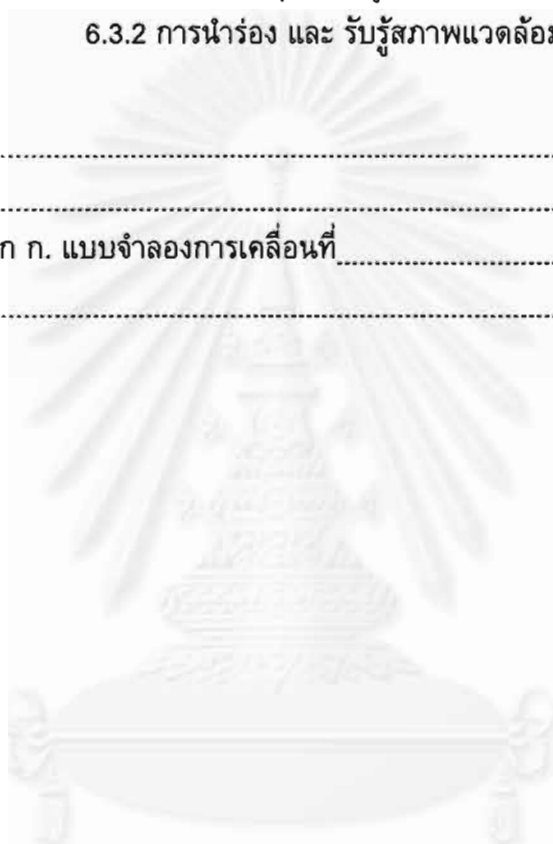
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขต.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้.....	3
2.1.1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ.....	4
2.2 ลักษณะการออกแบบที่เคยมีมา.....	5
2.2.1 ลักษณะการวางล้อ.....	5
2.2.2 ลักษณะของล้อ.....	9
บทที่ 3 การออกแบบ.....	11
3.1 ขั้นตอนการออกแบบ.....	11
3.2 วงจรไฟฟ้า.....	15
3.2.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า.....	15
3.2.2 คอมพิวเตอร์.....	18
3.2.3 ส่วนติดต่อและความคุมมอเตอร์.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 อุปกรณ์ตรวจวัด.....	25
3.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่.....	27
3.4.1 สมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และ สมการการเคลื่อนที่ผกผัน.....	28
บทที่ 4 การออกแบบระบบควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	31
4.1 ระบบควบคุมป้อนกลับ.....	31
4.2 PID Controller.....	33
4.2.1 Proportional Control.....	34
4.2.2 Integral Control.....	34
4.2.3 Derivative Control.....	35
4.2.4 PID Control.....	35
4.3 Resolved Motion Rate WMR Servo-Control.....	36
4.4 โปรแกรมควบคุม.....	38
4.4.1 ตัวประมวลผลของแต่ละล้อ.....	38
4.4.2 ตัวประมวลผลกลาง.....	39
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	42
5.1 การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง.....	43
5.2 การหมุนรอบตัวเอง.....	53
5.3 การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม.....	61
5.4 การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูป 8 เหลี่ยม.....	65
5.5 หาผลตอบสนองของล้อ เมื่อสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น.....	73
บทที่ 6 อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	77
6.1 อภิปรายผลการทดลอง.....	77
6.1.1 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง.....	78
6.1.2 วิเคราะห์การหมุนรอบตัวเองอยู่กับที่.....	84
6.1.3 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม.....	86
6.1.4 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม.....	87
6.1.5 หาผลตอบสนองของล้อเมื่อสั่งความเร็วการหมุน เป็นฟังก์ชันขั้น.....	88

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
6.1.6 อภิปรายผลการทดลอง.....	93
6.2 สรุปผลการทดลอง.....	94
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	95
6.3.1 การปรับปรุงความถูกต้องในการเคลื่อนที่.....	95
6.3.2 การนำร่อง และ รับรู้สภาพแวดล้อม.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	98
ภาคผนวก ก. แบบจำลองการเคลื่อนที่.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	106



สารบัญตาราง

บทที่		หน้า
บทที่ 2		
	ตารางที่ 2.1 ข้อแตกต่างเชิงกลระหว่าง WMRs กับแขนหุ่นยนต์.....	5
บทที่ 3		
	ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบระหว่าง LoNoTech 1 และ LoNoTech 4.....	14
บทที่ 5		
	ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที.....	48
	ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที.....	50
	ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที.....	50
	ตารางที่ 5.4 ตัวอย่างผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	55
	ตารางที่ 5.5 ตัวอย่างผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	56
	ตารางที่ 5.6 ตัวอย่างผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 1.4 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	57
	ตารางที่ 5.7 ตัวอย่างผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 1.4 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	58
	ตารางที่ 5.8 ตัวอย่างผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	59
	ตารางที่ 5.9 ตัวอย่างผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	60
	ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที.....	62
	ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที.....	63
	ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที.....	64

สารบัญญัตินาง (ต่อ)

บทที่	หน้า
ตารางที่ 5.13	ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที 68
ตารางที่ 5.14	ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที 70
ตารางที่ 5.15	ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที 72
บทที่ 6	
ตารางที่ 6.1	แสดงค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5% ของล้อยี่ 1 89
ตารางที่ 6.2	แสดงค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5% ของล้อยี่ 2 90
ตารางที่ 6.3	แสดงค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5% ของล้อยี่ 3 91
ตารางที่ 6.4	แสดงค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5% ของล้อยี่ 4 92
ตารางที่ 6.5	แสดงค่าความผิดพลาดสูงสุด ที่เกิดขึ้นในการทดลองแบบต่างๆ 94
ตารางที่ 6.1	แสดงค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5% เปรียบเทียบทั้งสี่ล้อ .. 95

สารบัญภาพ

บทที่	หน้า
บทที่ 2	
รูปที่ 2.1	LEGO Inside หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ ต่อด้วยชิ้นส่วน LEGO 3
รูปที่ 2.2	Rug Warrior หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยสายพาน..... 4
รูปที่ 2.3	LoNoTech 5 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยขา..... 4
รูปที่ 2.4	แผนผังการวางล้อแบบ Differential Drive 5
รูปที่ 2.5	Maximum High หุ่นยนต์ที่วางล้อแบบ Differential Drive 6
รูปที่ 2.6	Differential Drive..... 6
รูปที่ 2.7	ปัญหาของการวางล้อแบบ Differential Drive 7
รูปที่ 2.8	แผนผังการวางล้อแบบ Synchro Drive 7
รูปที่ 2.9	หุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยระบบ Synchro Drive..... 7
รูปที่ 2.10	การวางล้อแบบรถสามล้อ 8
รูปที่ 2.11	Neptune หุ่นยนต์สามล้อ ขับเคลื่อนและบังคับเลี้ยวโดยล้อหน้า 8
รูปที่ 2.12	แผนผังการวางล้อแบบรถยนต์..... 9
รูปที่ 2.13	The Stanford Cart หุ่นยนต์ที่วางล้อแบบรถยนต์..... 9
รูปที่ 2.14	แสดงล้อแบบต่างๆ..... 10
รูปที่ 2.15	Uranus หุ่นยนต์ใช้ล้อแบบ Omni-Directional..... 10
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1	LoNoTech 4 ออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD 11
รูปที่ 3.2	หุ่นยนต์ต้นแบบ LoNoTech 1..... 12
รูปที่ 3.3	หุ่นยนต์ LoNoTech 4..... 13
รูปที่ 3.4	เปรียบเทียบระหว่าง LoNoTech 1 กับ LoNoTech 4..... 14
รูปที่ 3.5	แบตเตอรี่..... 15
รูปที่ 3.6	แผงสวิทช์..... 16
รูปที่ 3.7	แผนผังการแจกจ่ายพลังงาน..... 17
รูปที่ 3.8	รูปแบบการควบคุม..... 18
รูปที่ 3.9	แผนผังการทำงาน..... 19
รูปที่ 3.10	ตัวประมวลผล หมายเลข 89C51 และ 89C1051 20
รูปที่ 3.11	ชุดควบคุมมอเตอร์ที่ได้สร้างขึ้น..... 22
รูปที่ 3.12	วงจรตัวประมวลผลของแต่ละล้อ..... 22
รูปที่ 3.13	วงจรขับมอเตอร์..... 22

สารบัญภาพ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รูปที่ 3.14	แสดงภายในของวงจรถับมอเตอร์..... 23
รูปที่ 3.15	แผนผังวงจร..... 24
รูปที่ 3.16	สัญญาณที่ได้จาก Encoder..... 26
รูปที่ 3.17	Encoder..... 26
รูปที่ 3.18	Encoder ขณะติดตั้งบนเพลลา..... 27
รูปที่ 3.19	ล้อไม่สามารถเลื่อนไกลในแนวด้านข้างได้ แต่สามารถหมุนรอบจุดสัมผัสได้..... 28
รูปที่ 3.20	การกำหนดแกนอ้างอิง..... 29
บทที่ 4	
รูปที่ 4.1	การควบคุมแบบป้อนกลับ..... 31
รูปที่ 4.2	สัญญาณป้อนกลับ และ ตัวควบคุม..... 31
รูปที่ 4.3	ระบบควบคุมป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบ PID..... 33
รูปที่ 4.4	ตัวควบคุมแบบ PID เมื่อนำมาใช้ร่วมกับแบบจำลองการเคลื่อนที่..... 36
รูปที่ 4.5	การทำงานของตัวประมวลผลของแต่ละล้อ..... 38
รูปที่ 4.6	บอร์ดประมวลผลกลาง..... 39
รูปที่ 4.7	การทำงานของตัวประมวลผลกลาง..... 41
บทที่ 5	
รูปที่ 5.1	ตำแหน่งที่ติดตั้ง Laser pointer..... 43
รูปที่ 5.2	แสดงการติดตั้ง Laser pointer..... 44
รูปที่ 5.3	การหาดำแหน่งศูนย์กลางของหุ่นยนต์..... 44
รูปที่ 5.4	การหามุมเบี่ยงเบน..... 45
รูปที่ 5.5	แสดงทิศทางการหมุนของแต่ละล้อ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศต่างๆ..... 46
รูปที่ 5.6	ผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที..... 47
รูปที่ 5.7	ผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที..... 49
รูปที่ 5.8	ผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที..... 51
รูปที่ 5.9	การวัดมุมที่หมุนได้..... 53

สารบัญญภาพ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รูปที่ 5.10 แสดงทิศทางการหมุนของแต่ละล้อ เมื่อหมุนตัวในทิศทวน และ ตามเข็มนาฬิกา.....	54
รูปที่ 5.11 ผลการทดลองหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียน ต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	55
รูปที่ 5.12 ผลการทดลองหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียน ต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	56
รูปที่ 5.13 ผลการทดลองหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 1.4 เรเดียน ต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	57
รูปที่ 5.14 ผลการทดลองหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 1.4 เรเดียน ต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	58
รูปที่ 5.15 ผลการทดลองหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 2.1 เรเดียน ต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	59
รูปที่ 5.16 ผลการทดลองหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 2.1 เรเดียน ต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	60
รูปที่ 5.17 การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม.....	61
รูปที่ 5.18 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2 เมตร ต่อวินาที.....	62
รูปที่ 5.19 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.4 เมตร ต่อวินาที.....	63
รูปที่ 5.20 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.6 เมตร ต่อวินาที.....	64
รูปที่ 5.21 การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม.....	66
รูปที่ 5.22 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2 เมตร ต่อวินาที.....	67
รูปที่ 5.23 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.4 เมตร ต่อวินาที.....	69
รูปที่ 5.24 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.6 เมตร ต่อวินาที.....	71
รูปที่ 5.25 ลักษณะการทดลองหาผลตอบสนองของล้อที่มีต่อฟังก์ชันขั้น.....	73
รูปที่ 5.26 ผลตอบสนองของล้อที่ 1 เมื่อสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที.....	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รูปที่ 5.27 ผลตอบสนองของล้อที่ 2 เมื่อสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันชั้น ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที.....	74
รูปที่ 5.28 ผลตอบสนองของล้อที่ 3 เมื่อสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันชั้น ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที.....	75
รูปที่ 5.29 ผลตอบสนองของล้อที่ 4 เมื่อสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันชั้น ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที.....	76
บทที่ 6	
รูปที่ 6.1 ความผิดพลาดของระยะทางเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 50 เซนติเมตร ในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที.....	78
รูปที่ 6.2 ความผิดพลาดของระยะทางเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 100 เซนติเมตร ในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที.....	79
รูปที่ 6.3 ความผิดพลาดของระยะทางเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 150 เซนติเมตร ในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที.....	80
รูปที่ 6.4 มุมเบี่ยงเบนเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 50 เซนติเมตร ในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที.....	81
รูปที่ 6.5 มุมเบี่ยงเบนเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 100 เซนติเมตร ในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที.....	82
รูปที่ 6.6 มุมเบี่ยงเบนเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 150 เซนติเมตร ในทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที.....	83
รูปที่ 6.7 ความผิดพลาดในการหมุนไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.7, 1.4 และ 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	84
รูปที่ 6.8 ความผิดพลาดในการหมุนไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.7, 1.4 และ 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	85
รูปที่ 6.9 ทดสอบการเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที.....	86
รูปที่ 6.10 ทดสอบการเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที.....	87
รูปที่ 6.11 แสดงโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5 %.....	88
รูปที่ 6.12 ผลตอบสนองของล้อที่ 1 เมื่อสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันชั้น ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที.....	89

สารบัญญภาพ (ต่อ)

บทที่	หน้า
รูปที่ 6.13 ผลตอบสนองของล้อที่ 2 เมื่อสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันชั้น ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที.....	90
รูปที่ 6.14 ผลตอบสนองของล้อที่ 3 เมื่อสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันชั้น ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที.....	91
รูปที่ 6.15 ผลตอบสนองของล้อที่ 4 เมื่อสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันชั้น ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที.....	92
รูปที่ 6.16 ความไม่แข็งแรงของระบบกันสะเทือน และ การเยื้องศูนย์ของล้อ.....	92
ภาคผนวก	
รูปที่ ก.1 การกำหนดแกนอ้างอิง.....	99



บทที่ 1

บทนำ



1.1 ความเป็นมา

เนื่องจากความสามารถของคอมพิวเตอร์ในระยะหลัง มีความก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็ว มีประสิทธิภาพสูงขึ้นอย่างมาก ทำให้การศึกษาเกี่ยวกับหุ่นยนต์มีความกว้างขวางมากขึ้น เพราะหัวใจของหุ่นยนต์ทั้งหลายจะขึ้นอยู่กับระบบประมวลผล นั่นก็คือคอมพิวเตอร์นั่นเอง ศาสตร์ทางด้านหุ่นยนต์เริ่มจากการพัฒนาเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม ทำการประกอบเคลื่อนย้ายชิ้นส่วน ตามโปรแกรมที่ตั้งไว้อย่างง่าย ๆ ค่อย ๆ พัฒนาจนเป็นหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด จนถึงสามารถตัดสินใจได้เองโดยอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งอยู่บนตัวหุ่น แต่การที่หุ่นยนต์จะสามารถตัดสินใจและเคลื่อนที่ได้อย่างถูกต้องนั้น ตัวหุ่นเองจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของตัวเอง เทียบกับสิ่งแวดล้อม

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ด้วยล้อ ซึ่งสามารถคำนวณ และ วิ่งไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ โดยอาศัยข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดตั้งอยู่ที่แต่ละล้อ ซึ่งหุ่นยนต์ดังกล่าวสามารถใช้เป็นฐานในการศึกษา Sensor-based Wheel Mobile Robots ได้ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาเทคโนโลยีเกี่ยวกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ (Wheeled Mobile Robots)
- 2) เพื่อออกแบบ และ สร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ ที่รองรับการควบคุมแบบต่าง ๆ กันได้

1.3 ขอบเขต

- 1) หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งแนวเดินหน้า/ถอยหลัง (forward/backward), ตามแนวด้านข้าง (lateral) และหมุนรอบตัวเอง (rotation) หรือ การเคลื่อนที่ที่เกิดจากการรวมกันของทั้ง 3 แบบที่กล่าวมา ได้อย่างอิสระบนพื้นราบ โดยอาศัยล้อ ซึ่งมีองศาความอิสระ (Degree of Freedoms; DOFs) เท่ากับ 3 หรือที่เรียกกันว่า Omni-directional wheel

2) ความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนที่ไม่เกิน 10 เซนติเมตร ต่อระยะทาง 1 เมตร ด้วยความเร็วไม่เกิน 0.6 เมตรต่อวินาที ความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนรอบตัวเองไม่เกิน 30 องศา ต่อการหมุนรอบตัวเอง 1 รอบ ด้วยความเร็วเชิงมุมไม่เกิน 0.5 เรเดียนต่อวินาที (ประมาณ 0.8 รอบต่อวินาที)

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาและวิเคราะห์ผลการวิจัยที่มีผ่านมา เพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบ และควบคุมหุ่นยนต์
- 2) ออกแบบลักษณะของหุ่น และการวางตำแหน่งของล้อ อย่างคร่าว ๆ
- 3) สร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ (Kinematics Modeling) เพื่อศึกษาความเป็นไปได้
- 4) ออกแบบ, สร้าง และ เลือกชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อประกอบเป็นหุ่นยนต์
- 5) ประกอบชิ้นงานขึ้นเป็นหุ่นยนต์ และแก้ไขเมื่อพบความผิดพลาด
- 6) ออกแบบระบบควบคุมขั้นต้น โดยอาศัย Kinematics Model ที่ได้หาไว้แล้ว
- 7) ทดสอบและแก้ไข

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อที่มีความคล่องตัวสูง เนื่องจากสามารถเคลื่อนที่ทั้ง 3 DOFs อย่างอิสระ
- 2) ผู้วิจัยในอนาคต สามารถใช้หุ่นยนต์นี้เป็นฐานในการพัฒนาระบบควบคุมขั้นสูงต่อไป

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ (Mobile Robots)

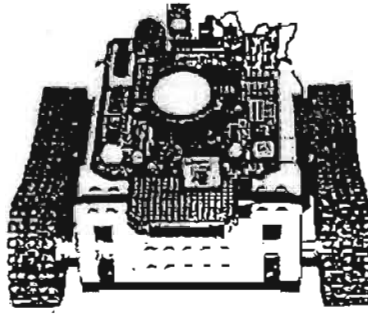
ในระยะแรก คอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมยังมีขนาดใหญ่ การวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ส่วนใหญ่จึงเน้นเกี่ยวกับแขนกลชนิดต่างๆ เพราะแขนกลชนิดนี้จะติดตั้งอยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนย้ายที่ติดตั้งบ่อยนัก ทั้งยังตอบสนองกับความต้องการทางด้านอุตสาหกรรมอีกด้วย

ต่อมา เมื่อคอมพิวเตอร์มีการพัฒนาให้มีขนาดเล็กลง ประสิทธิภาพสูงขึ้น จึงได้มีการนำคอมพิวเตอร์ติดตั้งลงบนหุ่นยนต์ แล้วพัฒนาให้สามารถเคลื่อนที่ได้ จึงนับเป็นจุดเริ่มของการค้นคว้าทางด้านหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ (Mobile Robot)



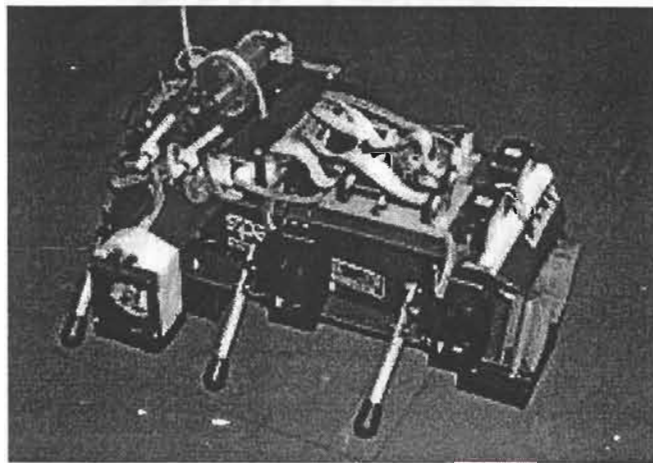
รูปที่ 2.1 LEGO Inside หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ด้วยล้อ ต่อด้วยชิ้นส่วน LEGO

โดยระบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ใช้กันทั่วไป มีอยู่ 3 แบบ ได้แก่ ใช้ล้อ, สายพาน (Tracks) และขา หุ่นยนต์ที่ใช้ล้อเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะไม่ซับซ้อนง่ายต่อการสร้าง สามารถรับน้ำหนักได้มากกว่า ในกรณีที่น้ำหนักโครงสร้างเท่ากัน แต่ก็มีข้อเสียคือ เคลื่อนที่ได้ไม่ดีนักบนพื้นที่ขรุขระ โดยเฉพาะถ้าสิ่งกีดขวางมีขนาดใหญ่ เมื่อเทียบกับล้อ ในขณะที่ 2 ระบบที่เหลือสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้



รูปที่ 2.2 Rug Warrior หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยสายพาน

การเคลื่อนที่ที่ใช้สายพาน จะสูญเสียพลังงานมาก เนื่องจากจะเกิดการลื่นไถล (Slip) ทุกครั้งที่มีการเลี้ยว และการลื่นไถลดังกล่าวทำให้การคำนวณตำแหน่งผิดพลาดได้ ส่วนขา ใช้การได้ดีบนพื้นผิวขรุขระ แต่ต้องการองศาความอิสระ (Degree of Freedom : DOF) ที่มาก นั่นคือต้องการตัวขับเคลื่อน (Actuator) เป็นจำนวนมาก ทำให้ระบบโดยรวมซับซ้อนกว่า



รูปที่ 2.3 LoNoTech 5 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยขา

2.1.1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ (Wheeled Mobile Robots ; WMRs)

นิยามของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ [Patrick F. Muir] คือ หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่บนพื้นผิวได้ โดยอาศัยการขับเคลื่อนของชุดล้อที่สัมผัสกับพื้น ซึ่งติดตั้งอยู่บนตัวหุ่นยนต์ ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อมีความแตกต่างจากแขนหุ่นยนต์ที่อยู่กับที่ ดังตารางที่ 2.1

Wheeled Mobile Robots	Stationary Manipulators
1. เป็น closed-link chains	1. โดยทั่วไปจะเป็น opened-link chains จะเป็น closed-link chains ก็ต่อเมื่อไปแตะกับวัตถุที่อยู่นิ่ง
2. ผิวสัมผัสระหว่างล้อกับพื้นเป็น Higher-pair joints	2. ผิวสัมผัสระหว่างข้อต่อเป็น Lower-pair joints
3. บาง DOF เท่านั้นที่ถูกกระทำโดย Actuators	3. ทุก DOF ถูกกระทำโดย Actuators
4. บาง DOF เท่านั้นที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดตำแหน่ง หรือ ความเร็วได้	4. ทุก DOF มีอุปกรณ์ตรวจวัด

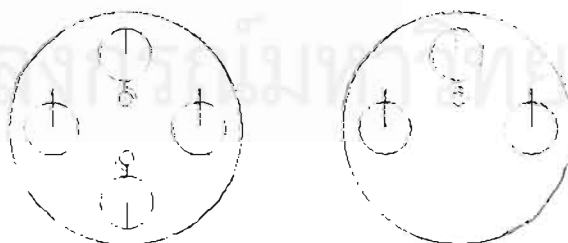
ตาราง 2.1 ข้อแตกต่างเชิงกลระหว่าง WMRs กับแขนหุ่นยนต์ (Stationary Manipulators)

2.2 ลักษณะการออกแบบที่เคยมีมา (Existing Design)

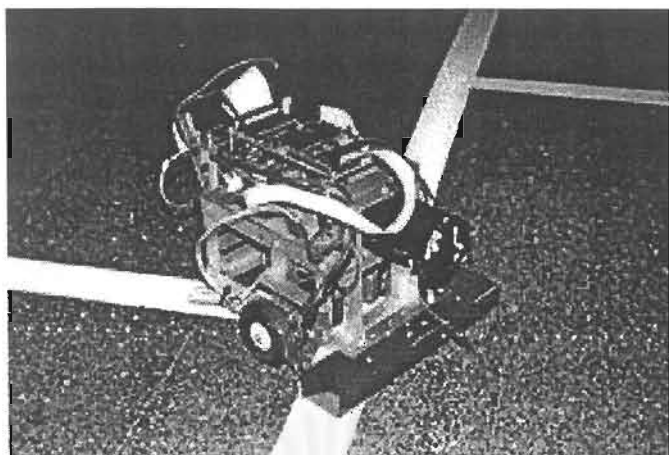
2.2.1 ลักษณะการวางล้อ

1) Differential Drive

เป็นการวางล้อที่ ความซับซ้อนน้อย ประกอบด้วยล้อขับ 2 ล้ออิสระที่มีแกนหมุนอยู่ในแนวเดียวกัน ลักษณะดังกล่าว ทำให้หุ่นยนต์สามารถวิ่งในแนวเส้นตรง, หมุนอยู่กับที่ หรือเคลื่อนที่เป็นส่วนโค้งได้ ปัญหาหนึ่งของการวางล้อแบบนี้คือ การออกแบบให้หุ่นยนต์มีความสมดุล โดยทั่วไปจะติดตั้งล้อตาม (Caster) จำนวน หนึ่ง หรือ สองล้อติดตั้งในรูปแบบสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัด หรือ รูปสามเหลี่ยม ขึ้นอยู่กับการกระจายน้ำหนัก

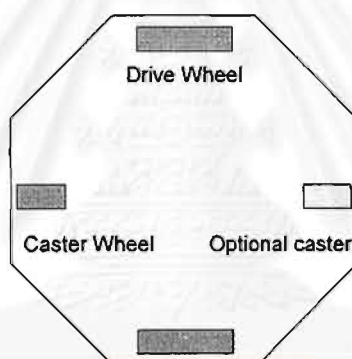


รูปที่ 2.4 แผนผังการวางล้อแบบ Differential Drive



รูปที่ 2.5 Maximum High หุ่นยนต์ที่วางล้อแบบ Differential Drive

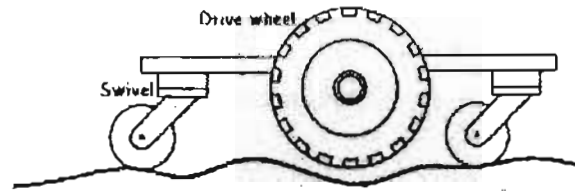
การวางล้อลักษณะสามเหลี่ยม ยังมีโอกาสที่หุ่นจะพลิกคว่ำได้ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Differential Drive

ถ้าไม่มีล้อตามเสริม เมื่อหุ่นยนต์วิ่งไปทางด้านขวามืออย่างรวดเร็ว แล้วหยุดทันที โอกาสที่หุ่นยนต์พลิกคว่ำจะมีสูงมาก แม้ว่าจุดศูนย์ถ่วง จะอยู่ทางด้านซ้ายมือก็ตาม

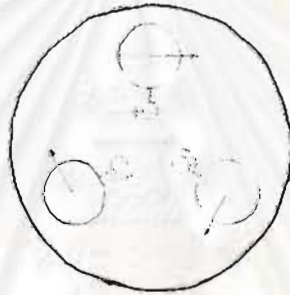
การวางล้อในรูปแบบข้าวหลามตัด สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ แต่ก็เกิดปัญหาเมื่อวิ่งบนพื้นผิวขรุขระ ถ้าล้อตามติดตั้งแบบตายตัว บางจังหวะ ล้อขับเคลื่อนอาจจะลอยพ้นพื้น ทำให้ไม่สามารถขับเคลื่อนหุ่นได้ ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ได้ด้วยการเพิ่มระบบกันสะเทือนอย่างง่ายให้กับล้อตามที่ติดตั้งอยู่



รูปที่ 2.7 ปัญหาของการวางล้อแบบ Differential Drive

2) Synchro Drive

ล้อทุกล้อสามารถขับเคลื่อน และหักเลี้ยวได้ แต่จะมีกลไกบางอย่างทำให้ล้อหันไปในทิศเดียวกันตลอด ถ้าต้องการเลี้ยว จะทำการหมุนทุกล้อรอบแกนตั้งพร้อมๆกัน การวางล้อลักษณะดังกล่าว สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นใน Differential Drive และ การวางล้อแบบรถยนต์ได้ แต่การสร้างจะมีความยากมากกว่า



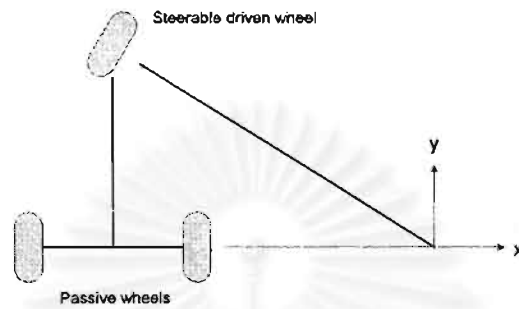
รูปที่ 2.8 แผนผังการวางล้อแบบ Synchro Drive



รูปที่ 2.9 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยระบบ Synchro Drive

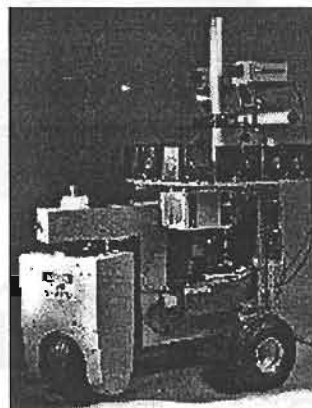
3) การวางล้อแบบรถสามล้อ

ติดตั้งล้อขับเคลื่อน 1 ล้อทางด้านหน้า และล้อตามธรรมชาติสองล้อ ไว้ทางด้านหลัง หรือติดตั้งในลักษณะกลับกัน



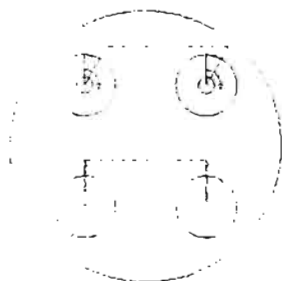
รูปที่ 2.10 การวางล้อแบบรถสามล้อ

ปัญหาของการวางล้อในลักษณะดังกล่าว คือเมื่อเคลื่อนที่ขึ้นเนิน จุดศูนย์ถ่วงจะห่างออกจากล้อหน้า ที่เป็นล้อขับเคลื่อนมากขึ้น ส่งผลให้ความสามารถในการเกาะพื้นลดลง และถ้ามีการบิดมุมเลี้ยวในขณะที่หุ่นไม่เคลื่อนที่ จะทำให้พื้นเสียหาย และ ทิศทางที่หุ่นจะวิ่งเกิดการผิดพลาด

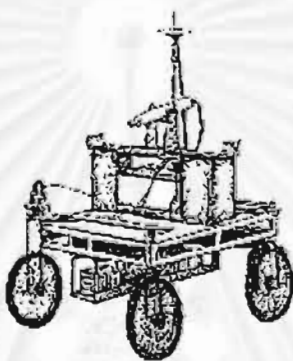


รูปที่ 2.11 Neptune หุ่นยนต์สามล้อ ขับเคลื่อนและบังคับเลี้ยวโดยล้อหน้า

4) การวางล้อแบบรถยนต์



รูปที่ 2.12 แผนผังการวางล้อแบบรถยนต์



รูปที่ 2.13 The Stanford Cart หุ่นยนต์ที่วางล้อแบบรถยนต์

การเคลื่อนที่ตามแนวยาว (Longitudinal motion) ถูกควบคุมด้วย ระบบขับเคลื่อนและระบบเบรก ส่วนระบบเลี้ยว ทำหน้าที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่ตามแนวยาว ให้กลายเป็นการเคลื่อนที่ในแนวขวางรวมกับการหมุน

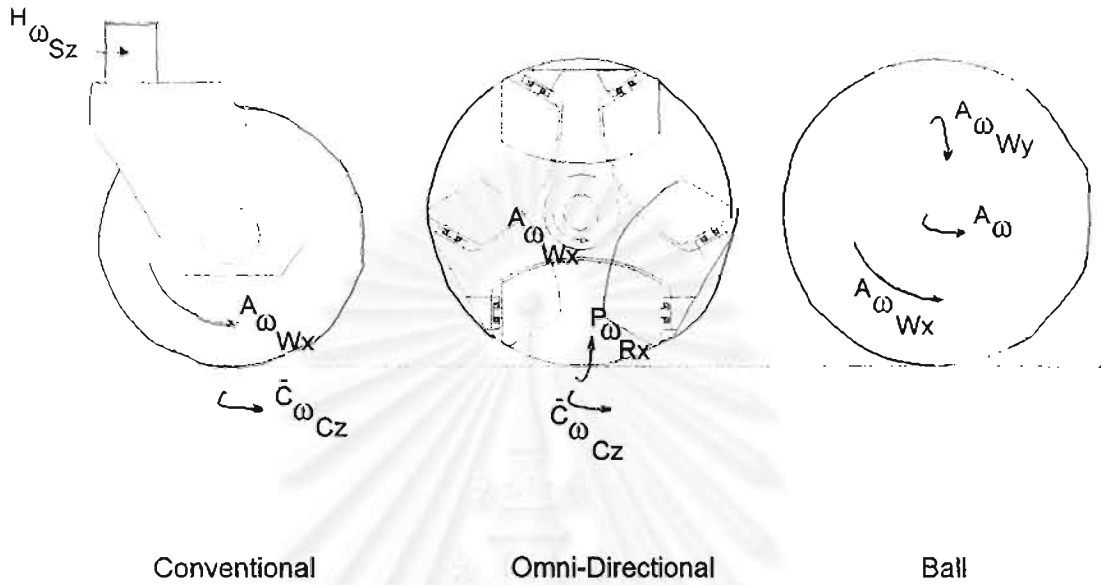
2.2.2 ลักษณะของล้อ

โดยทั่วไป มีล้ออยู่ 3 ชนิดที่ใช้กับ WMRs ได้แก่ ล้อธรรมดาเหมือนล้อรถยนต์, ล้อเคลื่อนที่ทุกทิศทาง (Omni-directional wheels) และล้อบอล (Ball wheels)

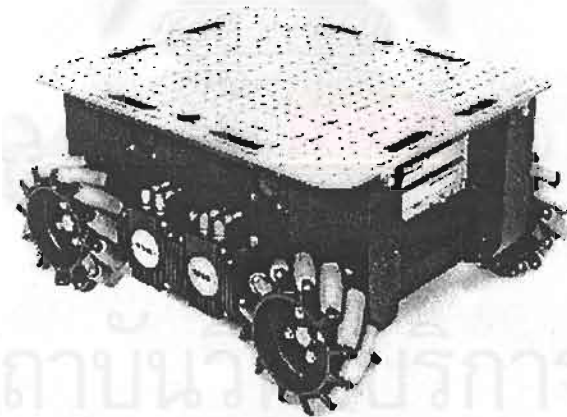
ปกติ ล้อแบบธรรมดาจะมี DOF เท่ากับ 2 จึงต้องมีกลไกสำหรับเลี้ยวติดตั้งอยู่เพื่อเพิ่มอีกหนึ่ง DOF ทำให้ล้อแบบนี้สามารถเคลื่อนที่บนระนาบในแนวเดียวกับการวางตัวของล้อ และหมุนได้รอบจุดสัมผัสระหว่างล้อกับพื้น

ล้อแบบ Omni-directional คิดในอีกแง่หนึ่ง ก็คือล้อแบบธรรมดาที่มีเกลียวพิเศษลักษณะเป็นลูกกลิ้ง ซึ่งติดตั้งเป็นมุม ๆ เท่าใดก็ได้ที่ไม่เท่ากับศูนย์เมื่อเทียบกับการวางตัวของล้อ ลูกกลิ้งดังกล่าวทำให้ล้อชนิดนี้ มี 3 DOF โดยไม่จำเป็นต้องมีกลไกเพิ่มเติม คือในแนวเดียวกับล้อ, ในแนวเดียวกับการหมุนของลูกกลิ้ง และ ในแนวการหมุนรอบจุดสัมผัส

