

กรณีศึกษาหุ่นยนต์แมงมุมอย่างง่าย

Case study of simple spider robot



นายกิติโชค

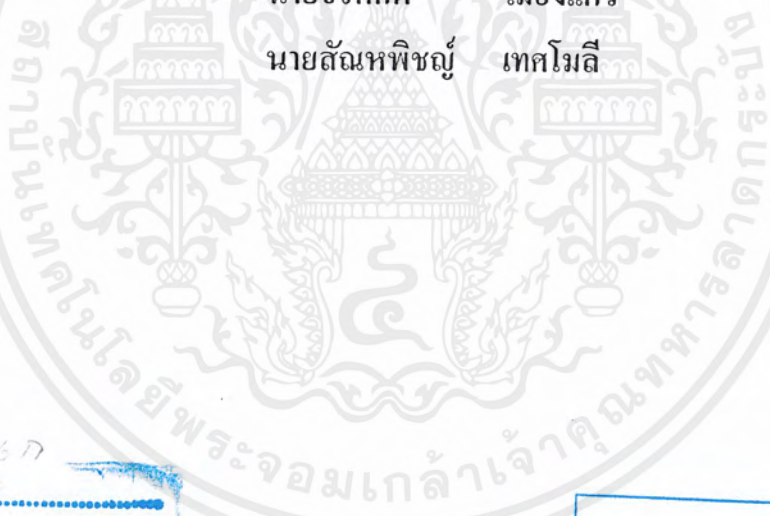
พรหมณีวัฒน์

นายจิรศักดิ์

เมืองแก้ว

นายสันหพิชญ์

เทศโมลี



เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....42525  
วัน, เดือน, ปี 24 พ.ค. 2545

b.....  
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20คป

# CASE STUDY OF SIMPLE SPIDER ROBOT



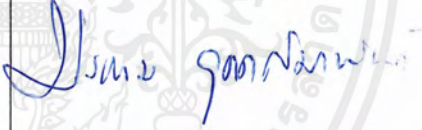
A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL INSTRUMENTATION TECHNOLOGY  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


2000

ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ กรณีศึกษาหุ่นยนต์แมงมุมอย่างง่าย  
CASE STUDY OF SIMPLE SPIDER ROBOT  
นักศึกษาผู้จัดทำ นายกิติโชค พรหมณีวัฒน์ รหัสประจำตัว 41012081  
นายจิรศักดิ์ เมืองแก้ว รหัสประจำตัว 41012084  
นายสันหพิชญ์ เทสโมลี รหัสประจำตัว 41012105  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
ปีการศึกษา 2543

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ประภาส อุคคกิมานันท์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2544  
สถานที่สอบ ณ ห้องสอบปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม

ภาควิชารับรองแล้ว  
  
(ผศ.ประสิทธิ์ จุลเสรีวงศ์)  
หัวหน้าภาควิชาฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์      กรณีศึกษาหุ่นยนต์แมงมุมอย่างง่าย  
CASE STUDY OF SIMPLE SPIDER ROBOT

นักศึกษาผู้จัดทำ      นายกิติโชค      พรหมณีวัฒน์  
                                 นายจิรศักดิ์      เมืองแก้ว  
                                 นายศันหพิชญ์      เทสโมลี

อาจารย์ที่ปรึกษา      ผศ.ประภาส      อุดคกิมพันธ์ุ

ปีการศึกษา              2543

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้นำเสนอแนวทางการออกแบบหุ่นยนต์แบบ 8 ขา ที่สามารถลดการกระเพื่อมของลำตัวหุ่นยนต์ขณะเดิน ซึ่งเกิดขึ้นกับกลไกหุ่นยนต์แมงมุมแบบคานเชื่อมต่อแข็ง หุ่นยนต์ที่ออกแบบนี้ ประกอบด้วยการออกแบบกลไกแบบ 4 คานเชื่อมต่อ และออกแบบชุดควบคุมความเร็วของตัวต้นกำลังแบบกลไกส้อมพันธ์ การสังเคราะห์หุ่นยนต์ 8 ขา ด้วยการกลไกที่สามารถสร้างได้ง่าย และมีงานวนขึ้นส่วนกลไกน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** Case Study of Simple Spider Robot  
**Authers** Mr.Kitichoke Prommaneeawat  
Mr. Jirasak Muangkeaw  
Mr. Sunhapitch Thedmolee  
**Thesis Advisor** Asst.Prof. Prapart Ukakimaparn  
**Year** 2000

### ABSTRACT

This thesis proposes the design of 8-legged robot which can reduce the ripple of the robot body while walking. Ripple always happens in mechanic of single – rigid bar spider robot. The four - bar linkage mechanic and the mechanical relation for velocity controller design are used in this study in order to synthesize the 8- legged spider robot which can be built up easily with the least mechanical equipment.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความเมตตาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์  
ประภาส อุกคฤมาพันธุ์ ที่ได้ให้คำแนะนำและกำลังใจที่ดีแก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังเอื้อเพื่อ  
อุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำปริญญาบัตรนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบ  
ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม  
ทุกท่าน ที่ได้แวะเวียนมาให้คำแนะนำและกำลังใจต่อการทำปริญญาบัตรฉบับนี้

ขอขอบคุณเพื่อนนักศึกษาวิชาภาควิชาเทคโนโลยีการวัดคุมทางอุตสาหกรรม ที่ได้ช่วย  
เหลือทั้งด้านเครื่องมืออุปกรณ์ ด้านความแนวคิด และมิตรภาพที่ดีให้แก่กัน

และที่ลืมเสียมิได้คือ ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ และญาติพี่น้องอันเป็นที่รักยิ่ง  
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญาบัตรฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบอบแต่ผู้มีพระคุณ  
ทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	I
1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีประกอบ.....	2
2.1 กล่าวนำ.....	2
2.1.1 การเคลื่อนที่แบบไขว้ขา.....	2
2.2 มอเตอร์ Motor.....	4
2.3 หลักการทำงานของคีมอเตอร์.....	4
2.4 ขนาดของคีมอเตอร์.....	6
2.5 แรงบิด ความเร็ว กำลัง และพลังงาน.....	6
2.6 โมเดล มอเตอร์.....	7
2.7 เฟือง.....	10
2.8 เกียร์ชุด.....	11
2.9 Four bar Linkage.....	12
2.9.1 วิธีการคำนวณ Four bar Linkage.....	13
2.10 ระบบคอนโทรลมอเตอร์.....	13
2.10.1 พื้นฐานของระบบคอนโทรลคีมอเตอร์.....	14
2.11 ลักษณะการคอนโทรลของระบบคีมอเตอร์.....	15
2.11.1 ระบบอนาล็อกคอนโทรล.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

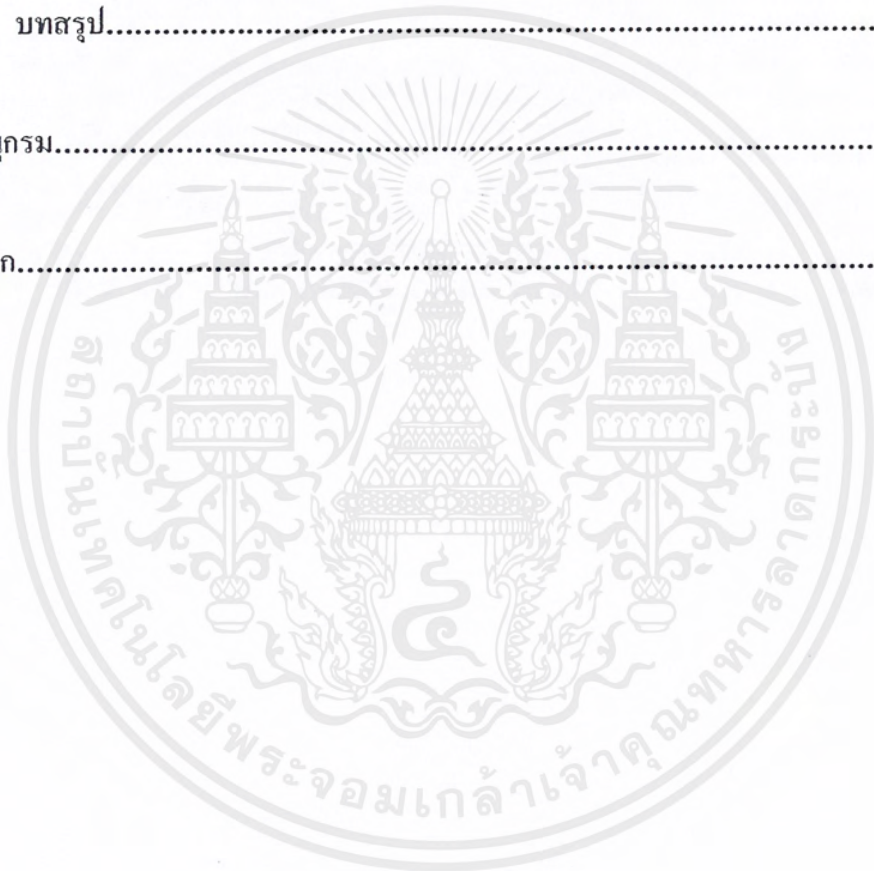
# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11.2 ระบบคิจิคอลคอนโทรล.....	15
2.12 วิธีในการวัดความเร็วรอบของดีซีมอเตอร์.....	16
2.13 การจำลองสมการความเร็วรอบของดีซีมอเตอร์ด้วยออปแอมป์.....	16
2.14 คุณสมบัติของตัวคอนโทรลเลอร์.....	17
2.14.1 ปร็อพออร์ชันแนลคอนโทรล.....	17
2.14.2 อินติกรัลคอนโทรล.....	18
2.14.3 ปร็อพออร์ชันนัล-อินติกรัลคอนโทรล.....	19
2.14.4 คิริเวทีฟคอนโทรล.....	20
2.15 แอมพลิไฟเออร์.....	21
2.16 การออกแบบภาคเอาต์พุต.....	22
<b>บทที่ 3 การออกแบบหุ่นยนต์ 8 ขา.....</b>	<b>25</b>
3.1 กล่าวนำ.....	25
3.2 การออกแบบกลไกขา.....	25
3.3 รูปแบบการเดิน.....	26
3.4 ออกแบบชุดกลไกขา.....	27
3.5 สั้งเคราะห์ชุดกลไก.....	29
3.6 การออกแบบชุดควบคุม.....	30
3.7 ไดรฟ์เวอร์.....	35
3.8 บทสรุป.....	39
<b>บทที่ 4 การออกแบบหุ่นยนต์ 8 ขา แบบ Four-Bar Linkage.....</b>	<b>40</b>
4.1 กล่าวนำ.....	40
4.2 การออกแบบขา 4 คานเชื่อมต่อ.....	40
4.3 การออกแบบก้านขา.....	41
4.4 ออกแบบชุดกลไกขา.....	43
4.5 การออกแบบลำตัวหุ่น.....	44
4.6 วิธีการกระเพื่อมในช่วงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.6.1 สักระยะที่ชุดกลไกแบบปรับมุมขา.....	46
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	48
บทที่ 6 บทสรุป.....	50
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก.....	52



# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบล้อและขา.....2
2.2	DC มอเตอร์เกียร์.....4
2.3	กฎของลอเรนทซ์ (Lorentz force Law).....4
2.4	กฎมือขวา.....5
2.5	โครงสร้างมอเตอร์.....6
2.6	อาร์เมเจอร์ (armature).....6
2.7	เปลี่ยนจากกำลังไฟฟ้า เป็นกำลังทางกล.....7
2.8	กราฟ ความเร็ว-แรงบิด.....9
2.9	การหมุนของล้อเสียดทาน.....10
2.10	ฟันเฟืองถูกเพิ่มเข้าไปบนล้อเสียดทาน.....11
2.11	อัตราทดเฟือง.....11
2.12	Four Bar Linkage.....12
2.13	ระบบการคอนโทรลคิซิมอเตอร์แบบพื้นฐาน.....14
2.14	บล็อกไดอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วที่มีทาโคมิเตอร์เป็นตัวป้อนกลับ.....15
2.15	ระบบคิซิคอนโทรล.....16
2.16	วงจรสำหรับวัดความเร็วรอบของคิซิมอเตอร์.....16
2.17	ตัวคอนโทรลเลอร์แบบปรือปพอร์ชันแนล.....17
2.18	การคอนโทรลแบบปรือปพอร์ชันแนล.....17
2.19	การคอนโทรลแบบอินติกรัล.....18
2.20	ปรือปพอร์ชันแนล-อินติกรัลคอนโทรล.....19
2.21	ตัวคอนโทรลเลอร์แบบดิริเวทิฟคอนโทรล.....20
2.22	เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์แบบทรานซิสเตอร์.....21
2.23	การออกแบบภาคเอาต์พุตแบบมีส่วนประกอบเต็มส่วนบริบูรณ์.....22
2.24	การออกแบบภาคเอาต์พุตแบบมีส่วนประกอบเต็มเพียงกึ่งเดียว.....23
2.25	ระบบของมอเตอร์และแอมพลิไฟเออร์ที่มีการป้อนกลับกระแสและ โวลต์ที่เต็ม.....23
2.26	ระบบคอนโทรลแรงบิด.....24
2.27	บล็อกไดอะแกรมของลูปลอนโทรลทอร์ก.....24
2.28	กลไกขา.....25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.1 จุดหมุนตามแนวแกน.....	26
3.2 รูปแบบการเดินของขา.....	26
3.3 การก้าวเดินของหุ่น.....	27
3.4 การวางชุดเฟือง.....	28
3.5 แสดงถึงการหาค่ามุมของขา.....	28
3.6 การประกอบชุดกลไก.....	29
3.7 แบบการวางชุดกลไก.....	29
3.8 วงจรสมมูลของ DC Motor.....	30
3.9 กราฟความสัมพันธ์จำนวนรอบกับแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์.....	30
3.10 Block diagram ของสมการ $K=V/n$ .....	31
3.11 ชุดจับความเร็ว.....	31
3.12 ตารางการทดลองความสัมพันธ์จำนวนรอบ กับ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน.....	31
3.13 แสดงการหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์.....	32, 33
3.14 Block diagram ของวงจรควบคุม Motor.....	33
3.15 ตัวคอนโทรลเลอร์ ไดรเวอร์ มอเตอร์ และชุด Encoder.....	34
3.16 มอเตอร์เกียร์.....	34
3.17 ตัววัดค่าความเร็ว.....	35
3.18 Drivesคอนโทรลเลอร์.....	35
3.19 วงจร PI Controller.....	36
3.20 วงจร โดยรวมของของวงจรไครฟ์เวอร์.....	36
3.21 วงจรจับมอเตอร์ ช้ายและขวา.....	37
3.22 วงจร โดยรวมทั้งหมด.....	37
3.23 หุ่นยนต์แมงมุมชนิดคานเชื่อมต่อเชิงพร้อมทั้ง Joy Stickที่เป็นตัวป้อน Sp ,Bias.....	38
3.24 วงจรควบคุมหุ่นยนต์แมงมุม 8 ขา.....	38
4.1 การปรับมุมขา.....	40
4.2 Four Bar Linkage.....	41
4.3 ก้านขาที่ได้รับการออกแบบ.....	41
4.4 มุมของขาเมื่อมีการเคลื่อนที่.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.5	Simmlate ของ Four Bar.....42
4.6	ชุดกลไกขา.....43
4.7	การวางชุดเฟือง.....43
4.8	ถังเคราะห์ชุดขาหุ่นยนต์.....43
4.9	มุมของช่วงการยกขา.....44
4.10	การออกแบบลำตัวหุ่น.....44
4.11	หุ่นยนต์ที่ทำการสังเคราะห์ลำตัวหุ่นเสร็จแล้ว.....45
4.12	การปรับมุมขา.....45
4.13	ชุดกลไกปรับมุมขา.....46
4.14	วงจรปรับมุมขา.....46
4.15	ชุดกลไกปรับมุมขา.....47
5.1	หุ่นยนต์แมงมุม 8 ขาที่นำมาทดสอบวัดค่าต่างๆ.....49