ล้อที่มีความคล่องตัวมากที่สุด คือ ล้อบอล ซึ่งให้ 3 DOFs โดยไม่มีการสิ้นไถล แต่ล้อชนิดนี้สร้างได้ยาก จึงไม่เป็นที่นิยม



รูปที่ 2.14 แสดงล้อแบบต่างๆ



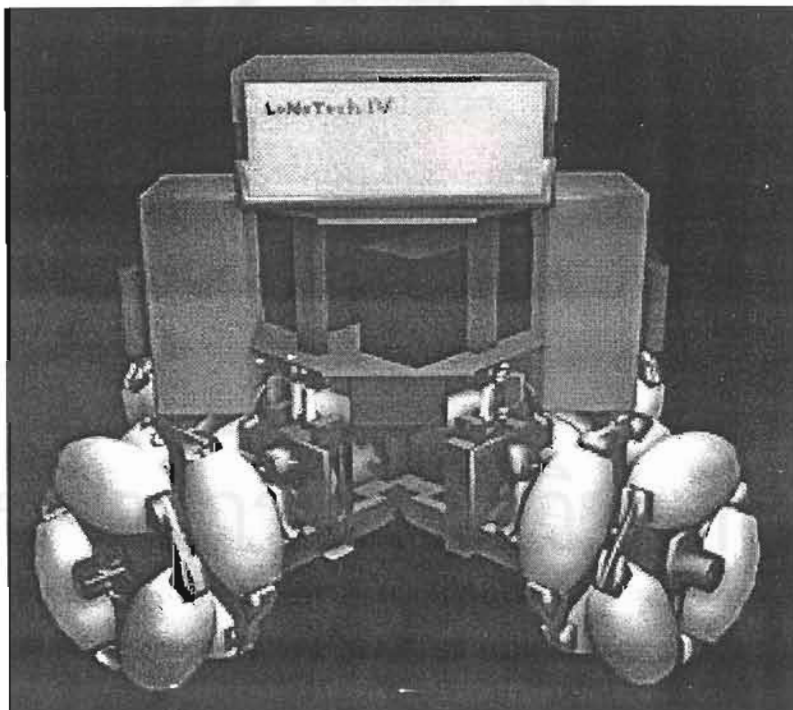
รูปที่ 2.15 Uranus หุ่นยนต์ใช้ล้อแบบ Omni-Directional

บทที่ 3 การออกแบบ

3.1 ขั้นตอนการออกแบบ

การออกแบบโดยทั่วไป มักจะทำในลักษณะออกแบบทั้งระบบ ประกอบกับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการจำลองเหตุการณ์ (Simulation) แล้วจึงสร้างระบบดังกล่าว และทดลองว่าทำงานได้ตามที่คิดไว้แต่แรกหรือไม่ การนำทฤษฎีมาใช้ในการออกแบบดังกล่าวจะใช้เวลาค่อนข้างมาก แต่บ่อยครั้งการใช้เวลานานในการออกแบบ ไม่ได้หมายความว่าผลที่ได้จะใช้ได้ดีเสมอไป เพราะขาดการนำผลการทดลองมาตรวจสอบ การออกแบบในการทำงานจริงมักจะแตกต่างไปจากการออกแบบบนกระดาษ หรือ การจำลองเหตุการณ์อยู่เสมอ

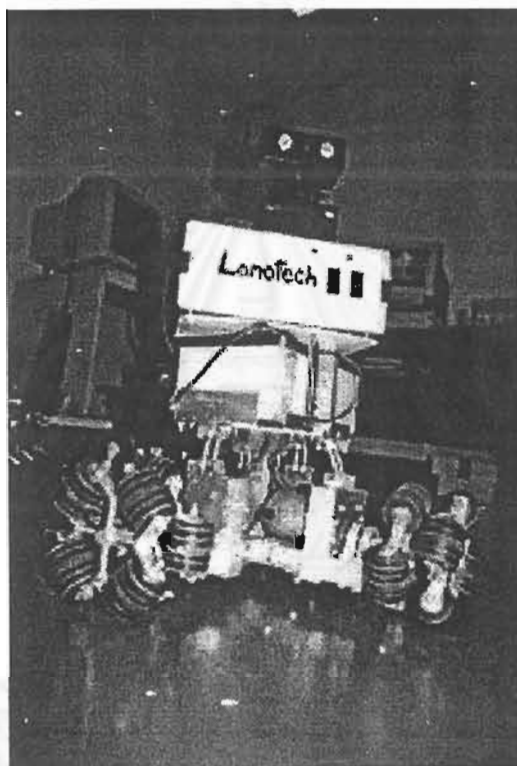
แต่เราสามารถค่อยๆออกแบบโดยใช้ทฤษฎี ประกอบกับสร้างและทดลองจริงได้ที่ระบบย่อยๆ ถ้าพบว่าสร้างจริงไม่ได้ หรือทำได้ยากจึงทำการออกแบบใหม่ในระบบดังกล่าว แล้วจึงนำระบบต่างๆที่ผ่านการทดลองแล้วมาประกอบกัน การออกแบบในลักษณะค่อยเป็นค่อยไปดังกล่าว จะใช้ได้ผลดีก็ต่อเมื่อผู้ที่ออกแบบได้ลงมือสร้างด้วยเท่านั้น เพราะระหว่างการสร้าง จะมองเห็นถึงขีดจำกัด และข้อผิดพลาดในการออกแบบ ซึ่งนำมาใช้ในการปรับปรุง หรือออกแบบใหม่ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 3.1 LoNoTech 4 ออกแบบด้วยโปรแกรม AutoCAD

1. หุ่นยนต์ต้นแบบ LoNoTech 1

จุดประสงค์ในการสร้าง คือเพื่อนำไปเข้าแข่งขัน Robot Contest 1998 เป็นการทดสอบรูปแบบโดยรวมของหุ่นยนต์ ทั้งชนิดของล้อ ตัวประมวลผล รวมถึงลักษณะโครงสร้างที่แบ่งออกเป็นส่วนๆ อย่างชัดเจน เนื่องจากเวลาที่ใช้สร้างมีค่อนข้างจำกัด งานที่ออกมาจึงไม่เรียบร้อยมากนัก ล้อที่ถูกสร้างขึ้นก็ออกแบบให้สร้างได้ง่าย ทำจากวัสดุที่หาได้ในท้องตลาด เป็นผลให้ขณะเคลื่อนที่ หุ่นยนต์มีการสั่นสะเทือนค่อนข้างมาก



รูปที่ 3.2 หุ่นยนต์ต้นแบบ LoNoTech 1

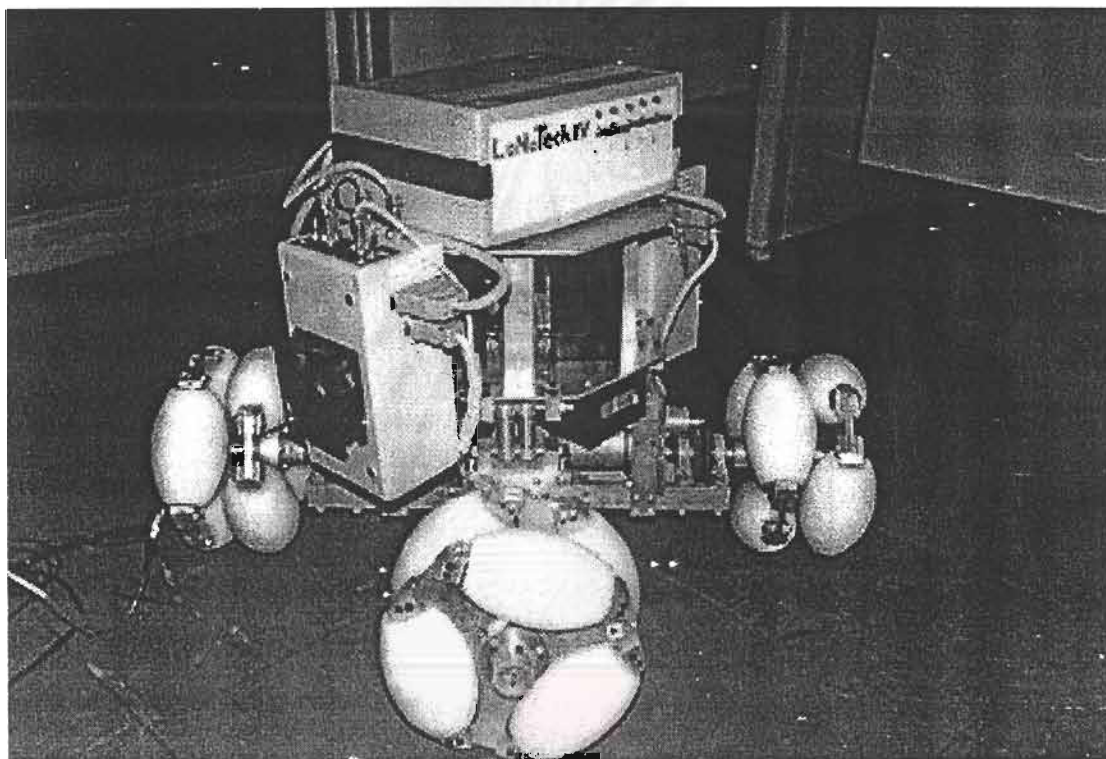
2. LoNoTech 4

ในการออกแบบ LoNoTech 4 ผู้สร้างนำแบบที่ได้ทดลองสร้างเป็นหุ่นยนต์ต้นแบบ LoNoTech 1 มาปรับปรุงบางส่วน ออกแบบใหม่ให้แข็งแรงขึ้น ส่วนการแบ่งพื้นที่ในการวางอุปกรณ์ทางไฟฟ้านั้นมีความเหมาะสม และง่ายต่อการดูแลรักษาแล้ว จึงคงลักษณะดังกล่าวไว้

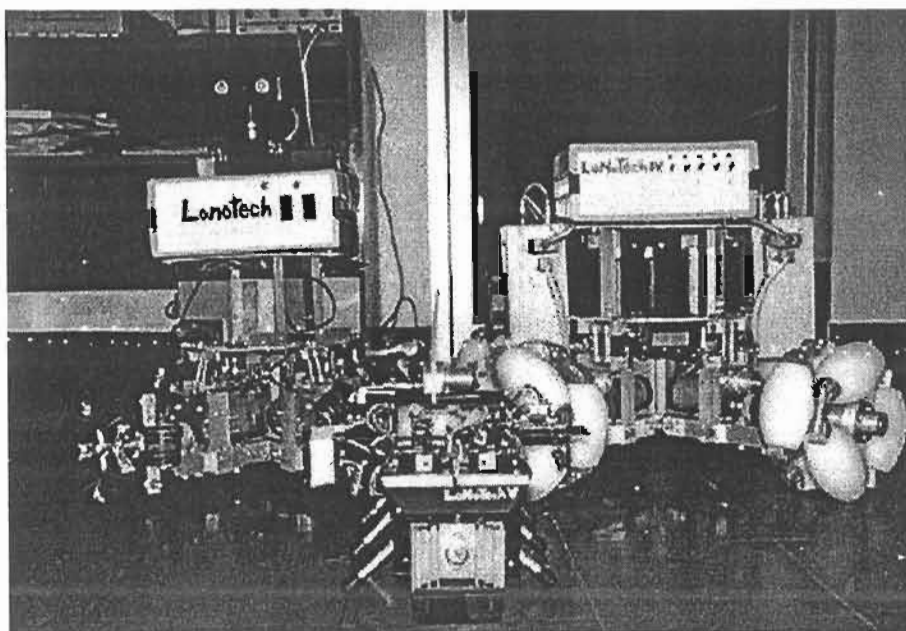
ส่วนวงจรทางไฟฟ้า ได้อาศัยพื้นฐานจากหุ่นยนต์ต้นแบบ LoNoTech 1 ซึ่งไม่สามารถควบคุมความเร็วได้ และไม่มีอุปกรณ์ป้องกันกลับ จึงปรับปรุง และ ออกแบบใหม่บางส่วน

ทำให้ควบคุมความเร็วได้ และตำแหน่งของแต่ละล้อได้ มีความทนทานมากขึ้น ดูแล่ง่ายขึ้น และมีระบบระบายความร้อนที่ดีขึ้น

ในส่วนของคอมพิวเตอร์ ในหุ่นตัวต้นแบบ เนื่องจากมีความซับซ้อนน้อยกว่า และถูกสร้างในเวลาอันจำกัด จึงใช้ตัวประมวลผลกลางเพียงตัวเดียวในการควบคุมทั้งหมด แต่ใน LoNoTech 4 มีความซับซ้อนในการควบคุมมากขึ้น เนื่องจากมีการควบคุมความเร็ว และตำแหน่ง โดยอาศัยประสบการณ์ในการสร้างตัวต้นแบบ ทำการออกแบบใหม่ ทำการกระจายงานให้กับตัวประมวลผลรองของแต่ละล้อ เพื่อลดภาระลง แต่การทำเช่นนี้ ต้องศึกษาและออกแบบการติดต่อกันระหว่างตัวประมวลผลเพิ่มเติม



รูปที่ 3.3 หุ่นยนต์ LoNoTech 4



รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบระหว่าง LoNoTech 1 (ซ้าย) กับ LoNoTech 4 (ขวา)

ส่วนตัวกลางเป็นหุ่นยนต์เดินด้วยขา LoNoTech 5

LoNoTech 1	LoNoTech 4
- ล้อออกแบบเพื่อให้สร้างได้ง่าย โดยอาศัยวัสดุในห้องตลาด	- Profile ล้อออกแบบใหม่ ให้วิ่งได้เรียบขึ้น
- แกนกลางแกนเดี่ยว	- เพิ่มแกนกลางเป็น 4 แกนเพื่อความแข็งแรง
- ระบบกันสะเทือนอย่างง่ายด้วยสปริง	- ระบบกันสะเทือนเช่นเดียวกับ LoNoTech 1
- ความเร็วเชิงมุมแต่ละล้อ 100 รอบต่อนาที	- ความเร็วเชิงมุมแต่ละล้อ 200 รอบต่อนาที
- ขับเคลื่อน 4 ล้ออิสระ	- ขับเคลื่อน 4 ล้ออิสระ
- On-Off Control	- Variable Speed Control with PID Controller
- ไม่มี Encoder	- ติดตั้ง Encoder 390 ppr ทดความเร็วจนสามารถวัดได้ 1950 ppr
- ตัวประมวลผลตัวเดียว หมายเลข 89C51	- ตัวประมวลผลกลาง หมายเลข 8032 1 ตัว ตัวประมวลผลรอง หมายเลข 89C51 4 ตัว
- แบตเตอรี่ Rechargeable Sealed Lead-Acid 7.2 Ah 2 ลูก	- แบตเตอรี่ Rechargeable Sealed Lead-Acid 7.2 Ah 2 ลูก

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบระหว่าง LoNoTech 1 และ LoNoTech

3.2 วงจรไฟฟ้า

ระบบทางไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่บนหุ่น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบย่อย ได้แก่ แหล่งกำเนิดไฟฟ้า, คอมพิวเตอร์ และส่วนติดต่อและควบคุมมอเตอร์ (Motor Interface)

3.2.1 แหล่งกำเนิดไฟฟ้า

3.2.1.1 แบตเตอรี่

แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้บนหุ่นยนต์ ได้มาจากแบตเตอรี่ Panasonic ชนิด Sealed Lead-Acid Batteries จำนวน 2 ลูก แต่ละลูกจ่ายแรงดัน 12 โวลต์ ความจุ 7.2 Amp hours.

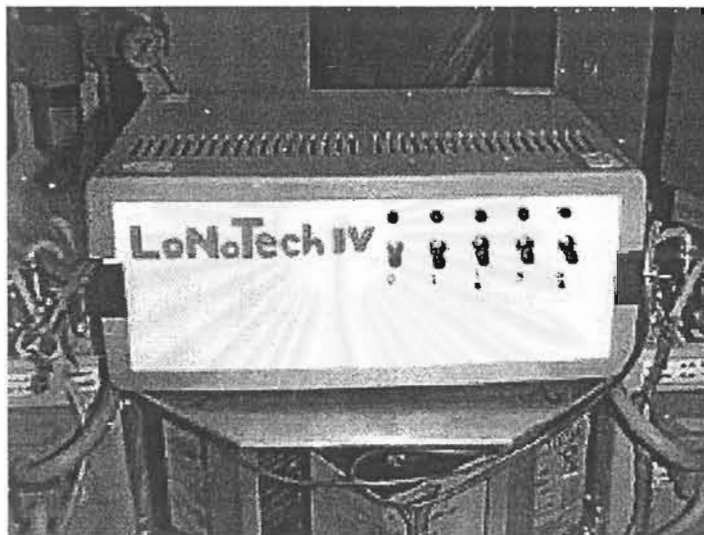
เหตุที่เลือกใช้แบตเตอรี่ชนิดตะกั่ว-กรด เพราะมีความจุต่อขนาดสูง มีความทนทาน อายุการใช้งานนาน และสามารถชาร์จไฟใหม่ได้ง่าย ไม่อาศัยวงจรซับซ้อน



รูปที่ 3.5 แบตเตอรี่ Panasonic Rechargeable Sealed Lead-Acid 12V 7.2 Ah

3.2.1.2 การแจกจ่ายพลังงาน (Power Distribution)

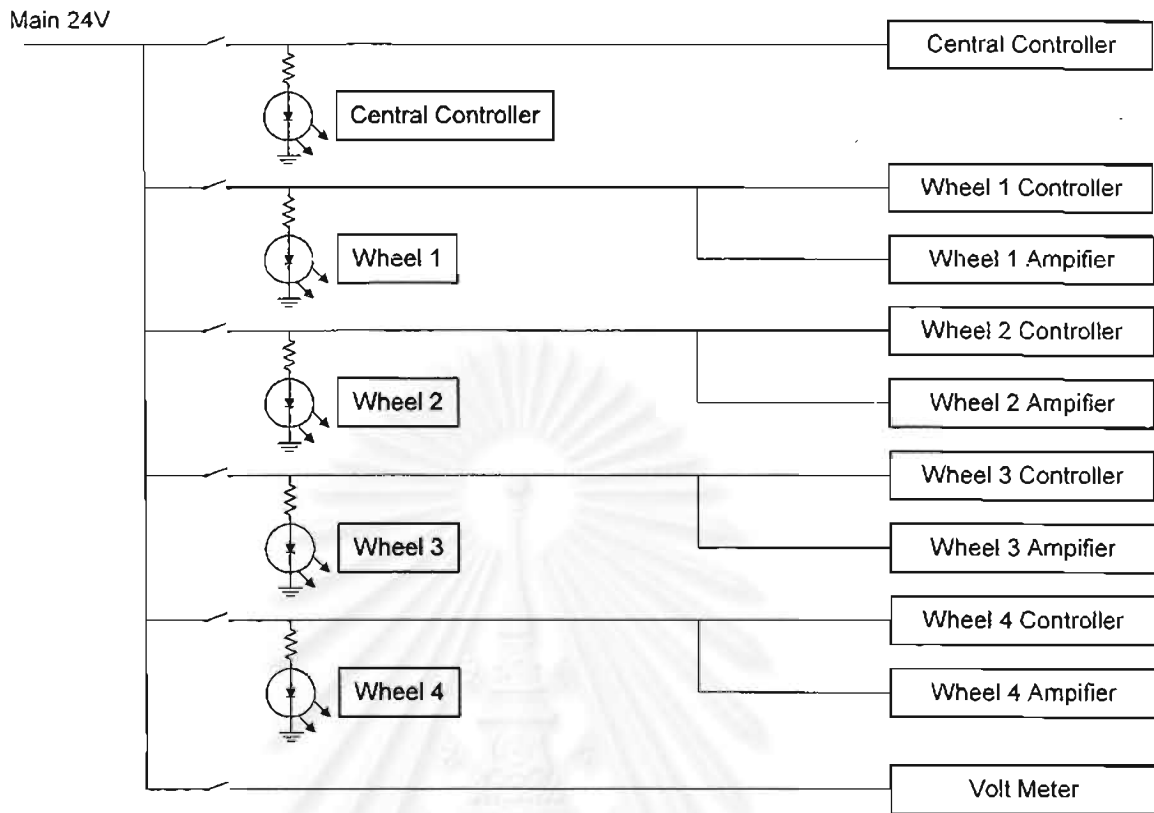
แผงสวิตช์ที่ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนหน้าของหุ่นยนต์ ทำหน้าที่ควบคุมการแจกจ่ายพลังงานไปยังส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์



รูปที่ 3.6 แผงสวิตช์

จะมีสวิตช์หลัก 5 ตัว เพื่อเปิด-ปิดกระแสไฟฟ้า แรงดัน 24 โวลต์จากแบตเตอรี่ เข้าสู่ตัวประมวลผลกลาง และ ตัวประมวลผลรวมกับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ของแต่ละล้อ และมีสวิตช์อีก 1 ตัวต่อกับโวลต์มิเตอร์ เพื่อวัดพลังงานที่เหลืออยู่ โดยมีแผนผังดังรูปที่ 3.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



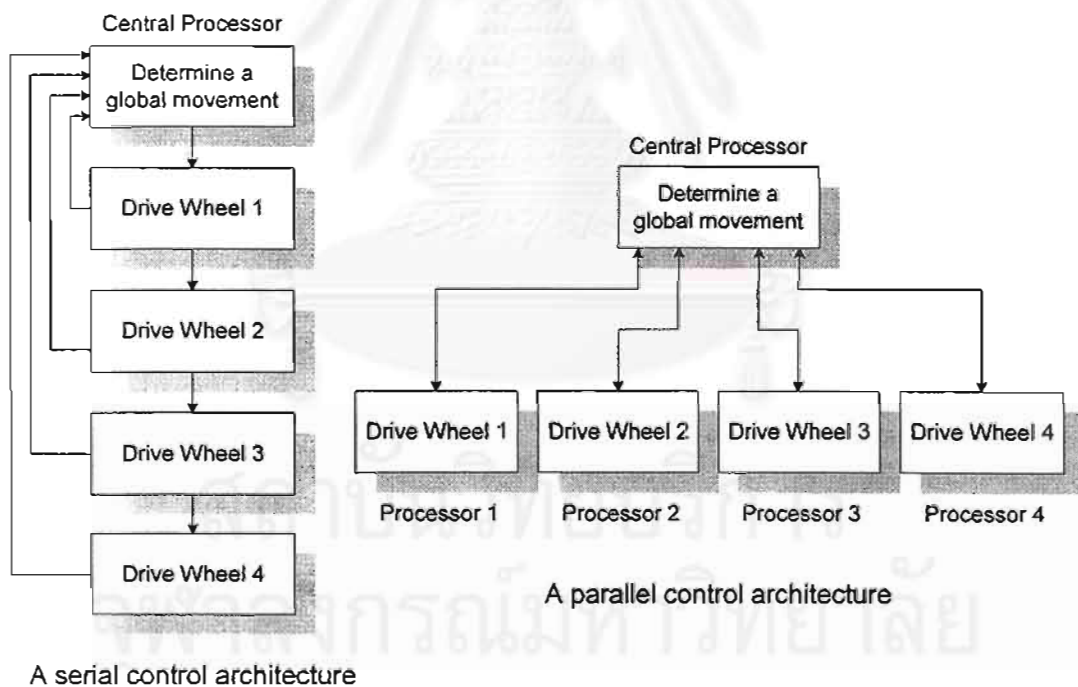
รูปที่ 3.7 แผนผังการแจกจ่ายพลังงาน

3.2.2 คอมพิวเตอร์

LoNoTech 4 ถูกออกแบบให้ติดตั้งคอมพิวเตอร์ไว้บนตัวหุ่นยนต์ โดยมีหน้าที่ควบคุมระบบพื้นฐาน (Low level Motion Control) และสามารถติดตั้งระบบควบคุมอื่น เพื่อใช้ในการควบคุมขั้นสูงได้ โดยติดต่อทางพอร์ตอนุกรม

3.2.2.1 Distributed System

วิธีที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์โดยทั่วไป อาจทำได้โดยใช้ตัวประมวลผลหลักเพียงตัวเดียว ควบคุมสั่งทั้งหมดส่งคำสั่งไปยังแต่ละล้อในลักษณะอนุกรม ดังรูป 3.8ก หรือใช้การประมวลผลในลักษณะขนาน โดยใช้ตัวประมวลผลย่อยในการควบคุมแต่ละล้อ แล้วมีตัวประมวลผลหลักคอยประสานงาน ดังรูป 3.8ข การกระจายงานดังกล่าว ทำให้สามารถใช้ตัวประมวลผลที่มีความเร็วต่ำกว่า และ ประหยัด ทั้งยังทำให้ตัวประมวลผลหลักมีเวลาในการคิดและคำนวณมากขึ้น



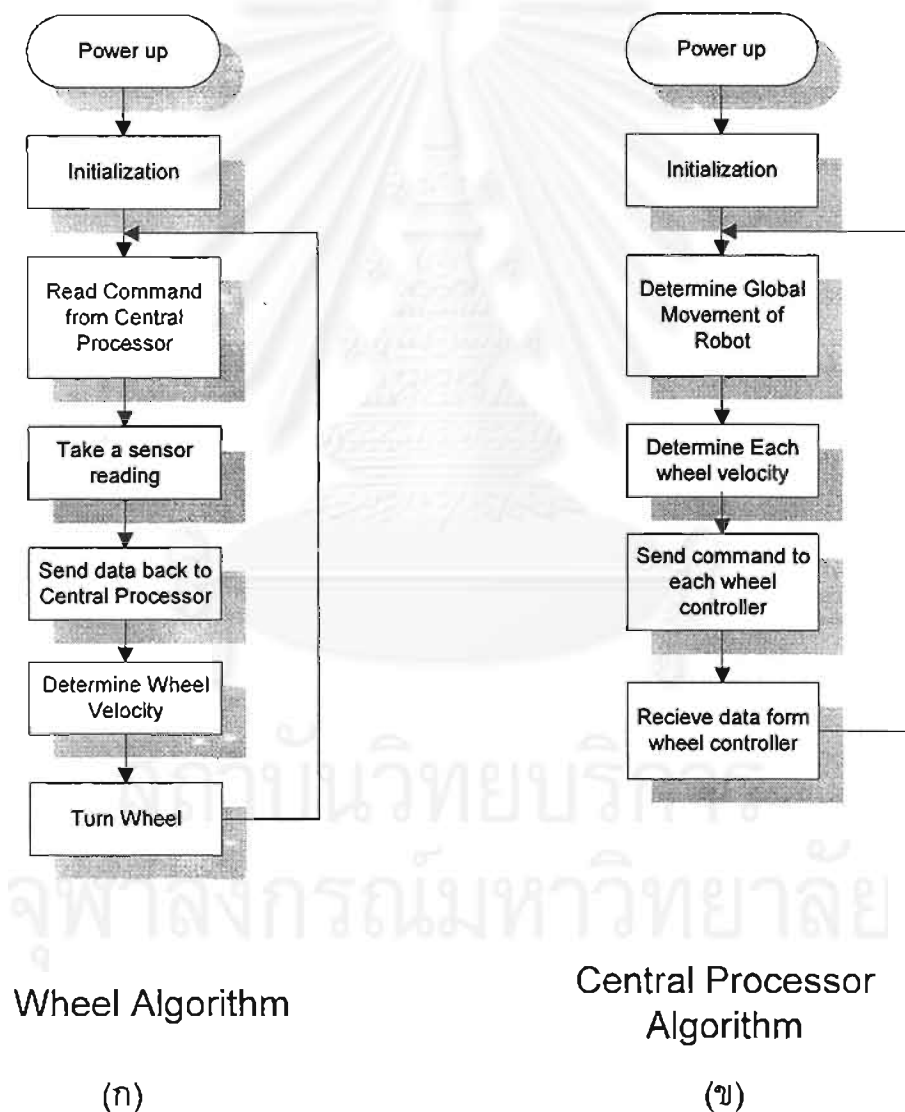
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.8 รูปแบบการควบคุม

ในวิทยานิพนธ์นี้ ได้เลือกใช้รูปแบบการควบคุมแบบขนาน ลักษณะการทำงานของตัวประมวลผลของแต่ละล้อก็จะแตกต่างจากการทำงานของตัวประมวลผลกลาง กล่าวคือ ตัวประมวลผลของแต่ละล้อ เมื่อเริ่มทำงาน จะกำหนดค่าคงที่ต่างๆ แล้วเข้าสู่วงวนหลัก คือ รับคำสั่งจากตัวประมวลผลกลาง อ่านค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัด ทำการเปรียบเทียบ พร้อมทั้งส่งค่าที่วัดได้กลับไปยังตัวประมวลผลกลาง นำค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบมาคำนวณเป็นความเร็วล้อ แล้วส่งคำสั่งไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ต่อไป ดังรูป 3.9ก

ส่วนตัวประมวลผลกลาง เมื่อเริ่มทำงาน ก็จะทำการกำหนดค่าคงที่ต่างๆ คำนวณการเคลื่อนที่โดยรวมของหุ่นยนต์ แล้วแปลงเป็นความเร็วของแต่ละล้อที่จะต้องหมุน แล้วส่งไปยังตัวประมวลผลของแต่ละล้อ พร้อมกับรับข้อมูลกลับมาเพื่อทำการคำนวณต่อไป ดังรูป 3.9ข



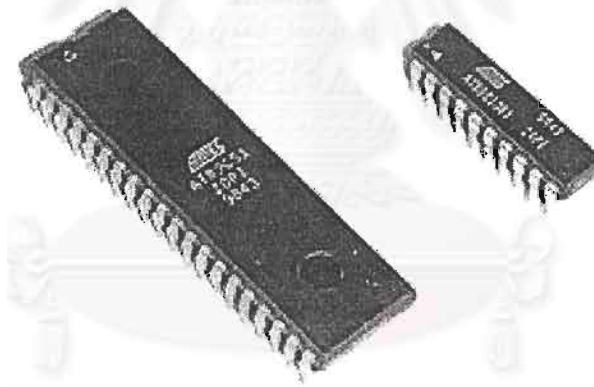
รูปที่ 3.9 แผนผังการทำงาน

3.2.2.2 ตัวประมวลผล (Processors)

ในปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์กำลังเป็นที่นิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลาย บริษัทผู้ผลิตชิพไมโครคอนโทรลเลอร์ต่างๆ ก็ได้แข่งขันพัฒนาออกมาจำหน่ายมากขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ก็เป็นตระกูลหนึ่งที่มีความนิยมมาก เพราะมีโครงสร้างที่ง่ายแก่การศึกษาและทำความเข้าใจ มีความอ่อนตัวในการพัฒนา สามารถเพิ่มเติมอุปกรณ์ต่างๆ เข้าไปในระบบเดิมได้โดยง่าย และมีทรัพยากรต่างๆ สนับสนุนการเรียนรู้ครบถ้วน และแพร่หลาย

ตัวประมวลผลที่เลือกมาใช้เป็นตัวประมวลผลหลัก และ ตัวประมวลผลของแต่ ละล้อ ได้แก่ หมายเลข AT89C51 มีโครงสร้าง และชุดคำสั่งเหมือนตระกูล MCS-51 ดั้งเดิม แต่ได้เพิ่ม Flash memory ทำให้เก็บโปรแกรมได้ในตัวเอง จึงสะดวกต่อการใช้งาน

ในส่วนที่ใช้สร้างสัญญาณ Pulse-Width Modulation เพื่อปรับความเร็วมอเตอร์ นั้น ได้ใช้หมายเลข AT89C1051 ซึ่งมีขนาดเล็กกว่า แต่ชุดคำสั่งยังคงเหมือนกัน



รูปที่ 3.10 ตัวประมวลผล หมายเลข 89C51 (ซ้าย) และ 89C1051 (ขวา)

ข้อมูลทางเทคนิคของ AT89C51

- มีโครงสร้างและชุดคำสั่งเหมือนกันกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51
- มีหน่วยความจำโปรแกรมชนิด Flash Memory ขนาด 4 Kbytes สามารถโปรแกรมซ้ำได้ 1000 ครั้ง
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 0 - 24 MHz
- สามารถโปรแกรมข้อมูล เพื่อป้องกันการตัดลอกโปรแกรม ได้ 3 ระดับ

- มีหน่วยความจำชนิด RAM 8-bit ขนาด 128 Bytes (Internal RAM)
- พอร์ต I/O 32 bits
- วงจรนับ และ วงจรไทมเมอร์ขนาด 16 bits 2 ช่อง
- รับสัญญาณอินเทอร์รัปต์ 6 แหล่ง
- พอร์ตสื่อสารแบบอนุกรม 1 ช่อง (UART)
- มีระบบประหยัดพลังงาน (Low Power Idle and Power Down Modes)

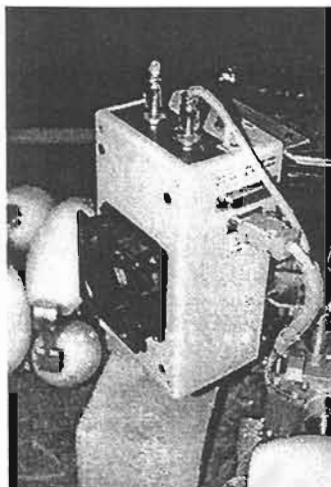
ข้อมูลทางเทคนิคของ AT89C1051

- มีโครงสร้างและชุดคำสั่งเหมือนกันกับไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล MCS-51
- มีหน่วยความจำโปรแกรมชนิด Flash Memory ขนาด 1 Kbytes สามารถโปรแกรมซ้ำได้ 1000 ครั้ง
- ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 0 - 24 MHz
- สามารถโปรแกรมข้อมูล เพื่อป้องกันการตัดลอกโปรแกรม ได้ 2 ระดับ
- มีหน่วยความจำชนิด RAM 8-bit ขนาด 128 Bytes (Internal RAM)
- พอร์ต I/O 15 bits
- วงจรนับ และ วงจรไทมเมอร์ขนาด 16 bits 2 ช่อง
- รับสัญญาณอินเทอร์รัปต์ 6 แหล่ง
- พอร์ตสื่อสารแบบอนุกรม 1 ช่อง (UART)
- มีวงจรเปรียบเทียบสัญญาณอะนาล็อก 1 ช่อง
- มีระบบประหยัดพลังงาน (Low Power Idle and Power Down Modes)

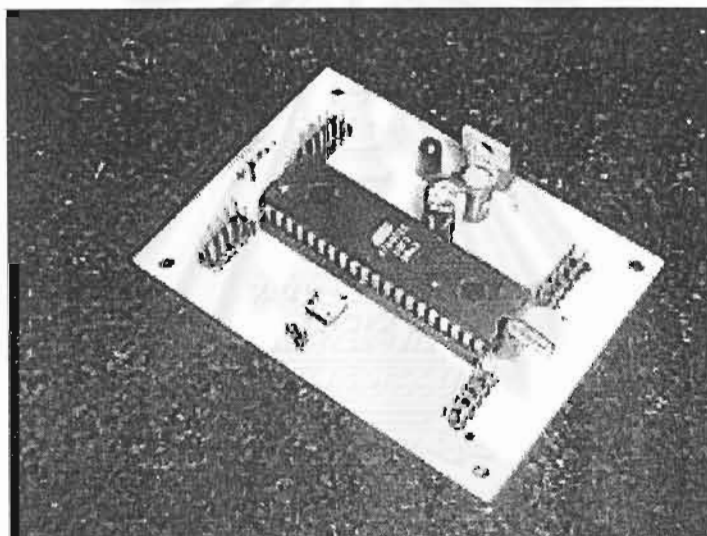
3.2.3 ส่วนติดต่อและควบคุมมอเตอร์ (Motor Interface)