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 การทดสอบเปรียบเทียบช่วงความสูงในยกขาก้าวเดิน.....	48
5.2 การทดลองปรับค่ามุม $\theta_1$ ของคานที่ 1 เพื่อพิจารณาความสูงของลำตัว.....	48
5.3 การทดลองการเดินปรับค่ามุม $\theta_1$ ของขาซ้ายและขวาให้ต่างกัน.....	49
5.4 การทดลองความสามารถในการเดิน ของหุ่นยนต์ 8 ขา.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและแรงจูงใจของงานวิจัย

ที่มาของหุ่นยนต์แมงมุม 8 ขา แบบคานเชื่อมต่อแข็งนี้ ได้ข้อมูลบางส่วนจากเว็บไซต์กับข้อมูลจากคำราทีเกี่ยวกับหุ่นยนต์เป็นแนวทางในการสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบชนิดนี้ ตามแนวคิดของกลุ่มผู้ทำโครงการ

ผลจากการศึกษาหุ่นยนต์แมงมุม 8 ขา แบบคานเชื่อมต่อแข็ง พบว่าการเดินของหุ่นยนต์ชนิดนี้ มีปัญหาในการเดินที่กระเพื่อมทำให้เดินไม่ตรงเส้นทางที่กำหนดไว้ ปัญหาดังกล่าวนำมาเป็นกรณีศึกษา แนวทางในการออกแบบหุ่นยนต์ 8 ขา เพื่อแก้ปัญหาการเดินที่เกิดขึ้นในหุ่นยนต์ 8 ขา แบบคานเชื่อมต่อแข็ง ให้ได้หุ่นยนต์ 8 ขาที่มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า

### 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์

ปริญญาานิพนธ์นี้จะเน้นศึกษากลไกการเดิน และการควบคุมกลไกการเดินของหุ่นยนต์แบบมีขา โดยใช้ “สไปเดอร์ โรบอท” เป็นกรณีศึกษา

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาจังหวะการก้าวขาอย่างง่ายของหุ่นยนต์ “สไปเดอร์ โรบอท”
2. ศึกษาและออกแบบกลไกให้สอดคล้องกับจังหวะการก้าวของ “สไปเดอร์ โรบอท”
3. สังเคราะห์กลไกตามกรณีศึกษาข้อ 2. หุ่นยนต์ “สไปเดอร์ โรบอท” และทดสอบการเดิน
4. ศึกษารูปแบบการเดิน โดยอาศัยขีดความสามารถทางกลไก
5. ออกแบบระบบควบคุมกลไกการเดิน
6. ออกแบบรูปแบบการเดิน โดยอาศัยคำสั่งจากผู้ควบคุม สังเคราะห์รูปแบบการเดิน โดยอาศัยคำสั่งและทดสอบรูปแบบการเดิน โดยคำสั่งจากผู้ควบคุม

### 1.4 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาโครงการเริ่มจากการศึกษาจังหวะการก้าวขาอย่างง่ายของหุ่นยนต์ “สไปเดอร์ โรบอท” ถึงการสร้างจังหวะการก้าว แล้วมาออกแบบและสังเคราะห์กลไกการเดิน นำไปทดสอบการเดิน เพื่อศึกษาผลจากการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดนี้ ขึ้นต่อไปออกแบบชุดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกหุ่นยนต์ สังเคราะห์และการทดสอบการควบคุมการเดินของหุ่นยนต์แบบมีขา 8 ขา ที่ได้พัฒนาแก้ไขการเดินที่กระเพื่อมของลำตัวหุ่นยนต์ สรุปผลแนวทางการออกแบบหุ่นยนต์ 8 ขา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

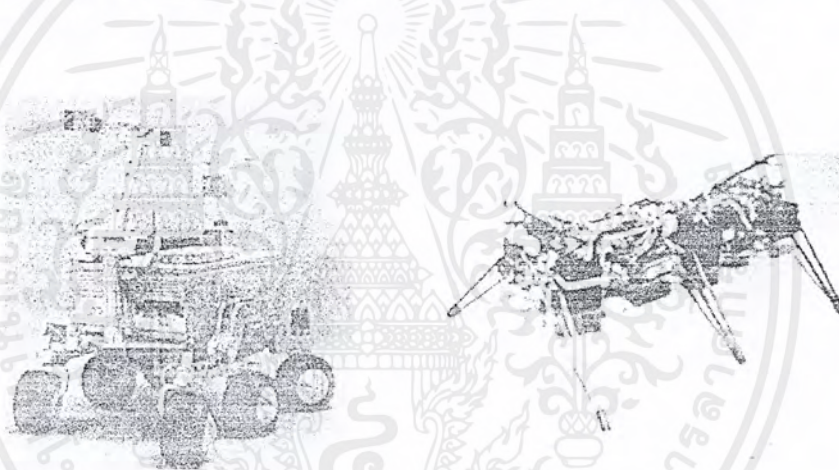
## บทที่ 2

# ทฤษฎีประกอบ

### 2.1 กล่าวนำ

หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่อยู่ 3 ระบบคือ ใช้ล้อรางและขา การใช้ล้อนิยมใช้กันมาก หุ่นยนต์ที่ใช้ล้อมีลักษณะทางกลที่ธรรมดาและง่าย ในการสร้างส่วนระบบขาและราง เป็นระบบที่ซับซ้อนและแข็งแรงมากกว่า แบบล้อที่น้ำหนักตัวเท่ากันอุปกรณ์แบบล้อหาได้ง่ายเช่นของเล่นเด็ก สามารถคิดแปลงเป็นตัวหุ่นยนต์ได้ ข้อเสียของล้อก็คือ เมื่ออยู่บนพื้นผิวไม่เรียบจะปฏิบัติงาน ได้ยาก และการปีนข้ามในสิ่งกีดขวางที่สูงกว่ารัศมีของล้อจะเป็นไปได้ยาก

หุ่นยนต์เดินด้วยขา จะไม่มีปัญหากับผิวหยาบ หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีสมรรถภาพสูงกว่าแบบล้อมาก



ภาพที่ 2.1 หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบขาและล้อ

#### 2.1.1 การเคลื่อนที่แบบใช้ขา

การเคลื่อนที่แบบใช้ขาส่วนใหญ่โครงสร้างจะเลียนแบบขาของแมลง และลักษณะการเดินจะเลียนแบบแมลงเช่นกัน โดยทางกลจะพิจารณาที่จังหวะการทำงานของกลไกขาหุ่นยนต์กับรูปแบบของขาหุ่นที่ใช้งาน ลักษณะการเดินของขาเป็นการเคลื่อนที่แบบจุดสัมผัสพื้น ณ ตำแหน่งปลายขา แต่การเคลื่อนที่แบบล้อเป็นการเคลื่อนโดยใช้เส้นรอบวงของล้อ ถ้าขยับออกไปบนแนวพื้นให้เกิดระยะทาง

## 2.2 มอเตอร์ (Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้า เป็นพลังงานกล มอเตอร์มีทุกขนาด และหลายประเภท มอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง (DC MOTOR) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC MOTOR) แต่เราจะเน้นที่มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ดีซี เหมาะที่จะใช้กับงานขนาดเล็ก และมีหลายขนาด และมีหลายแบบ สำหรับหุ่นยนต์แบบมีขาต้องการมอเตอร์ดีซี ที่มีแรงบิด (Torque) สูง ในการเปลี่ยนคุณสมบัติ จะต้องมีชุดเกียร์ มาลดทอนความเร็วรอบลงและเพิ่มแรงบิดขึ้น การต่อมอเตอร์กับชุดเกียร์ทด ชุดเกียร์ จะประกอบเข้ากับมอเตอร์ เรียกว่ามอเตอร์เกียร์ (DC gearhead motors) มอเตอร์เกียร์ทำจากแกนแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์นำหน้ามา



ภาพที่ 2.2 DC มอเตอร์เกียร์

ดีซีมอเตอร์จะมี 2 ขั้ว ไข้วต่อแรงดันไฟฟ้าเข้าจะทำให้มอเตอร์หมุนไปทิศทางใดทางหนึ่ง กลับขั้วมอเตอร์ก็จะหมุนกลับทาง แรงดันไฟฟ้าจะบ่งบอกถึงความเร็วของมอเตอร์

## 2.3 หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์

แรงแม่เหล็กไฟฟ้าในดีซีมอเตอร์ เกิดขึ้นเมื่อผ่านกระแสของตัวนำในสนามแม่เหล็ก

ดังภาพที่ 2.3

ภาพที่ 2.3 กฎของลอเรนทซ์ (Lorentz force Law)

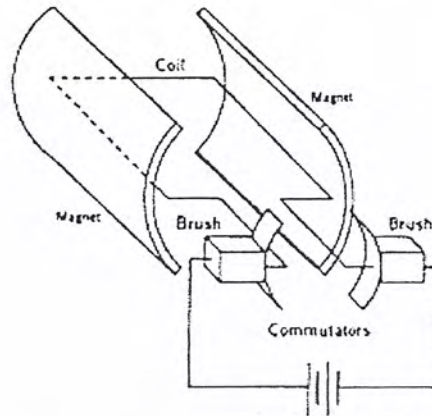
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กสามารถทำขึ้นได้จากแม่เหล็กถาวร เส้นแรงแม่เหล็กจะวิ่งจากขั้วเหนือไปขั้วใต้ จากกฎของลอเรนซ์ (Lorentz force Law) เมื่อผ่านกระแสไฟฟ้า แรง(F) โดยที่  $I$  แทนทิศทางของกระแส ทิศทางของ  $F$  อธิบายได้ตามกฎ มือขวา โดยที่นิ้วจะงอเข้ามาแทนทิศทางของกระแส ทิศทางมือทิสของสนามแม่เหล็ก และนิ้วโป้ง แทนแรงที่เกิดขึ้น ตามภาพที่ 2.3 แรงหมุนในวงรอบตามภาพที่ 2.4 (a) แสดงถึงลวดตัวนำในแกนหมุน และอยู่ในสนามแม่เหล็กถาวร ภาพที่ 2.4 (b) อธิบายผลการเกิดแรง เพราะแรงเกิดในทิศทางทำมุมฉากกับทิศกระแส และทิศสนามแม่เหล็กเป็นไปตามกฎมือขวา



ภาพที่ 2.4 กฎมือขวา

วงรอบ (loop) จะหมุนจนกระทั่ง แรงไม่กระทำ จุดนี้จะอยู่ตรงกลาง จะมีผลให้แรงบิดเป็นศูนย์ แรงที่ทำให้หมุนอย่างต่อเนื่อง คือ การทำกระแสตรงเป็นกระแสสลับ โดยการใช้คอมมิวเตชัน นั่นก็คือใช้แปรงถ่านเป็นตัวหน้าสัมผัส ต่อกับขดลวด ดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 โครงสร้างมอเตอร์

ชุดเกียร์ดังภาพที่ 2.6 จะเป็นตัวเพิ่มแรงบิดให้กับมอเตอร์ วงรอบขดลวดจะพันรอบแกนเหล็ก อาร์เมเจอร์ (armature) แม่เหล็กถาวร มี 2 ส่วนแบ่งครึ่งกันตามแนวทรงกระบอก ยึดติดกับ โครงเหล็ก แกนอาร์เมเจอร์ก็จะอยู่ตรงกลาง ระหว่างแม่เหล็ก โดยให้มีช่องว่างเหลือน้อยที่สุด เมื่อให้กระแสผ่านขดลวด อาร์เมเจอร์ ก็จะเกิดแรงผลักขึ้นเป็นผลให้อาร์เมเจอร์ หมุน



ภาพที่ 2.6 อาร์เมเจอร์ (armature)

## 2.4 ขนาดของดีซีมอเตอร์

การเลือกมอเตอร์ให้เหมาะสมกับหุ่นยนต์ของคุณจะต้องรู้ภาระของหุ่นยนต์ ที่มอเตอร์นั้นจะสามารถขับโหลดได้

## 2.5 แรงบิด ความเร็ว กำลัง และพลังงาน

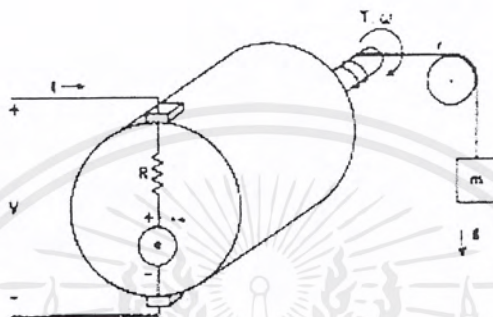
แรงบิดคือ แรงเชิงมุม ที่มอเตอร์นั้นหมุนเป็นระยะทางเท่าไร ตัวอย่าง แรงบิด 5 oz-in หมายถึง ระยะทาง 1 นิ้ว ที่แกนมอเตอร์เคลื่อนที่ มอเตอร์มีแรงเท่ากันดึงน้ำหนักขึ้นมา 5 ออนซ์ คู

ภาพที่ 2.7 ในหน่วยเมตร ก็คือ แรงบิดของมอเตอร์ใช้นิวตัน-เมตร (N-m) เราจะเปลี่ยนหน่วยได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1\text{N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{sec}^2 = 0.225 \text{ lb}$$

$$1 \text{ kg} = 2.21 \text{ lb} \quad \text{และ} \quad 1 \text{ inc} = 2.54 \text{ cm}$$

เมื่อเราจะเปลี่ยนจากกำลังไฟฟ้า เป็นกำลังทางกลจะได้



ภาพที่ 2.7 เปลี่ยนจากกำลังไฟฟ้า เป็นกำลังทางกล

ภาพที่ 2.7 อธิบายถึง การเปลี่ยนจากไฟฟ้า เป็นกำลังกล ของดีซีมอเตอร์ โดย  $P_e$  คือกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์  $V$  คือ แรงดันไฟฟ้า  $I$  คือ กระแสที่ไหลเข้ามอเตอร์  $P_m$  คือกำลังทางกล เท่ากับแรงบิดที่ปลายเพลา ( $T$ ) คูณด้วยความเร็วเชิงมุม ( $\omega$ )

$$P_m = T \times \omega$$

$$2\pi \text{ rad/sec} = 1 \text{ rev/sec}$$

$$1 \text{ Watt} = 1 \text{ Nm/sec}$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} \quad \text{และ} \quad 1 \text{ J} = 1 \text{ CV}$$

## 2.6 โหมดล มอเตอร์

ความสัมพันธ์ ของการเปลี่ยนกำลังไฟฟ้า เป็นกำลังทางกล ของ ดีซีมอเตอร์แม่เหล็กถาวร จะเขียนเป็น วงจรไฟฟ้าได้ตามภาพที่ 2.7 กำลังเอาต์พุตทางกล(การสูญเสียจากแรงเสียดทาน แรงลม ความดันความร้อนในขดลวด) จะเป็นสัดส่วนกับกำลังอินพุตทางไฟฟ้า  $\eta$  คือเปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพ

$$P_m = \eta \times P_e$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขดลวดโรเตอร์ ภาพที่ 2.4 อธิบายตัวเหนี่ยวนำ และความต้านทาน R เมื่อโรเตอร์หมุนในส่วนคอมมิวเตเตอร์ จะสัมผัสผ่านแปรงถ่าน ทำให้มีการสลับกระแส ในขดลวดอาร์เมเจอร์ กระแสที่เปลี่ยนไป  $di/dt$  จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำใน inductor มีแรงดันตกคร่อมที่ตัวเหนี่ยวนำ

$$V = L \frac{di}{dt}$$

เมื่อ L เป็นค่าคุณสมบัติคงที่เรียกว่าค่าเหนี่ยวนำ เมื่อมอเตอร์หมุน จะเกิดการเหนี่ยวนำแรงดัน e เรียกว่า แรงดันย้อนกลับ (back-emf) และความต้านทานที่ขดลวด R

$$V = I \times R + e$$

ขณะมอเตอร์ยังไม่หมุน  $e = 0$  V และกระแสจะเท่ากับแรงดันที่จ่ายตกคร่อม R กระแสช่วงนี้เราเรียกว่า กระแส เริ่มต้น (Starting Current)  $I_s$

$$I_s = \frac{V}{R}$$

เมื่อโรเตอร์ทำการหมุนแล้ว ค่า e จะเพิ่มขึ้นตามความเร็ว ของอาร์เมเจอร์

$$e = K_e \omega$$

เมื่อ  $K_e$  เรียกว่า ค่าคงที่ของ back-emf

$$\therefore V = IR + K_e \omega$$

หากให้โหลดและเพิ่มแรงดันไฟฟ้าป้อน แรงบิดของมอเตอร์จะเพิ่มตามเส้นแรงแม่เหล็กที่ตัวเหนี่ยวนำ และเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกควบคุมด้วยกระแส ดังนั้นแรงบิดก็จะเพิ่มขึ้นตามกระแสด้วยค่าคงที่ของคุณสมบัติ

$$T = K_t I$$

แทนค่า I จะได้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V = \left(\frac{TR}{K_t}\right) + K_e \omega$$