ไฟฟ้าแรงดัน 24 โวลต์ส่วนหนึ่งจะเข้าสู่ภาคกำลังโดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องทำการลดแรงดัน (Regulation) แต่จะต้องจ่ายกระแสได้มาก ส่วนไฟ 24 โวลต์อีกส่วนจะทำการลดแรงดันเหลือ 5 โวลต์ เพื่อใช้เป็นสัญญาณเปรียบเทียบ ระหว่างภาคกำลัง และภาคควบคุม

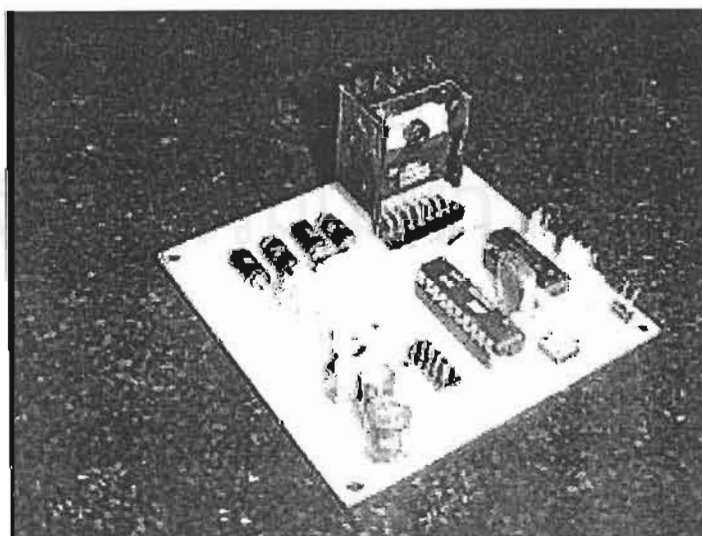
การขับเคลื่อนมอเตอร์จะทำผ่าน Full-Bridge Driver หมายเลข L298 โดยปรับความเร็วโดยใช้วิธีการ Pulse Width Modulation (PWM) ซึ่งสัญญาณดังกล่าว สร้างจากไมโครคอนโทรลเลอร์หมายเลข 89C1051 ความกว้างของสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงตามคำสั่งจากตัวควบคุมของแต่ละล้อเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หมายเลข 89C51 ซึ่งจะทำการควบคุมแบบ PID (Proportional - Integral - Differential) โดยอาศัยคำสั่งจากตัวประมวลผลหลัก (Central Processor) และสัญญาณป้อนกลับจากเอนโคเดอร์ (Encoder) ที่ติดตั้งอยู่กับเพลาล้อ



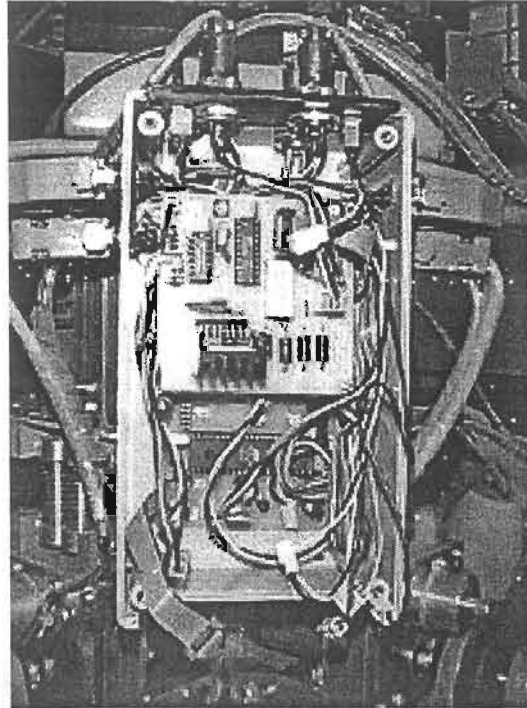
รูปที่ 3.11 ชุดควบคุมมอเตอร์ที่ได้สร้างขึ้น



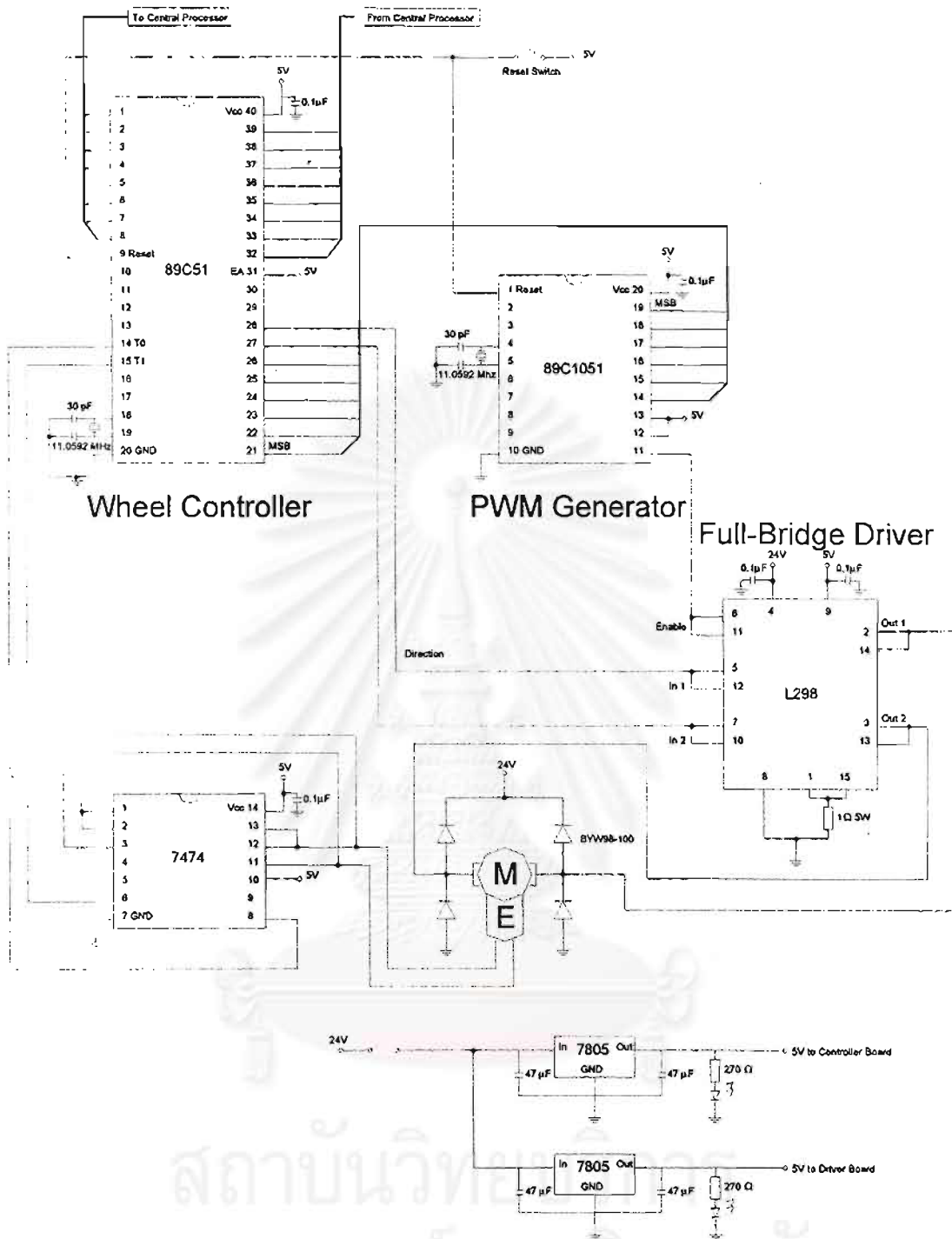
รูปที่ 3.12 วงจรตัวประมวลผลของแต่ละล้อ



รูปที่ 3.13 วงจรขับมอเตอร์



รูปที่ 3.14 แสดงภายในของวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ ส่วนบนเป็นวงจรต่อ 1 ล้อที่สมบูรณ์ ส่วนล่างคือตัววงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ซึ่งซ่อนอยู่ด้านนอก แสดงวงจรประมวลผลของแต่ละล้อ



รูปที่ 3.15 แผนผังวงจร

3.3 อุปกรณ์ตรวจจับ

เนื่องจากการคำนวณ แบบจำลองการเคลื่อนที่ผกผัน (Inverse Kinematics) ต้องใช้ข้อมูล ความเร็วการหมุนของแต่ละล้อ จึงได้ทำการติดตั้งตัวเข้ารหัส (Encoder) ชนิด Incremental Encoder ไว้ที่แต่ละล้อ ล้อละ 1 ตัว

ตัวเข้ารหัสด้วยแสง (Optical Encoder)

Encoder แบบดังกล่าว อาศัยหลักการตัดผ่านลำแสง (Break-beam proximity sensor) ลำแสงที่ถูกไฟกั้นจะพุ่งตรงไปยังตัวรับที่ติดอยู่อีกฟากหนึ่ง ลำแสงดังกล่าวจะถูกบังโดยจานเข้ารหัส ที่หมุนไปพร้อมกับเพลลาที่ต้องการวัด

Optical Encoder ที่ใช้โดยทั่วไป มีสองชนิด คือ Incremental Optical Encoder และ Absolute Optical Encoder ชนิดแรกจะวัดความเร็วในการหมุน และบอกถึงตำแหน่งสัมพันธ์กับจุดเริ่มต้น ในขณะที่ชนิดที่สอง วัดตำแหน่งเชิงมุมโดยตรง

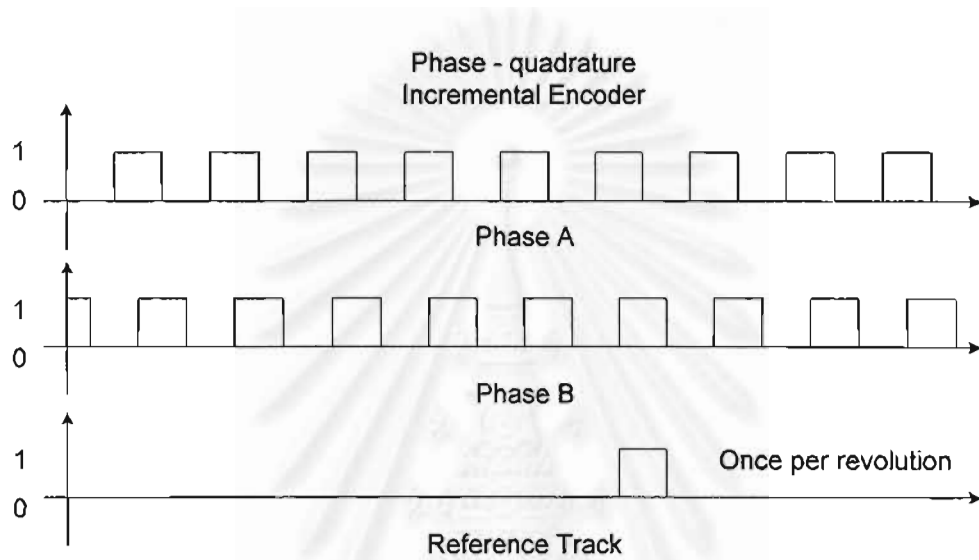
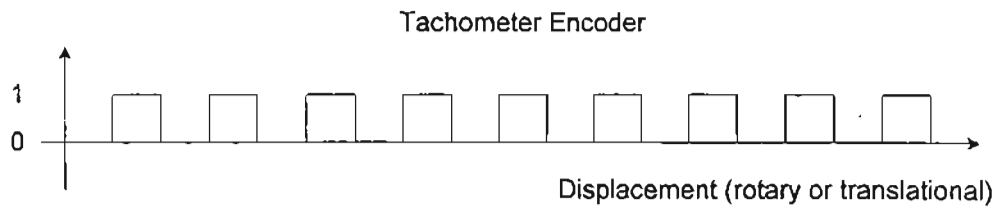
ในกรณีที่การวัดตำแหน่งที่แน่นอนอ้างอิงกับจุดๆหนึ่งไม่มีความจำเป็นมากนัก Incremental Encoder จะใช้วงจรที่ง่ายกว่าในการติดต่อ และมีราคาต่ำกว่า

Incremental Optical Encoder

ชนิดที่ง่ายที่สุดของ Encoder ชนิดนี้ คือ ชนิดช่องสัญญาณเดียวที่เรียกกันว่า Tachometer Encoder ถ้ามีการหมุนในทิศทางเดียว วงจรนับจะสามารถนับสัญญาณลูกคลื่น และหาตำแหน่งอ้างอิงจากจุดเริ่มต้นได้ แต่ถ้ามีการหมุนกลับทิศเกิดขึ้น สัญญาณที่ให้ยังคงมีลักษณะเหมือนเดิม ทำให้เกิดความผิดพลาดในการนับได้

Phase - quadrature incremental encoder สามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ โดยเพิ่มอีกหนึ่งช่องสัญญาณ ที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา ทำให้วงจรมับสามารถตรวจได้ว่า สัญญาณจากช่องใดนำมา และสามารถวัดได้ก่อน แล้วนำไปหาทิศทางการหมุนได้ บางครั้ง Encoder ชนิดนี้จะติดตั้งเพิ่มอีก 1 ช่องสัญญาณ ที่ให้เพียง 1 ลูกคลื่นต่อการหมุน 1 รอบ เพื่อความสะดวกในการนับจำนวนรอบการหมุน ดังรูปที่ 3.16

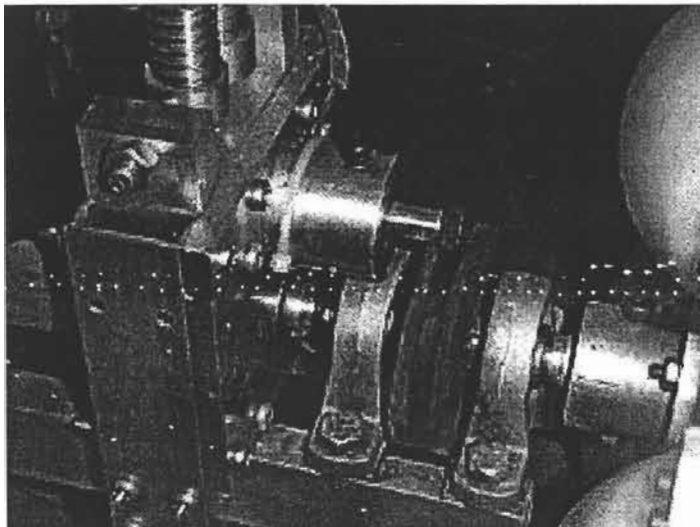
Encoder ที่เลือกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นชนิด Phase – quadrature incremental encoder ดังรูปที่ 3.17 ให้ลูกคลื่นจำนวน 390 ลูกต่อการหมุน 1 รอบ และถูกติดตั้งกับเพลลาด้วยอัตราทด 1 ต่อ 5 ในลักษณะดังรูป 3.18 เมื่อเพลลาหมุน 1 รอบจะทำให้ Encoder หมุนได้ 5 รอบ ได้จำนวนลูกคลื่น 1950 ลูก ต่อการหมุนของเพลลา 1 รอบ



รูปที่ 3.16 สัญญาณที่ได้จาก Encoder



รูปที่ 3.17 Encoder



รูปที่ 3.18 Encoder ขณะติดตั้งบนเพลลา

3.4 แบบจำลองการเคลื่อนที่

แบบจำลองการเคลื่อนที่ เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่าง ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ของระบบทางกลหนึ่งๆ แบบจำลองดังกล่าวจะเป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบควบคุมป้อนกลับของหุ่นยนต์ต่อไป

เนื่องจากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ มีความแตกต่างไปจากแขนหุ่นยนต์ที่ใช้โดยทั่วไป ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 วิธีที่ใช้ในการหาแบบจำลองจึงแตกต่างออกไป โดยมีสมมติฐานบางประการในการหาแบบจำลอง ดังนี้

สมมติฐานในการออกแบบ

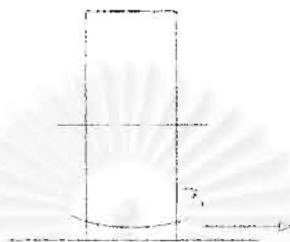
1. ขณะเคลื่อนที่ หุ่นยนต์มีลักษณะเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body)
2. มีกลไกในการบังคับเลี้ยวเพียงกลไกเดียว หรือ ไม่มีเลยในแต่ละล้อ
3. แกนของการเลี้ยวตั้งฉากกับพื้นเสมอ

สมมติฐานในการปฏิบัติงาน

4. หุ่นยนต์ต้องเคลื่อนที่บนระนาบเท่านั้น

5. แรงเสียดทานในการเลื่อนไถลที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับพื้น ต้องมีค่ามากพอที่จะไม่เกิดการเลื่อนไถล

6. แรงเสียดทานในการหมุนที่จุดสัมผัสระหว่างล้อกับพื้น ต้องมีค่าน้อยมาก ทำให้เกิดการหมุนได้



รูปที่ 3.19 ล้อไม่สามารถเลื่อนไถลในแนวด้านข้างได้ แต่สามารถหมุนรอบจุดสัมผัสได้

3.4.1 สมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และ สมการการเคลื่อนที่ผกผัน

(Forward and Inverse Kinematics Solutions)

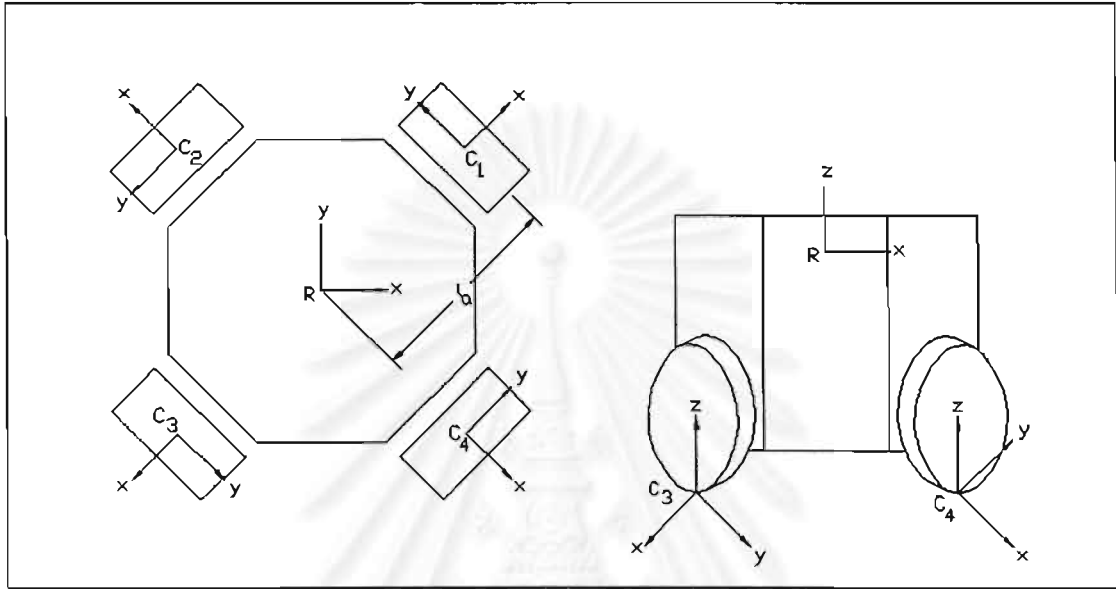
เนื่องจากหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยล้อ (WMRs) เป็นกลไกแบบปิด การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ จะมาจากการหาแบบจำลองของแต่ละล้อขึ้นมาพร้อม ๆ กัน แล้วจึงนำมารวมเป็นแบบจำลองโดยรวมของหุ่นยนต์อีกครั้ง

การกำหนดระบบแกนอ้างอิง (Coordinate System Assignments)

ในการหา Kinematics Modeling ของ WMRs จะใช้ระบบแกนแบบ Sheth-Uicker แทนระบบแกนแบบ Denavit-Hartenburg ซึ่งใช้กับแขนหุ่นยนต์ ระบบแกนแบบ Sheth-Uicker นี้จะวางแกนอ้างอิง 2 แกนซ้อนกัน ณ จุดสัมผัส โดยแกนหนึ่งจะอยู่บนกลไกหนึ่ง ส่วนแกนที่เหลือ จะอยู่บนกลไกที่ต่อกันอยู่ เช่นในกรณีที่ล้อสัมผัสกับพื้น แกนหนึ่งจะอยู่ที่ล้อ ณ จุดสัมผัส ส่วนอีกแกนจะอยู่ที่พื้น ณ จุดสัมผัสเช่นกัน ทำให้สามารถหาแบบจำลอง (Modeling) ของข้อต่อ Higher-pair และการเคลื่อนที่หลายทิศทางของล้อบนพื้นได้

Wheel Jacobian Matrices

โดยการกำหนดแกนอ้างอิงตามรูป 3.20 โดยมุมของแกนลูกกลิ้งที่ทำกับแกนเพลลาของล้อหลักที่ 1, 2, 3 และ 4 (η_1 , η_2 , η_3 และ η_4) มีค่าเท่ากับ 90 องศา สามารถหา Jacobian Matrices ได้ดังนี้



รูปที่ 3.20 การกำหนดแกนอ้างอิง (Coordinate system Assignments)

Actuated Inverse Velocity Solution

เป็นสมการที่ใช้คำนวณความเร็วในการหมุนของแต่ละล้อ เมื่อกำหนดความเร็วลัพธ์ของหุ่นยนต์ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สมการการเคลื่อนที่ผกผัน (Inverse Kinematics) มีรูปแบบดังนี้

$$\begin{bmatrix} \omega_{w_1,x} \\ \omega_{w_2,x} \\ \omega_{w_3,x} \\ \omega_{w_4,x} \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & l_a \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & l_a \\ \frac{2}{\sqrt{2}} & -\frac{2}{\sqrt{2}} & l_a \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{B} v_{Bx} \\ \bar{B} v_{By} \\ \bar{B} \omega_{Bz} \end{bmatrix}$$

- เมื่อ ω_{w1x} : ความเร็วเชิงมุมของล้อที่ 1.
 ω_{w2x} : ความเร็วเชิงมุมของล้อที่ 2
 ω_{w3x} : ความเร็วเชิงมุมของล้อที่ 3
 ω_{w4x} : ความเร็วเชิงมุมของล้อที่ 4
 R : รัศมีของล้อ เท่ากับ 10 เซนติเมตร
 l_a : ระยะจากศูนย์กลางหุ่นยนต์ ถึงศูนย์กลางล้อ
 เท่ากับ 28 เซนติเมตร
 $\bar{B} v_{Bx}$: ความเร็วของศูนย์กลางหุ่นยนต์ เทียบกับจุดที่ซ้อนทับกับศูนย์กลาง
 ของหุ่นยนต์ในขณะนั้น (instantaneously coincident point)
 ในแนวแกน X
 $\bar{B} v_{By}$: ความเร็วของศูนย์กลางหุ่นยนต์ เทียบกับจุดที่ซ้อนทับกับศูนย์กลาง
 ของหุ่นยนต์ในขณะนั้น (instantaneously coincident point)
 ในแนวแกน Y
 $\bar{B} \omega_{Bz}$: ความเร็วเชิงมุมของหุ่นยนต์ เทียบกับจุดที่ซ้อนทับกับศูนย์กลาง
 ของหุ่นยนต์ในขณะนั้น (instantaneously coincident point)
 รอบแกน Z

Sensed Forward Velocity Solution

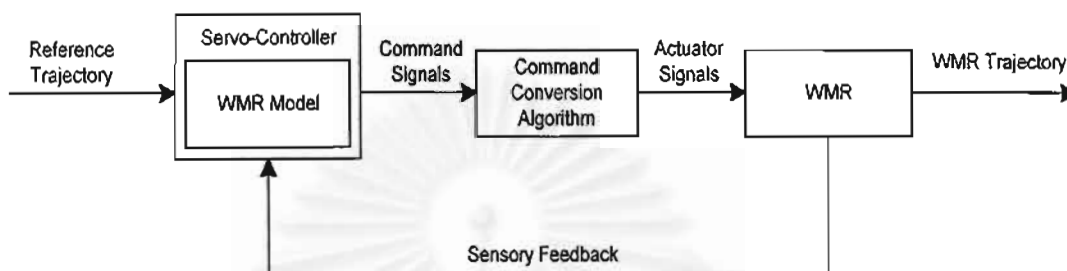
เป็นสมการที่ใช้คำนวณความเร็วลัพธ์ของหุ่นยนต์ เมื่อกำหนดความเร็วในการหมุนของแต่ละล้อ หรือ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า สมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Forward Kinematics)

$$\begin{bmatrix} \bar{B} v_{Bx} \\ \bar{B} v_{By} \\ \bar{B} \omega_{Bz} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & -\frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & \frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & \frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} \\ \frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & -\frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & -\frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & \frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} \\ \frac{4l_a^3}{(1+l_a^2)^2} & \frac{4l_a^3}{(1+l_a^2)^2} & \frac{4l_a^3}{(1+l_a^2)^2} & \frac{4l_a^3}{(1+l_a^2)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{w1x} \\ \omega_{w2x} \\ \omega_{w3x} \\ \omega_{w4x} \end{bmatrix}$$

บทที่ 4

การออกแบบระบบควบคุมโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model-Based WMR Servo-Controller Design)

จากบทที่ 3 เราได้หาแบบจำลองการเคลื่อนที่ไว้ ในบทนี้จะนำแบบจำลองดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุมของหุ่นยนต์ โดยมีลักษณะคร่าวๆดังนี้

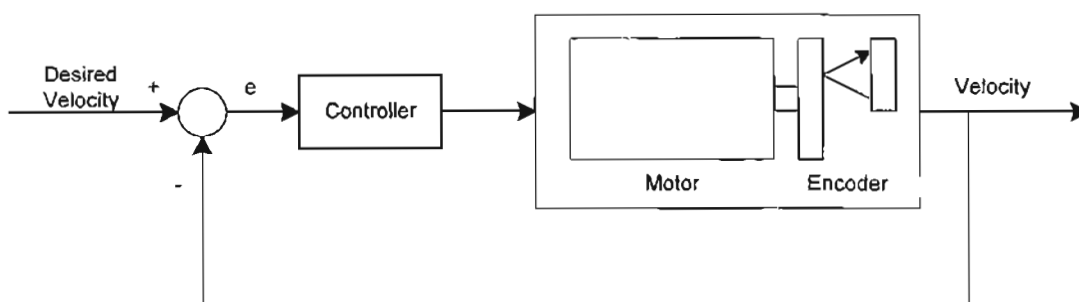


รูปที่ 4.1 การควบคุมแบบป้อนกลับ

4.1 ระบบควบคุมป้อนกลับ (Feedback-Control Loops)

วิธีที่ใช้ในการสร้างสัญญาณ pulse-width modulation ให้กับมอเตอร์ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 เป็นวิธีที่เรียกกันว่า การควบคุมแบบเปิด (open-loop control) ซึ่งจะไม่นำสัญญาณป้อนกลับใดๆ มาจากมอเตอร์ เพื่อบอกวาขณะนั้นหมุนด้วยความเร็วเท่าใด หรือหมุนไปแล้วเท่าใด เมื่อนำหุ่นยนต์ไปวิ่งบนพื้นที่มีลักษณะแตกต่างกัน หรือ น้ำหนักที่ตัวหุ่นรองรับมีค่าเปลี่ยนไป ความเร็วที่เคลื่อนที่ก็จะแตกต่างกัน แม้ว่าเราจะสั่งคำสั่งเดียวกันก็ตาม

วิธีที่จะทำให้ได้ค่าที่ถูกต้อง จะต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (sensors) เข้ากับตัวหุ่นยนต์ ในที่นี่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดชนิด Incremental Encoder ไว้ที่เพลาของแต่ละล้อ แล้วรับสัญญาณมาประมวลผล แล้วส่งคำสั่งออกไปยังชุดขับมอเตอร์อีกต่อหนึ่ง ลักษณะดังรูป



รูปที่ 4.2 สัญญาณป้อนกลับ และ ตัวควบคุม

แนวคิดของระบบควบคุม คือ ส่งความเร็วที่ต้องการให้กับมอเตอร์ แล้ววัดว่ามอเตอร์หมุนจริงด้วยความเร็วเท่าไร นำมาเปรียบเทียบกับค่าที่สั่งให้ครั้งแรก ความแตกต่างที่ได้ถูกเรียกว่า สัญญาณผิดพลาด (error signal) ซึ่งมีค่าได้ทั้งมากกว่า หรือ น้อยกว่าศูนย์

ระบบควบคุมพื้นฐานที่นิยมใช้โดยทั่วไป คือ พีไอดี หรือ ชนิดสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์ (Proportional-Integral-Derivative control ;PID) ซึ่งใช้ได้ทั้งการควบคุมความเร็ว และ ตำแหน่ง

ชนิดของระบบควบคุมจะเป็นแบบเชิงสัดส่วน (Proportional control) แบบอินทิกรัล (Integral control) หรือแบบอนุพันธ์ (Derivative control) ขึ้นอยู่กับการนำสัญญาณผิดพลาดดังกล่าวไปใช้คำนวณ เช่น ถ้าตัวควบคุมนำสัญญาณผิดพลาดไปคูณกับค่าคงที่ค่าหนึ่ง เพื่อส่งเป็นสัญญาณควบคุมใหม่ ตัวควบคุมก็จะเป็นชนิดเชิงสัดส่วน ในขณะที่แบบอินทิกรัลจะนำสัญญาณความผิดพลาดครั้งก่อนมารวมกับค่าความผิดพลาดครั้งหลัง แล้วจึงนำไปคูณค่าคงที่ส่วนแบบอนุพันธ์ จะนำผลต่างค่าความผิดพลาดมาคูณค่าคงที่

ระบบควบคุมของแต่ละล้อในหุ่นยนต์ LoNoTech 4 จะเป็นแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์ (Proportional-Integral-Derivative control ;PID) โดยค่าความเร็วที่ต้องการได้รับจากตัวประมวลผลกลาง ค่าป้อนกลับได้จากสัญญาณ Encoder สัญญาณควบคุมที่ได้จากการนำสัญญาณผิดพลาดมาคำนวณ จะถูกส่งต่อเพื่อสร้างสัญญาณ pulse-width modulation ให้กับมอเตอร์อีกต่อหนึ่ง

เนื่องจากชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ บางส่วนเช่น มอเตอร์ ไม่สามารถหาคุณสมบัติได้ ตัวล้อและตัวหุ่นเองก็มีรูปร่างซับซ้อนยากต่อการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย จึงเลือกระบบควบคุมชนิดนี้ เพราะค่าอัตราขยายทั้งสามสามารถหาได้จากการทดลอง โดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะทางพลศาสตร์ของระบบมาก่อน ทั้งยังเข้าใจได้ง่าย จึงสะดวกในการเขียนโปรแกรมควบคุม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2 PID Controller

PID Controller มีใช้โดยทั่วไปในระบบอุตสาหกรรม รูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) คือ

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.1)$$

เมื่อ K_p = อัตราขยายเชิงสัดส่วน (proposional gain)
 T_i = ช่วงเวลาอินทิกรัล (integral time)
 T_d = ช่วงเวลาอนุพันธ์ (derivative time)

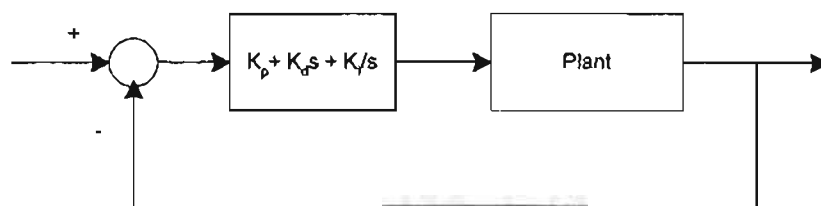
เมื่อ $e(t)$ เป็นสัญญาณผิดพลาดขาเข้า (input) ของ PID Controller สัญญาณขาออก (output) จากตัวควบคุม จะอยู่ในรูป

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_{-\infty}^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.2)$$

สมการ (6.1) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.3)$$

เมื่อ K_p = อัตราขยายเชิงสัดส่วน (proposional gain)
 K_i = อัตราขยายอินทิกรัล (integral gain)
 K_d = อัตราขยายอนุพันธ์ (derivative gain)



รูปที่ 4.3 ระบบควบคุมป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบ PID

เนื่องจากการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ จะมีลักษณะเป็นการควบคุมแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) ระบบควบคุม PID ในรูปแบบ discrete จะมีลักษณะดังนี้

4.2.1 Proportional Control

รูปแบบของตัวควบคุมแบบสัดส่วน ในแบบ discrete และแบบต่อเนื่องจะมีลักษณะเหมือนกัน โดยในแบบต่อเนื่อง จะอยู่ในรูป

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4.4)$$

$$D(s) = K_p \quad (4.5)$$

ในแบบ discrete จะเป็น

$$u(k) = K_p e(k) \quad (4.6)$$

$$D(z) = K_p \quad (4.7)$$

4.2.2 Integral Control

สำหรับการควบคุมแบบต่อเนื่อง จะทำการอินทิเกรตสัญญาณผิดพลาดที่เข้าสู่ระบบควบคุม

$$u(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_{t_0}^t e(t) dt \quad (4.8)$$

$$D(s) = \frac{K_p}{T_i s} \quad (4.9)$$

ในการควบคุมแบบ discrete จะหาผลรวมสัญญาณผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนหน้าทั้งหมด

$$u(k) = u(k-1) + \frac{K_p}{T_i} e(k) \quad (4.10)$$

$$D(z) = \frac{K_p T}{T_i (1 - z^{-1})} = \frac{K_p T z}{T_i (z - 1)} \quad (4.11)$$

เช่นเดียวกับในการควบคุมแบบต่อเนื่อง เหตุผลที่ใช้การควบคุมแบบอินทิกรัลก็เพื่อลดสัญญาณผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว แต่จะทำให้เสถียรภาพของระบบโดยรวมลดลง

4.2.3 Derivative Control

สำหรับการควบคุมแบบต่อเนื่อง ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะอยู่ในรูป

$$u(t) = K_p T_d \dot{e}(t) \quad (4.12)$$

$$D(s) = K_p T_d (s) \quad (4.13)$$

อนุพันธ์อันดับหนึ่งสามารถประมาณให้อยู่ในรูปแบบ discrete ด้วยการหาผลต่าง ทำให้ได้

$$u(k) = K_p T_d \frac{(e(k) - e(k-1))}{T} \quad (4.14)$$

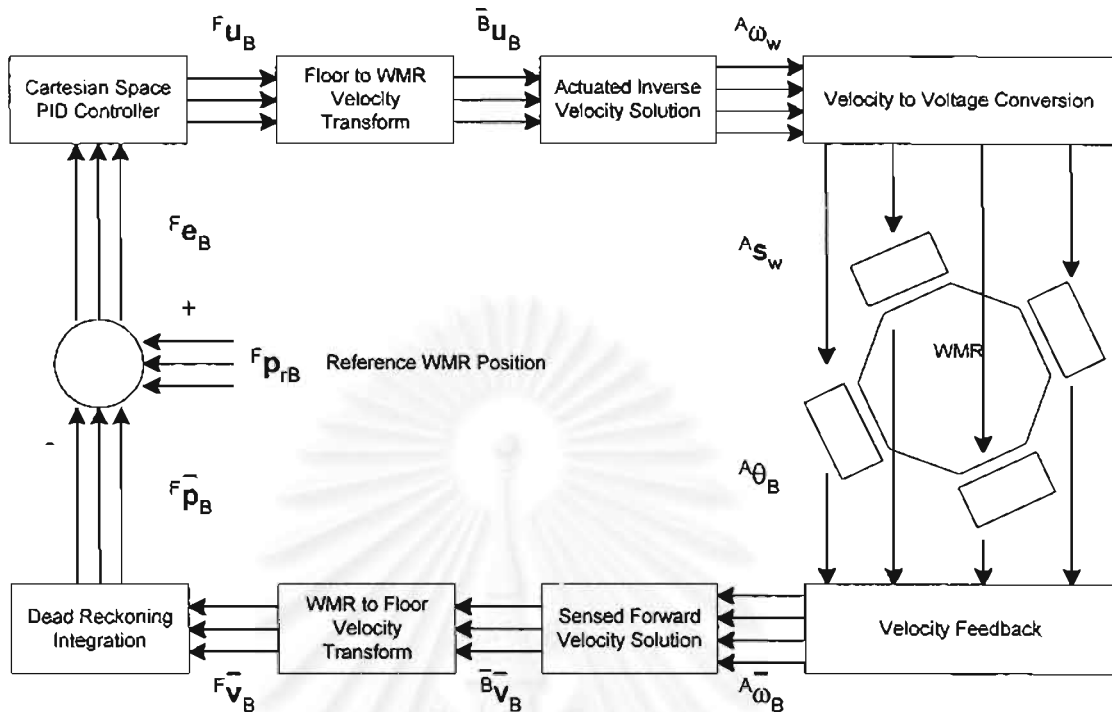
$$D(z) = K_p T_d \frac{1 - z^{-1}}{T} = K_p T_d \frac{z - 1}{Tz} \quad (4.15)$$