แต่  $K_t = K_e$  เราจะได้จากกำลังเอาท์พุททางกลที่เพลา จะแปลงเป็นกำลังอินพุททางไฟฟ้าลบด้วยค่าสูญเสียเนื่องจากความร้อนในความต้านทาน  $I_2 \times R$

$$P_m = P_e - I_2 R$$

$$T\omega = VI - I_2 R$$

แทนค่า T และ V ลงในสมการ

$$K_t I \omega = (IR + K_e \omega)I - I_2 R$$

ให้

$$K_t = K_e = K$$

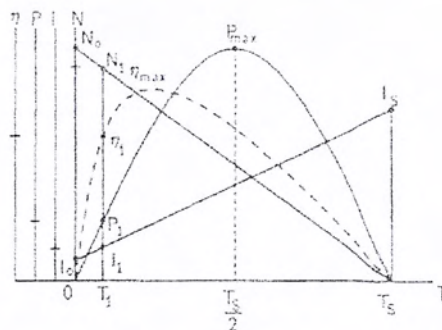
จะได้

$$V = \left(\frac{TR}{K}\right) + K\omega$$

ความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็ว เป็นแบบเชิงเส้น (linear) ด้วยความชันแบบลบ

$$\omega = -\left(\frac{R}{K_2}\right)T + \frac{V}{K}$$

ความสัมพันธ์ที่ได้เราก็นำมาพล็อตกราฟระหว่างแรงบิดและความเร็ว

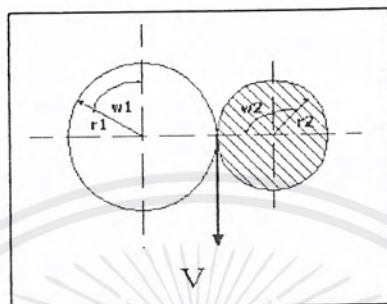


ภาพที่ 2.8 กราฟ ความเร็ว-แรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 เฟือง

การส่งถ่ายกำลังจากเพลานึง ไปยังอีกเพลานึง โดยที่กำลังที่จะส่งนั้นไม่มากเกินไป และมีความเร็วไม่สูงมากนัก อาจใช้ลูกกลิ้งเสียดทาน (Friction drive) จำนวน 2 ลูกได้ (ตามภาพที่ 2.9) เมื่อไม่มีการลื่นเกิดขึ้น ความเร็วสัมผัส  $v$  (tangential velocity) ที่จุดสัมผัสของลูกกลิ้งเสียดทาน ทั้งสองย่อมเท่ากัน



ภาพที่ 2.9 การหมุนของลูกกลิ้งเสียดทาน

จากวิชาฟิสิกส์เราทราบว่า  $V = \omega r$  เมื่อ  $\omega$  เป็นความเร็วเชิงมุมและ  $r$  เป็นรัศมีของการหมุน และเนื่องจาก  $V = \omega_1 r_1$  และ  $V = \omega_2 r_2$  จะได้ว่า

$$\omega_1 r_1 = \omega_2 r_2$$

นั่นคือ

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

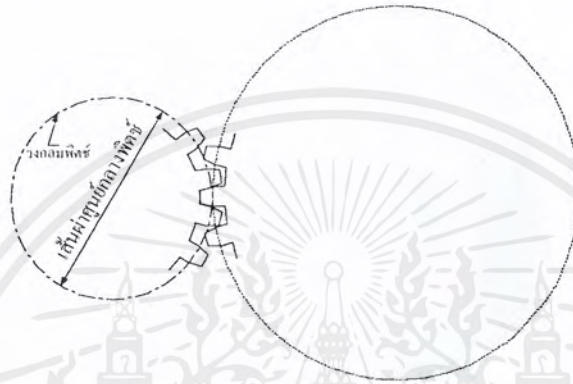
เมื่อ  $\omega_1/\omega_2 =$  อัตราทดความเร็วเชิงมุม  $m\omega$  ถ้าหาร  $\omega$  ด้วย 2 และคูณด้วย 60 จะได้ ความเร็วรอบต่อนาที ดังนั้น

$$m \times \omega = \frac{rpm_1}{rpm_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{d_2}{d_1}$$

ข้อเสียของลูกกลิ้งเสียดทานก็คือ อาจเกิดการลื่นระหว่างล้อทั้งสองได้ เมื่อถ่ายทอคกำลังมาก ดังนั้นจึงนิยมใช้เฉพาะในงานที่มีโมเมนต์บิดน้อยๆ เช่น เครื่องเล่นจานเสียง เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

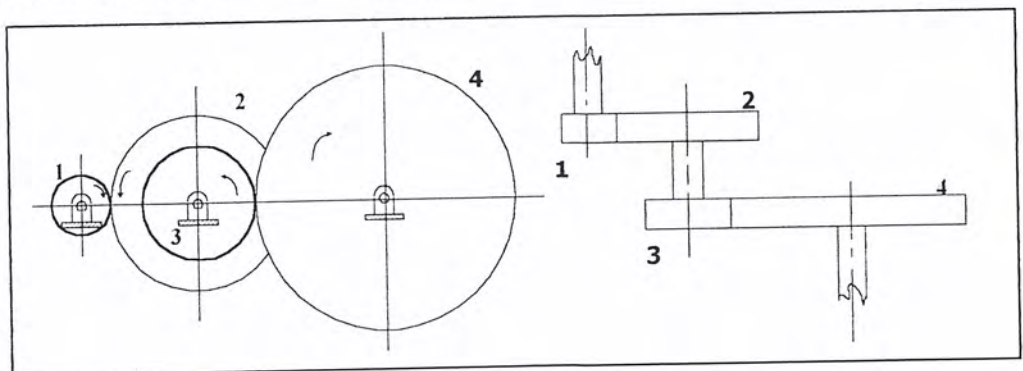
การป้องกันมิให้มีการลื่น ในการส่งถ่ายกำลังมาก ๆ จำเป็นต้องใช้ฟันขบกัน(ตามภาพที่ 2.10) ล้อกลมหที่มีฟันเราเรียกว่าเฟือง (Gear) เฟืองขนาดเล็กเรียกว่า ฟัน-เนียน (Pinion) และมักจะ เป็นเฟืองขับ เป็นส่วนมาก เส้นผ่าศูนย์กลางของล้อเสียดทานเดิมเรียกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางพิตช์ (Pitch Diameter) ส่วนโค้งของฟันจะต้องมีลักษณะพิเศษที่จะไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง  $m\omega$  ในขณะที่ฟันเฟืองทั้งสองขบกัน ผิวโค้งดังกล่าวเราเรียกว่า ส่วนโค้งคอนจูเกต (Conjugate curves) ซึ่งเป็น กฎในการคำนวณออกแบบฟันเฟือง



ภาพที่ 2.10 ฟันเฟืองถูกเพิ่มเข้าไปบนล้อเสียดทาน

## 2.8 เกียร์ชุด

การนำเกียร์หลาย ๆ อันมารวมกันเรียกว่าเกียร์ชุด อัตราส่วน input ความเร็วเชิงมุมกับ output ความเร็วเชิงมุมคืออัตราส่วนความเร็วเชิงมุมและสัญลักษณ์เป็น  $\frac{\omega_{in}}{\omega_{out}}$  ในภาพที่ 2.11 แสดง pinion ขับ spur gear ภายนอกและ pinion ขับ spur gear ภายในทั้ง 2 กรณี อัตราส่วนความเร็วเชิงมุม เป็นส่วนกลับกัน ที่จำนวนซี่เฟืองที่แสดงให้เห็น เกียร์ภายนอกหมุนทิศทางตรงกันข้าม และเกียร์ หมุนภายในหมุนในทิศทางเดียวกันเป็น pinion ของมัน แสดงโดยเครื่องหมายเป็นลบบนอัตรา ความเร็วในกรณีแรก โดยรวมเครื่องหมายในกรณีที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} = \frac{\omega_{driver}}{\omega_{driven}}$$

$$\frac{\omega_{in}}{\omega_{out}} = \frac{\omega_1}{\omega_4} = \frac{(N_2 \times N_4)}{(N_1 \times N_3)}$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\left(\frac{N_2}{N_1}\right) \text{ และ } \frac{\omega_3}{\omega_4} = \frac{N_4}{N_3}$$

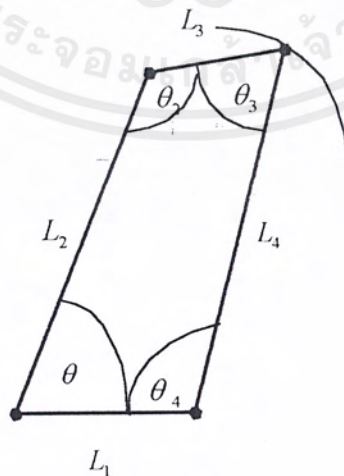
$$\frac{\omega_1}{\omega_2} \times \frac{\omega_3}{\omega_4} = \frac{N_2}{N_1} \times \frac{N_4}{N_3}$$

แต่  $\omega_2 = \omega_3$

$$\frac{\omega_1}{\omega_4} = \frac{N_2}{N_1} \times \frac{N_4}{N_3}$$

## 2.9 Four bar Linkage

เป็น Link 4 ตัว ที่ต่อกันจาก link 1 ไปถึง link 4 โดยจะมี link ตัวหนึ่งอยู่กับที่และอีกตัวหนึ่งเป็นตัวขับเคลื่อนหรือแกว่งไปมาและ link ตัวที่ 3 และ ตัวที่ 4 จะเป็นตัวแสดงผลด้วยการหมุนหรือแกว่งตามอินพุตที่ link 2



ภาพที่ 2.12 Four Bar Linkage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.1 วิธีการคำนวณ 4 คานเชื่อมต่อกัน (Four bar Linkage)

สมการหาค่า การถ่ายโอนมุมภายใน

$$z^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_2$$

ให้

$$r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_2 = r_3^2 + r_4^2 - 2r_3r_4 \cos \gamma$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left[ \frac{r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 - r_4^2 - 2r_1r_2 \cos \theta_2}{-2r_3r_4} \right]$$

หรือ

$$\gamma = \cos^{-1} \left( \frac{z^2 + r_3^2 - r_4^2}{-2zr_4} \right)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{z^2 + r_4^2 - r_3^2}{2zr_4} \right)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left( \frac{z^2 + r_1^2 - r_2^2}{2zr_1} \right)$$

$$\theta_4 = 180^\circ - (\alpha + \beta)$$

ผลจากการเปลี่ยนแปลงมุมภายใน จะเกิดการถ่ายโอนกำลังและการเคลื่อนที่นำไปประยุกต์ใช้งานได้

### 2.10 ระบบคอนโทรลมอเตอร์

ดีซีมอเตอร์เป็นอานาล็อก actuator ที่ไม่มีตำแหน่งหยุดที่แน่นอนเหมือนสเตป-มอเตอร์ ดังนั้นระบบคอนโทรลดีซีมอเตอร์โดยทั่วไปมักเป็นระบบแบบลูปปิด ในระบบแบบลูปปิดตำแหน่งเอาต์พุตจะถูกป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับอินพุตอ้างอิงเพื่อให้ได้คุณสมบัติการทำงานที่ต้องการสามารถกำหนดตำแหน่งได้อย่างสมบูรณ์ และสามารถวัดแรงบิดขับเคลื่อน เพื่อป้อนกลับไปเป็น

#### ระบบแบบลูปปิด

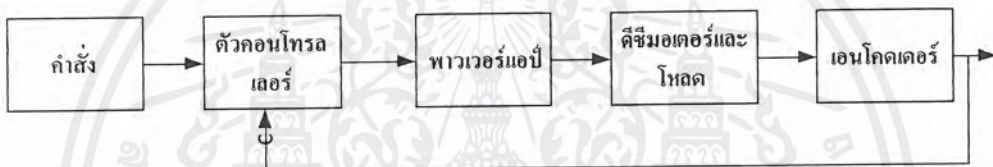
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.10.1 พื้นฐานของระบบคอนโทรลดิซีมเตอร์

ส่วนประกอบพื้นฐานของระบบคอนโทรลดิซีมเตอร์แสดงได้ในบล็อกไดอะแกรมของภาพที่ 2.13 ซึ่งประกอบด้วยบล็อกที่สำคัญ 4 บล็อกคือ

- (1) ตัวคอนโทรลเลอร์
- (2) วงจรไครเวอร์หรือเพาเวอร์แอมพลิไฟ
- (3) พิคแบ็คทรานสดิวเซอร์หรือเอน โคเดเซอร์
- (4) ดิซีมเตอร์และโหลด

ตัวคอนโทรลเลอร์ เป็นส่วนของระบบที่ทำให้เกิดสัญญาณคอนโทรลไปยังคัตติซีมเตอร์และโหลด คอนโทรลเลอร์ที่ให้สัญญาณคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณอนาล็อกเราเรียกว่าอนาล็อกคอนโทรลเลอร์ ส่วนคอนโทรลเลอร์ที่ให้สัญญาณคอนโทรลเป็นสัญญาณดิจิทัลเราเรียกว่า ดิจิตอลคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 2.13 ระบบการคอนโทรลดิซีมเตอร์แบบพื้นฐาน

วงจรไครเวอร์ เป็นส่วนประกอบของระบบที่อยู่ระหว่างตัวคอนโทรลเลอร์กับดิซีมเตอร์และโหลดมีหน้าที่ปรับรูปและขยายสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะป้อนเข้าไปขับดิซีมเตอร์และโหลด วงจรไครเวอร์ส่วนใหญ่ได้แก่เพาเวอร์แอมพลิไฟซึ่งอาจแบ่งย่อยออกเป็นลิเนียร์เพาเวอร์แอมพลิไฟและพัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟลาย

พิคแบ็คทรานสดิวเซอร์หรือเอน โคเดเซอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่รับรู้หรือคิเท็คสัญญาณเอาท์พุทที่ต้องการ โดยไม่มีผลของการโหลดคิง (loading) สัญญาณที่คิเท็คได้นี้จะป้อนกลับไปเปรียบกับสัญญาณอ้างอิง ทำให้ได้สัญญาณเออร์เรอร์ พิคแบ็คทรานสดิวเซอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ อนาล็อกทรานสดิวเซอร์ คือสิ่งประดิษฐ์ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณอนาลอกได้แก่พวก ทาโคเซนเนอเรเตอร์ส่วนพิคแบ็คทรานสดิวเซอร์อีกแบบหนึ่งคือดิจิทัลทรานสดิวเซอร์ เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่ใช้เปลี่ยนพลังงานรูปหนึ่งให้เป็นสัญญาณดิจิทัล

ดิซีมเตอร์และโหลด คือระบบคอนโทรลหรือส่วนที่ออกแรงทำงานซึ่งจะเป็นเครื่องจักรกล (ดิซีมเตอร์) หรืออะไรก็ตามที่ให้ตัวแปร ดิซีมเตอร์ในที่นี้เป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่มีคุณสมบัติการทำงานสูง มีอาร์มาเจอร์อินคักเต้นซ์และแรงเฉื่อยของ โรเตอร์ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

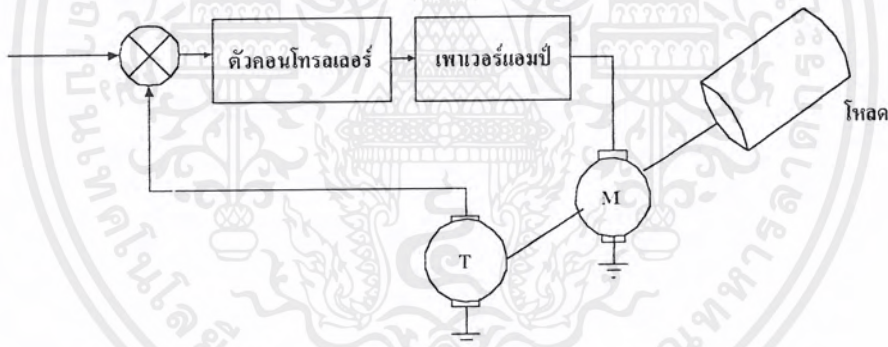
## 2.11 ลักษณะการคอนโทรลของระบบดีซีมอเตอร์

ระบบการคอนโทรลมอเตอร์ดีซีสามารถที่จะจำแนกลักษณะการคอนโทรลออกได้เป็น 2 แบบ คือระบบอนาลอกคอนโทรลและระบบดิจิตอลคอนโทรล

### 2.11.1 ระบบอนาลอกคอนโทรล

ในคอนโทรลลูปของระบบอนาลอกคอนโทรล เอาท์พุทของระบบจะถูกวัดค่าหรือดีเท็คค่าได้เป็นสัดส่วนกับสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นสัญญาณอนาลอก เช่นระบบที่มีการป้อนกลับด้วยทาโคมิเตอร์ในภาพที่ 2.14 โวลต์เตจเอาท์พุทของทาโคมิเตอร์จะเป็นสัญญาณอนาลอกที่แสดงถึงความเร็วมอเตอร์

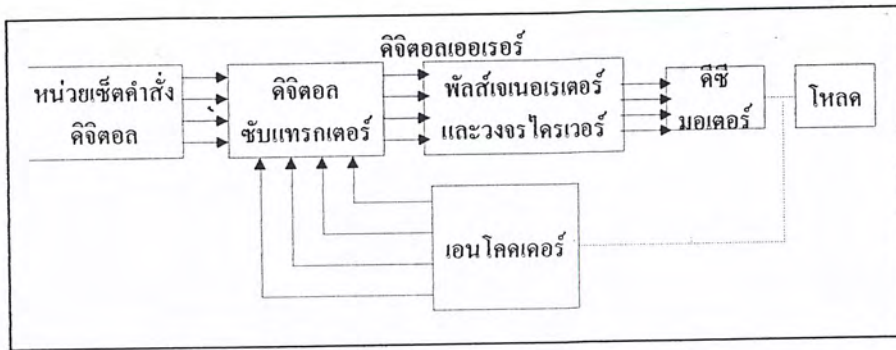
สรุปได้ว่าระบบอนาลอกคอนโทรลก็คือคอนโทรลลูปที่มีฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์ เป็นอนาลอกทรานสดิวเซอร์วัดค่าไดนามิกวารีเอเบิลออกเป็นสัญญาณ อนาลอกป้อนกลับไปยังตัวคอนโทรลเลอร์เพื่อคอนโทรลเลอร์เพื่อคอนโทรลให้ได้คุณสมบัติการทำงานเป็นไปตามที่ต้องการ



ภาพที่ 2.14 บล็อกโคโอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วที่มีทาโคมิเตอร์เป็นตัวป้อนกลับ

### 2.11.2 ระบบดิจิตอลคอนโทรล

ระบบดิจิตอลคอนโทรลคือระบบที่คอนโทรลลูปมีฟีดแบ็คทรานสดิวเซอร์เป็นดิจิตอลทรานสดิวเซอร์ซึ่งสามารถวัดค่าไดนามิกวารีเอเบิลออกเป็นสัญญาณดิจิตอลป้อนกลับไปยังตัวคอนโทรลเลอร์เพื่อคอนโทรลให้ได้คุณสมบัติการทำงานของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ



ภาพที่ 2.15 ระบบดิจิทัลคอนโทรล

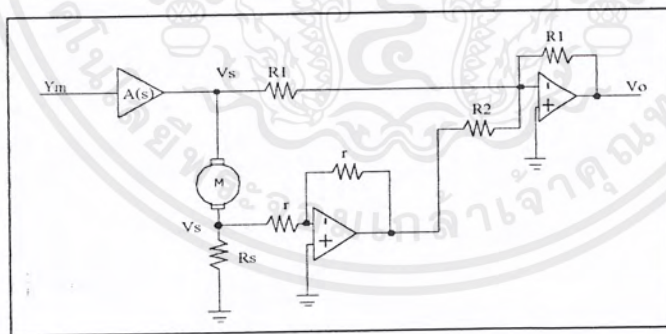
### 2.12 วิธีในการวัดความเร็วรอบของดิซิมอเตอร์

การขับเคลื่อนความเร็วของดิซิมอเตอร์ จะประกอบด้วย การควบคุมความเร็ว รูปการควบคุมความเร็วจะต้องมีตัววัดความเร็วรอบของดิซิมอเตอร์ออกมาเป็นสัญญาณ โวลต์ตรงเพื่อใช้สำหรับเป็นสัญญาณป้อนกลับของรูปเพื่อเรียกดูความเร็วของมอเตอร์ของการวัดความเร็วรอบของดิซิมอเตอร์

### 2.13 การจำลองสมการความเร็วรอบของดิซิมอเตอร์ด้วยออปแอมป์

วงจรที่ใช้จำลองสมการความเร็วรอบของดิซิมอเตอร์ ด้วยออปแอมป์แสดงได้ดังใน

ภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 วงจรสำหรับวัดความเร็วรอบของดิซิมอเตอร์

จากภาพที่ 2.16 เราหาสมการความเร็วรอบของดิซิมอเตอร์ได้ดังนี้

$$V_a = (R_a + R_s) \times i_a + K_a \times \omega$$

$$K_e \times \omega = [V_a - (R_a + R_s) \times i_a]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และหาค่า  $V_o$  ได้เป็น

$$V_o = -\left(\frac{R_1}{R_1}\right) \times V_a + \left(\frac{R_1}{R_2}\right) \times V_s$$

$$V_s = i_a \times R_a$$

$$-V_o = \left[ V_a - \left( R_1 \times \frac{R_s}{R_2} \right) \times i_a \right]$$

เราจะเห็นได้ว่าสมการ (5-31) และสมการ (5-32) ทางด้านขวามือมีค่าเท่ากันเมื่อ

$$R_1 \times \frac{R_s}{R_2} = (R_a + R_s)$$

ดังนั้น

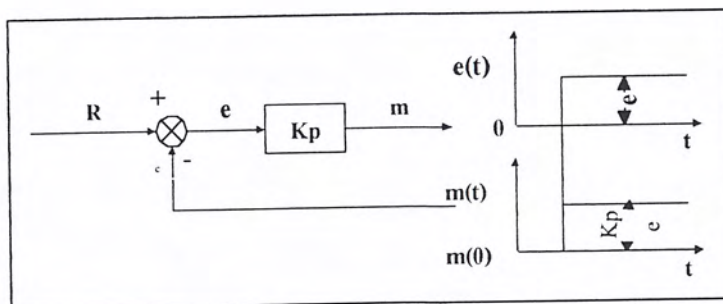
$$V_o = -K_e \times \omega$$

แสดงให้เห็นว่าโวลต์เตจเอาต์พุต ( $V_o$ ) ที่ได้มีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วยรอบของมอเตอร์ซึ่งเราสามารถนำไปใช้แทนเอาต์พุตของคิซิทาโคมิเตอร์

## 2.14 คุณสมบัติของตัวคอนโทรลเลอร์

### 2.14.1 ปรีออปพอร์ชันแนลคอนโทรล

สัญญาณตัวแปรเพื่อการแก้ไขของตัวคอนโทรลเลอร์จะเป็นสัดส่วนกับสัญญาณเออร์เรอร์



ภาพที่ 2.17 ตัวคอนโทรลเลอร์แบบปรีออปพอร์ชันแนล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m = K_p + m(0)$$

เมื่อ  $K_p$  คือกำลังขยายของตัวคอนโทรลเลอร์แบบปรีอพออร์ชันแนล  
 $m(0)$  คือเอาต์พุทของตัวคอนโทรลเลอร์เมื่อเออร์เรอร์เป็นศูนย์

การคอนโทรลแบบนี้มักจะแสดงอยู่ในรูปของปรีอพออร์ชันแนลแบนด์ (PB) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ ค่า PB คือสัญญาณเออร์เรอร์ที่ทำให้สัญญาณควบคุมเปลี่ยนไปร้อยละ เมื่อ PB เท่ากับ 50% หมายถึงถ้าสัญญาณเออร์เรอร์เกิดขึ้น 50% สัญญาณควบคุมจะเปลี่ยนไป 100% PB เป็นตัวบอกความไวของการแก้ความผิดพลาดจึงอาจเรียกค่าว่า ความไวของ ปรีอพออร์ชันแนลคอนโทรลได้อีกชื่อหนึ่ง

$$PB = \frac{1}{K_p} \times 100$$

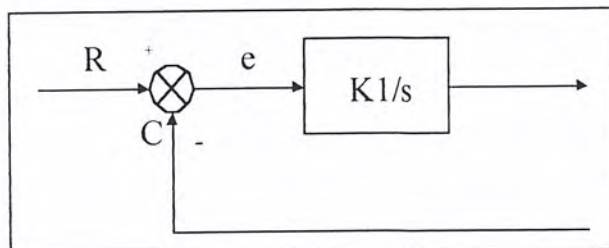
#### ข้อเสียของการคอนโทรลแบบปรีอพออร์ชันแนล

กรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดจะเกิดค่าออฟเซต (ค่าผิดพลาด) ของสัญญาณกระบวนการ (C) ที่สถานะคงที่ แก้ไขด้วยการลดค่า PB แต่ก็ไม่สามารถกำจัดค่าได้หมด เพราะถ้าค่า สูงเกินไป การควบคุมจะเกิดการออสซิลเลท โหลดเปลี่ยนแปลงในระบบคอนโทรลแบบปรีอพออร์ชันแนล

ปรีอพออร์ชันแนลคอนโทรลจะใช้งานได้เฉพาะในระบบที่ไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงโหลดมากนัก หรือระบบที่มีกระบวนการที่มีไทม์แล็กน้อย ๆ ระบบจะต้องมี ปรีอพออร์ชันแนลแบนด์น้อย ซึ่งจะทำให้ค่าออฟเซตเออร์เรอร์ลดลง

#### 2.14.2 อินติกรัลคอนโทรล

การคอนโทรลแบบอินติกรัล ค่าสัญญาณควบคุม (m) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าอินติกรัลของสัญญาณเออร์เรอร์ (e) จึงสามารถแก้ค่าออฟเซตได้ การควบคุมแบบนี้บางทีเรียกว่า รีเซทแอกชั่น



ภาพที่ 2.19 การคอนโทรลแบบอินติกรัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{m} = \left( \frac{e}{T_i \times S} \right) + m(0) = \left( \frac{K_i}{S} \right) \times e + m(0)$$

$T_i$  (อินทิกรัลไทม์) คือเวลาที่ใช้ในการเพิ่มค่าของสัญญาณควบคุม ( $m$ ) จนกว่าสัญญาณผลต่างจะหมดไป ดังนั้นถ้าค่า  $T_i$  น้อย action จะเกิดเร็ว ทำให้สัญญาณ  $e = 0$  มีข้อเสียที่ ถ้าค่า  $T_i$  น้อยเกินไปจะทำให้ค่า  $\zeta$  ของกระบวนการมีค่าต่ำ อาจทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ(unstable) ถ้าให้  $T_i$  มากเกินไป ค่า stabilizing time ของกระบวนการจะยาวนานเกินไป

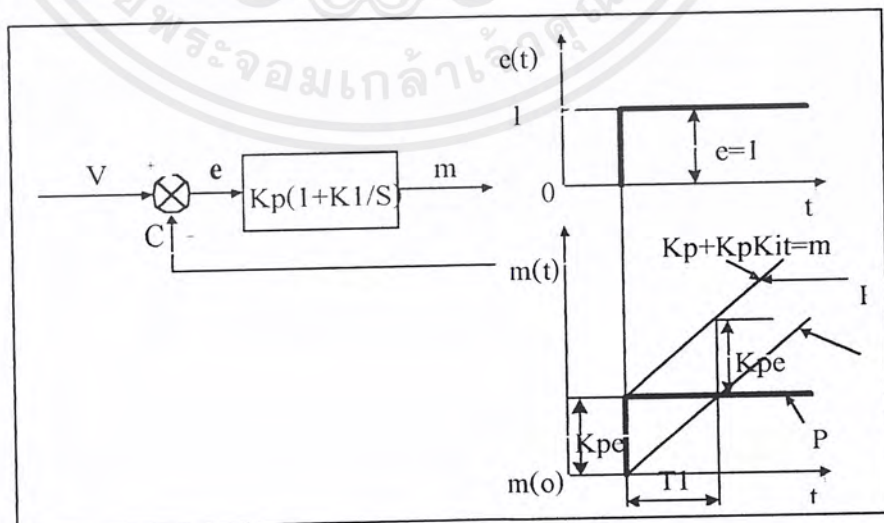
### 2.14.3 ปรีออปพอร์ชันนัล-อินทิกรัลคอนโทรล

การคอนโทรลแบบนี้เราจะหาสัญญาณควบคุม ( $m$ ) ได้ตามสมการที่ (6-8)

$$m = K_p + K_p \times K_i \int e dt + m(0)$$

ข้อดีของ PI คอนโทรล คือการคอนโทรลแบบนี้จะให้คุณสมบัติของทั้งแบบปรีออปพอร์ชันนัลและระบบคินดริคัลซึ่งสามารถทำให้ค่าออฟเซ็ทในแบบ ปรีออปพอร์ชันนัลหมดไป และ  $K_i$  กำลังขยายของการอินทิเกรตสามารถจะปรับค่าได้อย่างอิสระ

ข้อเสียของ PI คอนโทรล คือระบบอาจจะไม่เสถียรภาพกรณีค่า  $T_i$  น้อยและไม่เหมาะสมกับกระบวนการที่มีไทม์แล็กมาก ๆ เพราะการตอบสนองของตัวแปรกระบวนการ ( $C$ ) ช้ามากไม่สามารถแก้ไขผิดพลาดได้ทันเวลา



ภาพที่ 2.20 ปรีออปพอร์ชันนัล-อินทิกรัลคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

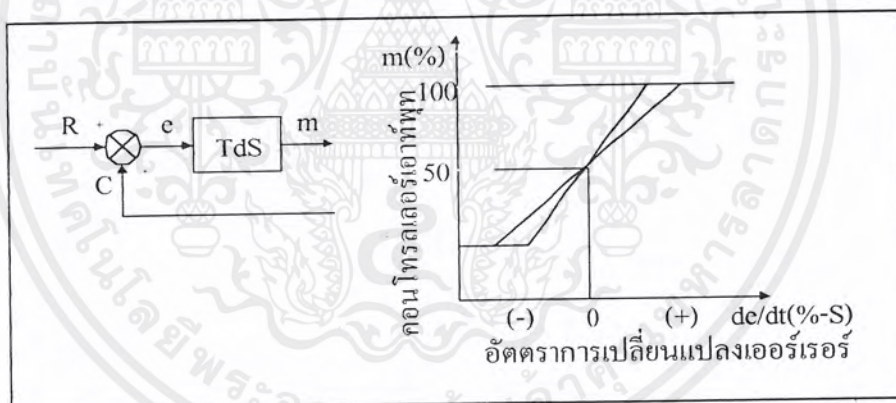
ระบบ PI โทลจะใช้ได้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดมาก ๆ ได้ แต่โหลดควรจะต้องเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เมื่อเทียบกับTi เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการ ออสซิลเลท เนื่องจากโอเวอร์ชูทของการอินทิกรัล และระบบมักจะทำให้โอเวอร์ชูทสูงก่อนที่เข้าสู่เซ็ทตั้งใหม่