4.2.4 PID Control

รวมตัวควบคุมที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้ได้

$$D(z) = K_p \left(1 + \frac{Tz}{T_i(z-1)} + \frac{T_d(z-1)}{Tz} \right) \quad (4.15)$$

4.3 Resolved Motion Rate WMR Servo-Control



รูปที่ 4.4 ตัวควบคุมแบบ PID เมื่อนำมาใช้ร่วมกับแบบจำลองการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 4.4 สมมติให้มุมที่หมุนของแต่ละล้อเป็น ${}^A \theta_w$ ซึ่งวัดมาจาก Encoder แล้วถูกแปลงให้กลายเป็นความเร็วเชิงมุม โดยนำค่ามุมที่วัดได้ลบกับมุมที่วัดได้ครั้งก่อนหารด้วยคาบเวลา ได้เป็นความเร็วเชิงมุมโดยประมาณ ${}^A \bar{\omega}_w$

นำความเร็วเชิงมุมของแต่ละล้อที่หาได้ ผ่านเมตริกซ์ Sensed Forward Velocity Solution (Forward Kinematics) เพื่อแปลงเป็นความเร็วของหุ่นเทียบกับตำแหน่งหุ่นเดิม ${}^B \bar{v}_B$ แล้วถูกแปลงเป็นความเร็วของหุ่นเทียบกับพื้น ${}^F \bar{v}_B$ โดย WMR to Floor Velocity Transform Matrix

$${}^F \bar{v}_B = \begin{bmatrix} \cos^F \theta_B & -\sin^F \theta_B & 0 \\ \sin^F \theta_B & \cos^F \theta_B & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B \bar{v}_{Bx} \\ {}^B \bar{v}_{By} \\ {}^B \bar{\omega}_B \end{bmatrix} = \mathbf{M}^B \bar{v}_B \quad (4.16)$$

นำความเร็วของหุ่นเทียบกับพื้นมาอินทิเกรต หาค่าแห่งเทียบกับพื้น ${}^F \bar{p}_B$ นำค่าแห่งดังกล่าวไปลบกับค่าแห่งที่ตั้ง ${}^F p_{rB}$ เพื่อหาสัญญาณผิดพลาด ${}^F e_B$ ป้อนให้กับ PID Controller

สัญญาณควบคุมที่ออกมาจากตัวควบคุม จะเป็นคำสั่งความเร็วของหุ่นเทียบกับพื้น ${}^F \mathbf{u}_B$ นำมาผ่าน Floor to WMR Velocity Transform Matrix (Inverse ของ WMR to Floor Transformation Matrix (4.16)) จะได้คำสั่งความเร็วของหุ่นเทียบกับตำแหน่งหุ่นเดิม ${}^B \mathbf{u}_B$ นำความเร็วดังกล่าวผ่าน Actuated Inverse Velocity Solution (Inverse Kinematics) จะได้คำสั่งความเร็วเชิงมุมของแต่ละล้อ ${}^A \boldsymbol{\omega}_w$ แล้วส่งค่าดังกล่าวให้กับตัวประมวลผลของแต่ละล้อต่อไป

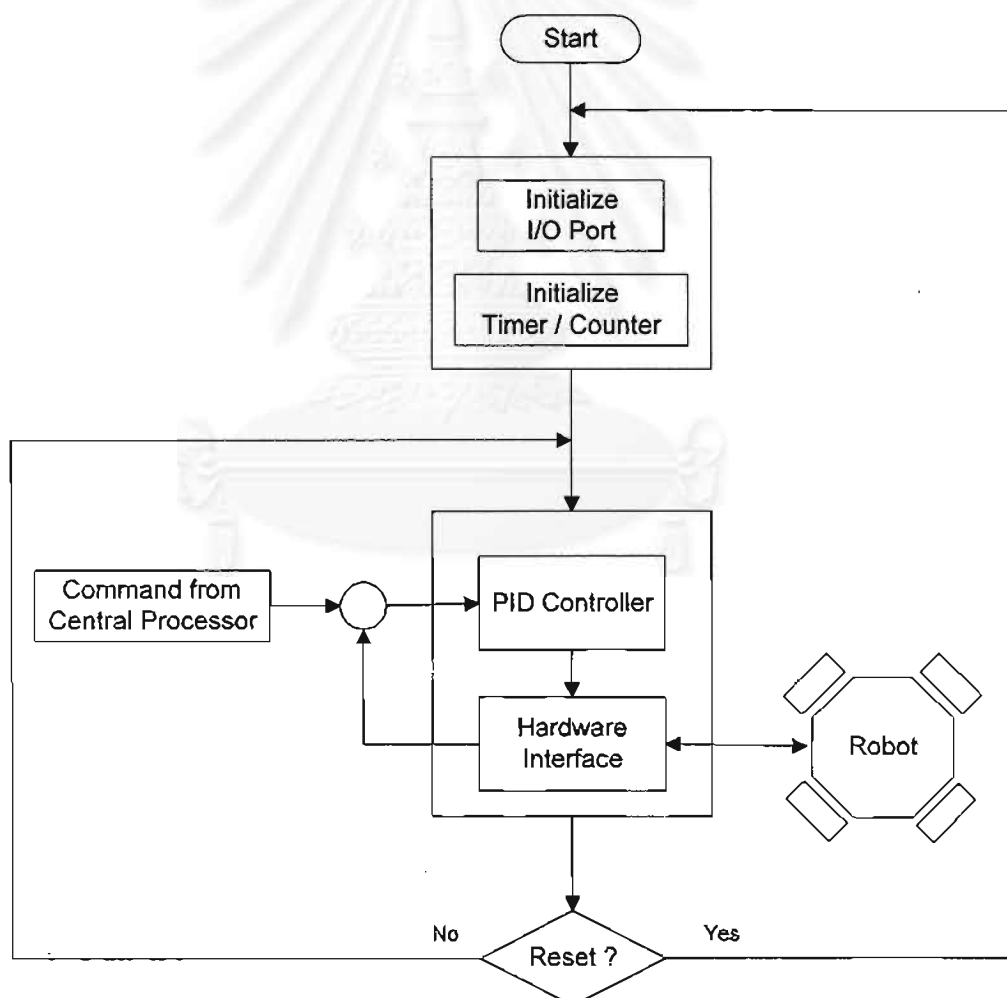


4.4 โปรแกรมควบคุม

แบ่งเป็นสองส่วน คือ ของตัวประมวลผลกลาง และตัวประมวลผลของแต่ละล้อ แต่ก็มีลักษณะโดยรวมคล้ายคลึงกัน สามารถแบ่งได้เป็นส่วนๆ อันได้แก่

1. ส่วนกำหนดค่าเริ่มต้น
2. ส่วนติดต่อกับ Hardware
3. ส่วนวงวนการทำงาน

4.4.1 ตัวประมวลผลของแต่ละล้อ



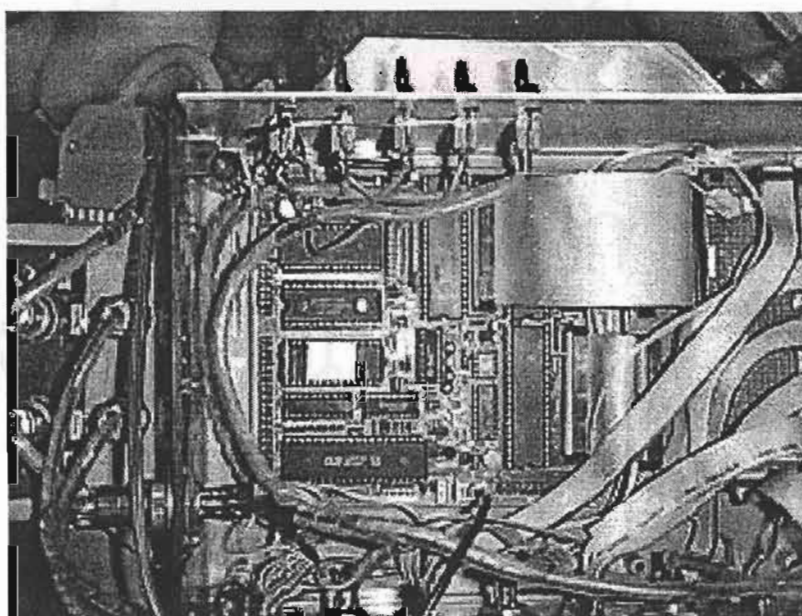
รูปที่ 4.5 การทำงานของตัวประมวลผลของแต่ละล้อ

เป็นตัวประมวลผลตระกูล 8051 หมายเลข 89C51 ซึ่งมีพอร์ต Input / Output ขนาด 8 บิต จำนวน 4 พอร์ต (P0 – P3) วงจรที่ออกแบบไว้ จะใช้ พอร์ต 0 รับคำสั่งจากตัวประมวลผลกลาง พอร์ต 1 ส่งค่าความเร็วที่วัดได้กลับไปยังตัวประมวลผลกลาง พอร์ต 2 ส่งค่าความเร็วที่ต้องการไปให้วงจรขับมอเตอร์ (Power Amplifier) การที่จะใช้พอร์ตใดเป็น input หรือ output นั้น ถูกกำหนดโดยโปรแกรมส่วนกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialize) โปรแกรมส่วนนี้ยังกำหนดให้ตัวประมวลผลสามารถใช้วงจรมับ / จับเวลาภายในได้ ซึ่งถูกใช้ในการอ่านค่าวงจร Decoder แล้วแปลงเป็นความเร็วต่อไป

หลังจากได้กำหนดแล้วว่า พอร์ตใดเป็น input หรือ output จะมีโปรแกรมส่วนติดต่อ Hardware มารองรับการรับและส่งค่าไปมาระหว่างตัวประมวลผลหลักและรอง และส่งค่าไปวงจรขับให้เป็นไปตาม protocol ที่ได้กำหนดขึ้น โดยโปรแกรมส่วนดังกล่าวถูกเขียนเป็นโปรแกรมย่อย (Subroutine) ซึ่งจะถูกเรียกใช้โดยวงวนการทำงานหลัก (Main loop) ต่อไป

ในส่วนวงวนการทำงานหลัก จะวนรับค่าที่ตัวประมวลผลกลางส่งมา อ่านค่าจากวงจร Decoder และนำมาแปลงเป็นความเร็วของล้อ ส่งความเร็วที่วัดได้กลับไปตัวประมวลผลกลาง พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับคำสั่ง ทำการคำนวณความเร็วที่ต้องการแล้วส่งค่าไปยังวงจรขับ โดยกระบวนการทั้งหมดใช้เวลาคงที่ นั่นก็คือ อัตราสุ่มข้อมูล (Sampling Rate) นั่นเอง ในที่นี้อัตราสุ่มข้อมูล จะทำทุก 13.5 มิลลิวินาที

4.4.2 ตัวประมวลผลกลาง



รูปที่ 4.6 บอร์ดประมวลผลกลาง

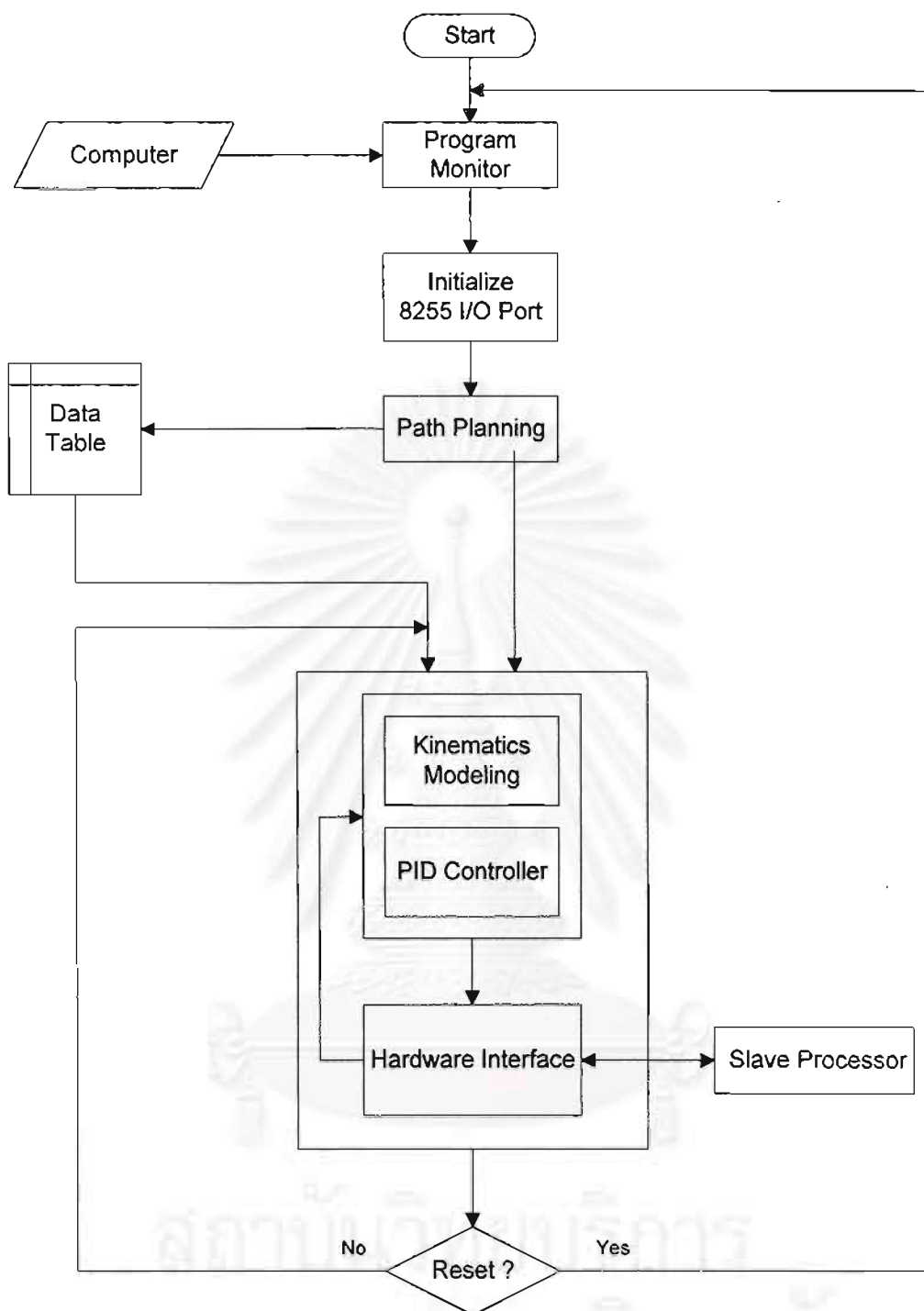
เป็นตัวประมวลผลตระกูล 8051 หมายเลข 8032 ซึ่งต่อขยายกับวงจรมายนอก เพื่อขยายให้มีพอร์ต Input / Output มากถึง 80 บิต 8 บิตแรกคือ พอร์ต P1 ส่วนอีก 72 บิตที่เหลือมาจากไอซีหมายเลข 8255 จำนวน 3 ตัว ตัวละ 3 พอร์ต พอร์ตละ 8 บิต

เพื่อติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ตัวประมวลผลถูกต่อเข้ากับไอซี ROM (Read only memory) ตัวหนึ่ง เรียกว่า Program Monitor ในที่นี้ใช้รุ่น MON31 ซึ่งเป็นรุ่นที่ใช้ติดต่อกับตัวประมวลผลตระกูล 8051 โดยเฉพาะ ทำหน้าที่ติดต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อ upload ข้อมูล ตรวจสอบหน่วยความจำ และทำให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ติดตั้งบนหุ่นสามารถแสดงผลออกทางจอภาพได้ โดยผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม RS-232 เมื่อจ่ายไฟฟ้าให้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเข้าสู่การทำงานของ Program Monitor ทันทีโดยอัตโนมัติ ทำการ upload โปรแกรม แล้วสั่งให้ทำงานต่อไป

เมื่อสั่งให้ทำงานผ่านทาง Program Monitor โปรแกรมส่วนกำหนดค่าเริ่มต้น (Initialize) ของตัวประมวลผลกลางจะส่งค่าไปยัง พอร์ตควบคุม (Control Port) ของ 8255 เพื่อกำหนดว่าจะใช้พอร์ตใดเป็น input รับค่าที่ส่งมาจากตัวประมวลผลของแต่ละล้อ หรือ output คำสั่งไปยังแต่ละล้อ

เช่นเดียวกันโปรแกรมส่วนติดต่อ Hardware ที่ใช้มารองรับการรับและส่งค่าไปมาระหว่างตัวประมวลผลหลักและรอง ถูกเขียนเป็นโปรแกรมน้อย (Subroutine) เพื่อให้สะดวกในการถูกเรียกใช้โดยวงวนการทำงานหลัก (Main loop)

ก่อนจะเข้าสู่วงวนการทำงานหลัก จะทำการอ่านค่า input ตำแหน่งสุดท้ายจะเคลื่อนที่ไป ความเร็วที่ใช้ ทำการคำนวณแล้วเก็บค่าลงในตาราง เมื่อคำนวณเสร็จ จะเข้าสู่วงวนการทำงานหลัก



รูปที่ 4.7 การทำงานของตัวประมวลผลกลาง

ในส่วนวงวนการทำงานหลัก จะรับค่าที่ตัวประมวลผลของแต่ละล้อส่งมา อ่านค่าจากตารางที่คำนวณล่วงหน้าเปรียบเทียบกับคำสั่ง ทำการคำนวณตาม Inverse และ Forward Kinematics แล้วส่งค่าไปยังตัวประมวลผลของแต่ละล้อ โดยมีอัตราสุ่มข้อมูลเท่ากับ 30 มิลลิวินาที เมื่อทำงานเสร็จ จะหยุดการทำงาน ถ้าต้องการทำงานต่อก็ทำการ reset ตัวประมวลผล แล้วเริ่มต้นใหม่

บทที่ 5

ผลการทดลอง

ทำการทดลอง 5 แบบคือ

1. การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง
2. การหมุนรอบตัวเอง
3. การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม
4. การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม
5. หาผลตอบสนองของล้อ เมื่อส่งความเร็วการหมุนเป็นฟังก์ชันขั้น (Step function)

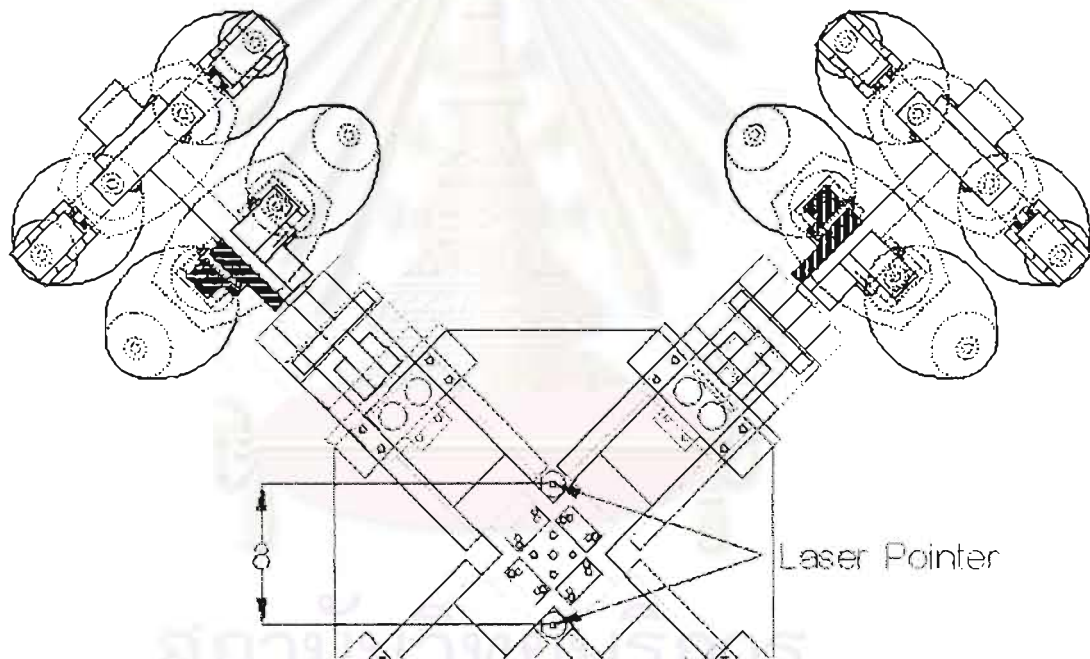
ในการทดลองแบบที่ 1, 3 และ 4 จะทำการทดลองที่ความเร็ว 3 ค่า ได้แก่ 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที ส่วนการทดลองแบบที่ 2 ทดลองด้วยความเร็วเชิงมุม 0.7, 1.4 และ 2.1 เรเดียนต่อวินาที

ในการทดลองแบบที่ 5 จะส่งความเร็วให้ล้อเป็นฟังก์ชันขั้น (Step function) ที่ความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที (ประมาณ $1/3$, $2/3$ และ 1 รอบต่อวินาที)

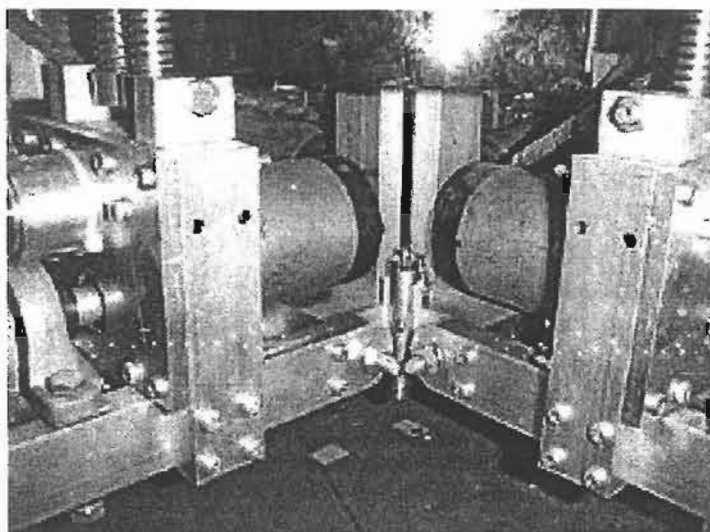
5.1 การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

เพื่อทดสอบการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปยังตำแหน่งปลายที่ต้องการ โดยคำสั่งที่ส่งให้กับหุ่นยนต์ จะสั่งตำแหน่งสุดท้ายในการเคลื่อนที่ในพิกัด X-Y และความเร็วสูงสุดที่ใช้ เมื่อเคลื่อนที่เรียบร้อยแล้ว จะทำการวัดระยะที่เคลื่อนที่ได้ ในแนวแกน X และแกน Y ทำการทดลองที่ความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที เป็นระยะ 50, 100 และ 150 เซนติเมตร ในทิศทางหลักๆ อันได้แก่ 0, 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150, 180, 210, 225, 240, 270, 300 และ 330 องศา พร้อมทั้งวัดมุมที่หุ่นยนต์เบี่ยงเบนออกจากแนวที่ควรจะเป็น

ระยะที่เคลื่อนที่ จะวัดจากจุดศูนย์กลางของหุ่น ก่อนและหลังเคลื่อนที่ ในการหาจุดศูนย์กลางของหุ่น ทำได้โดยติดตั้ง Laser pointer ไว้ที่แกนกลางของหุ่นยนต์ จำนวน 2 ตัว ระยะห่าง 8 เซนติเมตร ดังรูปที่ 5.1

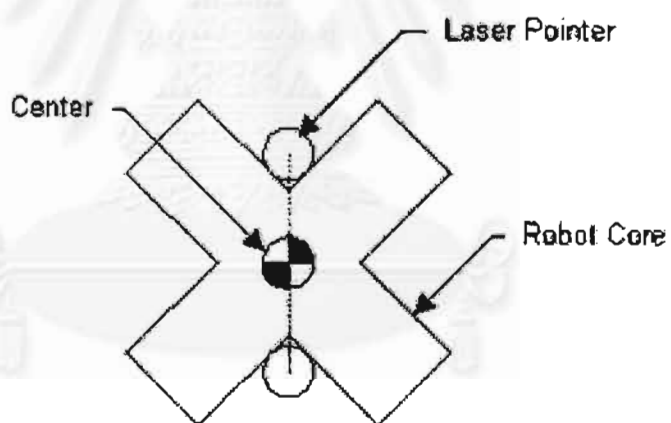


รูปที่ 5.1 ตำแหน่งที่ติดตั้ง Laser pointer

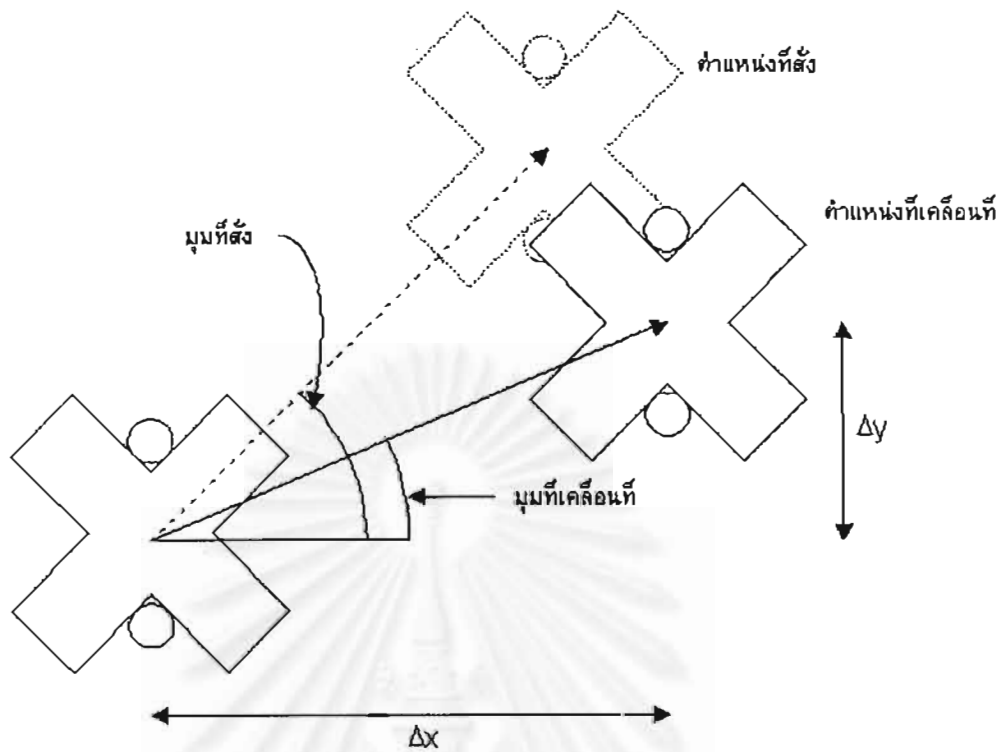


รูปที่ 5.2 แสดงการติดตั้ง Laser pointer

เมื่อต้องการหาจุดศูนย์กลาง ก็ทำการลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุดที่ Laser กระทบพื้นทั้งสองจุดแล้วหาจุดกึ่งกลางเส้น ก็จะได้จุดศูนย์กลางหุ่นออกมา ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การหาดำแหน่งศูนย์กลางของหุ่นยนต์



รูปที่ 5.4 การหามุมเบี่ยงเบน

หลังจากวัดระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน X และ Y ได้แล้ว จะสามารถคำนวณหา มุมที่เคลื่อนที่ได้ ดังนี้

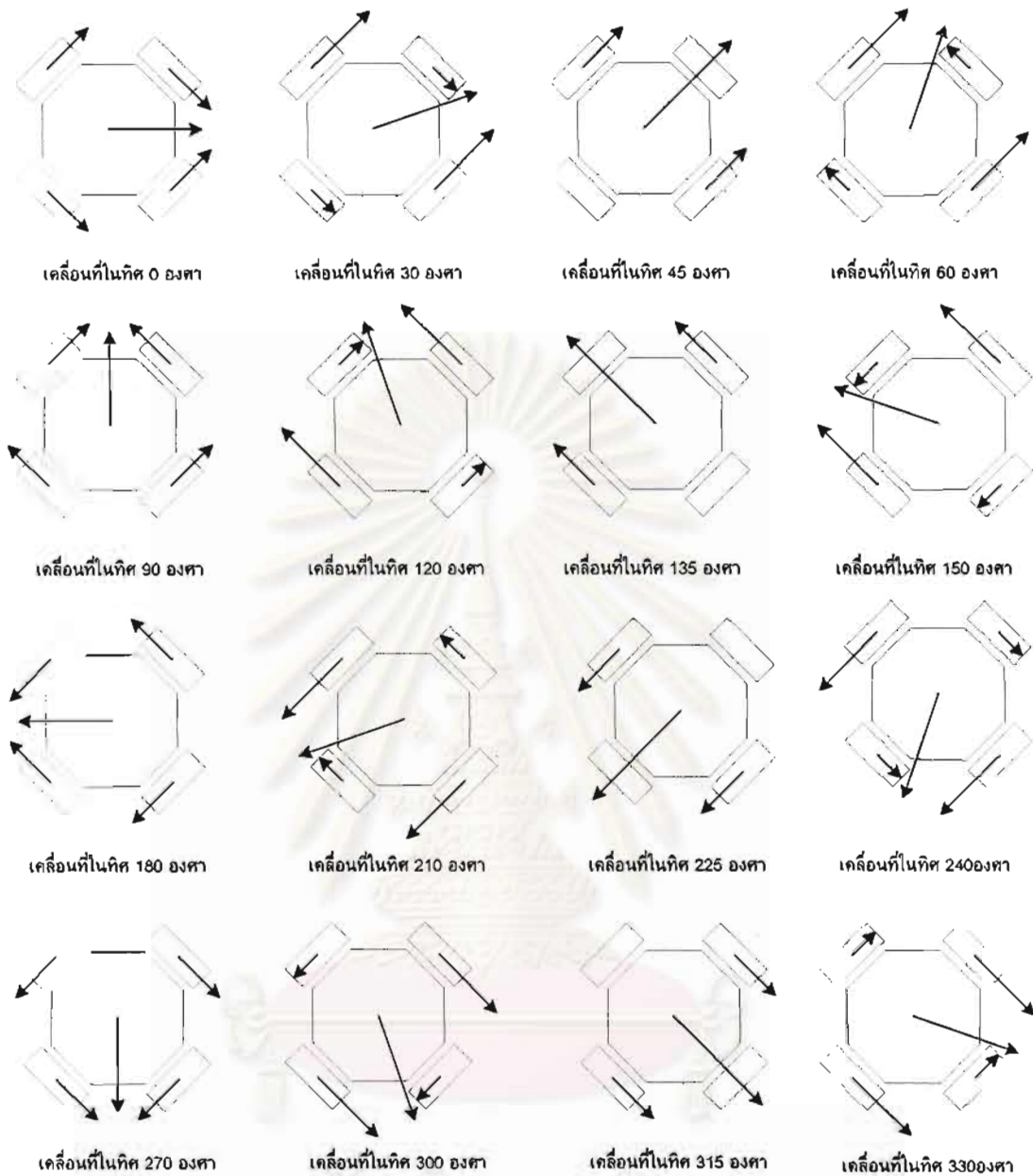
$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta y}{\Delta x}\right) \quad (5.1)$$

θ : มุมที่เคลื่อนที่

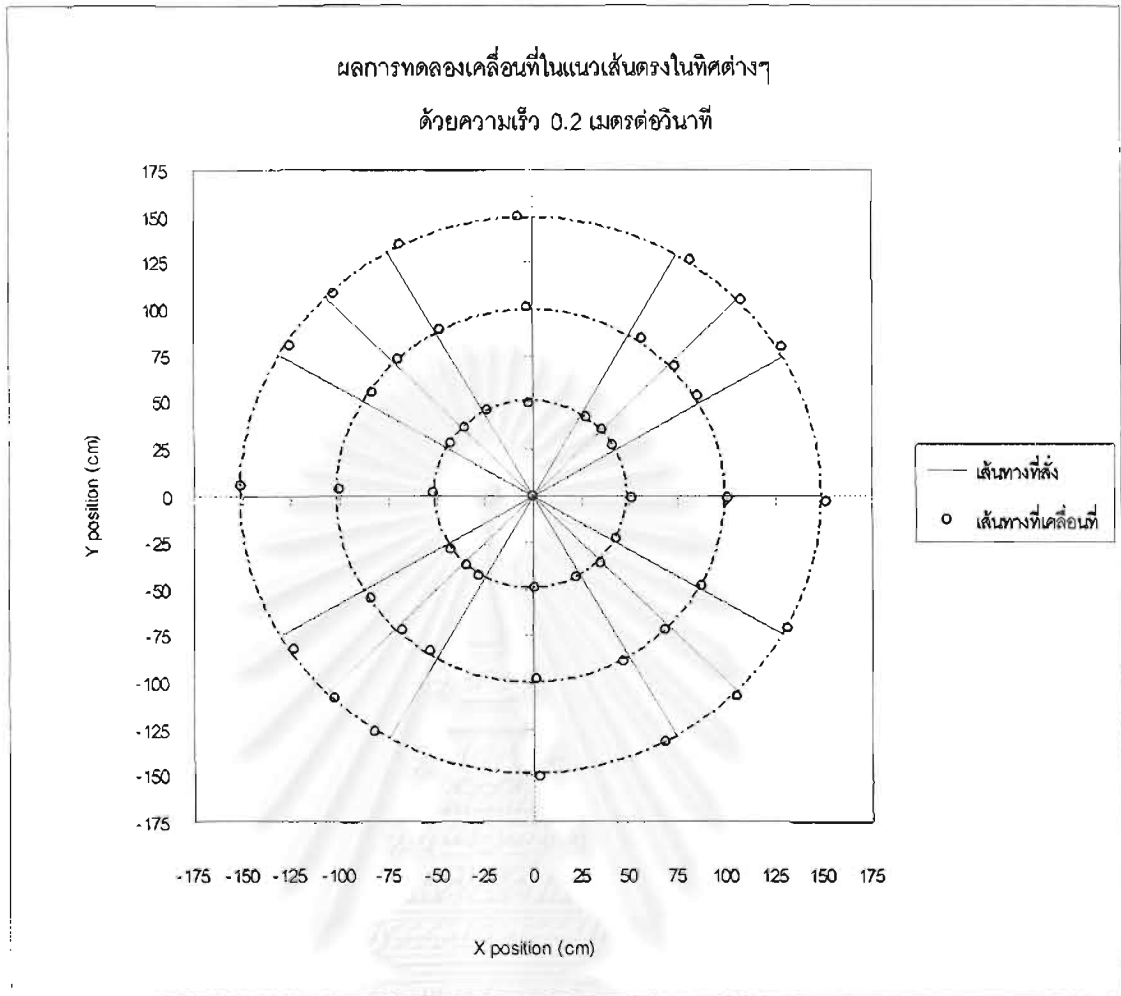
Δy : ระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน Y