#### 2.14.4 ดิริเวทิฟคอนโทรล

การควบคุมแบบนี้เหมาะกับกระบวนการที่มีไทม์แล็กมาก ๆ เพราะสามารถแก้ค่าผิดพลาดโดยการกระทำล่วงหน้าก่อนที่จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น สัญญาณควบคุมจะแปรตามอัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเออร์เรอร์ (e) การคอนโทรลแบบดิริเวทิฟ หรือ เรทคอนโทรลนี้ไม่สามารถนำไปใช้งานแบบเดี่ยวโคด ๆ ได้ เพราะว่าเมื่อเออร์เรอร์เป็นศูนย์หรือมีค่าคงที่ คอนโทรลเลอร์จะไม่ให้สัญญาณเอาต์พุตเลย ดังนั้นสมการของ m หาได้ดังนี้

$$m = T_d \frac{de}{dt} + m(0)$$

เมื่อ  $T_d$  กำลังขยายคงที่ของดิริเวทิฟคอนโทรล อาจเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ดิริเวทิฟไทม์



ภาพที่ 2.21 ตัวคอนโทรลเลอร์แบบดิริเวทิฟคอนโทรล

$T_d$  คือเวลาที่สัญญาณควบคุมนำหน้า (lead) สัญญาณเออร์เรอร์อยู่ ค่าสัญญาณเออร์เรอร์ (e) ที่เป็นศูนย์แต่เป็นสัญญาณเออร์เรอร์ที่เกิดจากกระบวนการที่มีไทม์แล็กมาก ๆ D-แอกชั่นจะมีผลต่อเมื่อสัญญาณเออร์เรอร์ (e) มีการเปลี่ยนแปลงเท่านั้น สัญญาณเออร์เรอร์คงที่ D-แอกชั่นจะหมดปฏิกิริยาทันที

ข้อเสียของ D-คอนโทรล คือมีความไวต่อสัญญาณเออร์เรอร์ (e) มาก โดยเฉพาะกรณี  $T_d$  มีค่ามาก จะทำให้ระบบไม่เสถียรภาพจึงไม่เหมาะกับกระบวนการที่มีค่าไทม์แล็กน้อย ๆ และกระบวนการที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ง่าย

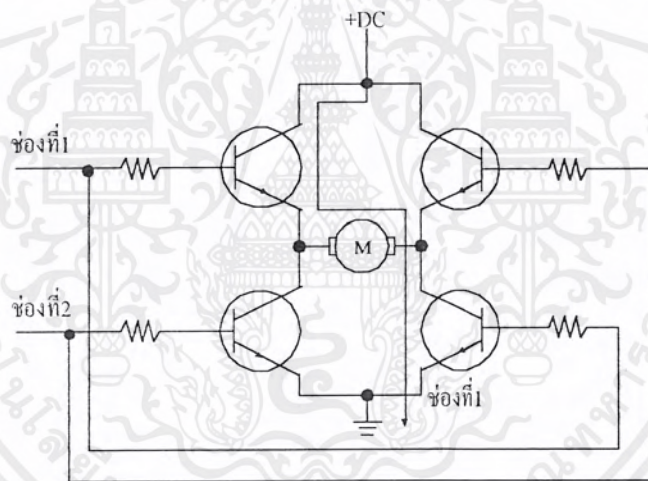
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.15 แอมพลิไฟเออร์

เราสามารถจัดประเภทของแอมพลิไฟเออร์ออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

- (1) ลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์
- (2) SCR แอมพลิไฟเออร์
- (3) สวิทซ์อิงแอมพลิไฟเออร์
- (4) ลิเนียร์แอมพลิไฟเออร์

เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์แบบทรานซิสเตอร์จัดออกได้ตามหลักการออกแบบภาคเอาต์พุตออกได้เป็น 2 แบบ คือแบบ “H” และ “T” มีลักษณะวงจรพื้นฐานดังแสดงในภาพที่ 2.22 และ ภาพที่ 2.23



ภาพที่ 2.22 เซอร์โวแอมพลิไฟเออร์แบบทรานซิสเตอร์

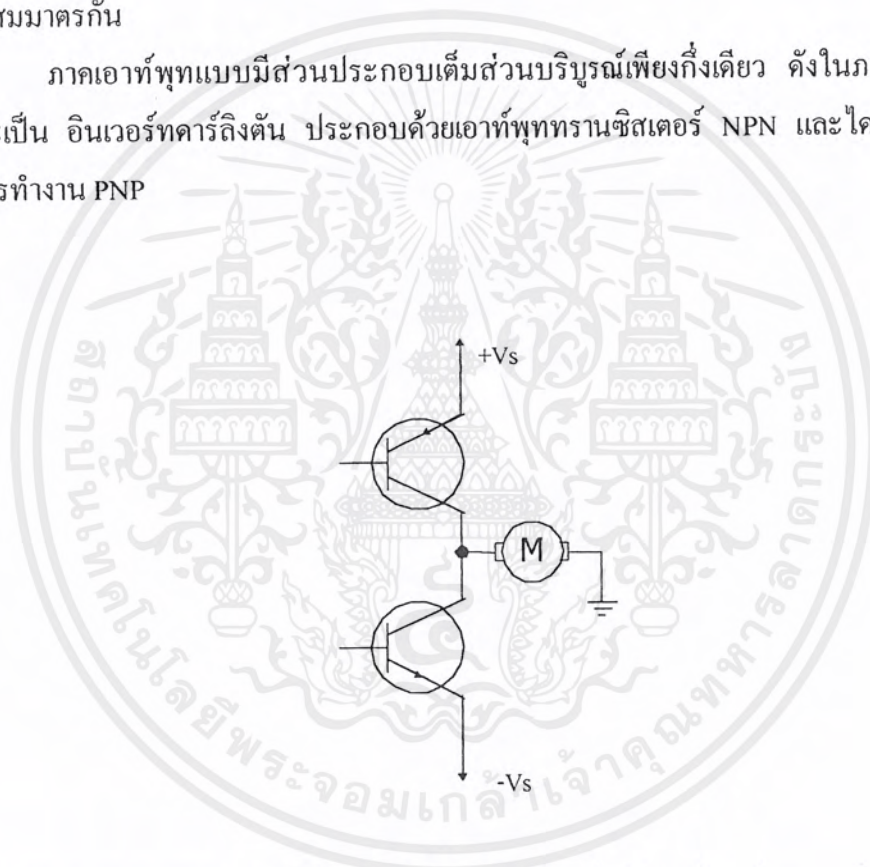
ภาคเอาต์พุตแบบ “H” หรือแบบบริดจ์ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ 4 ตัว ดีซีเพาเวอร์ซัพพลายเพียงตัวเดียว ภาคเอาต์พุตแบบนี้มีข้อดีคือ ง่าย เพาเวอร์ซัพพลายใช้เพียงขั้วเดียว (+DC) และการป้องกัน โวลต์เตจย้อนกลับจะมีการแบ่งส่วนกันระหว่างทรานซิสเตอร์อย่างไรก็ตาม เป็นการยากที่จะให้วงจรภาคเอาต์พุตแบบนี้ทำงานเป็นลิเนียร์ เนื่องจากมอเตอร์อยู่ในสภาวะลอคซ์ (หรือไม่ได้ต่อกับกราวนด์)

ภาควงจรเอาต์พุตแบบ “T” จะต้องใช้เพาเวอร์ซัพพลายสองชุด (DC และ - DC) และทรานซิสเตอร์ 2 ตัวที่เป็นคอมพลิเมนต์กัน แต่สามารถไดรว์ให้เป็นลิเนียร์ได้ง่าย สามารถกระทำการป้อนกลับของโวลต์เตจและกระแสได้ง่าย ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้วงจรแบบ “T” มักได้รับการนิยมนำไปใช้เป็นตัวขับแอมพลิไฟเออร์

## 2.16 การออกแบบภาคเอาต์พุต

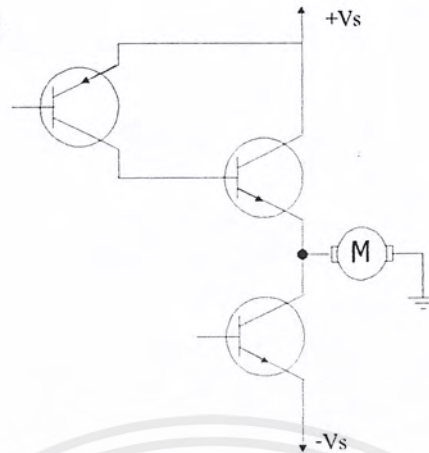
การออกแบบภาคเอาต์พุตแอมพลิไฟไค์เป็น 2 ลักษณะ คือแบบโครงสร้างมีส่วนประกอบเต็มส่วนบริบูรณ์ดังในภาพที่ 2.23 ใช้ NPN และ PNP เอาต์พุตทรานซิสเตอร์ในการจัดวงจรที่สมมาตรกัน

ภาคเอาต์พุตแบบมีส่วนประกอบเต็มส่วนบริบูรณ์เพียงกึ่งเดียว ดังในภาพที่ 2.23 มีลักษณะเป็น อินเวอร์ทาร์ลิงตัน ประกอบด้วยเอาต์พุตทรานซิสเตอร์ NPN และไดรว์ PNP แบบการทำงาน PNP



ภาพที่ 2.23 การออกแบบภาคเอาต์พุตแบบมีส่วนประกอบเต็มส่วนบริบูรณ์

ภาคเอาต์พุตแบบมีส่วนประกอบเต็มส่วนบริบูรณ์มีความสะดวก การออกแบบและมีคุณสมบัติการทำงานที่สมมาตรกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อัตราขยายและแบนด์วิดท์ ส่วนภาคเอาต์พุต

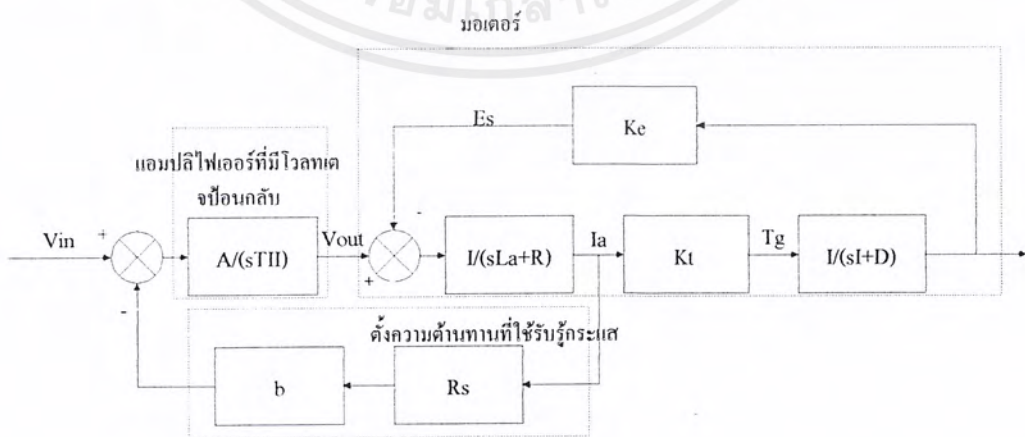


ภาพที่ 2.24 การออกแบบภาคเอาต์พุตแบบมีส่วประกอบเต็มเพียงกิ่งเดียว

การออกแบบภาคเอาต์พุตแบบมีส่วประกอบที่เต็มบริบูรณ์ซึ่งต้องการเพียงตัวความต้านทานที่อิมิตเตอร์ซึ่งค่าของความต้านทานให้โวลต์เตจตกคร่อมประมาณ 0.7 โวลต์ที่กระแสคอลเล็กเตอร์ไหลสูงสุด เอาต์พุตทรานซิสเตอร์ที่มีลักษณะเป็นคู่ (complementary pair) สามารถเพิ่มการประหยัดได้อย่างมาก

### ระบบคอนโทรลแรงบิด

ในบางกรณีเราต้องการรักษาในแรงบิดของมอเตอร์คงที่ เนื่องจากแรงบิดจะเป็น สัดส่วนกับกระแสของมอเตอร์ หมายความว่าเราจะต้องให้กระแสของมอเตอร์ไหลคงที่ วิธีการนี้กระทำได้ดังแสดงในภาพที่ 2.25

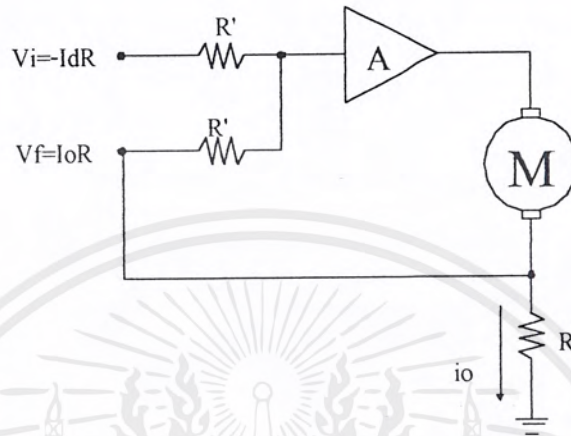


การป้อนกระแสกลับ

ภาพที่ 2.25 ระบบของมอเตอร์และแอมพลิไฟเออร์ที่มีการป้อนกลับกระแสและ โวลต์เตจ

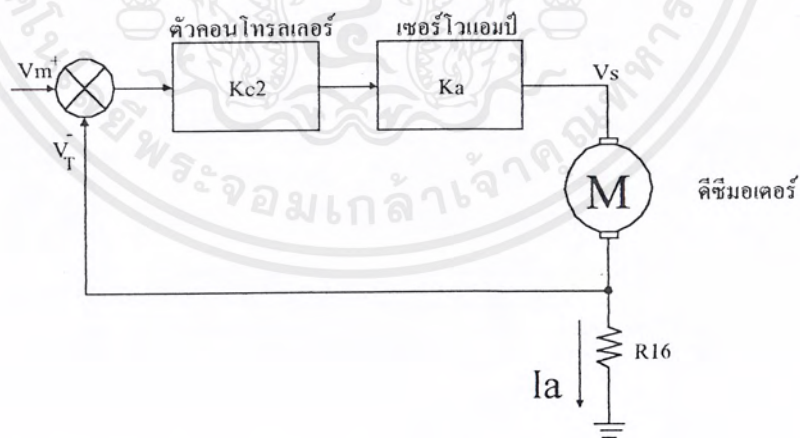
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุท โวลต์เตจ  $V_i = -I_d R$  จะถูกเปรียบเทียบกับ โวลต์เตจป้อนกลับ  $V_f = I_R R$  และเป็นอินพุทให้กับแอมพลิไฟเออร์ที่มีอัตราขยายสูง ถ้ากระแสเอาต์พุต  $I_o$  มีค่าต่างไปจากกระแสที่ต้องการ ความแตกต่างดังกล่าวจะถูกขยายและใช้สำหรับไปแก้ไขสถานะให้ถูกต้อง(คือมี  $I_o - I_d$  คงที่)



ภาพที่ 2.26 ระบบคอนโทรลแรงบิด

บล็อกไดอะแกรมของลูปคอนโทรลทอร์ก จากภาพที่ 2.26 เราสามารถแยกเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมของลูปคอนโทรลทอร์กได้ดังแสดงในภาพที่ 2.27



ภาพที่ 2.27 บล็อกไดอะแกรมของลูปคอนโทรลทอร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบหุ่นยนต์ 8 ขา

#### 3.1 กล่าวนำ

การสร้างหุ่นยนต์แบบมีขาชนิดคานเชื่อมต่อแข็งแบบง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน พิจารณารูปร่างหุ่นยนต์แบบ 8 ขา ที่มีชุดกลไกและชุดควบคุมความเร็วอย่างง่าย ที่ทำให้หุ่นยนต์เดินได้มีองค์ประกอบดังนี้

##### 1. ส่วนของกลไก

- ชุดเฟืองขับ ใช้ต่อกับขาที่เป็นคานเชื่อมต่อแบบแข็ง ต้นกำเนิดการในการเคลื่อนที่
- ข้อหมุน ทำหน้าที่เป็นจุดหมุนของก้านขา
- มอเตอร์ เป็นตัวต้นกำลังที่ต่อกับชุดเฟือง
- ก้านขา เป็นตัวส่งผ่านกำลังและการเคลื่อนที่
- ลำตัว เป็นส่วนที่ยึดของชุดกลไกและวงจรควบคุม

##### 2. ส่วนของชุดควบคุมความเร็วของตัวต้นกำลัง

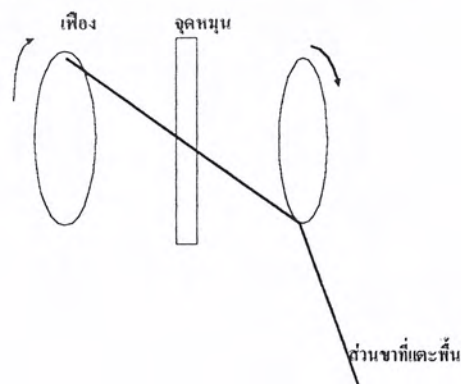
- PI Controller
- Drives
- Joy Stick

ทั้งกลไกและส่วนควบคุมความเร็วของตัวต้นกำลัง จะทำงานสัมพันธ์กันทั้ง 2 ส่วน

หุ่นยนต์จึงสามารถเดินได้

#### 3.2 การออกแบบกลไกขา

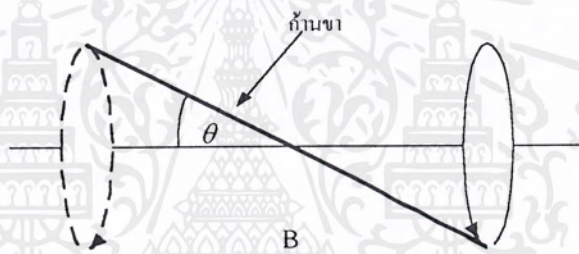
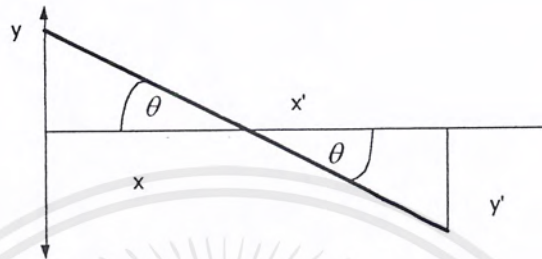
จากแนวคิดที่ให้ปลายด้านหนึ่งของขาต่อเข้ากับเฟือง แล้วช่วงกลางต่อผ่านจุดหมุนปลายอีกด้านให้เป็นส่วนขาที่ใช้เดิน ตามภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 กลไกขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

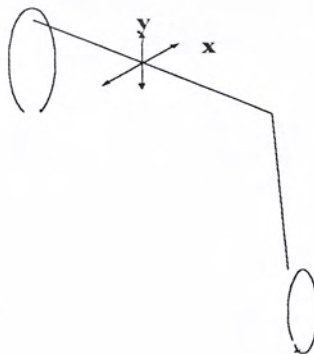
- เฟืองเป็นตัวสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่เป็นวงกลม
- ก้านขาเป็นตัวกลางในการถ่ายทอดกำลังงานและการเคลื่อนไหวนอกจากตามการหมุนของเฟือง
- จุดหมุนคงเป็นตัวตำแหน่งที่ให้ก้านขามันผ่านตำแหน่งกลางแกนนั้น และปลายอีกด้านจะมีผลจากการหมุนเหมือน การกรรเชิงเรือ ตามภาพที่ 3.2 B



ภาพที่ 3.2 จุดหมุนตามแนวแกน

### 3.3 รูปแบบการเดิน

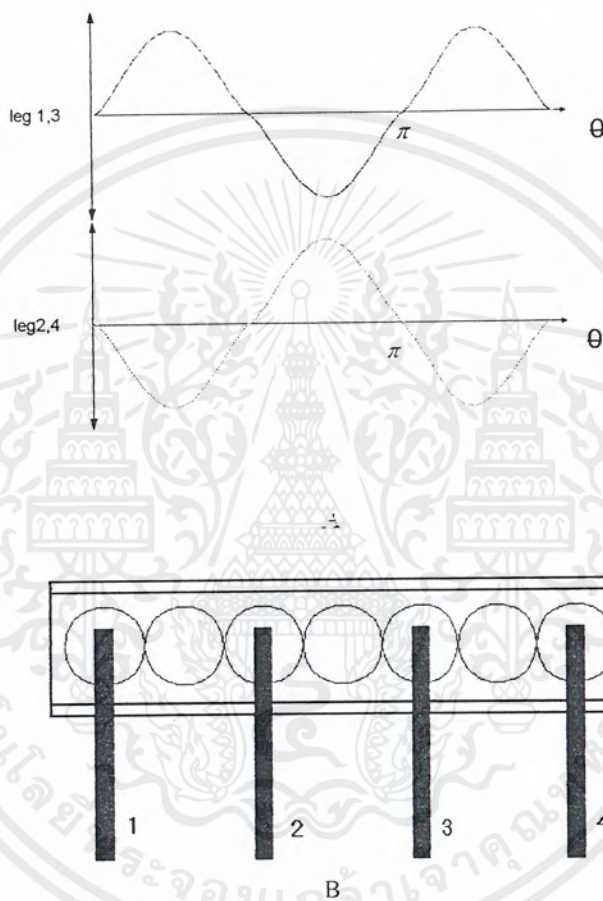
เมื่อเราพิจารณาการหมุนของปลายขา รูปแบบการหมุนยังเป็นวงกลมแล้วต่อ link เพิ่ม เพื่อเพิ่มพิกัดของปลาย Function ให้อยู่อีกที่หนึ่งเราจะเห็นทางเดินของการเคลื่อนที่ ตามภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.3 รูปแบบการเดินของขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

link ที่เพิ่มมาเป็นการถ่ายโอนกำลัง และการเคลื่อนที่ไปยังปลาย ใช้ในการก้าวเดิน จากสิ่งที่กล่าวมา นำมาสร้างความสัมพันธ์ในลำดับจังหวะการก้าวเดิน หุ่นยนต์แต่ละข้างมี 4 ขา เพื่อให้จังหวะ การทำงานของกลไกมีความสัมพันธ์กัน จุดเพื่อจะต้องต่อเชื่อมกันทุกอัน ในแต่ละด้าน หุ่นยนต์จะทรงตัวอยู่ได้เมื่อมีการถ่ายน้ำหนักอย่างเหมาะสมจึงสรุปลำดับการทำงานของ ขา ทำงานเหมือนกัน 2 คู่ ในแต่ละคู่อยู่ในองศาเดียวกัน และมีความต่างขององศาอยู่ที่ 1 ขา และ 3 แล้วคู่ที่ 2 ขา 2 และขา 4 ดังภาพที่ 3.4 A

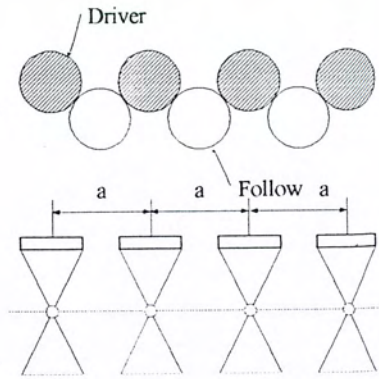


ภาพที่ 3.4 การก้าวเดินของหุ่น

### 3.4 ออกแบบชุดกลไกขา

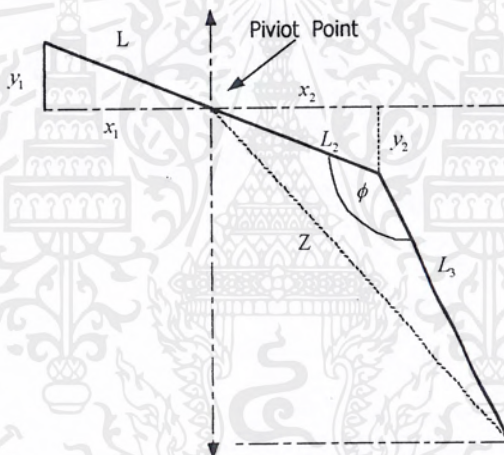
จากรูปแบบการทำงานเป็น คู่ขาสลับพิกัดกันจะให้คล้ายกับการพายเรือกรรเชียง ได้เป็น ตามภาพที่ 3.5 เป็นชุดเกียร์ที่วางเรียงกันเป็นแถวประกอบด้วยเฟืองขับ และเฟืองตาม เฟืองทำหน้าที่ สร้างรูปแบบของการเคลื่อนที่เป็นวงกลม และถ่ายกำลังให้ขาด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.5 การวางชุดเฟือง

ระยะ a เป็นความห่างของแต่ละชุดกลไก เพื่อไม่ให้ขาที่เคลื่อนที่หมุนชนกันตามความยาวของขาตั้งที่ต้องทราบ รัศมีการเคลื่อนที่ของการหมุน



ภาพที่ 3.6 แสดงถึงการหาค่ามุมของขา

- $y_1$  = รัศมีกลางเฟืองถึงจุด Link
- $x_1$  = ความยาวจากเฟืองถึงจุดเชื่อมต่อ
- $x_2$  = ความยาวจุดหมุนถึงข้อที่หักของมุมขา
- $y_2$  = รัศมีจากแกน x ถึงจุดข้อที่งอ
- $\phi$  = มุมขาที่
- $z$  = ความยาวจากจุดปลายหนึ่งถึงอีกปลายหนึ่ง

ในช่วงที่ยกขาสูงสุด

$$\theta_n = 90 - \left( \left( \sin^{-1} \frac{L_2 \sin \phi}{Z} \right) - \theta \right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในช่วงที่กดบนพื้น

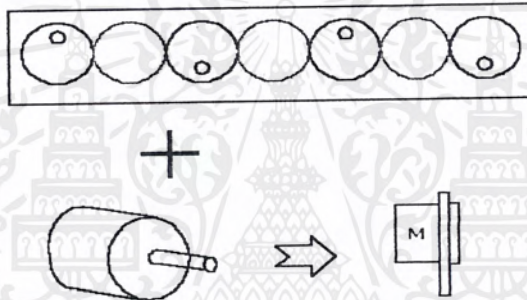
$$\theta_h = 90 - \left( \theta + \left( \sin^{-1} L_2 \sin \phi / Z \right) \right)$$

ความสูงของขาในตำแหน่ง  $\theta$  ที่เกิดขึ้น

$$H = \cos \theta_h$$

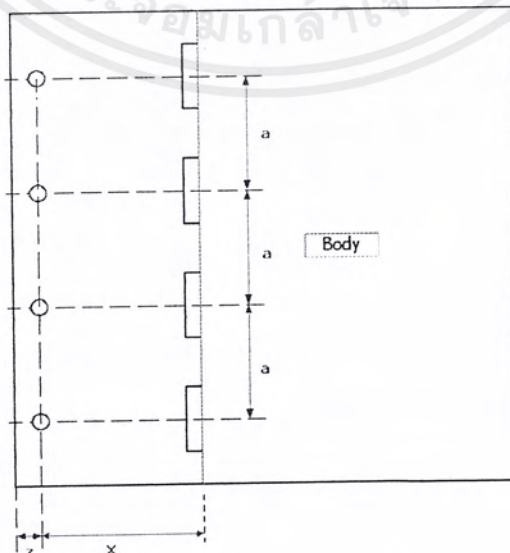
### 3.5 สังกะสีชุดกลไก

ลำดับการทำงานชุดกลไกของหุ่นยนต์แมงมุม 8 ขา โดยกำหนดตำแหน่งของเฟืองให้ต่างกัน  $180^\circ$  เมื่อเฟืองขับหมุนกันขาจะหมุนตาม เกิดเป็นจังหวะการก้าวเดิน ใช้มอเตอร์เกียร์เป็นตัวต้นกำลังขับเฟืองดังภาพที่ 3.7



ภาพที่ 3.7 การประกอบชุดกลไก

นำกลไกขาที่ออกแบบไว้จากภาพที่ 3.7 มาประกอบดังภาพที่ 3.8

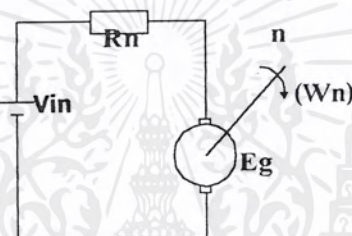


เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสถาบันวิจัยและพัฒนาเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การออกแบบชุดควบคุม

พิจารณาการควบคุมการเดินของหุ่นยนต์ ซึ่งจะประกอบด้วย Motor ขับเคลื่อน 2 ตัว เป็น DC motor ตัวที่หนึ่งจะทีหนึ่งจะเป็นตัวขับเคลื่อนของขาข้างขวาและ Motor อีกตัวจะขับเคลื่อนด้านซ้าย ซึ่งการเลี้ยงของหุ่นยนต์จะอาศัยหลักการ การควบคุมความเร็วของ Motor ของแต่ละด้าน เช่น การเลี้ยงซ้ายของหุ่นยนต์ ความเร็วของ Motor ทางด้านซ้ายต้องลดลงหรืออาจจะหยุดจึงจะทำให้เลี้ยงได้

การควบคุมอีกกรณีคือ การควบคุมทอร์คให้คงที่เพื่อที่จะให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้ต้องอาศัยแรงในการยกน้ำหนักตัวและขาแล้วออกไปข้างหน้าเพราะฉะนั้นจะต้องควบคุมทอร์คด้วยจากรวมของ DC Motor จะพิจารณาจากรูปของค่าความต้านทานของขดลวด Motor

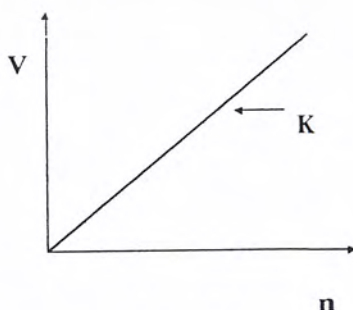


ภาพที่ 3.9 วงจรสมมูลของ DC Motor

พิจารณาวงจรสมมูลของ DC Motor ในสถานะที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์ เกิด  $E_g$  ซึ่งเป็นแรงเคลื่อนตกคร่อมมอเตอร์แปรผันตรงกับรอบการหมุน  $E_g$  ก็จะแปรผันตามแรงดันที่ป้อนให้ ( $V_{in}$ )

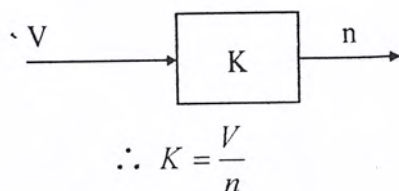
$$E_g = Kn$$

$$n = \frac{E_g}{K}$$



ภาพที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์จำนวนรอบกับแรงดันไฟฟ้าที่มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.11 Block diagram ของสมการ  $K=V/n$

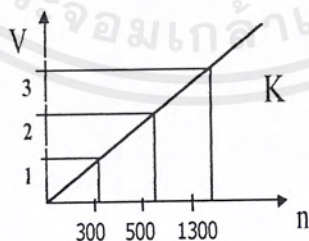
วิธีหาค่า  $K$  ของมอเตอร์ โดยใช้ทาโคมิเตอร์วัดจำนวนรอบ ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 ชูดจับความเร็ว

ทำการทดลองหาค่า โดยการปรับแรงดัน Input (V) แล้วทำการวัดความเร็วรอบโดยอาศัยการนับจำนวน pulse จาก model ดังภาพที่ 3.12

จากการวัดค่าจำนวนรอบ นำมาพล็อตความสัมพันธ์กับ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน เพื่อนำมาหาค่าคงที่ของ Motor ( $K$ ) ตามภาพที่ 3.13



ภาพที่ 3.13 ตารางการทดลองความสัมพันธ์จำนวนรอบ กับ แรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

หาค่าเฉลี่ยของ  $K$  มอเตอร์ เมื่อรู้ค่า  $K$  และหาค่า  $R_a$  จากการวัดค่าความต้านทานของขดลวด ถ้าจะหาค่า  $V_{Ra}$  ได้ ย่อมจะทราบค่า  $E_g$  ตามด้วย แต่  $V_{Ra}$  จะเกิดจากค่าความต้านทานภายในของ Motor จึงหาค่าของ  $V_{Ra}$  ไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_a = \frac{(\rho l n)}{A}$$