Δx : ระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน X

มุมเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้น จึงมีค่าเท่ากับมุมที่เคลื่อนที่ ลบด้วย มุมที่สังนั่นเอง



รูปที่ 5.5 แสดงการทิศทางการหมุนของแต่ละล้อ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศต่างๆ

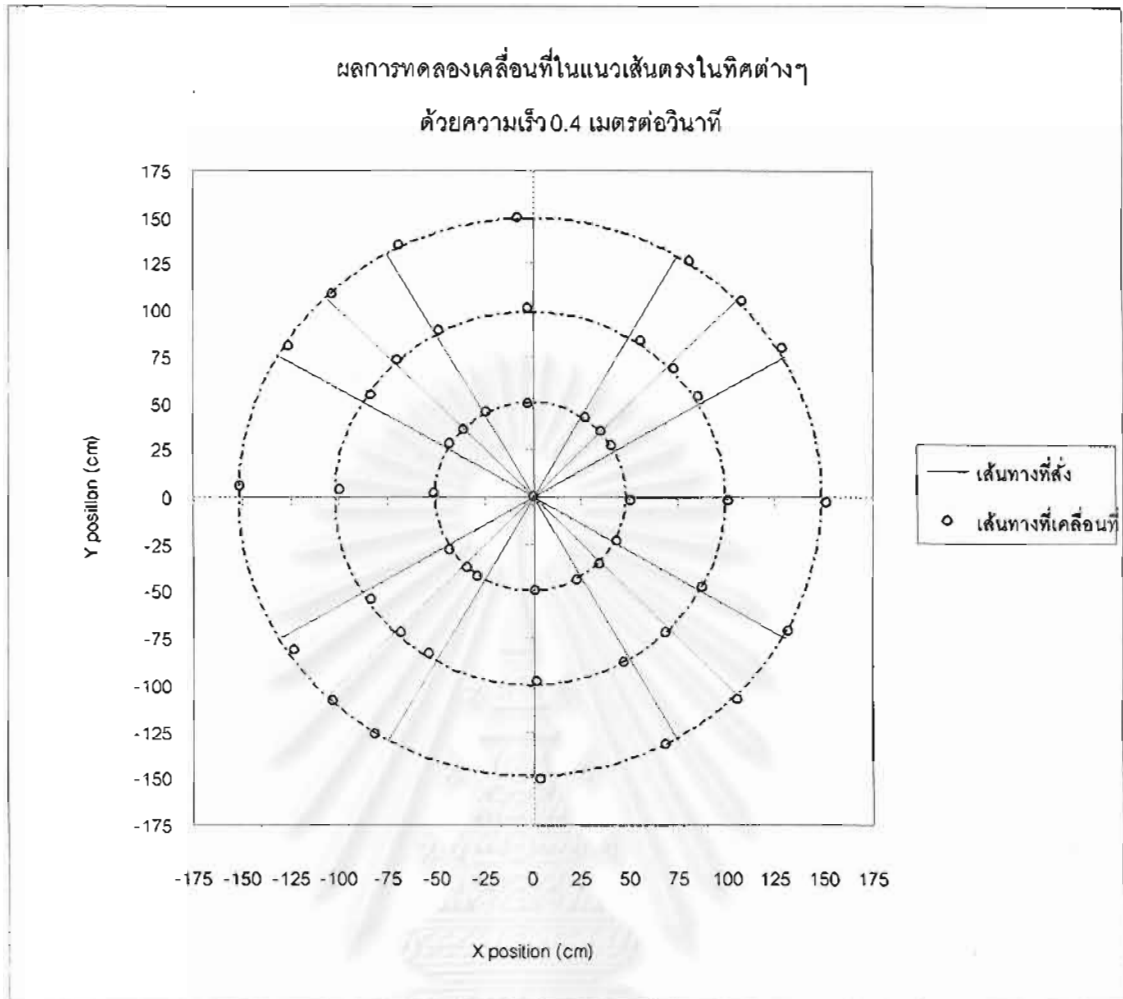


รูปที่ 5.6 ผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ระยะที่สั่ง (เซนติเมตร)	ระยะเคลื่อนที่ (เซนติเมตร)	ความผิดพลาด (%)	ทิศทางที่สั่ง (องศา)	ทิศทางเคลื่อนที่ (องศา)	ทิศทางผิดพลาด (องศา)
50	50.1	+0.2	135	134.5	-0.5
50	51	+2	180	178	-2
100	99.9	-0.1	210	213.1	+3.1
100	98	-2	270	271.2	+1.2
150	150.2	+0.1	90	92.8	+2.8
150	147.8	-1.4	210	213.6	+3.6

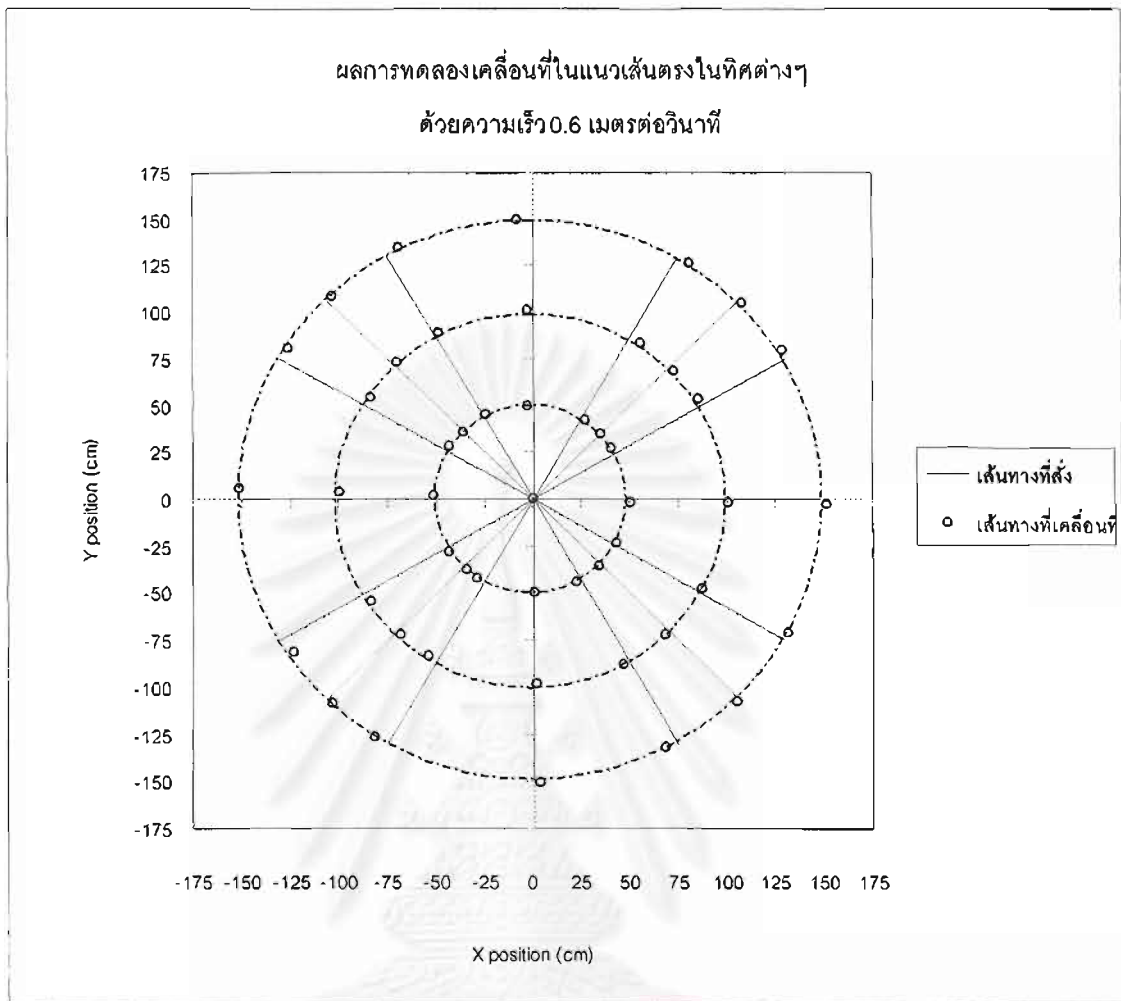
ตารางที่ 5.1 ตัวอย่างผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในทิศต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.7 ผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที

ระยะที่สั่ง (เซนติเมตร)	ระยะเคลื่อนที่ (เซนติเมตร)	ความผิดพลาด (%)	ทิศทางที่สั่ง (องศา)	ทิศทางเคลื่อนที่ (องศา)	ทิศทางผิดพลาด (องศา)
50	50.1	+0.2	210	214.5	+4.5
50	48.3	-3.5	300	296.5	-3.5
100	99.8	-0.2	225	226.7	+1.7
100	97.9	-2.1	60	56	-4
150	150.2	+0.1	90	92.8	+2.8
150	150.5	+0.3	30	32	+2

ตารางที่ 5.2 ตัวอย่างผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในทิศต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.8 ผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงทิศต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

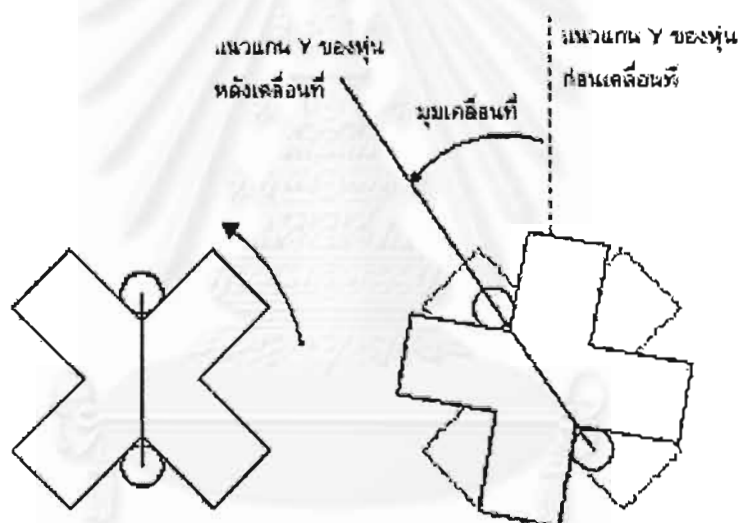
ระยะที่สั่ง (เซนติเมตร)	ระยะเคลื่อนที่ (เซนติเมตร)	ความผิดพลาด (%)	ทิศทางที่สั่ง (องศา)	ทิศทางเคลื่อนที่ (องศา)	ทิศทางผิดพลาด (องศา)
50	50.5	+1.0	60	56.6	-3.4
50	53	+6.0	120	117.6	-2.4
100	99.3	-0.7	90	92.7	+2.7
100	102.7	+2.7	240	237.9	-2.1
150	150.2	+0.1	90	92.8	+2.8
150	151.3	+0.8	0	-2.6	-2.6

ตารางที่ 5.3 ตัวอย่างผลการทดลองเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงในทิศต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที

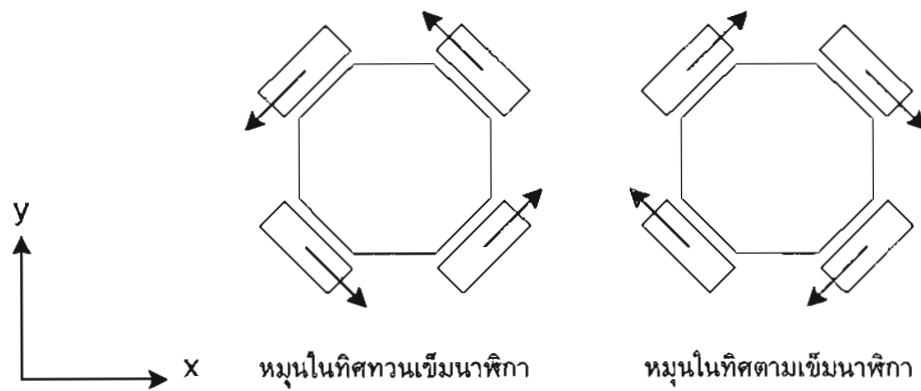
5.2 การหมุนรอบตัวเอง

เพื่อทดสอบการหมุนรอบตัวเองของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ กัน ทำการทดลอง โดยสั่งให้หุ่นยนต์หมุนไปยังมุมต่าง ๆ แล้ววัดมุมที่หมุนไปได้ เมื่อเทียบกับตำแหน่งเริ่มต้น ซึ่ง วัดได้จากมุมที่เปลี่ยนแปลงของแกน Y (หน้า-หลัง) ของหุ่นยนต์ ก่อน และ หลังการหมุนโดยทำ การทดสอบที่ความเร็วการหมุนต่างๆ กัน 3 ระดับ คือ 0.7, 1.4 และ 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศ ทางทวน และ ตามเข็มนาฬิกา เป็นมุม 30, 45, 60, 90, 120, 135, 150, 180, 210, 225, 240, 270, 300, 330 และ 360 องศาตามลำดับ

แนวแกน Y ของหุ่นยนต์ หาได้จากการลากเส้นตรง เชื่อมระหว่างจุดที่ Laser ทั้งสอง ตกกระทบพื้น หาแนวแกน Y นี้ทั้งก่อน และ หลังการหมุน มุมที่หุ่นยนต์หมุนได้ คือมุม ที่วัดระหว่างแนวแกนทั้งสองนั่นเอง ดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 การวัดมุมที่หมุนได้

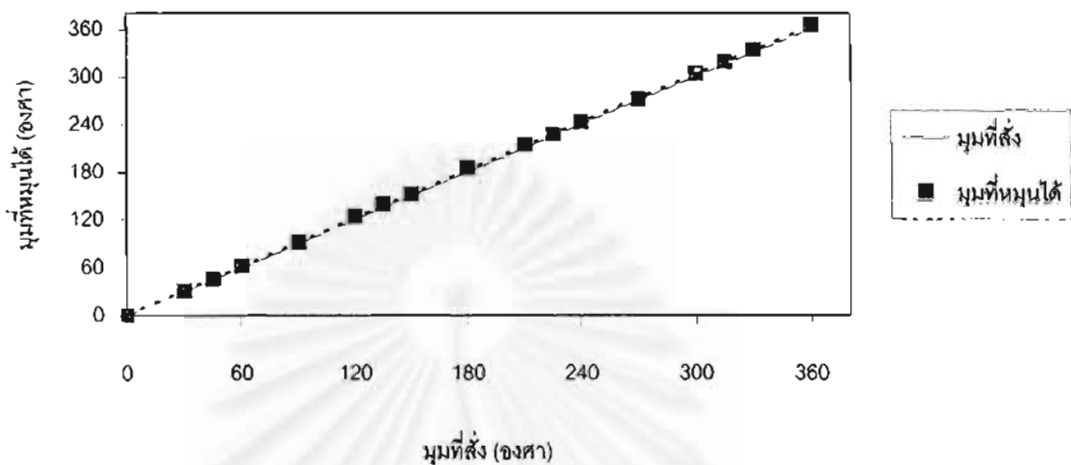


รูปที่ 5.10 แสดงการทิศทางการหมุนของแต่ละล้อ เมื่อหมุนตัวในทิศทวน และ ตามเข็มนาฬิกา

ในการหมุนตัว จะสั่งคำสั่งให้ทำการหมุนไปจนถึงมุมที่ต้องการ แล้วจึงทำการหยุด ไม่ว่าจะมุมสุดท้ายจะมีค่ามาก หรือ น้อยเท่าใด โดยไม่มีการแบ่งหมุนเป็นมุมย่อยๆ ประกอบกันแต่อย่างใด ทำการทดลองมุมละ 3 ครั้ง นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย แล้วพล็อตลงบนกราฟ ดังรูป 5.11 ถึง 5.16

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

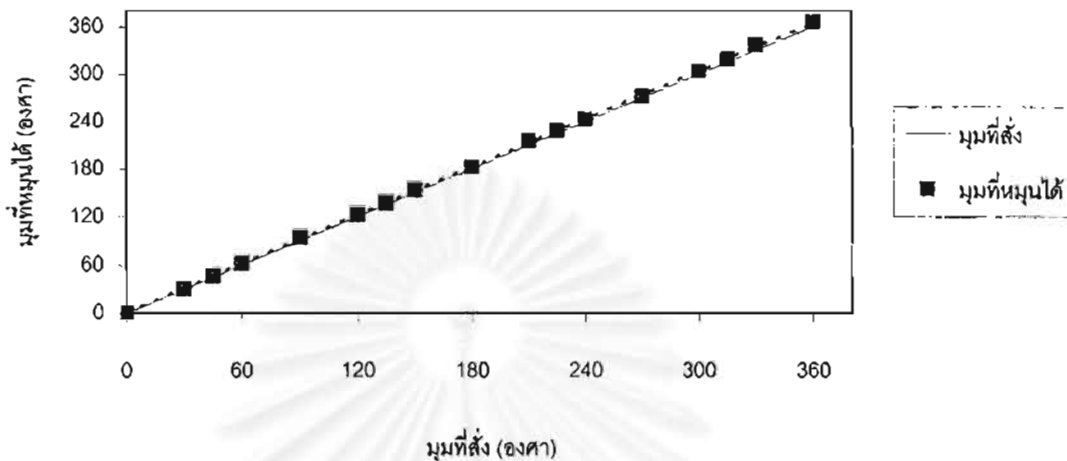


รูปที่ 5.11 ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

มุมที่ตั้ง (องศา)	60	120	180	240	300	360
มุมที่หมุนได้ (องศา)	62.3	124.2	185.3	242.7	303.8	364.7
มุมผิดพลาด (องศา)	+2.3	+4.2	+5.3	+2.7	+3.8	+4.7

ตารางที่ 5.4 ตัวอย่างผลการทดลองหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

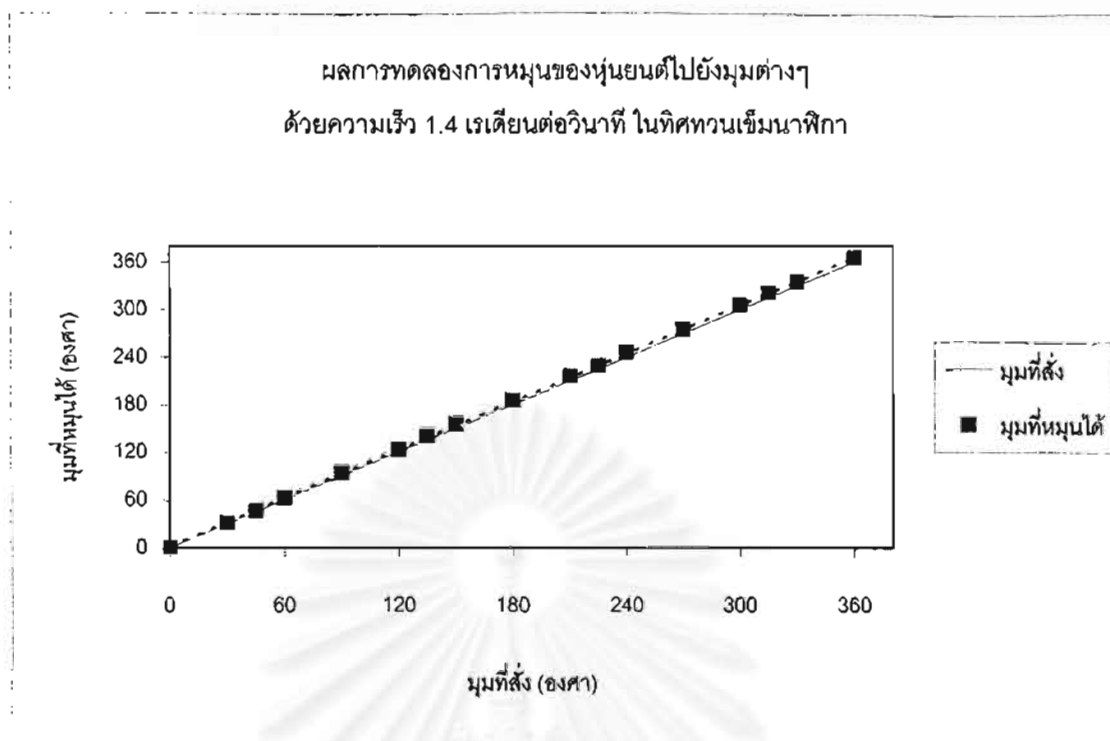
ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.12 ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา

มุมที่ตั้ง (องศา)	60	120	180	240	300	360
มุมที่หมุนได้ (องศา)	61.7	122.7	182.3	242.7	303.3	366
มุมผิดพลาด (องศา)	+1.7	+2.7	+2.3	+2.7	+3.3	+6

ตารางที่ 5.5 ตัวอย่างผลการทดลองหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.7 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา

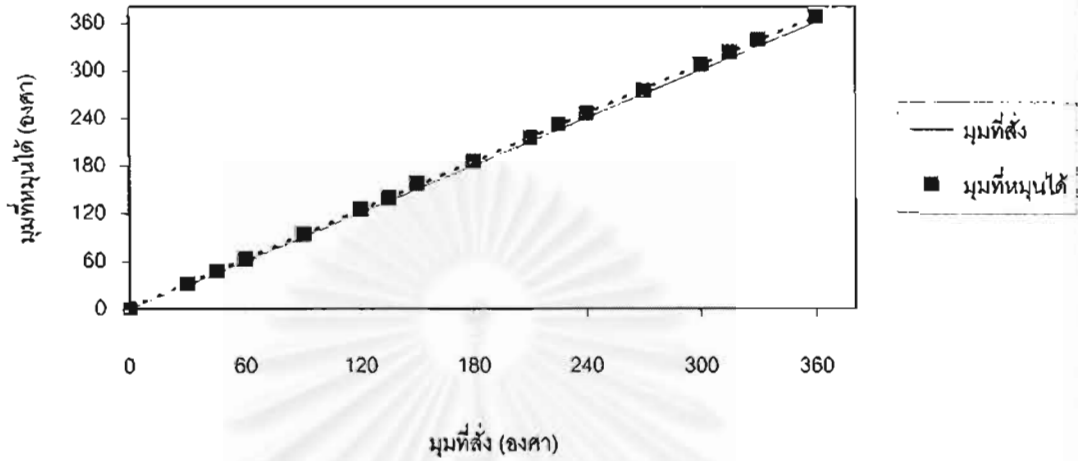


รูปที่ 5.13 ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 1.4 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

มุมที่สั่ง (องศา)	60	120	180	240	300	360
มุมที่หมุนได้ (องศา)	62	122.3	185	245.7	305.7	365.7
มุมผิดพลาด (องศา)	+2	+2.3	+5	+5.7	+5.7	+5.7

ตารางที่ 5.6 ตัวอย่างผลการทดลองหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 1.4 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

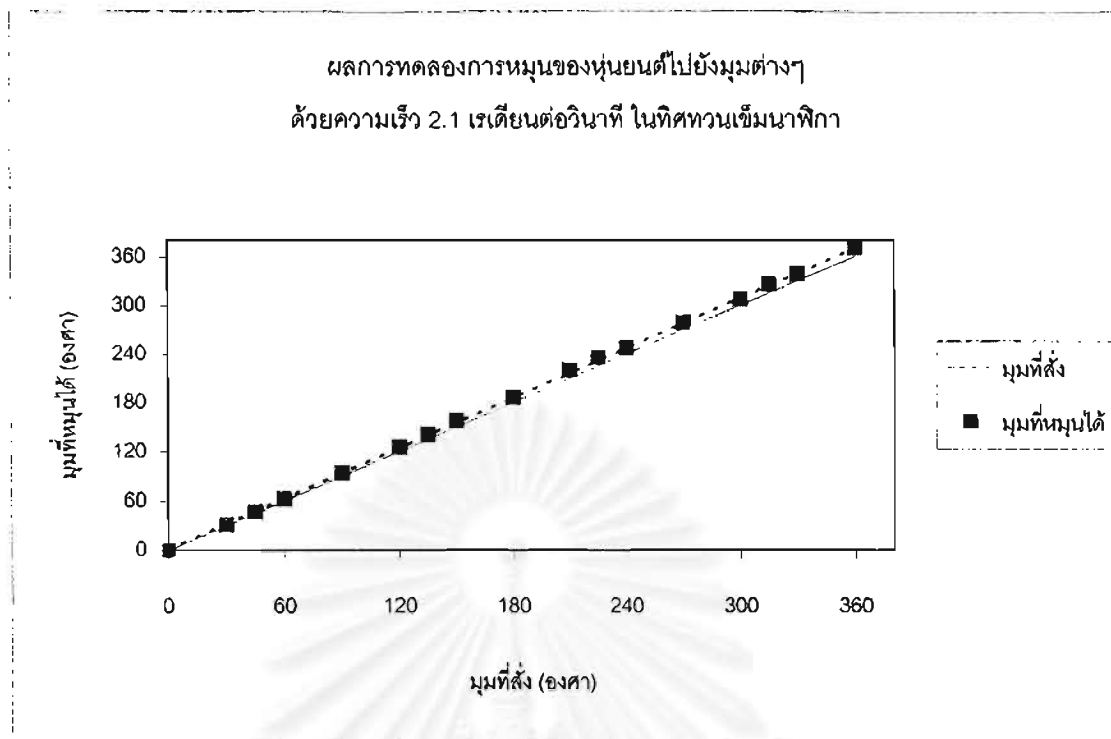
ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 1.4 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา



รูปที่ 5.14 ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 1.4 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา

มุมที่สั่ง (องศา)	60	120	180	240	300	360
มุมที่หมุนได้ (องศา)	62.7	124.7	185.3	245.3	307	366.70
มุมผิดพลาด (องศา)	+2.7	+4.7	+5.3	+5.3	+7	+6.7

ตารางที่ 5.7 ตัวอย่างผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 1.4 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา

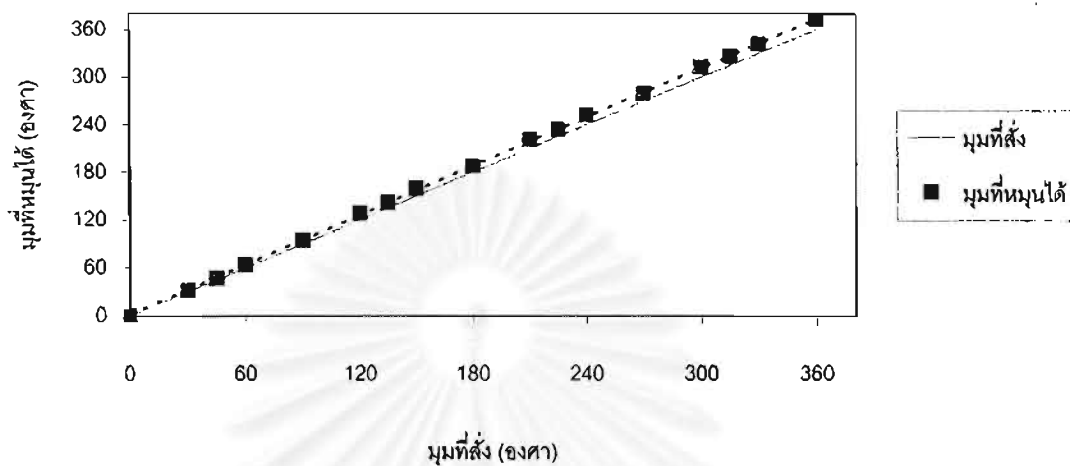


รูปที่ 5.15 ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

มุมที่ตั้ง (องศา)	60	120	180	240	300	360
มุมที่หมุนได้ (องศา)	62.5	125.3	186	247	307.3	370.3
มุมผิดพลาด (องศา)	+2.5	+5.3	+6	+7	+7.3	+10.3

ตารางที่ 5.8 ตัวอย่างผลการทดลองหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา



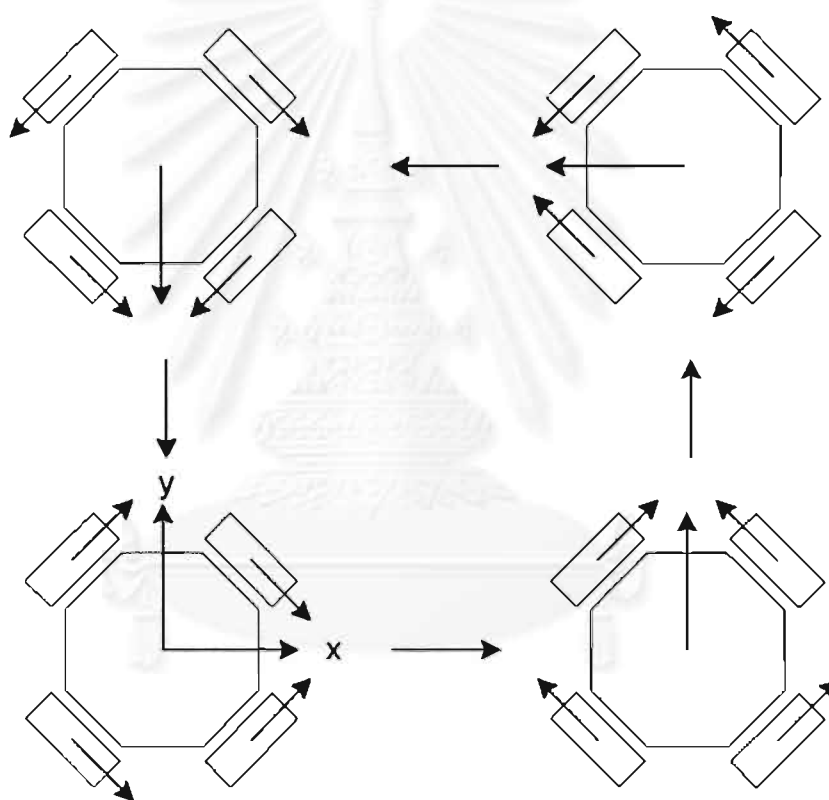
รูปที่ 5.16 ผลการทดลองการหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา

มุมที่ตั้ง (องศา)	60	120	180	240	300	360
มุมที่หมุนได้ (องศา)	63.5	128	187.7	252	312.3	373.3
มุมผิดพลาด (องศา)	+3.5	+8	+7.7	+12	+12.3	+13.3

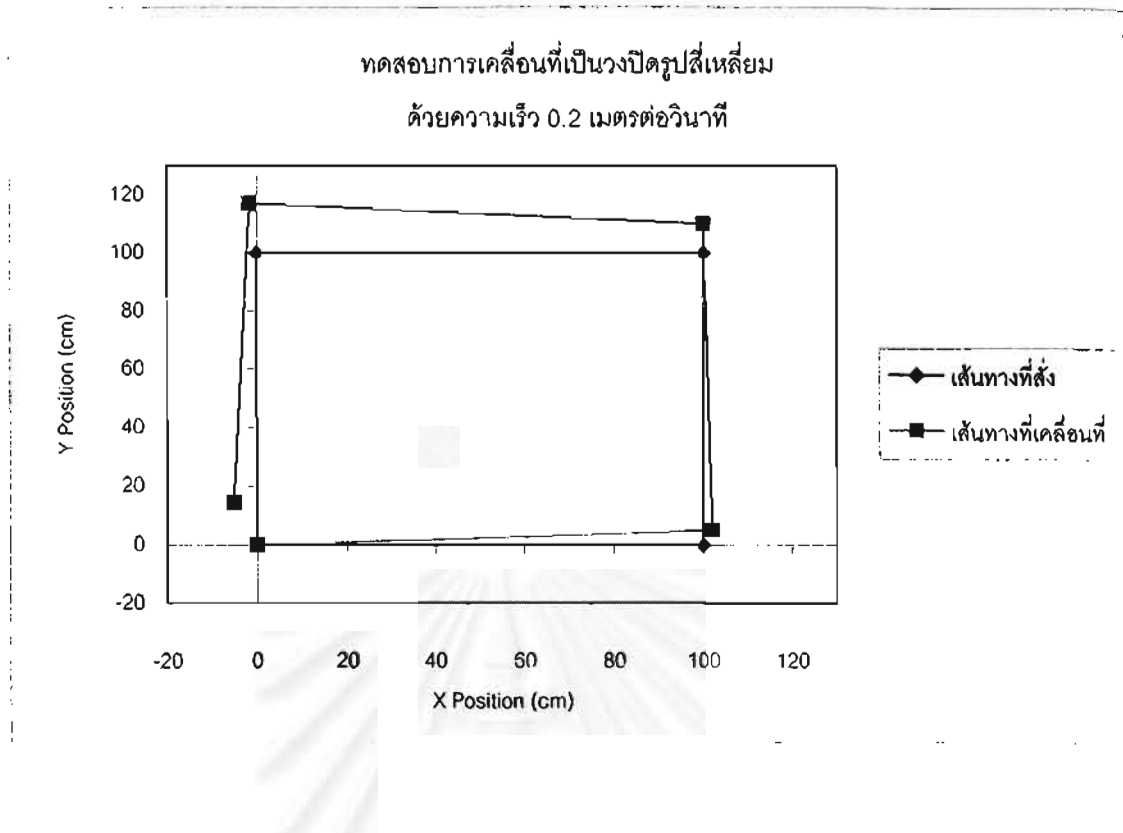
ตารางที่ 5.9 ตัวอย่างผลการทดลองหมุนของหุ่นยนต์ไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 2.1 เรเดียนต่อวินาที ในทิศตามเข็มนาฬิกา

5.3 การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม

เพื่อทดสอบการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของหุ่นยนต์โดยไม่หยุดวิ่ง เคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส โดยไม่ทำการหันหน้าหุ่นยนต์ก่อนการเคลื่อนที่ แล้วกลับมายังตำแหน่งเริ่มต้น ทดลองโดยสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทาง $+X$ $+Y$ $-X$ และ $-Y$ ตามลำดับ ระยะเคลื่อนที่ทิศทางละ 1 เมตร ทำให้เกิดการเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยมจตุรัส กว้าง 1 เมตร ยาว 1 เมตร ทำการวัดตำแหน่งหลังจากเคลื่อนที่ในแนวแกนหนึ่ง ๆ เสร็จเรียบร้อย ทำการทดลองที่ความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที



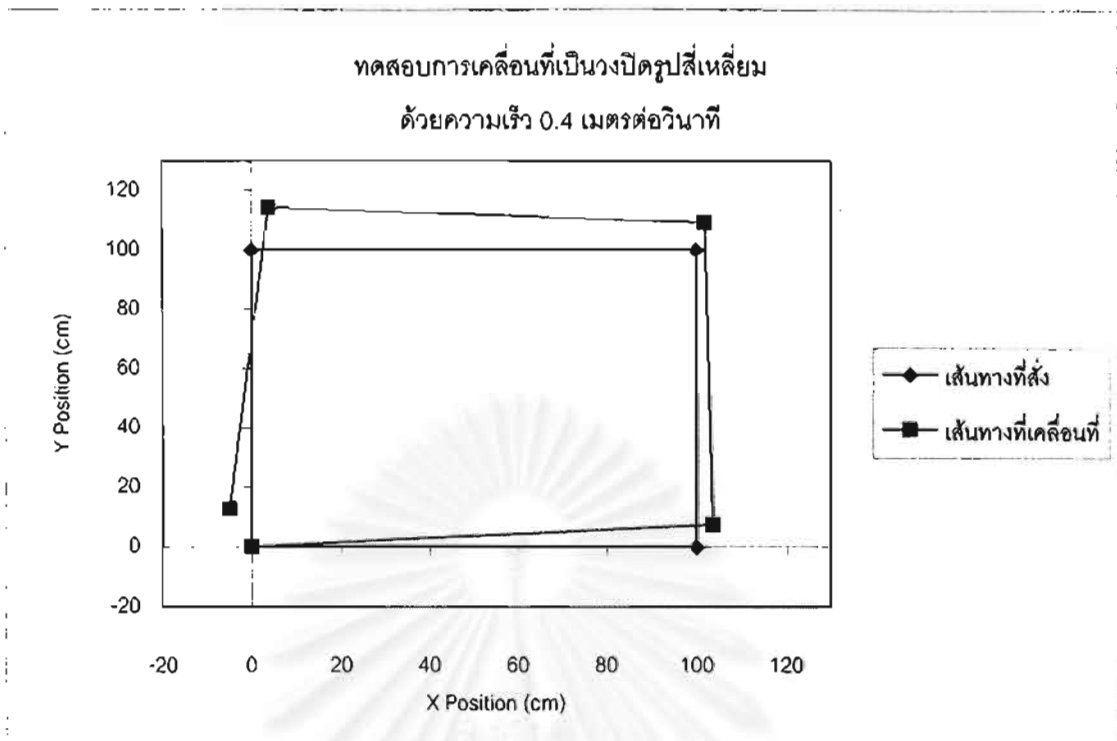
รูปที่ 5.17 การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม



รูปที่ 5.18 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที

จุดที่	ตำแหน่งที่สั่ง (cm)		ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ได้ (cm)	
	X	Y	X	Y
1	100	0	102	5
2	100	100	100	110
3	0	100	-1.7	117
4	0	0	-5.3	14.5

ตารางที่ 5.10 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม
ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที

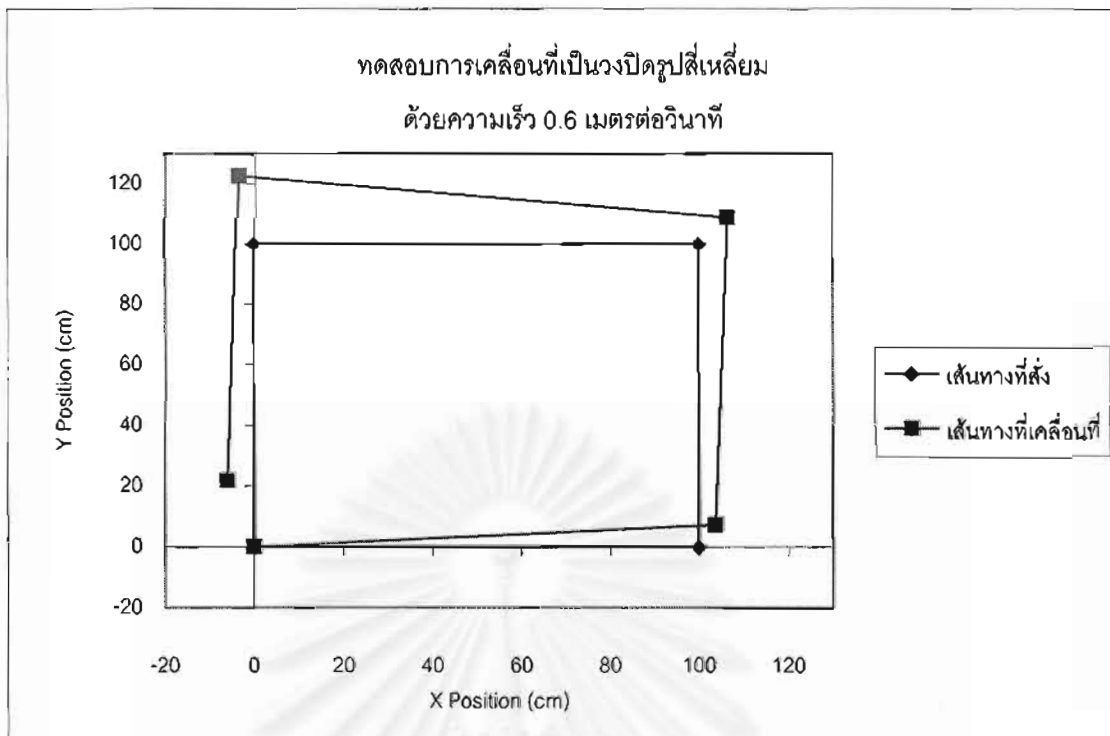


รูปที่ 5.19 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที

ผลการทดลอง

จุดที่	ตำแหน่งที่สั่ง (cm)		ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ได้ (cm)	
	X	Y	X	Y
1	100	0	103.7	7.3
2	100	100	101.9	109.2
3	0	100	3.8	114.3
4	0	0	-5	12.7

ตารางที่ 5.11 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม
ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.20 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที

ผลการทดลอง

จุดที่	ตำแหน่งที่ตั้ง (cm)		ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ได้ (cm)	
	X	Y	X	Y
1	100	0	103.7	7.2
2	100	100	106.5	108.8
3	0	100	-3.7	122.5
4	0	0	-6	21.9

ตารางที่ 5.12 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม
ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที

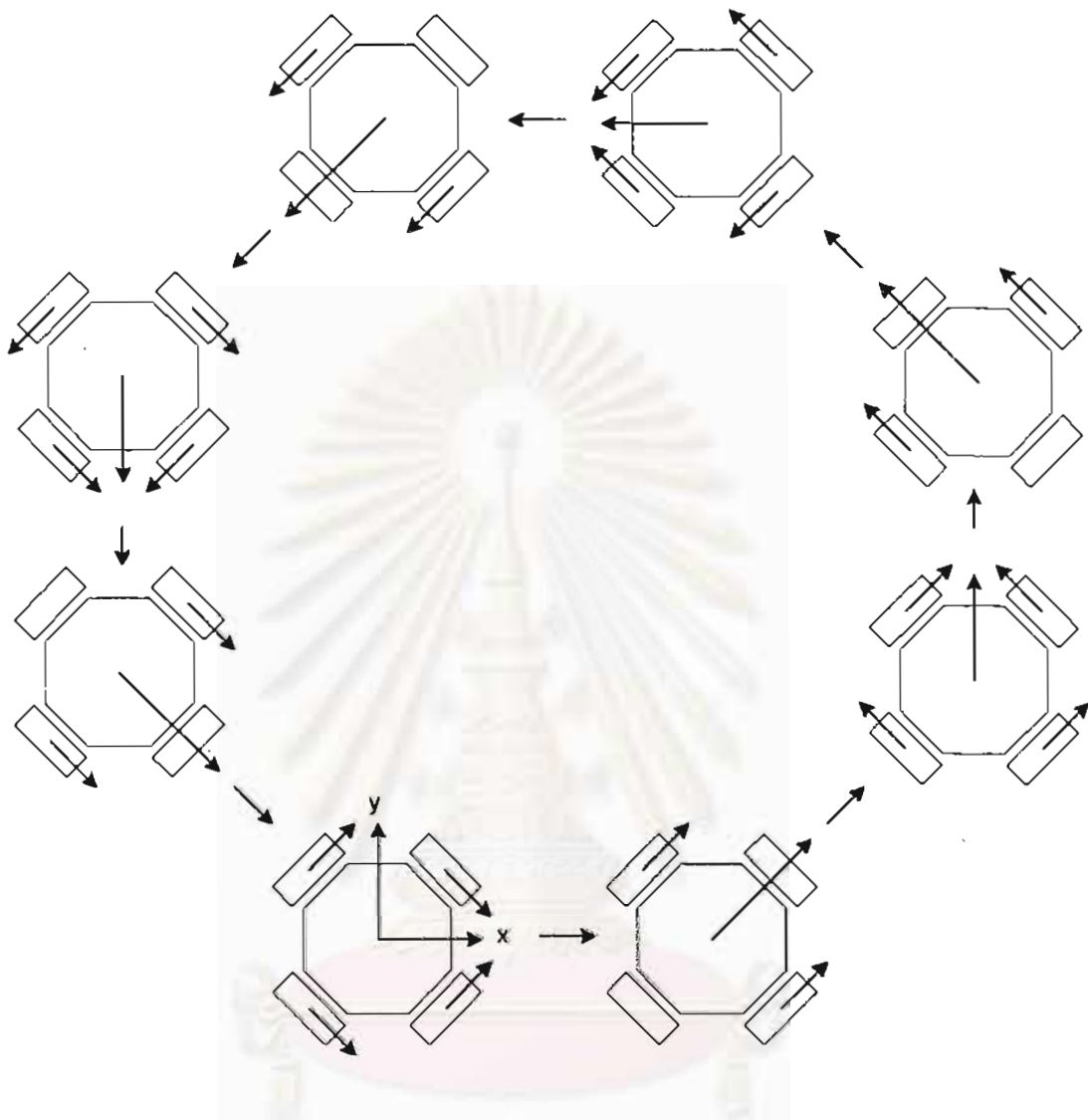
5.4 การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม

เพื่อทดสอบการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องของหุ่นยนต์ โดยไม่ทำการหันหน้าหุ่นยนต์ก่อนการเคลื่อนที่ จุดประสงค์เพื่อเคลื่อนที่เป็นวงปิดให้ใกล้เคียงการวิ่งเป็นรูปวงกลม แต่การวิ่งเป็นรูปวงกลม จะไม่สามารถวัดตำแหน่งอื่นได้นอกจากจุดเริ่มต้น และ จุดสิ้นสุด จึงได้เคลื่อนที่เป็นวงปิดรูป 8 เหลี่ยมด้านเท่าแทน

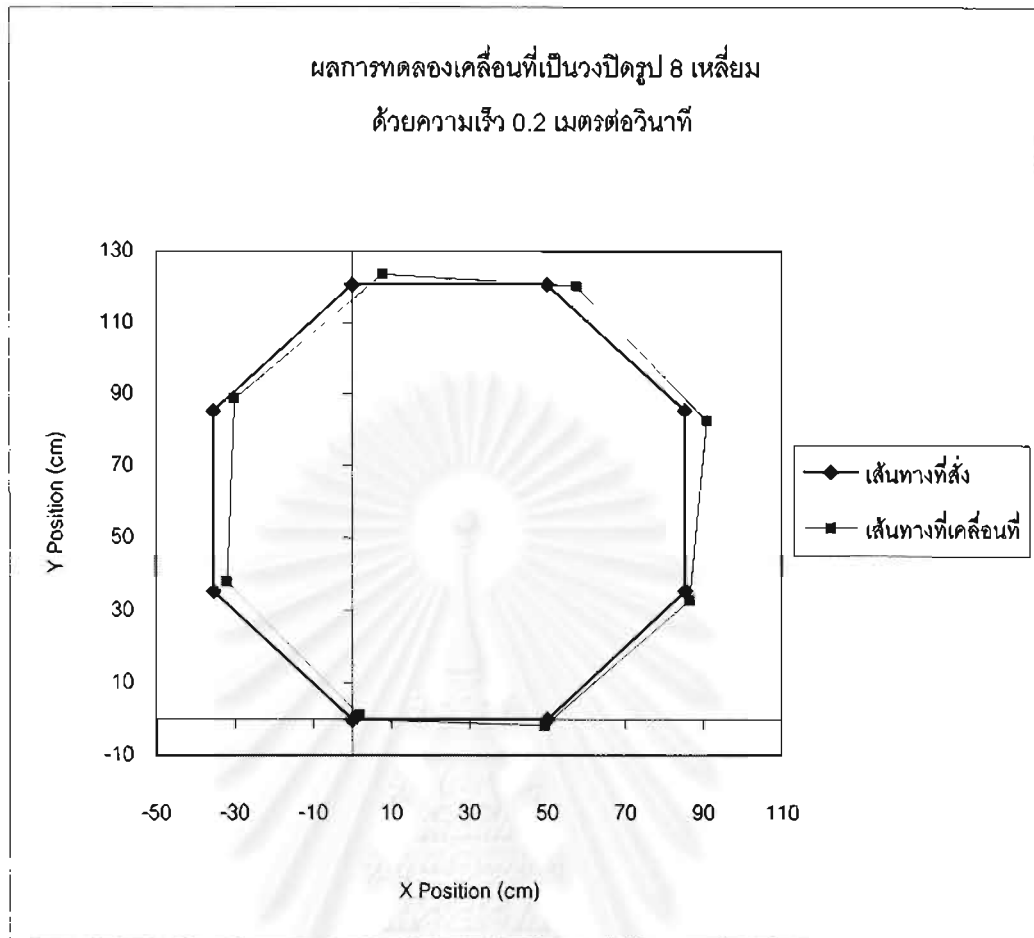
สาเหตุที่เลือกทดสอบกับรูป 8 เหลี่ยมนั้น เพราะลักษณะการวางล้อดังกล่าว ทำให้หุ่นสามารถเคลื่อนที่ได้ดีที่สุด ในแนว 8 ทิศหลัก อันได้แก่ เดินหน้า ถอยหลัง ซ้าย ขวา หน้า-ซ้าย หน้า-ขวา หลัง-ซ้าย และ หลังขวา เมื่อนำการเคลื่อนที่ใน 8 ทิศหลักมาประกอบกันจึงได้รูป 8 เหลี่ยม ซึ่งสะดวกต่อการทดลอง และวัดตำแหน่ง

ทดลองโดยสั่งให้เคลื่อนที่เป็นระยะ 50 เซนติเมตรในทิศทาง 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270 และ 315 องศาตามลำดับ ทำการทดลองที่ความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที





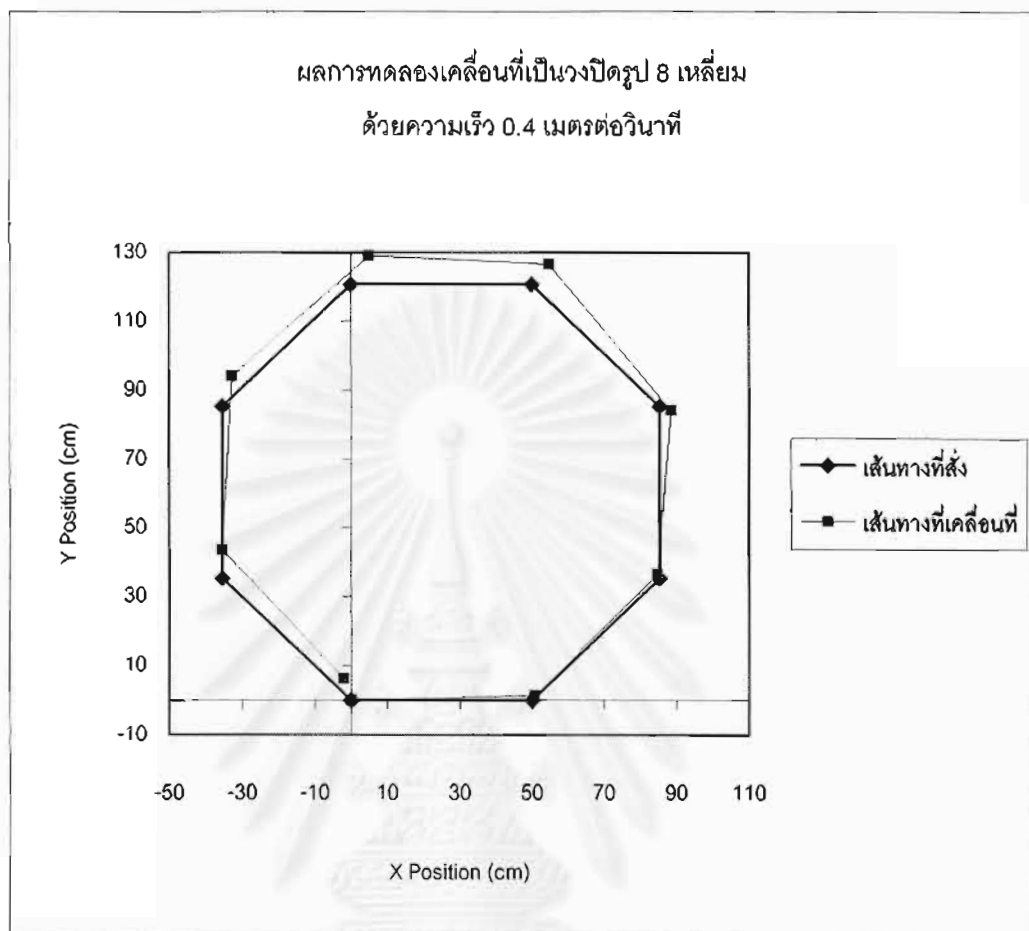
รูปที่ 5.21 การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม



รูปที่ 5.22 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที

จุดที่	ตำแหน่งที่สั่ง (cm)		ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ได้ (cm)	
	X	Y	X	Y
1	50	0	49.3	-1.7
2	85.4	35.4	86.5	32.8
3	85.4	85.4	90.9	82.6
4	50	120.7	57.6	120.2
5	0	120.7	7.8	123.6
6	-35.4	85.4	-30	88.8
7	-35.4	35.4	-32	37.9
8	0	0	1.8	1.18

ตารางที่ 5.13 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม
ด้วยความเร็ว 0.2 เมตรต่อวินาที

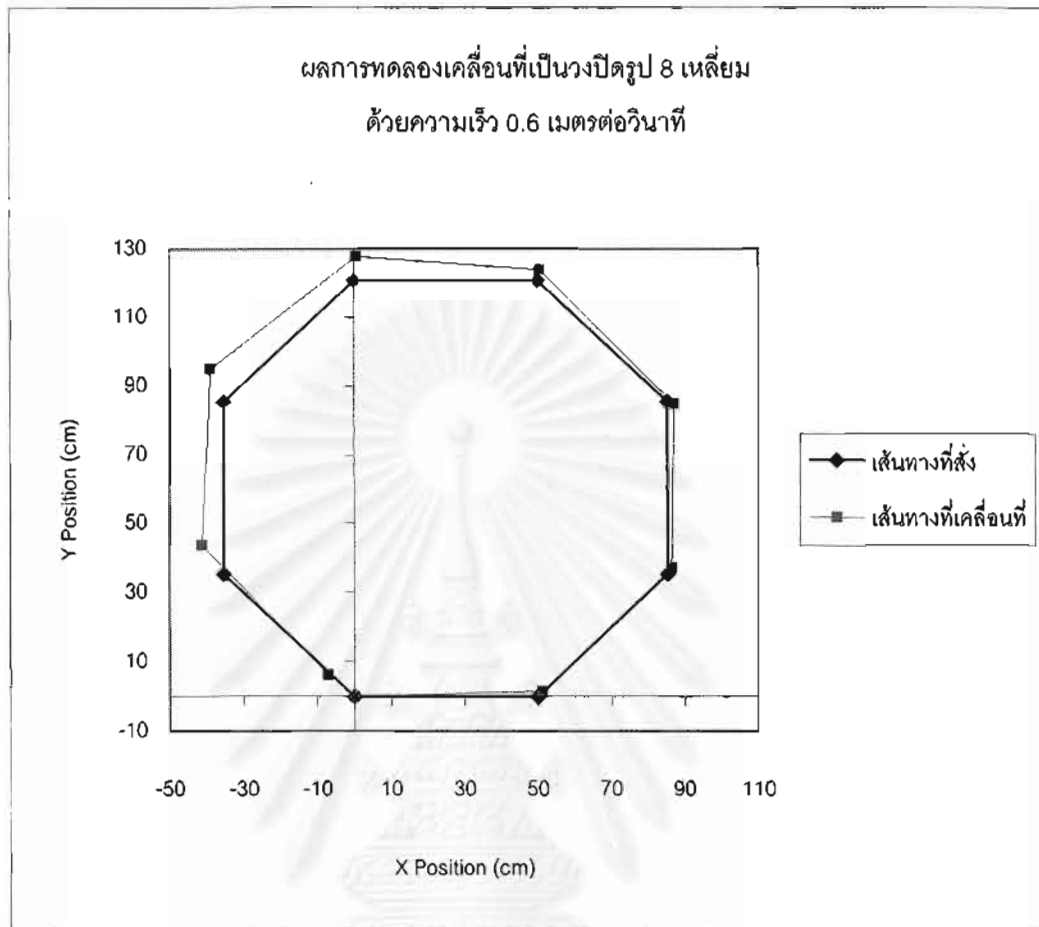


รูปที่ 5.23 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที

จุดที่	ตำแหน่งที่ตั้ง (cm)		ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ได้ (cm)	
	X	Y	X	Y
1	50	0	50.7	1.3
2	85.4	35.4	84.8	36.6
3	85.4	85.4	88.5	84.3
4	50	120.7	54.8	126.6
5	0	120.7	4.9	129.1
6	-35.4	85.4	-32.8	94.1
7	-35.4	35.4	-35.5	43.6
8	0	0	-2.1	6.2

ตารางที่ 5.14 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม
ด้วยความเร็ว 0.4 เมตรต่อวินาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.24 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที

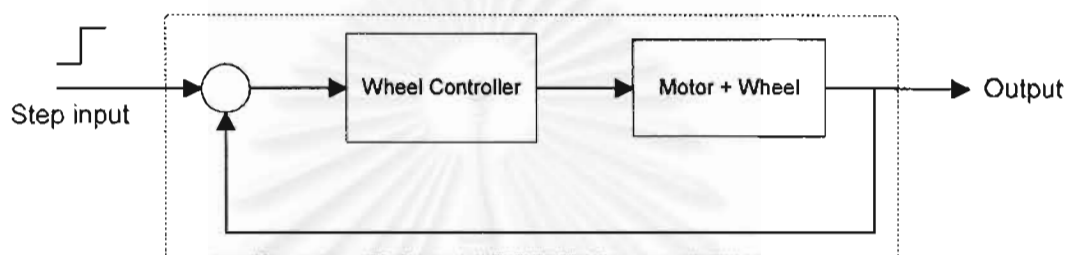
จุดที่	ตำแหน่งที่ตั้ง (cm)		ตำแหน่งที่เคลื่อนที่ได้ (cm)	
	X	Y	X	Y
1	50	0	51.2	1.5
2	85.4	35.4	86.5	37
3	85.4	85.4	87.2	84.7
4	50	120.7	50.5	123.8
5	0	120.7	0.5	127.8
6	-35.4	85.4	-38.9	94.9
7	-35.4	35.4	-41.2	43.5
8	0	0	-7.2	6.3

ตารางที่ 5.15 ผลการทดลองเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม
ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที

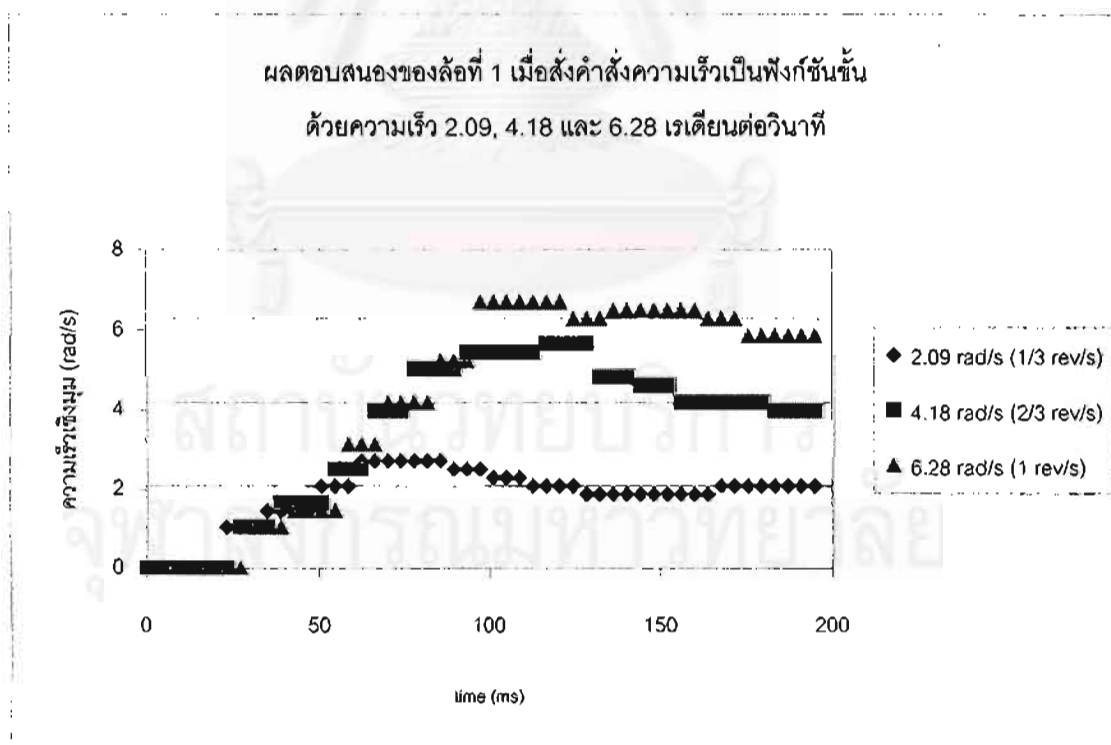
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.5 หาผลตอบสนองของล้อ เมื่อสั่งความเร็วการหมุนเป็นฟังก์ชันขั้น (Step function)

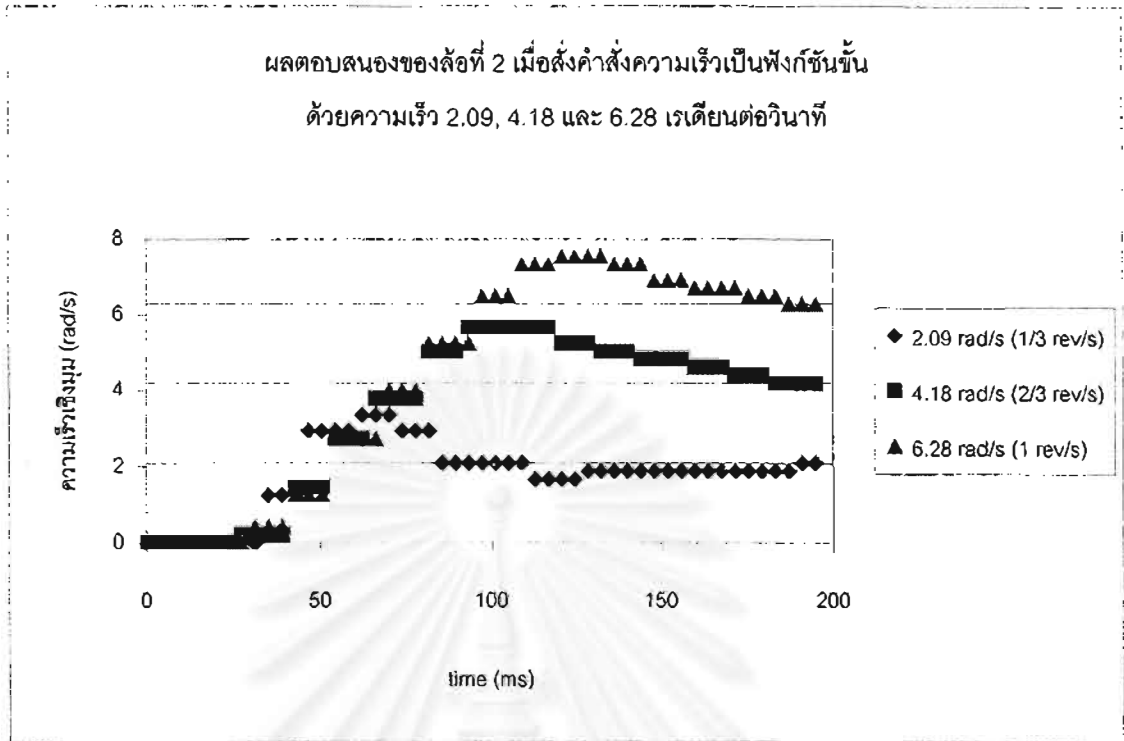
ทดลองสั่งความเร็วให้กับแต่ละล้อ ในลักษณะฟังก์ชันขั้น (Step function) ขนาดต่างๆ กัน คือ 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที (ประมาณ 1/3, 2/3 และ 1 รอบต่อวินาที ตามลำดับ) แล้ววัดความเร็วของล้อที่หมุนได้จริง นำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบลักษณะการตอบสนองต่อฟังก์ชันขั้นที่มีขนาดต่างๆกัน



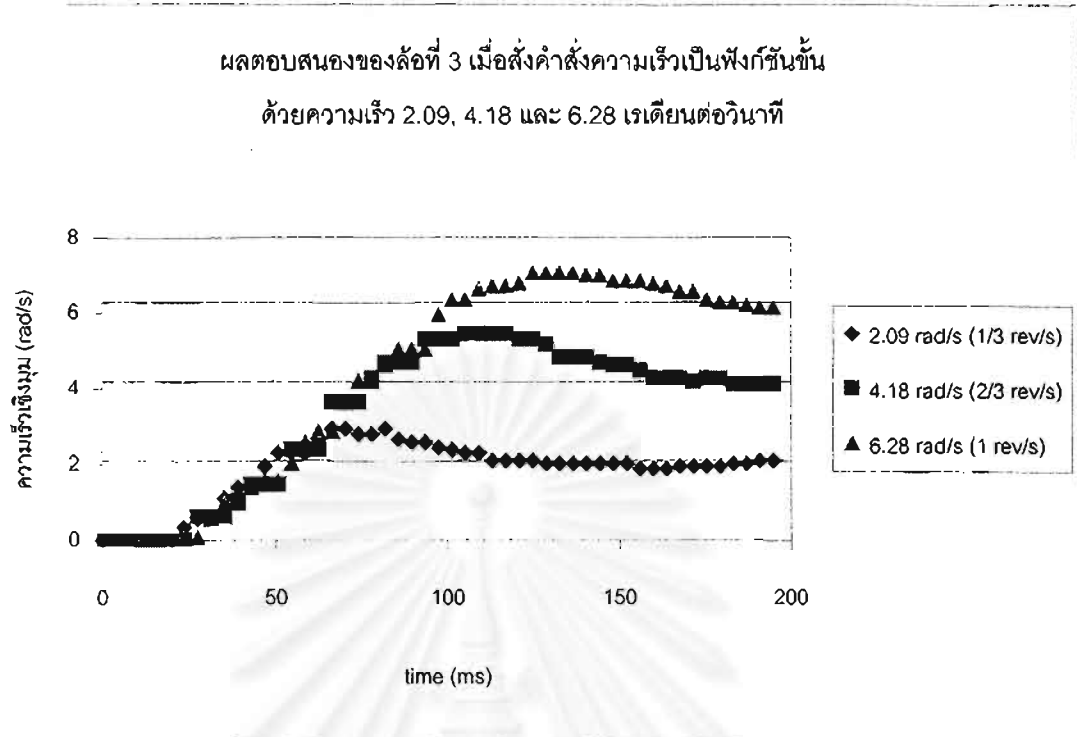
รูปที่ 5.25 ลักษณะการทดลองหาผลตอบสนองของล้อที่มีต่อฟังก์ชันขั้น



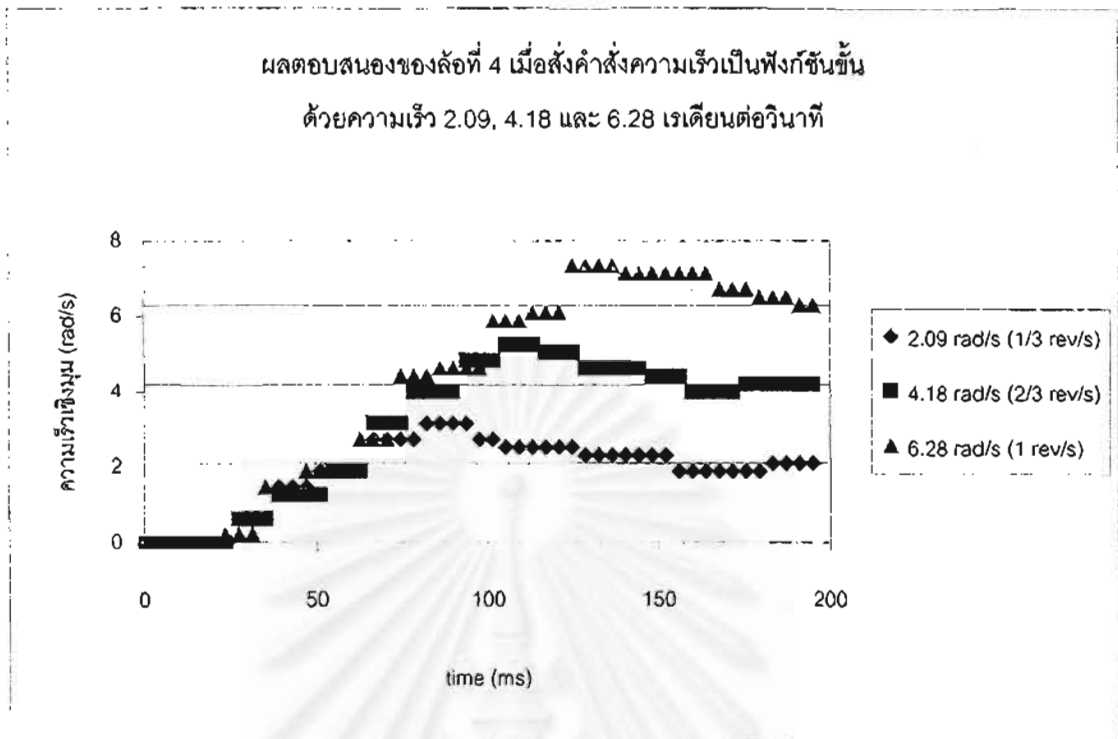
รูปที่ 5.26 ผลตอบสนองของล้อที่ 1 เมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที



รูปที่ 5.27 ผลตอบสนองของล้อที่ 2 เมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น
ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที



รูปที่ 5.28 ผลตอบสนองของล้อที่ 3 เมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น
ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที



รูปที่ 5.29 ผลตอบสนองของล้อที่ 4 เมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น
ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที

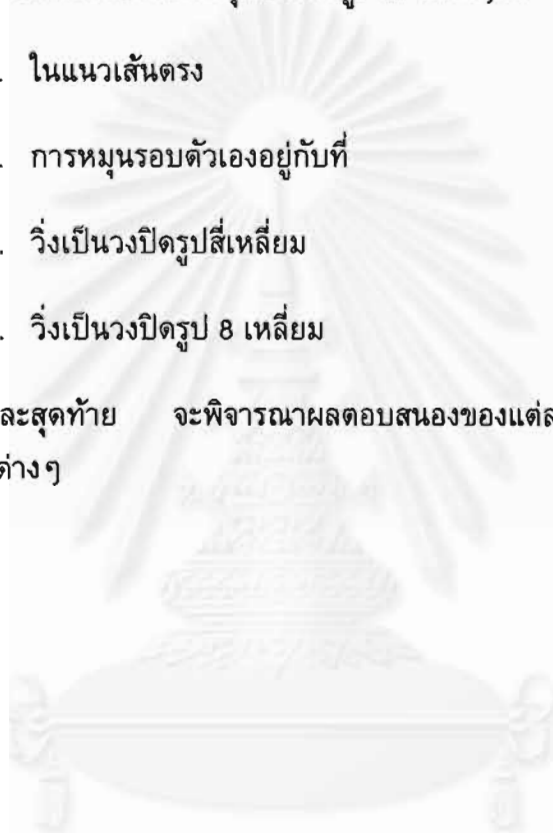
บทที่ 6 อภิปรายผล สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

6.1 อภิปรายผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์การทดสอบ จะพิจารณาผลอันเกิดจากความเร็วในการเคลื่อนที่ หากความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในรูปแบบต่างๆกัน ได้แก่

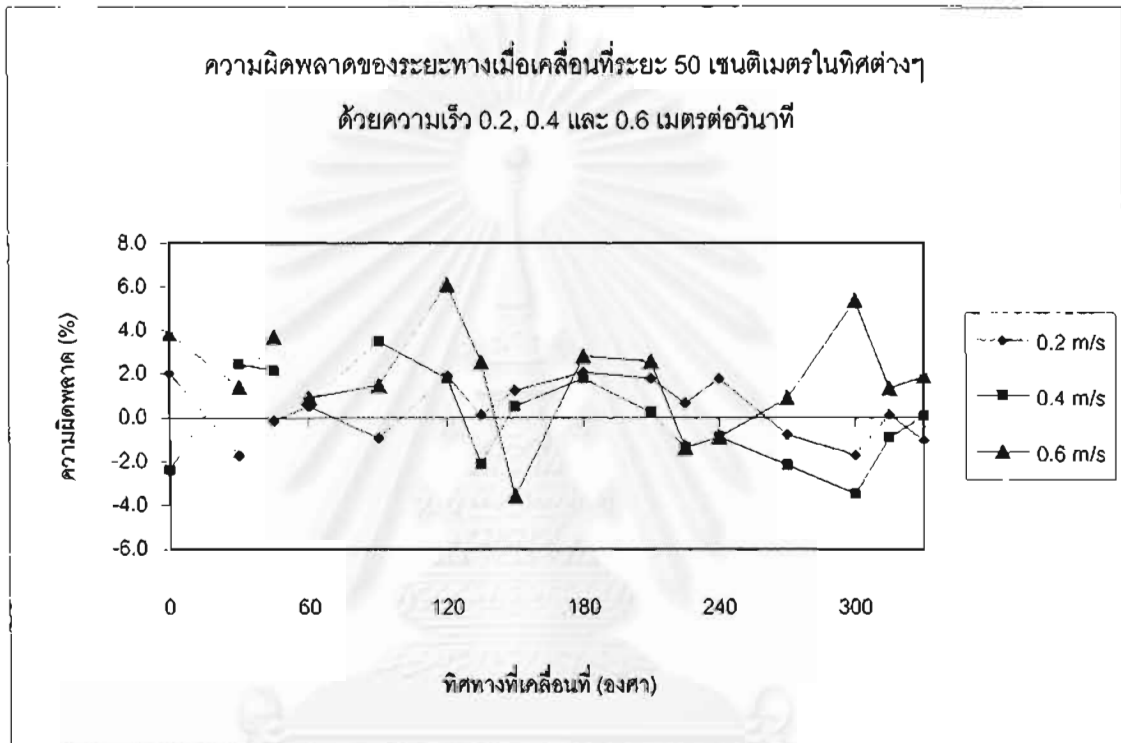
1. ในแนวเส้นตรง
2. การหมุนรอบตัวเองอยู่กับที่
3. ริงเป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม
4. ริงเป็นวงปิดรูป 8 เหลี่ยม

และสุดท้าย จะพิจารณาผลตอบสนองของแต่ละล้อเมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันชั้น ขนาดต่างๆ

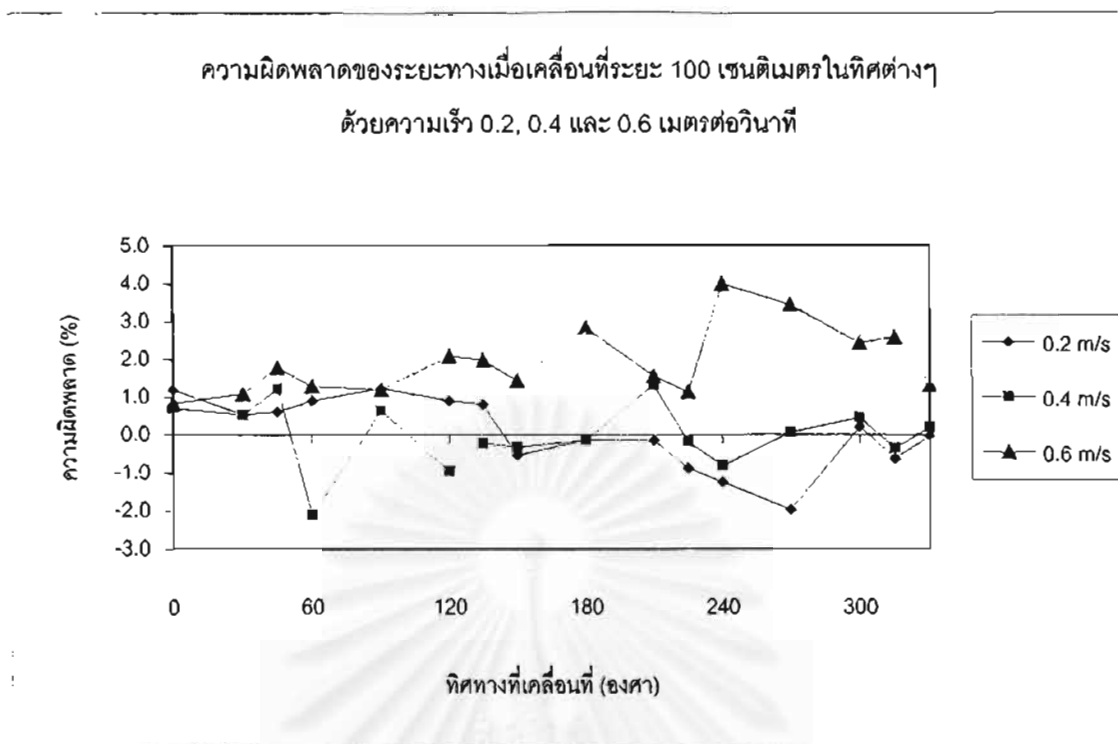


6.1.1 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

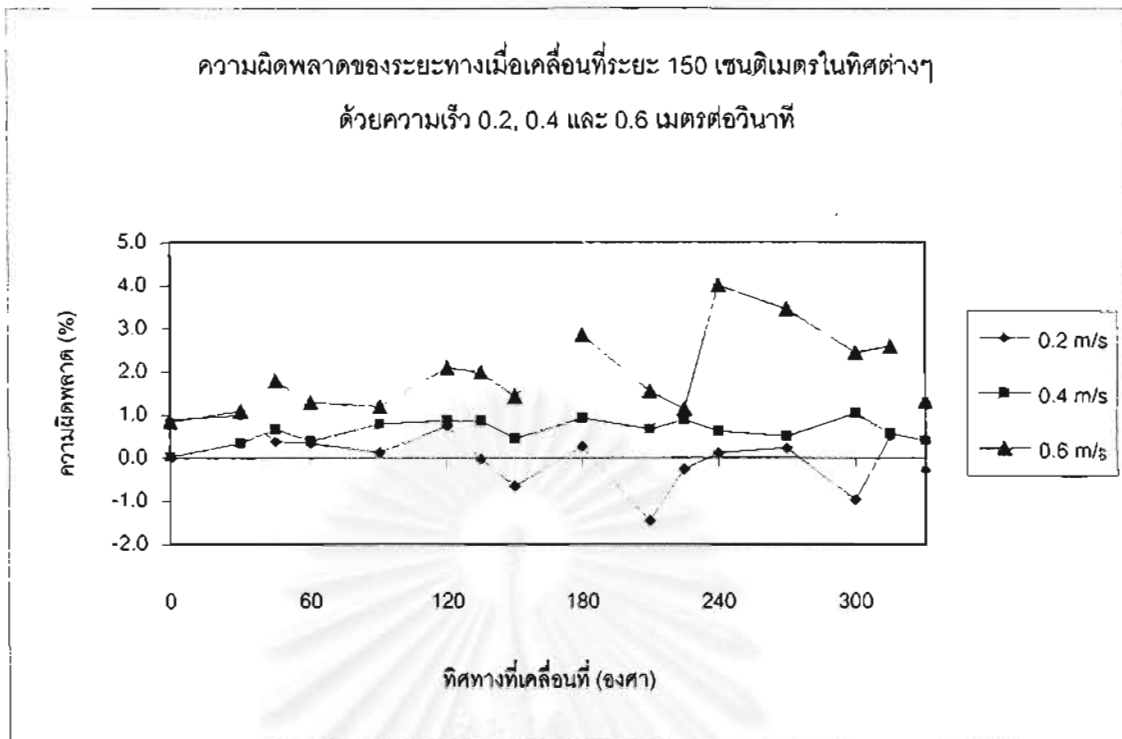
1) นำเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของระยะการขจัด (Displacement) ในการเคลื่อนที่เป็นระยะ 50, 100 และ 150 เซนติเมตรไปในมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที มาเขียนกราฟเปรียบเทียบ ได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 ความผิดพลาดของระยะทางเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 50 เซนติเมตรในทิศต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 6.2 ความผิดพลาดของระยะทางเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 100 เซนติเมตรในทิศต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที



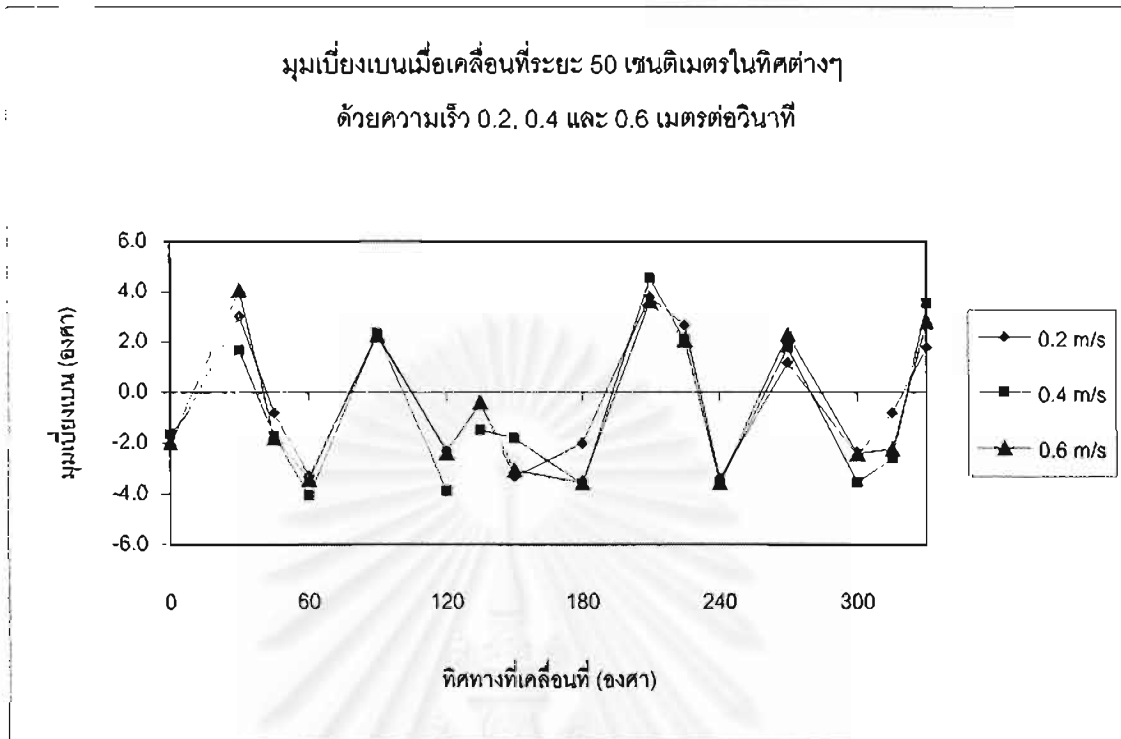
รูปที่ 6.3 ความผิดพลาดของระยะทางเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 150 เซนติเมตรในทิศต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที

เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง 45, 135, 225 และ 315 องศา ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มต่ำกว่าการเคลื่อนที่ในทิศทางอื่น เนื่องจากการเคลื่อนที่ในทิศดังกล่าว ใช้ล้อขับเคลื่อนเพียง 2 ล้อ ส่วนอีก 2 ล้อหยุดอยู่กับที่ ซึ่งเป็นการขับเคลื่อนที่มีโอกาสเกิดการลื่นไถล (Slip) น้อยที่สุด เพราะมีความซับซ้อนน้อย

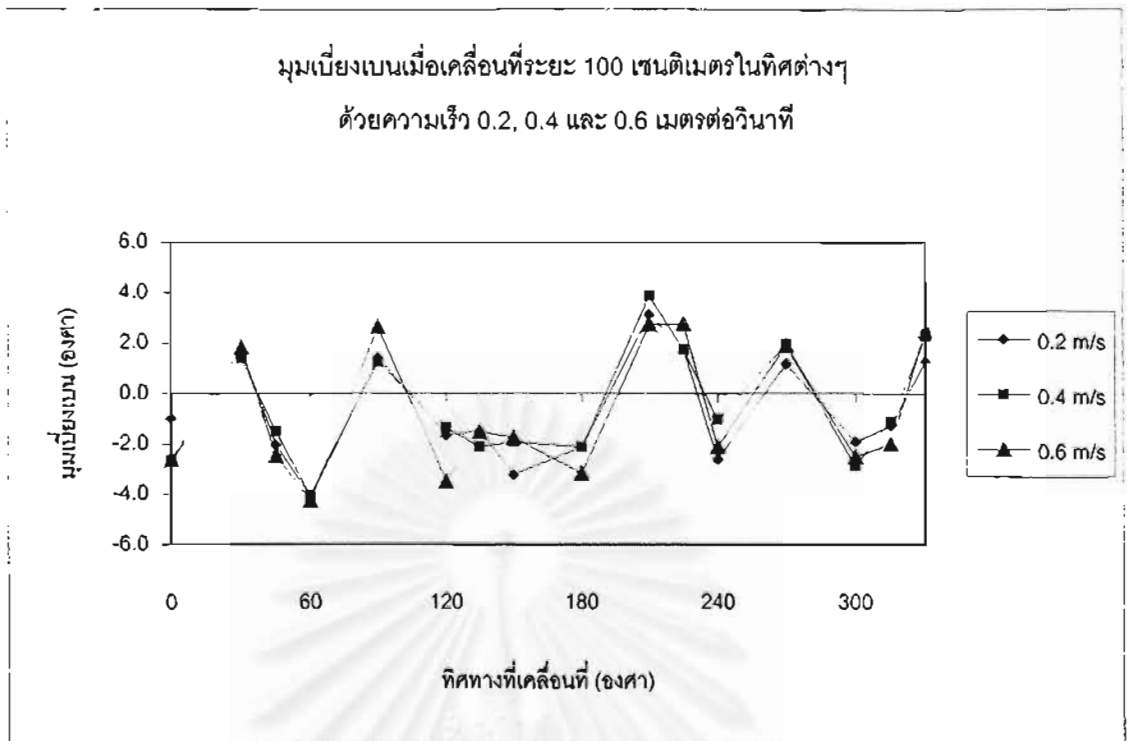
ส่วนการเคลื่อนที่ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น คือการเคลื่อนที่ในทิศทาง 0, 90, 180 และ 270 องศา การเคลื่อนที่ดังกล่าวใช้ล้อทั้งสี่ในการขับเคลื่อน แต่ละล้อมีความเร็วเท่ากัน และ การเคลื่อนที่ในทิศทาง 30, 60, 120, 150, 210, 240, 300 และ 330 องศา ที่แต่ละล้อมีความเร็วไม่เท่ากัน โอกาสเกิดความผิดพลาดจะมีมากขึ้นตามลำดับ

ความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ก็มีผลต่อความผิดพลาดเช่นกัน ที่ความเร็วสูงจะมีแนวโน้มในการผิดพลาดสูงกว่าที่ความเร็วต่ำ

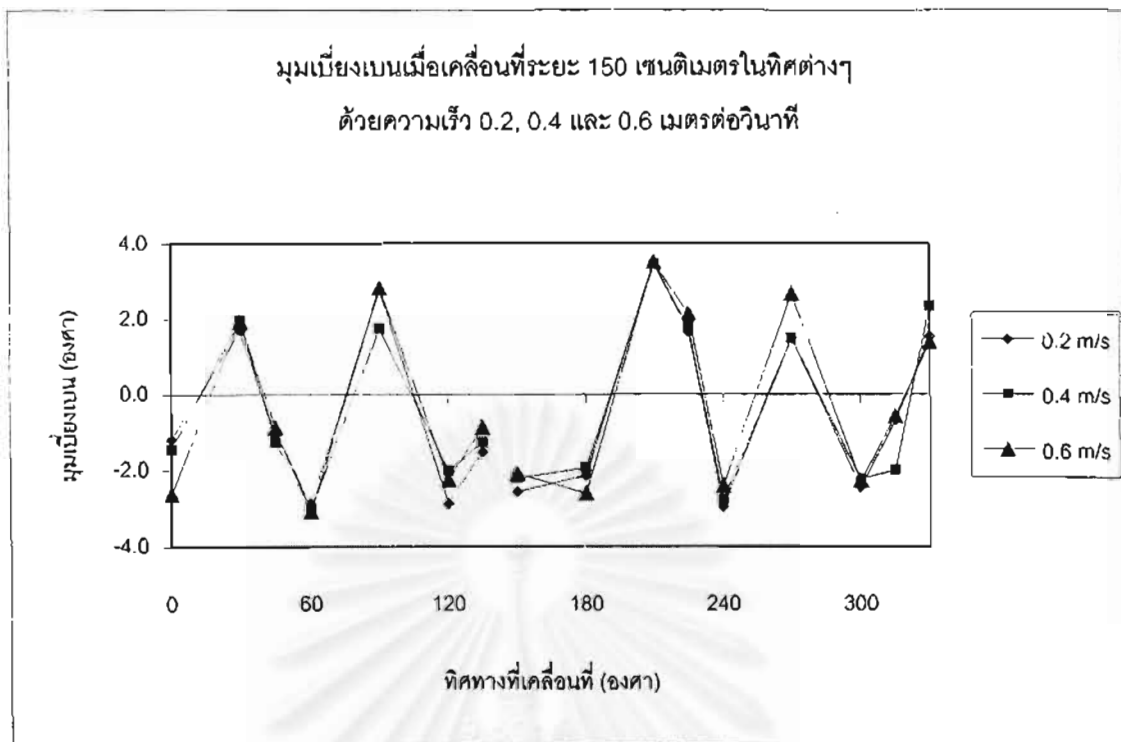
2) นำมุมเบี่ยงเบนของหุ่นยนต์เมื่อเคลื่อนที่เป็นระยะ 50, 100 และ 150 เซนติเมตรไปในมุมต่างๆ ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาทีมาเขียนกราฟเปรียบเทียบ ได้ดังนี้



รูปที่ 6.4 มุมเบี่ยงเบนเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 50 เซนติเมตรในทิศต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 6.5 มุมเบี่ยงเบนเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 100 เซนติเมตรในทิศต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที



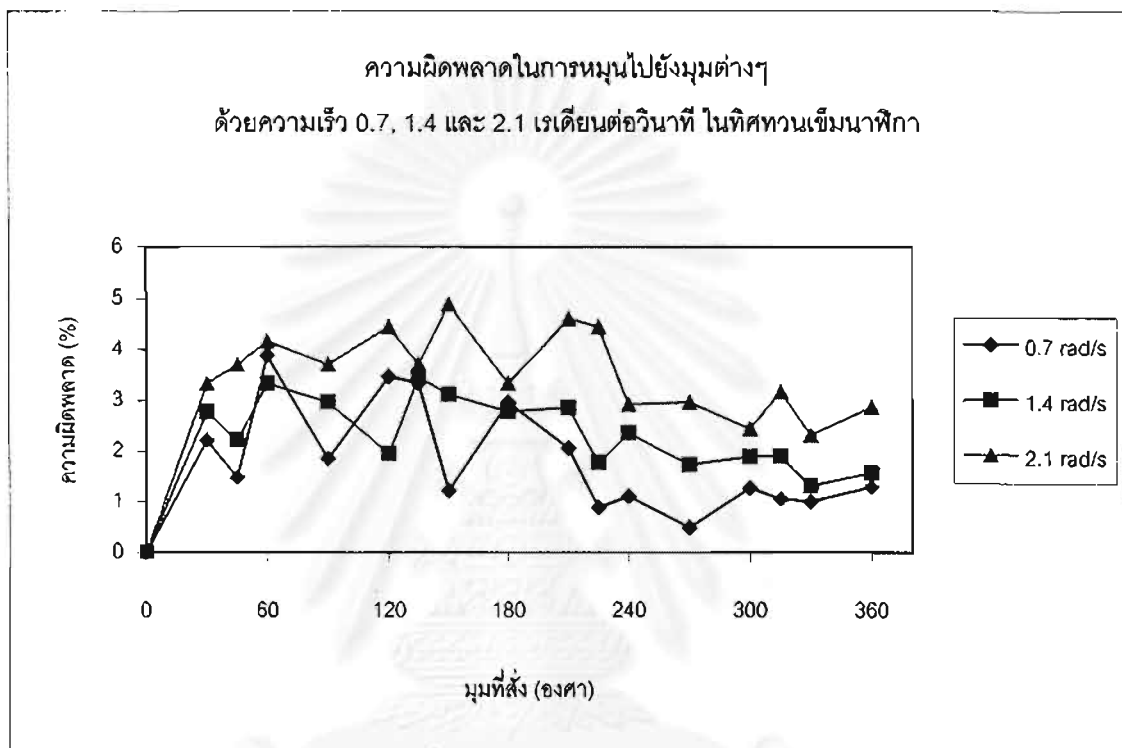
รูปที่ 6.6 มุมเบี่ยงเบนเมื่อเคลื่อนที่ระยะ 150 เซนติเมตรในทิศต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที

มุมเบี่ยงเบนของหุ่นยนต์ที่เกิดขึ้น มีลักษณะคล้ายกับความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ กล่าวคือ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศทาง 45, 135, 225 และ 315 องศา มุมเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มต่ำกว่าการเคลื่อนที่ในทิศทางอื่น ส่วนการเคลื่อนที่ที่ใช้ล้อทั้งสี่ขับเคลื่อน มุมเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

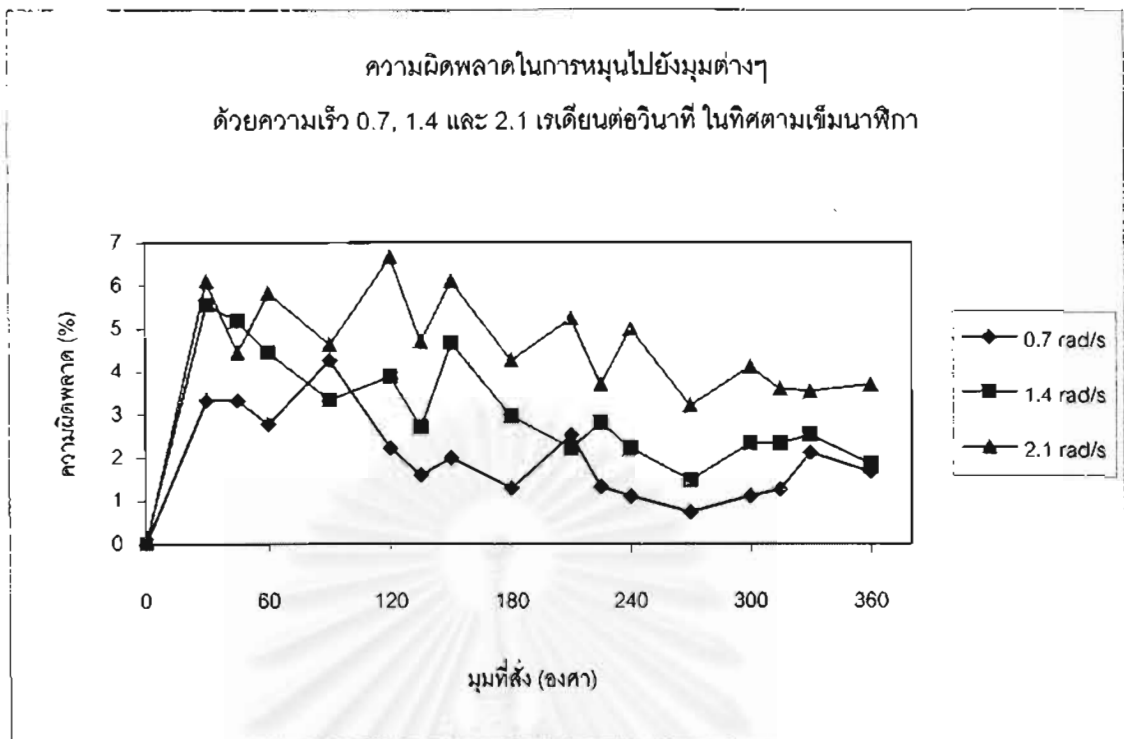
6.1.2 วิเคราะห์การหมุนรอบตัวเองอยู่กับที่

จากผลการทดลอง นำค่าความผิดพลาดในการหมุนไปยังมุมต่างๆ ด้วยความเร็วแตกต่างกัน คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ มาเขียนกราฟเปรียบเทียบ ได้ดังนี้



รูปที่ 6.7 ความผิดพลาดในการหมุนไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.7, 1.4 และ 2.1 เมตรต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

สถาบันนวัตกรรมการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



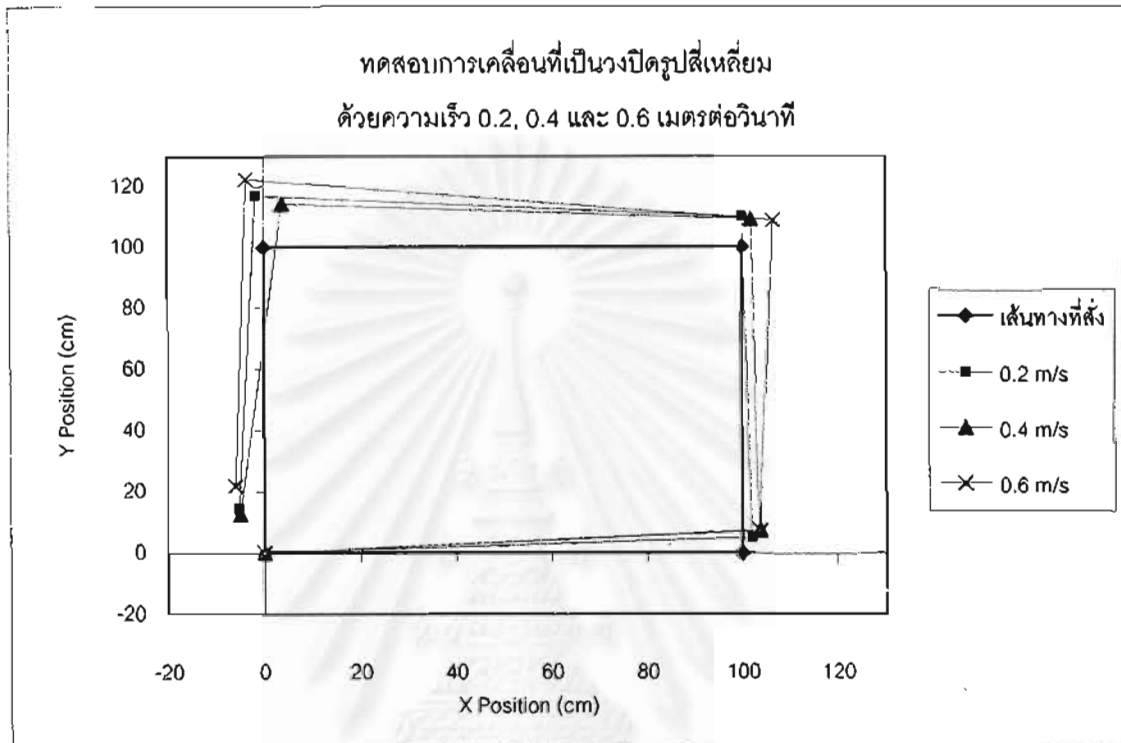
รูปที่ 6.8 ความผิดพลาดในการหมุนไปยังมุมต่างๆ
ด้วยความเร็ว 0.7, 1.4 และ 2.1 เมตรต่อวินาที ในทิศทวนเข็มนาฬิกา

จะเห็นว่า ความผิดพลาดในการหมุน มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วในการหมุน เนื่องจากเมื่อใช้ความเร็วในการหมุนสูงขึ้น เนื่องจากโมเมนต์ของหุ่นยนต์ก็มีค่าเพิ่มขึ้นตาม แรงที่ใช้หยุดหมุนก็จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งอาจมากกว่าขีดสูงสุดที่จะจ่ายให้ได้ของชุดขับมอเตอร์ (Power Amplifier) ทำให้หยุดได้ไม่ตรงตำแหน่งที่สั่ง และมุมที่หมุนได้มีแนวโน้มมากกว่ามุมที่สั่งเสมอ

ความผิดพลาดอีกส่วนหนึ่ง เกิดจากวิธีการวัด เพราะในการวัดมุมที่หมุนได้ จะทำการวัดเทียบแนวแกน Y ก่อน และ หลังการหมุน ตำแหน่งที่ติดตั้ง Laser Pointer ทั้งสองเพื่อใช้หาแนวแกนนั้น ห่างกันเพียง 8 เซนติเมตร ซึ่งน้อยมาก เมื่อเทียบกับระยะระหว่างล้อ (56 เซนติเมตร) ทำให้แนวแกนที่หาได้ในแต่ละครั้งมีโอกาสผิดพลาดได้ง่าย

6.1.3 วิเคราะห์การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม

นำผลการเคลื่อนที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที มาเขียนลงบนกราฟเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ดังนี้

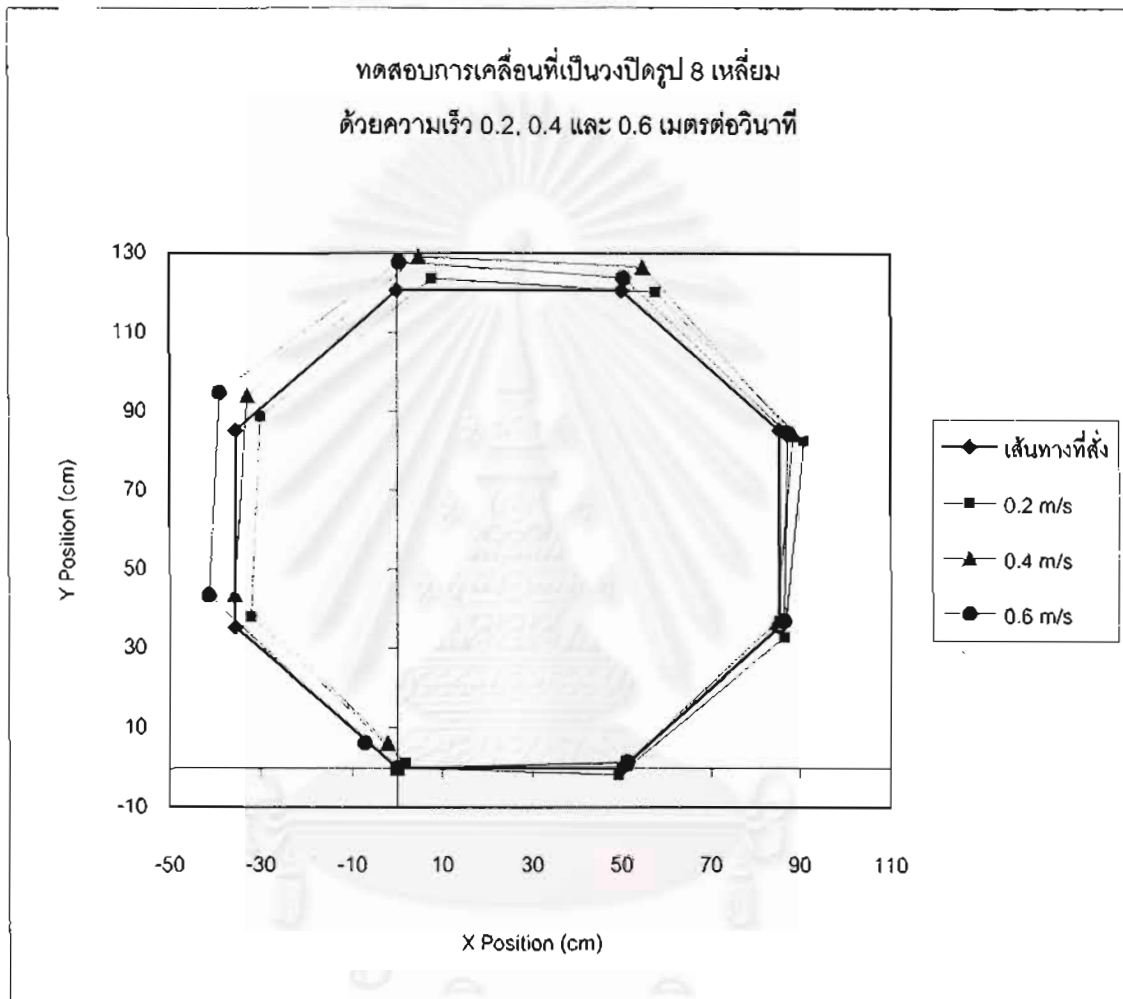


รูปที่ 6.9 ทดสอบการเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปสี่เหลี่ยม
ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที

ในช่วงแรกของการเคลื่อนที่ ความผิดพลาดเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกัน ยังใกล้เคียงกันอยู่ และมีแนวโน้มที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไกลกว่าตำแหน่งที่สั่งเล็กน้อย เพราะผลเนื่องจากแรงเฉื่อยของตัวหุ่น และ การสั่นไถลระหว่างล้อกับพื้น เมื่อเคลื่อนที่เป็นระยะทางไกล จากจุดเริ่มต้นมากขึ้น ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ก็จะมากขึ้นด้วย เพราะเกิดจากความผิดพลาดสะสมในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่มารวมกัน ที่ความเร็วสูงกว่า หุ่นยนต์มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ไกลกว่าเส้นทางที่สั่งมากขึ้น

6.1.4 วิเคราะห์การเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปหลายเหลี่ยม (8 เหลี่ยม)

นำผลการเคลื่อนที่เป็นรูป 8 เหลี่ยม ด้วยความเร็ว 0.2 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที มาเขียนลงบนกราฟเดียวกัน เพื่อเปรียบเทียบกัน ได้ดังนี้



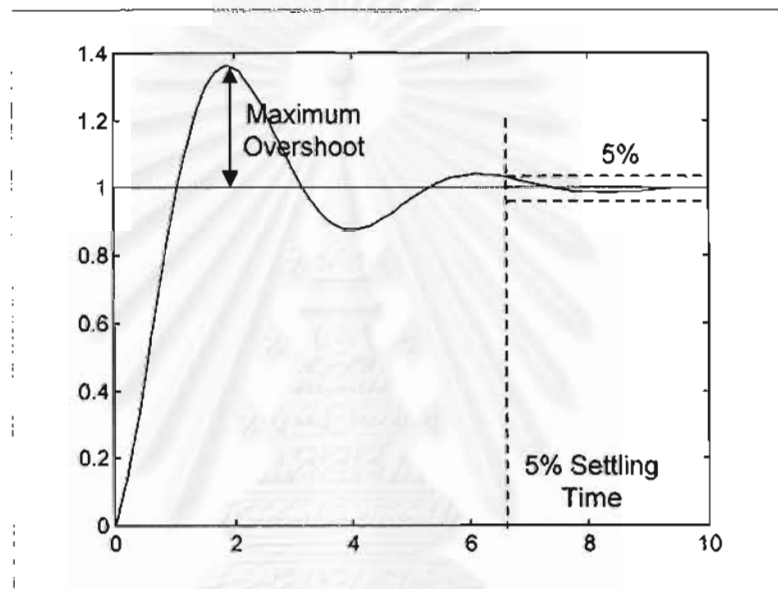
รูปที่ 6.10 ทดสอบการเคลื่อนที่เป็นวงปิดรูปแปดเหลี่ยม
ด้วยความเร็ว 0.2, 0.4 และ 0.6 เมตรต่อวินาที

จะเห็นว่า ลักษณะความผิดพลาดที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับการเคลื่อนที่รูปสี่เหลี่ยม กล่าวคือ ในช่วงแรกของการเคลื่อนที่ ความผิดพลาดเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกัน ยังใกล้เคียงกันอยู่ แต่เมื่อเคลื่อนที่เป็นระยะทางไกลจากจุดเริ่มต้นมากขึ้น ความผิดพลาดในการเคลื่อน