$\rho$  : ค่าความหนาแน่นจำเพาะของขดลวด

$l$  : ความยาวของขดลวด

$A$  : พื้นที่หน้าตัดของขดลวด

$N$  : จำนวนรอบของขดลวด

เราสามารถหากระแสได้จากค่า  $R_a$  โดยอนุกรมตัวต้านทานเข้าไปในระบบโดยสมมติให้ค่าความต้านทานน้อยกว่า  $R_a$  เป็นจำนวนเท่า ของตัวต้านทานสมมติใหม่ ( $R_{aa}$ )

$R_{aa}$  : ค่าความต้านทานภายนอก

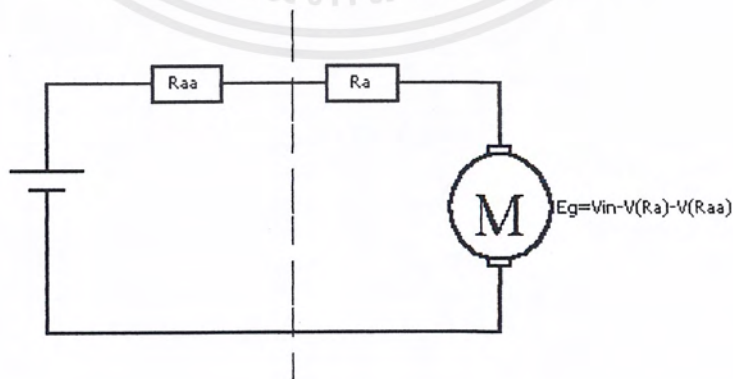
เพราะฉะนั้นถ้าเกิดแรงดันตกคร่อม  $R_{aa} = 0.5 \text{ V}$  หมายความว่า แรงดันตกคร่อมความต้านทานรวม แรงดันตกคร่อมตัวต้านทานรวม

$$V_t = V_{R_{aa}}$$

สมมติให้ค่าความต้านทาน น้อยกว่า 4 เท่า เพราะฉะนั้น

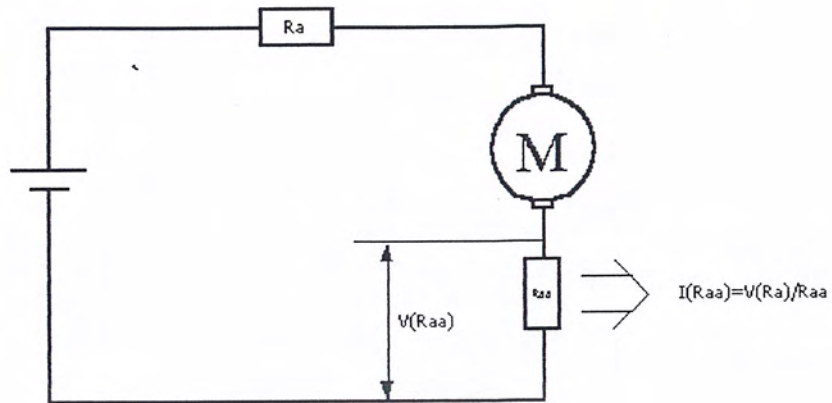
$$R_a = 4R_{aa}$$

$$\therefore R_{aat} = R_{aa} + 4R_{aa} = 5R_{aa}$$



A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



B

ภาพที่ 3.14 แสดงการหาค่าความต้านทานอาร์เมเจอร์

จากภาพที่ 3.14 A จะได้

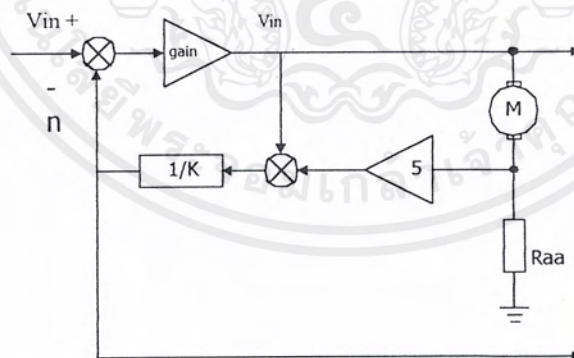
$$V_{Ra+Raa} = V_{Ra} + 4V_{Raa} = 5V_{Raa}$$

$$E_g = V_{in} - 5V_{Raa}$$

จากภาพที่ 3.14 B จะได้

$$n = \frac{E_g}{K} = \frac{(V_{in} - 5V_{Raa})}{K}$$

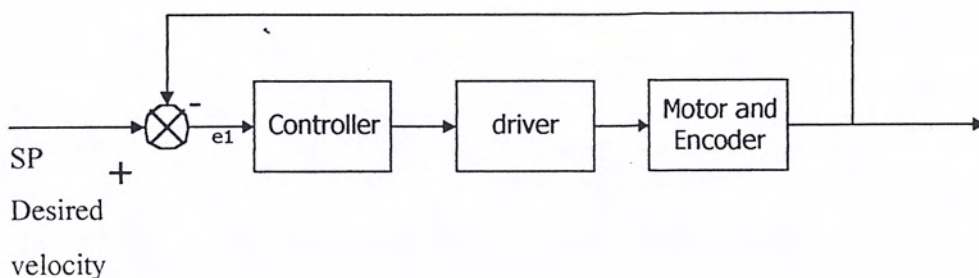
จากสมการนำมามาออกแบบ Block diagram ของวงจรควบคุม Motor ภาพที่ 3.15



ภาพที่ 3.15 Block diagram ของวงจรควบคุม Motor

Sp เป็นตัวกำหนดค่าของรอบเป็น volt เราสามารถมองการควบคุม close loop ได้หลายกรณี กระแสเป็นกำลังงานเป็น back emf เป็นรอบมอเตอร์ จากคอนโทรลเลอร์โดยทั่วไปประกอบด้วย ตัวคอนโทรลเลอร์ ไดรเวอร์ มอเตอร์ และชุด Encoder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.16 ตัวคอนโทรลเลอร์ ไดรเวอร์ มอเตอร์ และชุด Encoder

มอเตอร์ เล็กคีมอเตอร์ขนาดเล็ก ใช้แรงดันไฟฟ้าไม่เกิน 15 โวลต์ และมีชุดเกียร์ติดอยู่กับมอเตอร์เรียกว่ามอเตอร์เกียร์

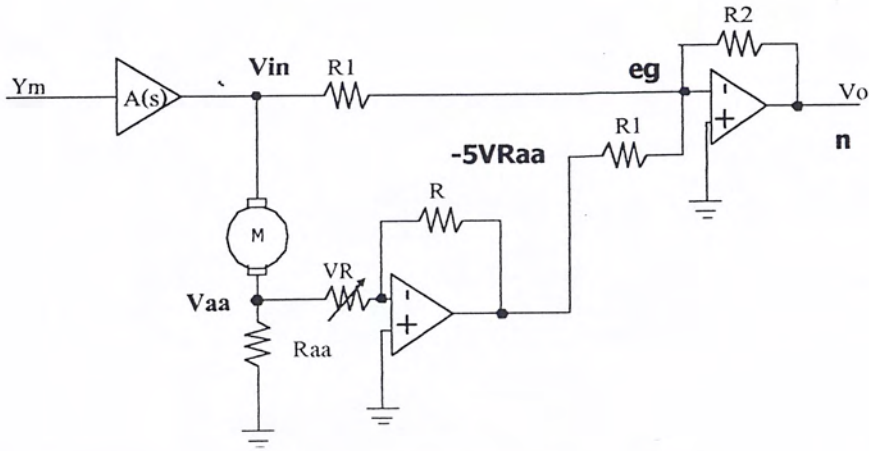


ภาพที่ 3.17 มอเตอร์เกียร์

เอนโคเดอร์ ตัววัดค่าความเร็วจากการออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์ ดังภาพที่ 3.12 จะเห็นว่า การวัดค่าความเร็วของมอเตอร์ จะวัดออกมาในรูปโวลตเตจเอาต์พุต ( $V_o$ ) ซึ่งเป็นสัดส่วนของความเร็ว จากสมการ

$$n = \frac{E_g}{K} = (V_m - 5V_{Raa})/K$$

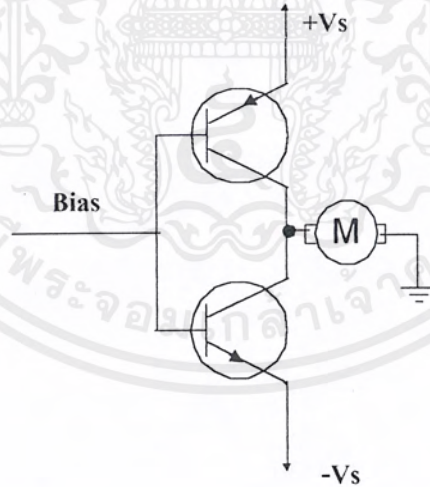
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.18 ตัววัดค่าความเร็ว

### 3.7 ไตรฟเวอร์

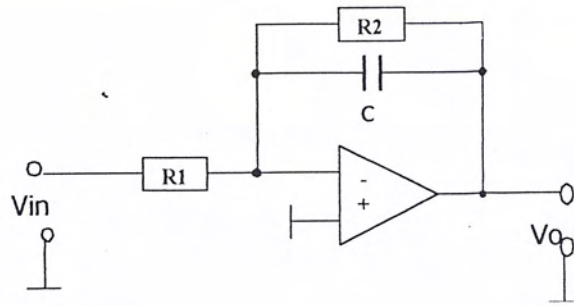
ใช้วงจรภาคเอาต์พุตแบบ “T” จะใช้เพาเวอร์ซัพพลาย 2 ชุด ( $+V_s$  และ  $-V_s$ ) และทรานซิสเตอร์ 2 ตัว เป็นชนิด NPN และ PNP อย่างละตัวสามารถไครฟ์ให้เป็นลิเนียร์ได้ง่าย และสามารถกระทำการป้อนกลับของโวลตเตจและกระแสได้ง่าย



ภาพที่ 3.19 Drivesคอนโทรลเลอร์

PI คอนโทรลเลอร์ อัตราขยายของ P คอนโทรลเลอร์จะไม่สูงมากเกินไป สามารถที่จะสร้างขึ้นด้วยออปแอมป์ เพียงตัวเดียว

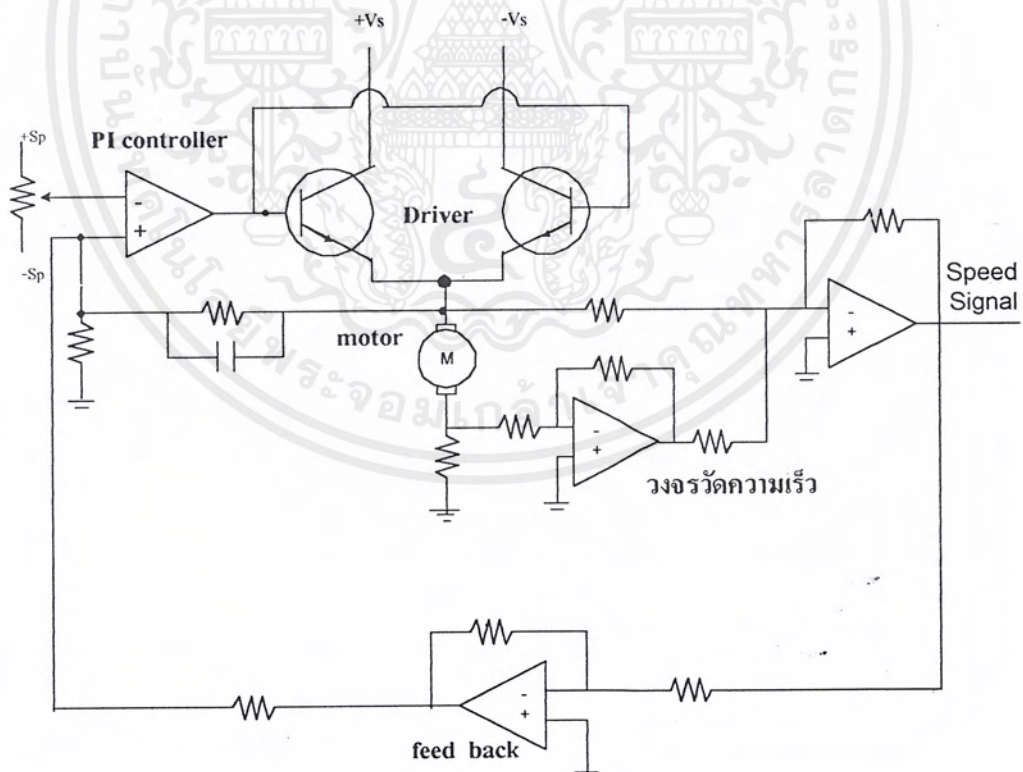
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.20 วงจร PI Controller

$$A_c = \left( \frac{R_2}{R_1} \right) + \left[ \frac{1}{(j\omega c R_2 + 1)} \right]$$

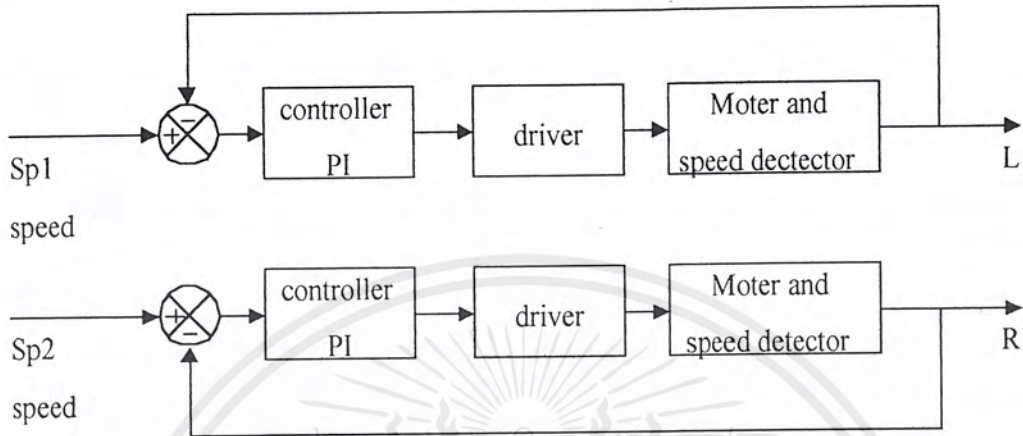
การออกแบบ จะเลือกขนาดของ R1 R2 และ C จะเลือกขนาด Ap ไม่มากจนเกิดออสซิลเลท  
เมื่อพิจารณาระบบควบคุมทุกส่วนแล้วก็นำมาสร้างรวมกัน



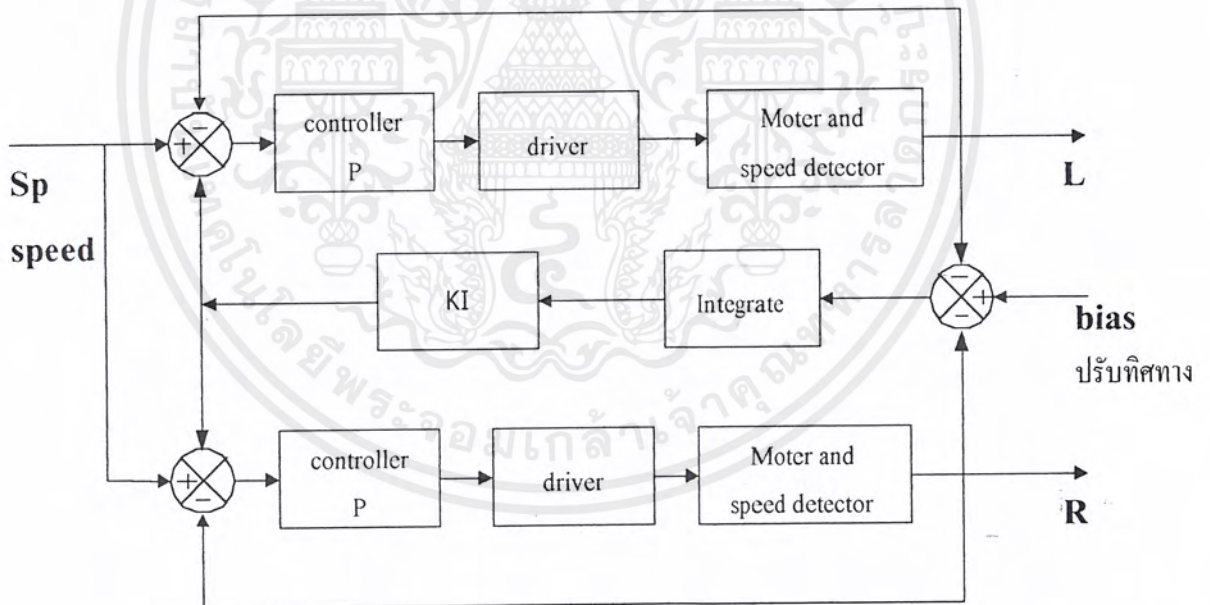
ภาพที่ 3.21 วงจรโดยรวมของของวงจรไครฟ์เวอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่การขับเคลื่อนของหุ่นยนต์นั้นใช้มอเตอร์ 2 ตัว ซึ่งจะต้องมีวงจรขับและคอนโทรลเลอร์คนละตัวดังรูปบล็อกไดอะแกรม