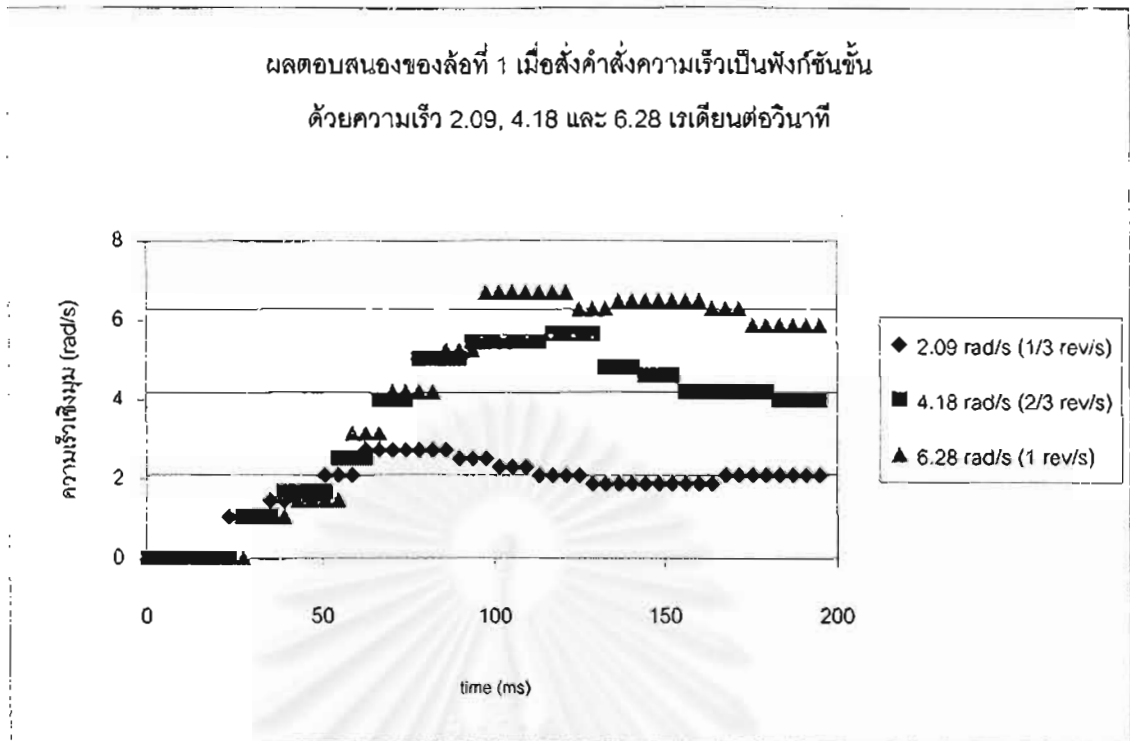
ที่ก็จะมากขึ้นด้วย เพราะเกิดจากความผิดพลาดสะสมในแต่ละช่วงการเคลื่อนที่มารวมกัน ที่ความเร็วสูงกว่า หุ่นยนต์มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ไกลกว่าเส้นทางที่สั่งมากขึ้น

6.1.5 หาผลตอบสนองของล้อย เมื่อสั่งความเร็วการหมุนเป็นฟังก์ชันขั้น (Step function)

ผลตอบสนองของแต่ละล้อยที่มีต่อฟังก์ชันขั้น จะมีลักษณะดังรูปที่ 6.13 จะทำการหาโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5 % ของแต่ละล้อย แล้วนำมาเปรียบเทียบกัน



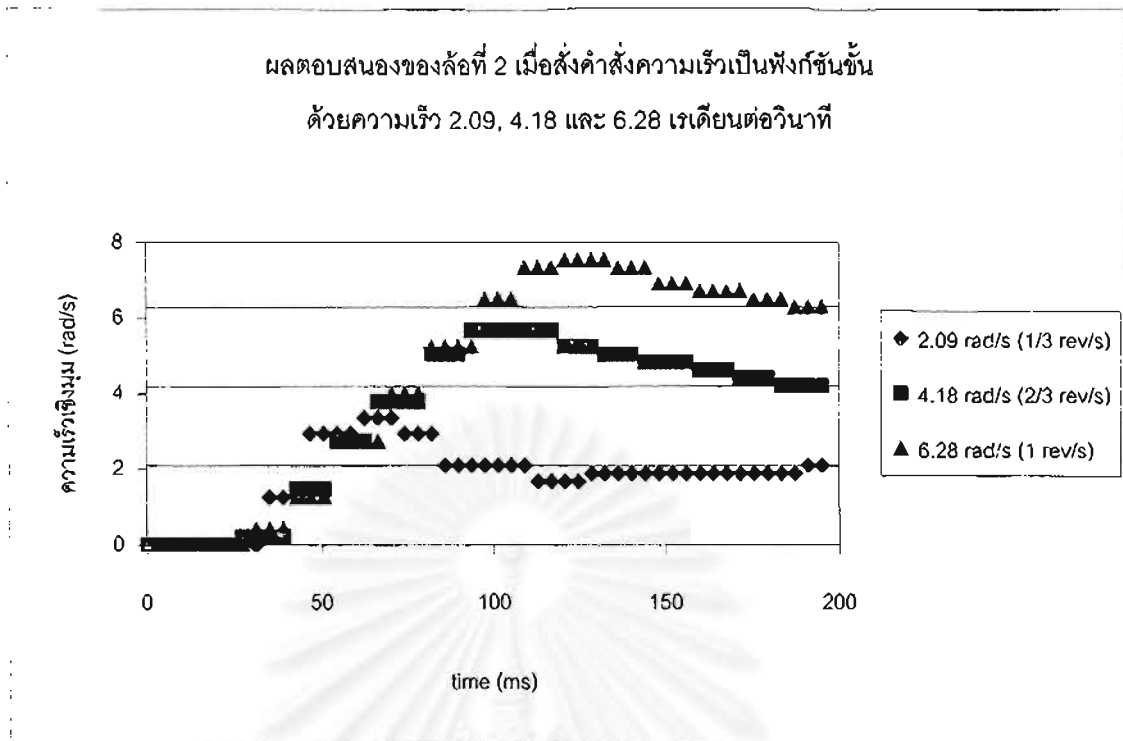
รูปที่ 6.11 แสดงโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5 %



รูปที่ 6.12 ผลตอบสนองของล้อที่ 1 เมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น
ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที

ความเร็ว (rad/s)	โอเวอร์ชูตสูงสุด (%)	เวลาเข้าที่ 5 % (มิลลิวินาที)
2.09	30.1	167.7
4.18	35.1	156
6.28	6.6	136.5

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5 % ของล้อที่ 1

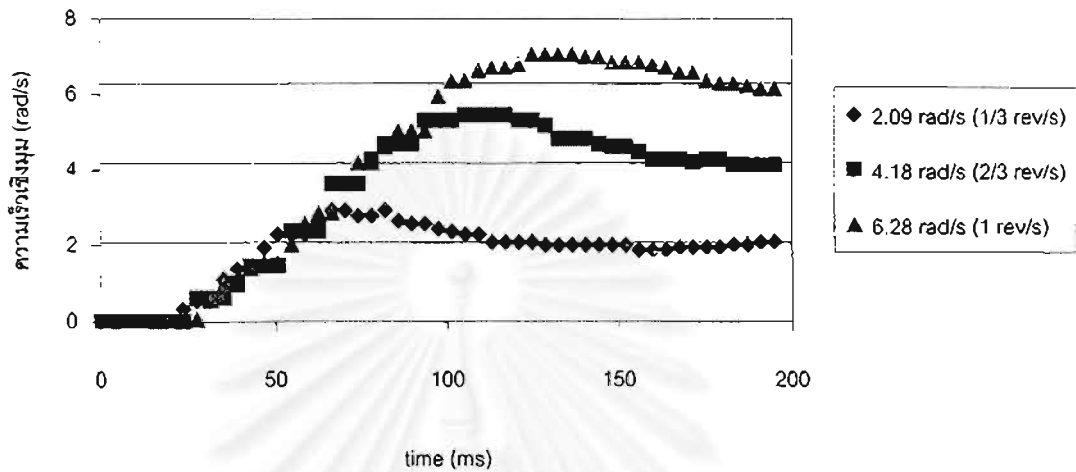


รูปที่ 6.13 ผลตอบสนองของล้อที่ 2 เมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น
ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที

ความเร็ว (rad/s)	โอเวอร์ชูตสูงสุด (%)	เวลาเข้าที่ 5 % (มิลลิวินาที)
2.09	60.2	191.1
4.18	35.2	171.6
6.28	19.9	175.5

ตารางที่ 6.2 แสดงค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5 % ของล้อที่ 2

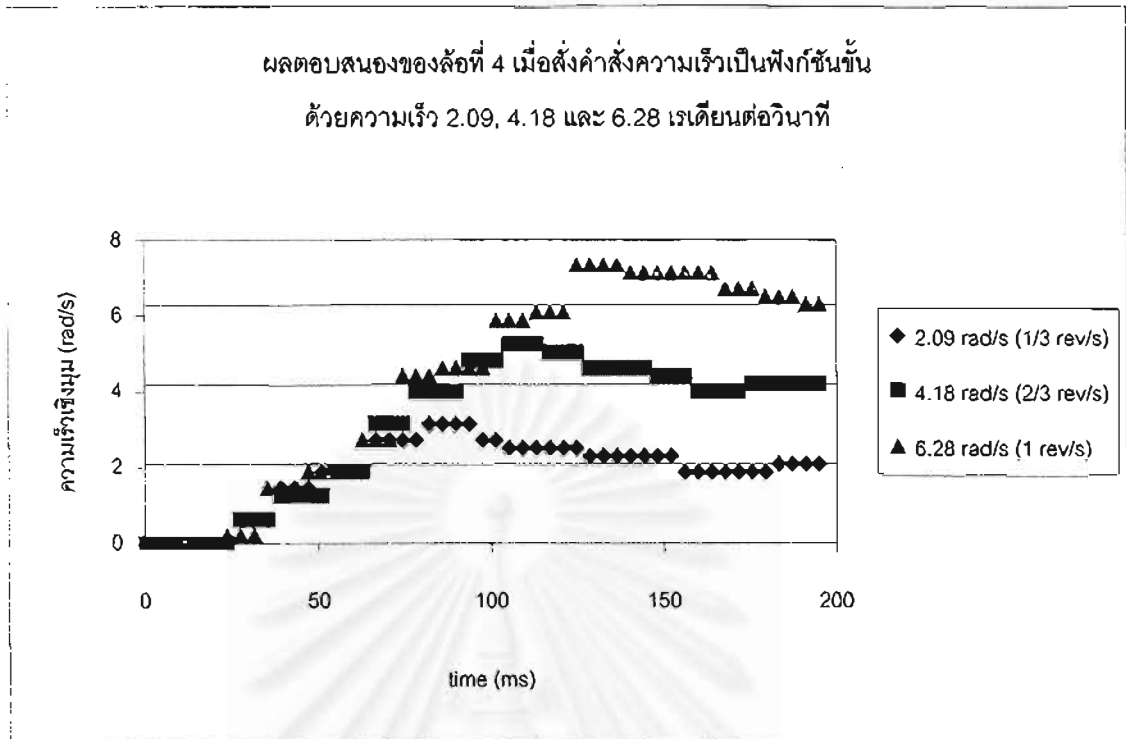
ผลตอบสนองของล้อที่ 3 เมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น
ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที



รูปที่ 6.14 ผลตอบสนองของล้อที่ 3 เมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น
ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที

ความเร็ว (rad/s)	โอเวอร์ชูตสูงสุด (%)	เวลาเข้าที่ 5 % (มิลลิวินาที)
2.09	40.2	113.1
4.18	29.2	159.9
6.28	12.3	167.7

ตารางที่ 6.3 แสดงค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5 % ของล้อที่ 3



รูปที่ 6.15 ผลตอบสนองของล้อที่ 4 เมื่อสั่งคำสั่งความเร็วเป็นฟังก์ชันขั้น
ด้วยความเร็ว 2.09, 4.18 และ 6.28 เรเดียนต่อวินาที

ความเร็ว (rad/s)	โอเวอร์ชูตสูงสุด (%)	เวลาเข้าที่ 5 % (มิลลิวินาที)
2.09	50.2	156
4.18	25.4	148.2
6.28	16.7	179.4

ตารางที่ 6.4 แสดงค่าโอเวอร์ชูตสูงสุด และ เวลาเข้าที่ 5 % ของล้อที่ 4

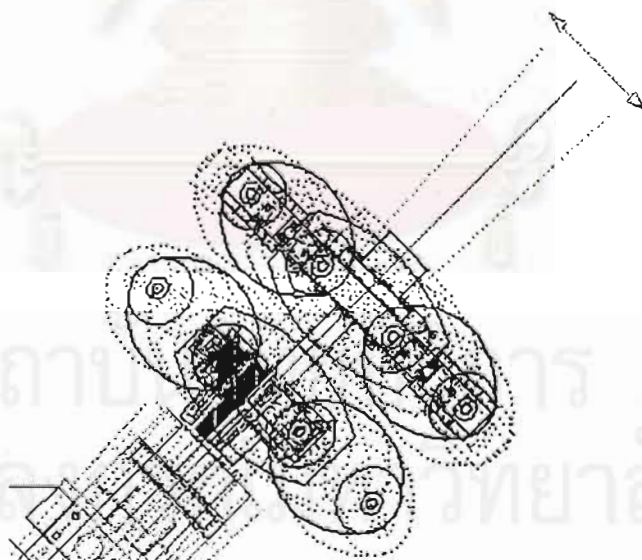
จากรูปที่ 6.12 ถึง 6.15 และ ตารางที่ 6.1 ถึง 6.4 จะเห็นว่า เมื่อสั่งคำสั่งลักษณะเหมือนกัน คือเป็นฟังก์ชันขั้นขนาดต่างๆ ความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady State Error) จะเกิดน้อยมาก แต่เนื่องจากล้อแต่ละล้อมีการตอบสนองในภาวะชั่วคราว (Transient Response) ที่ไม่เท่ากัน ทำให้การเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ ของหุ่นยนต์ที่ต้องอาศัยล้อทั้งสองทำงานพร้อมๆกัน เกิดความผิดพลาดได้ ในขณะเริ่มต้น และ หยุด

6.1.6 อภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองที่กล่าวมา จะเห็นได้ว่า หุ่นยนต์มีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่มากกว่า ระยะทางที่สั่งอยู่เสมอ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงที่มุมต่างๆ และการหมุนรอบตัวเอง ความผิดพลาดที่เกิดขึ้น มีความสัมพันธ์กับความเร็วที่ใช้เคลื่อนที่ โดยที่ความเร็วสูงกว่า ระยะทางที่ผิดพลาดก็จะมีค่ามากตามไปด้วย อธิบายได้ว่าที่ความเร็วสูง โมเมนตัมของหุ่นยนต์จะมีค่าสูงกว่าที่ความเร็วต่ำ ทำให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการหยุด ซึ่งอาจจะมากกว่าค่าที่ชุดขับเคลื่อนจะให้ได้ และโอกาสที่จะเกิดการลื่นไถล (Slip) เมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง มีมากกว่าที่ความเร็วต่ำ

รูปแบบการเคลื่อนที่ก็มีผลต่อความผิดพลาดเช่นกัน รูปแบบที่มีความซับซ้อนน้อย เช่น ขับเคลื่อนโดยใช้ล้อเพียง 2 ล้อ โอกาสผิดพลาดจะต่ำกว่า การขับเคลื่อนโดยใช้สี่ล้อ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในกรณีที่ล้อทั้งสี่มีความเร็วไม่เท่ากัน โอกาสผิดพลาดก็จะยิ่งสูง

นอกจากมีค่าความผิดพลาดของระยะในการเคลื่อนที่แล้ว หุ่นยนต์ยังมีการเคลื่อนที่เบี่ยงเบนออกจากแนวที่ต้องการไปเล็กน้อย ซึ่งเกิดจากความไม่แข็งแรงของกลไก บริเวณชุดกันสะเทือน การผิดรูปของแกนกลาง ทำให้ล้อทั้งสี่ไม่อยู่ในแนวตั้งฉากซึ่งกันละกันจริงๆ และ profile ของล้อ ที่ไม่เป็นวงกลมสมบูรณ์ และยังมีการเยื้องศูนย์กลางอยู่เล็กน้อยในแต่ละล้อ



รูปที่ 6.16 ความไม่แข็งแรงของระบบกันสะเทือน และการเยื้องศูนย์กลางของล้อ

จุดที่สำคัญอีกจุดหนึ่งที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ คือ แต่ละล้อมีการตอบสนองต่อคำสั่งได้ต่างกัน ทำให้การเคลื่อนที่ที่จำเป็นต้องอาศัยล้อทั้งสี่พร้อมๆกัน เกิดความผิดพลาดได้ โดยเฉพาะในช่วงที่ต้องเปลี่ยนแปลงความเร็ว เช่น ตอนออกตัว และ หยุด เป็นต้น แต่ในสภาวะคงที่ ความเร็วผิดพลาดของแต่ละล้อน้อยมาก เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ความผิดพลาดจะเกิดน้อยกว่า ดังนั้นการเคลื่อนที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเกิดขึ้นบ่อยครั้ง โอกาสผิดพลาดจะมากขึ้นตามลำดับ

6.2 สรุปผลการทดลอง

ความเร็วเชิงเส้นเฉลี่ยสูงสุดในการทดสอบ	0.6 เมตรต่อวินาที	
ความเร็วเชิงมุมเฉลี่ยสูงสุดในการทดสอบ	2.1 เรเดียนต่อวินาที (120.3 องศาต่อวินาที)	
ความผิดพลาดของระยะทางสูงสุด	5.4 %	ด้วยความเร็ว 0.6 เมตรต่อวินาที ในทิศ 300 องศา เป็นระยะ 50 เซนติเมตร
ความผิดพลาดเชิงมุม	6.6 %	ด้วยความเร็วเชิงมุม 2.1 เรเดียนต่อวินาที (120.3 องศาต่อวินาที) หมุนตามเข็มนาฬิกา 120 องศา

ตารางที่ 6.5 แสดงค่าความผิดพลาดสูงสุด ที่เกิดขึ้นในการทดลองเคลื่อนที่แบบต่างๆ

	โอเวอร์ชูตสูงสุด (%)		เวลาเข้าที่ 5 % สูงสุด (ms)	
ล้อยี่ 1	35.1	ที่ความเร็ว 4.18 rad/s	167.7	ที่ความเร็ว 2.09 rad/s
ล้อยี่ 2	60.2	ที่ความเร็ว 2.09 rad/s	191.1	ที่ความเร็ว 2.09 rad/s
ล้อยี่ 3	40.2	ที่ความเร็ว 2.09 rad/s	167.7	ที่ความเร็ว 6.28 rad/s
ล้อยี่ 4	50.2	ที่ความเร็ว 2.09 rad/s	179.4	ที่ความเร็ว 6.28 rad/s

ตารางที่ 6.6 แสดงค่าความโอเวอร์ชูตสูงสุด และเวลาเข้าที่ 5 % สูงสุดเปรียบเทียบทั้งสี่ล้อ

6.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้อาจแบ่งได้ดังนี้

1. การปรับปรุงความถูกต้องในการเคลื่อนที่
2. การนำร่อง และ รับรู้สภาพแวดล้อม

6.3.1 การปรับปรุงความถูกต้องในการเคลื่อนที่

จากที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 5 ความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ส่วนใหญ่มาจากวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไม่สามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอที่จะทำให้มอเตอร์หยุดหุ่นยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเฉื่อยสูง ทำให้หุ่นยนต์หยุดได้ไม่ตรงตำแหน่ง ความไม่แข็งแรง และ ผิดรูปของโครงสร้าง และ ความเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นมีค่าไม่เพียงพอ

ดังนั้นการปรับปรุงชุดขับเคลื่อนให้มีกำลังมากขึ้น จะช่วยให้หุ่นยนต์ตอบสนองตามที่ควบคุมสั่งได้แม่นยำขึ้น การปรับปรุงโครงสร้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบกันสะเทือน ทำให้แข็งแรงขึ้น ไม่เสียรูปได้ง่าย จะทำให้แบบจำลองการเคลื่อนที่ (Kinematics Modeling) มีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น ทำให้ควบคุมทำงานได้แม่นยำขึ้น

ความเสียดทานระหว่างล้อ กับพื้นที่มีค่าน้อยเกินไป สามารถแก้ไขได้โดยเปลี่ยนวัสดุที่ใช้ทำล้อให้มีสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสูงขึ้น หรือหุ้มล้อด้วยวัสดุดังกล่าว เพื่อลดโอกาสที่จะลื่นไถลให้น้อยที่สุด

รวมทั้งปรับแต่งค่าอัตราขยายของตัวควบคุมแต่ละล้อ เพื่อให้การตอบสนองในภาวะชั่วคราวของแต่ละล้อมีค่าใกล้เคียงกัน จะทำให้ในช่วงเริ่ม และ หยุดการเคลื่อนที่เกิดการผิดพลาดได้น้อยลง

6.3.2 การนำร่อง และ รับรู้สภาพแวดล้อม

การนำร่องยังคงเป็นปัญหาที่สำคัญของหุ่นยนต์ประเภทเคลื่อนที่ได้ (Mobile Robot) เพราะวิธีการที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถรับรู้ได้ว่าเส้นทางและสภาวะแวดล้อมเป็นอย่างไร จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดจำนวนมากลงบนหุ่น

ถ้าพิจารณาเฉพาะการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งให้ถูกต้อง เราอาจใช้การหาตำแหน่งโดยใช้เครื่องวัดความเร่ง (Accelerometer) ร่วมกับ Encoder หรือใช้อุปกรณ์เพื่อตำแหน่งจริงเทียบกับพื้นโลก เช่น ระบบหาดำแหน่งด้วยดาวเทียม (Global Positioning System, GPS) ระบบหาดำแหน่งในบริเวณใกล้เคียง (Local Positioning System, LPS) ซึ่งเป็นการควบคุมแบบป้อนกลับเมื่อเทียบกับสภาวะแวดล้อม

เนื่องจากการเคลื่อนที่จริงในสภาพแวดล้อมโดยทั่วไป นอกจากตัวหุ่นยนต์เองแล้ว ยังมีสิ่งกีดขวางอื่นๆอีก การนำร่องด้วยระบบที่ได้กล่าวมาแล้วอาจจะไม่เพียงพอ ซึ่งแก้ปัญหาได้ด้วยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัด (sensors) เพิ่ม เช่น กล้อง CCD, Pyroelectric sensors, Force sensors, Sonar range finder หรือแม้กระทั่งไมโครโฟน เมื่อมีอุปกรณ์ตรวจวัดมากขึ้นก็จำเป็นต้องหาวิธีจัดการกับข้อมูลเหล่านั้นต่อไป หรือที่เรียกกันว่า Sensors fusion ซึ่งยังเป็นหัวข้อให้ศึกษาได้ต่อไป

รายการอ้างอิง

- [1] คู่มือ/เทียบเบอร์ ไอซี TTL, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2521.
- [2] รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การควบคุมระบบพลศาสตร์, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [3] ดร.วิทยา วัชรวิทยากุล, ภาษาและการโปรแกรม C, ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2538
- [4] บริษัท อีทีที จำกัด, คู่มือ CPAT-32.
- [5] Patrick F. Muir, Modeling and Control of Wheeled Mobile Robots, Ph.D. Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1988.
- [6] John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, 2nd Edition, Addison-Wesley, 1989.
- [7] Mike Blackwell, The Uranus Mobile Robot, Technical Report No. CMU-RI-TR-91-06, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1990.
- [8] Gene F. Franklin, J. David Powell, Michael L. Workman, Digital Control of Dynamic Systems, 2nd Edition, Addison-Wesley, 1990.
- [9] Katsuhiko Ogata, Modern Control Engineering, 2nd Edition, Prentice-Hall International, Inc., 1990.
- [10] Ernest O. Doebelin, Measurement Systems, Application and Design, 4th Edition, McGraw-Hill, Inc., 1990.
- [11] Stephen L. Dickerson, Brett D. Lapin, Control of an Omni-Directional Robotic Vehicle with Mecanum Wheels, IEEE, 1991.
- [12] Joseph L. Jones, Anita M. Flynn, Mobile Robots, Inspiration to Implementation, : A K Peters, Wellesley, Massachusetts, 1993.
- [13] Subir Kumar Saha, Jorge Angeles, John Darcovich, The Kinematic Design of a 3-dof Isotropic Mobile Robot, IEEE, 1993.
- [14] Willard S. MacDonald, Design and Implementation of a Multilegged Walking Robot, Senior Honors Thesis, Laboratory for Perceptual Robotics, University of Massachusetts-Amherst, 1994.
- [15] J. Borenstein, H.R. Everett, L. Feng, Where am I ?, Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning, University of Michigan, 1996.
- [16] National Semiconductor, LM78xx Series Voltage Regulators Datasheet, 1999.
- [17] ST Microelectronics, L298 Dual Full-Bridge Driver Datasheet, 2000.
- [18] Atmel Corporation, 89C51 Datasheet, 2000.

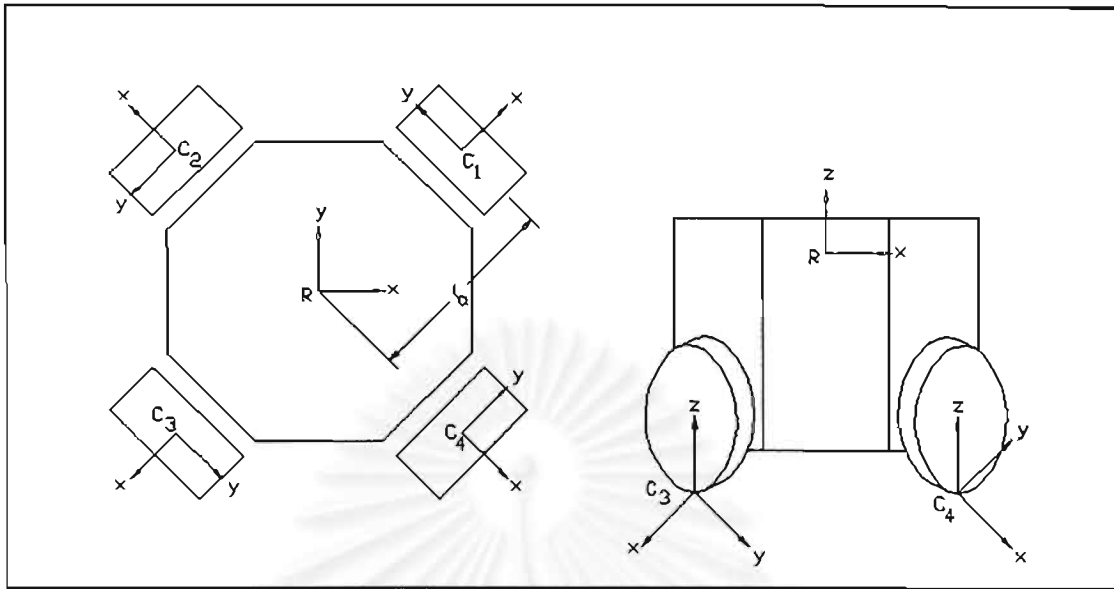


ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
Kinematics Modeling

ขั้นตอนการหาแบบจำลอง

1. วาดรูปคร่าวๆ ของหุ่น เพื่อบอกตำแหน่งของล้อ และกลไกการเคลื่อน
2. กำหนดระบบแกนอ้างอิง
3. หา Coordinate transformation matrices
4. หา Wheel Jacobian matrices
5. หา Wheel acceleration matrices
6. คำนวณ Actuated Inverse Velocity Solution
7. คำนวณ Sensed Forward Velocity Solution



Wheel Jacobian Matrices

รัศมีล้อ

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$$

รัศมีลูกกลิ้ง

$$r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r$$

มุมระหว่างเพลาลูกกลิ้งกับเพลาล้อ

$$\eta_1 = \eta_2 = \eta_3 = \eta_4 = 90^\circ$$

$${}^R\theta_{C1} = 45^\circ$$

$${}^R\theta_{C2} = 135^\circ$$

$${}^R\theta_{C3} = 225^\circ$$

$${}^R\theta_{C4} = 315^\circ$$

Jacobian matrix for Omni-Directional Wheels

$$\mathbf{J}_i = \begin{bmatrix} -R_i \sin^R\theta_{Ci} & r_i \sin({}^R\theta_{Ci} + \eta_i) & {}^R d_{Ciy} \\ R_i \cos^R\theta_{Ci} & -r_i \cos({}^R\theta_{Ci} + \eta_i) & -{}^R d_{Cix} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Equation of Motion

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}}$$

เมื่อ $\dot{\mathbf{p}}$: เวกเตอร์ความเร็วของหุ่นยนต์

$\dot{\mathbf{q}}$: เวกเตอร์ความเร็วของล้อ

ล้อยี่ 1

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} -\frac{R\sqrt{2}}{2} & \frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ \frac{R\sqrt{2}}{2} & \frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \omega_{W_{1x}} \\ P_1 \omega_{R_{1x}} \\ \bar{C}_1 \omega_{C_{1z}} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_1 \dot{\mathbf{q}}_1$$

ล้อยี่ 2

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} -\frac{R\sqrt{2}}{2} & -\frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{R\sqrt{2}}{2} & \frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 \omega_{W_{2x}} \\ P_2 \omega_{R_{2x}} \\ \bar{C}_2 \omega_{C_{2z}} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_2 \dot{\mathbf{q}}_2$$

ล้อยี่ 3

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \frac{R\sqrt{2}}{2} & -\frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{R\sqrt{2}}{2} & -\frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_3 \omega_{W_{3x}} \\ P_3 \omega_{R_{3x}} \\ \bar{C}_3 \omega_{C_{3z}} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_3 \dot{\mathbf{q}}_3$$

ล้อยี่ 4

$$\dot{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \frac{R\sqrt{2}}{2} & \frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ \frac{R\sqrt{2}}{2} & -\frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_4 \omega_{W_{4x}} \\ P_4 \omega_{R_{4x}} \\ \bar{C}_4 \omega_{C_{4z}} \end{bmatrix} = \mathbf{J}_4 \dot{\mathbf{q}}_4$$

จะได้ว่า

ล้อยี่ 1

$$\mathbf{J}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R\sqrt{2}}{2} & \frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ \frac{R\sqrt{2}}{2} & \frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{1s} = \begin{bmatrix} -\frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{R\sqrt{2}}{2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{1n} = \begin{bmatrix} \frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ \frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_1^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2R} & \frac{\sqrt{2}}{2R} & \frac{l_o}{R} \\ \frac{\sqrt{2}}{2r} & \frac{\sqrt{2}}{2r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ล้อยี่ 2

$$\mathbf{J}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R\sqrt{2}}{2} & -\frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{R\sqrt{2}}{2} & \frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{2s} = \begin{bmatrix} -\frac{R\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{R\sqrt{2}}{2} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{2n} = \begin{bmatrix} -\frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ \frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_o\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_2^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2R} & -\frac{\sqrt{2}}{2R} & \frac{l_a}{R} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2r} & \frac{\sqrt{2}}{2r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ล้อยี่ 3

$$\mathbf{J}_3 = \begin{bmatrix} \frac{R\sqrt{2}}{2} & -\frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_a\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{R\sqrt{2}}{2} & -\frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_a\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{3s} = \begin{bmatrix} \frac{R\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{R\sqrt{2}}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{J}_{3n} = \begin{bmatrix} -\frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_a\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{r\sqrt{2}}{2} & \frac{l_a\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_3^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2R} & -\frac{\sqrt{2}}{2R} & \frac{l_a}{R} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2r} & -\frac{\sqrt{2}}{2r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ล้อยี่ 4

$$\mathbf{J}_4 = \begin{bmatrix} \frac{R\sqrt{2}}{2} & \frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_a\sqrt{2}}{2} \\ \frac{R\sqrt{2}}{2} & -\frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_a\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{4,s} = \begin{bmatrix} \frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{R\sqrt{2}}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{J}_{4,n} = \begin{bmatrix} \frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_a\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{r\sqrt{2}}{2} & -\frac{l_a\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_4^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2R} & \frac{\sqrt{2}}{2R} & \frac{l_a}{R} \\ \frac{\sqrt{2}}{2r} & -\frac{\sqrt{2}}{2r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

จาก \mathbf{J}_1^{-1} , \mathbf{J}_2^{-1} , \mathbf{J}_3^{-1} และ \mathbf{J}_4^{-1}

Actuated Inverse Velocity Solution

$$\begin{bmatrix} \omega_{w_1,x} \\ \omega_{w_2,x} \\ \omega_{w_3,x} \\ \omega_{w_4,x} \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & l_a \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & l_a \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & l_a \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & l_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_{Bx} \\ \bar{v}_{By} \\ \bar{\omega}_{Bz} \end{bmatrix}$$

จาก $\Delta(\mathbf{U}) = \mathbf{U}(\mathbf{U}^T\mathbf{U})^{-1}\mathbf{U}^T - \mathbf{I}$

$$\Delta(\mathbf{J}_{1n})\mathbf{J}_{1s} = \begin{bmatrix} \frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{1+l_o^2}{1+l_o^2} \\ -\frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{-l_o R}{1+l_o^2} \end{bmatrix}$$

$$\Delta(\mathbf{J}_{2n})\mathbf{J}_{2s} = \begin{bmatrix} \frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{1+l_o^2}{1+l_o^2} \\ \frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{-l_o R}{1+l_o^2} \end{bmatrix}$$

$$\Delta(\mathbf{J}_{3n})\mathbf{J}_{3s} = \begin{bmatrix} -\frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{1+l_o^2}{1+l_o^2} \\ \frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{-l_o R}{1+l_o^2} \end{bmatrix}$$

$$\Delta(\mathbf{J}_{4n})\mathbf{J}_{4s} = \begin{bmatrix} -\frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{1+l_o^2}{1+l_o^2} \\ -\frac{R\sqrt{2}}{2} \\ \frac{-l_o R}{1+l_o^2} \end{bmatrix}$$

จาก

$$\dot{\mathbf{p}} = \left[\Delta(\mathbf{J}_{1n}) + \Delta(\mathbf{J}_{2n}) + \Delta(\mathbf{J}_{3n}) + \Delta(\mathbf{J}_{4n}) \right] \bullet \left[\Delta(\mathbf{J}_{1n})\mathbf{J}_{1s}\Delta(\mathbf{J}_{2n})\mathbf{J}_{2s}\Delta(\mathbf{J}_{3n})\mathbf{J}_{3s}\Delta(\mathbf{J}_{4n})\mathbf{J}_{4s} \right] \dot{\mathbf{q}}$$

Sensed Forward Velocity Solution

$$\begin{bmatrix} \bar{v}_{Bx} \\ \bar{v}_{By} \\ \bar{\omega}_{Bx} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & -\frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & \frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & \frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} \\ \frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & -\frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & -\frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} & \frac{\sqrt{2}}{(1+l_a^2)^2} \\ \frac{4l_a^3}{(1+l_a^2)^2} & \frac{4l_a^3}{(1+l_a^2)^2} & \frac{4l_a^3}{(1+l_a^2)^2} & \frac{4l_a^3}{(1+l_a^2)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{w1x} \\ \omega_{w2x} \\ \omega_{w3x} \\ \omega_{w4x} \end{bmatrix}$$



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายมงคล เทียนวิบูลย์ เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ.2519 ณ อ.เมือง จ.ลำปาง เข้ารับการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนไตรภพวิทยา เมื่อสำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่หก ได้เข้าศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย จ.ลำปาง หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาระดับปริญญาตรี ณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2539 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ในปีการศึกษา 2540