ภาพที่ 3.22 วงจรขับมอเตอร์ ซ้ายและขวา



ภาพที่ 3.23 วงจรโดยรวมทั้งหมด

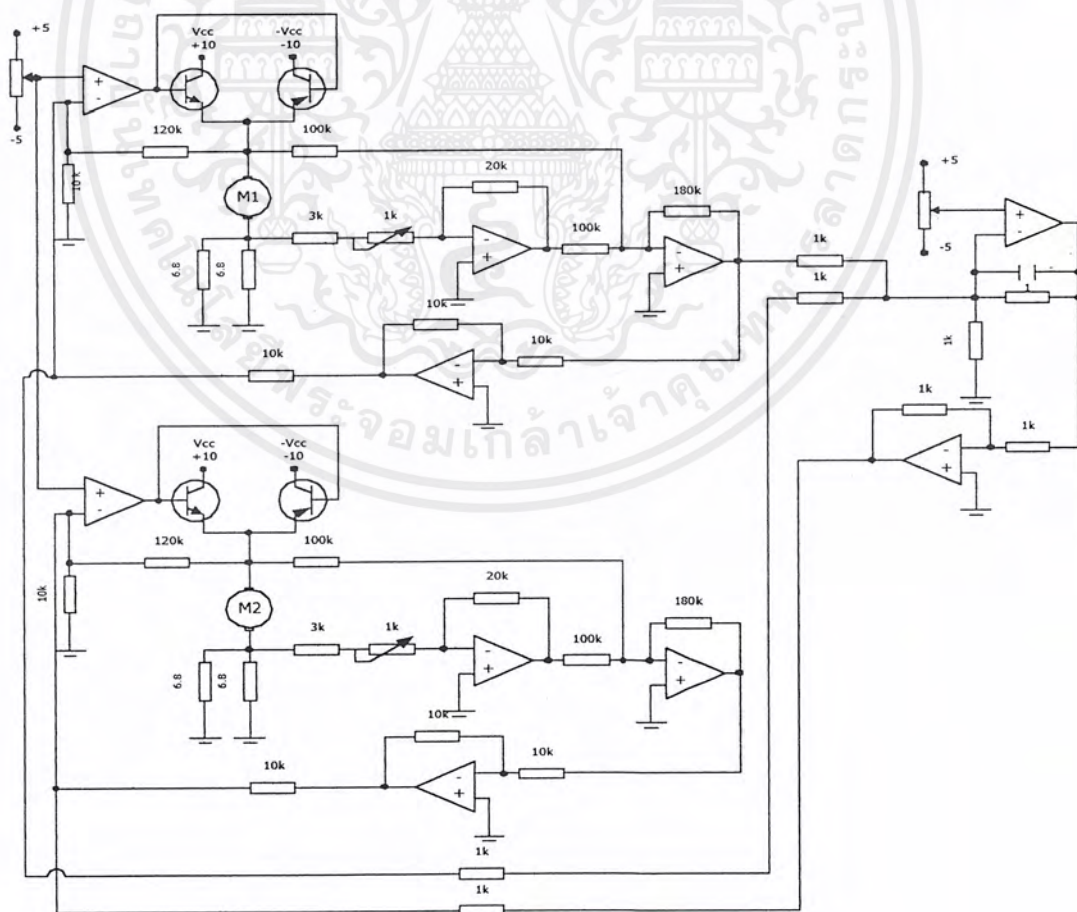
ถ้าต้องการควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ให้เดินพร้อมกันทั้ง 2 ด้าน คือการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ให้มีความเร็วเท่ากันนั้นจะต้องมี  $Sp$  เป็นตัวเดียวกัน และจากการเปลี่ยนแปลงของโหลดของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ที่ไม่เท่ากันดังนั้นจึงนำความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มาเปรียบเทียบกัน เป็นความแตกต่างของความเร็วจะกระทำการป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับค่า Sp เพื่อให้คอนโทรลเลอร์ทั้ง 2 ข้าง ปรับให้ความเร็วของมอเตอร์ให้เท่ากันดังบล็อกไดอะแกรมจาก บล็อกไดอะแกรมจะเห็นว่า Loop Integrate เป็นลูปที่เปรียบเทียบค่าความเร็วที่ แตกต่างของมอเตอร์ ของทั้ง 2 ตัว และจะมีค่า Bias คือเป็นการปรับให้หุ่นยนต์เกิดการเดียวกันนั้นคือการตั้งค่าความเร็วที่ แตกต่างขึ้นมาเอง โดยปรับให้มอเตอร์ตัวหนึ่งมีความเร็วเพิ่ม แล้วลดความเร็วของมอเตอร์อีกตัวใน เวลาเดียวกัน จากบล็อกไดอะแกรมสังเคราะห์เป็นวงจร ได้ดังภาพที่ 3.25



ภาพที่ 3.24 หุ่นยนต์แมงมุมชนิดคานเชื่อมต้อแจ้งพร้อมทั้งJoy Stickที่เป็นตัวป้อนSp ,Bias



ภาพที่ 3.25 วงจรควบคุมหุ่นยนต์แมงมุม 8 ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 บทสรุปกรณีการเดินที่กระเพื่อมของลำตัว

การเดินกระเพื่อมของ body ที่เกิดขึ้นมีตามกรณีดังนี้

1. จากกลไกขาที่มีการเคลื่อนไหวของก้านขา จะช่วยยกตัวหุ่นให้สูงสุด,ต่ำสุด มีผลต่อการทรงตัว ขณะก้าวเดิน
2. ชุดกลไกขาที่ออกแบบและตั้งเคราะห์ ค่าการกระเพื่อมของ body อยู่ช่วง  $180^{\circ}$  -  $360^{\circ}$  เนื่องจากเป็นช่วงที่ขาสัมผัสพื้นจึงเกิดการยกตัว body ในช่วงนั้น และขาชุดต่อไปจะหมุนมาสัมผัสพื้นเพื่อก้าวเดินต่อ
3. กลไกขาที่มีลำดับการทำงานซ้ายและขวาต่างกัน ตำแหน่งขาจะยกไม่เท่ากัน ทำให้ลำตัวเอียงตามความสูงในการยกขาของแต่ละซีก

ทั้ง 3 กรณีนี้เป็นปัญหาของหุ่นยนต์ 8 ขา แบบคานเชื่อมต่อนิ่ง จากตารางการทดลอง แสดงให้เห็นค่าทั้ง 3 ระดับของความสูงที่ขาขามีผลต่อการเอียงของลำตัว ทั้งขณะที่เดินอยู่หรือยืนอยู่กับที่ ผลของการกระเพื่อมของลำตัวทำให้หุ่นเดินไม่ตรงตามทางที่ให้เดินไปมากนัก

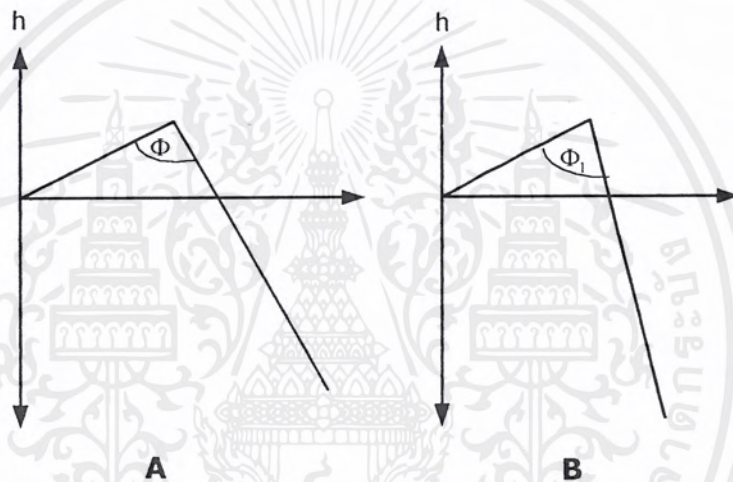
ในส่วนชุดควบคุมจะทำงานสัมพันธ์กับกลไก การสร้างรูปแบบการเดินจะเป็นตามการป้อนค่าจากผู้ควบคุม ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทที่ 4

# การออกแบบหุ่นยนต์ 8 ขา แบบ Four-Bar Linkage

### 4.1 กล่าวนำ

หุ่นยนต์ 8 ขา แบบคานเชื่อมต่อแข็งพบปัญหาในการเดินที่มีการกระเพื่อมของลำตัว ผลมาจากก้านขา วิธีการแก้ปัญหาที่เหมาะสมลดการกระเพื่อมของการเดินโดยใช้แนวคิดที่ว่าลดช่วงยกของขาให้น้อยลงจะช่วยลดการกระเพื่อมได้มากการเดินของหุ่นจึงมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น



ภาพที่ 4.1 การปรับมุมขา

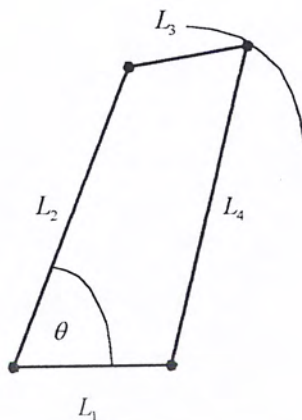
จากภาพที่ 4.1 A เป็นขาแบบเดิม ภาพที่ 4.1 B เป็นขาที่สามารถปรับลดความสูงได้โดยให้ช่วงยกลดลงช่วงที่สัมผัสพื้นความสูงเพิ่มขึ้น

วิธีที่จะลดความสูงนี้ใช้หลักการของ 4 คานเชื่อมต่อ(Four bar linkage) มาประยุกต์ในการออกแบบสร้างกลไกขาแบบใหม่

### 4.2 การออกแบบขา 4 คานเชื่อมต่อ

แนวคิดที่จะปรับมุมขาเพื่อลดการกระเพื่อมของลำตัว โดยนำคานเชื่อมต่อมาออกแบบใช้เป็นขา หุ่นยนต์ตามภาพที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

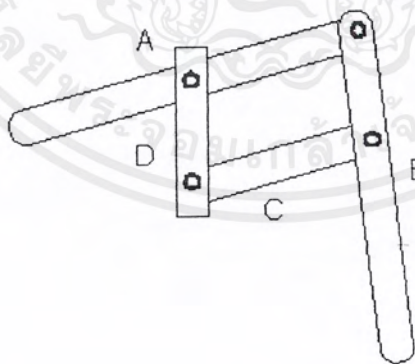


ภาพที่ 4.2 Four Bar Linkage

การออกแบบของ Four bar จะมี Link ตัวที่ 1 เป็นฐานของ Four bar Link ที่ 2 เป็นตัวขับ link อื่น ๆ เมื่อให้มุม  $\theta$  เปลี่ยนแปลง ส่งผลให้คานที่เคลื่อนย้ายตาม Link ที่ 2

### 4.3 การออกแบบก้านขา

หุ่นยนต์แบบคานเชื่อมต่อแข็ง มีการเคลื่อนไหวแบบหมุนควงผ่านจุดหมุนขาแบบ Four bar ให้การเคลื่อนไหวเหมือนขาแบบแรกที่ไม่มี Link เช่นกัน มีการปรับมุม Link ตามคุณสมบัติของ Four bar และเพิ่มช่วงคานที่ 3 ให้ยาวเพื่อใช้เป็นขา ดังภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 ก้านขาที่ได้รับการออกแบบ

กำหนดให้คานต่าง ๆ มีค่าดังนี้

คานที่ 1 ความยาวจากจุดเชื่อมต่อ 2 cm

คานที่ 2 ความยาวระหว่างเชื่อมต่อ 4.5 cm

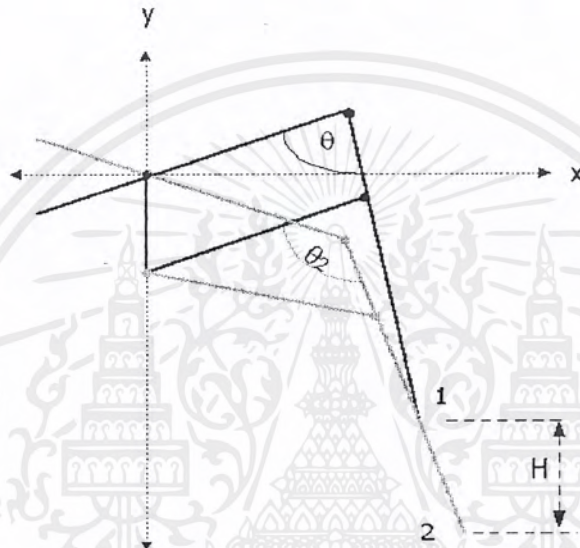
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คานที่3 ความยาวระหว่างจุดเชื่อมต่อ 2 cm และเพิ่มความยาวคานออก 7.5 cm ใช้เป็นขา

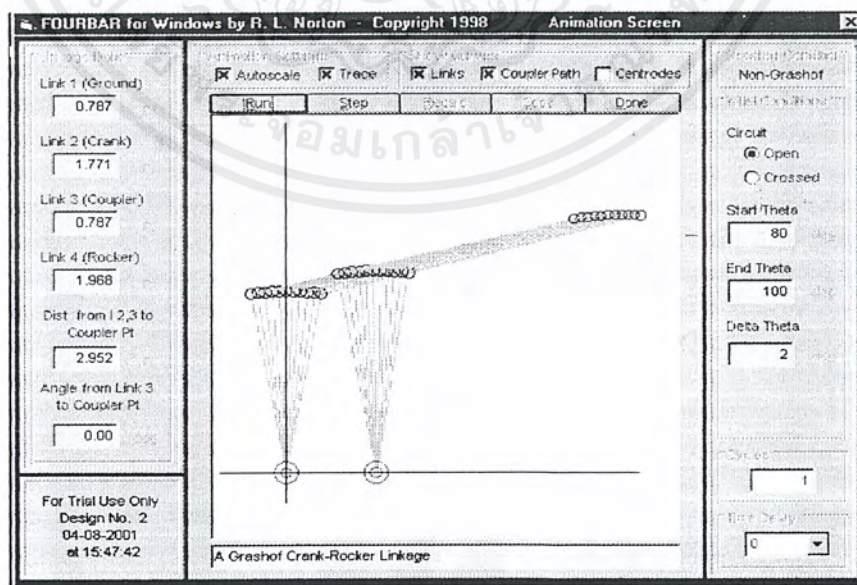
คานที่4 ความยาวระหว่างจุดเชื่อมต่อ 5 cm

ใช้ Software simulate Four-bar จะเห็นการทำงานของคานเชื่อมต่อ 4 จุด (Four-bar) ได้ดังภาพที่ 4.5

ภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นเมื่อป้อนค่า  $\theta$  ให้ Link 2 คานจะเปลี่ยนตำแหน่งตามค่ามุมการเคลื่อนที่ของ Link ค่า เป็นช่วงที่ขาเคลื่อนที่ในช่วงสูงสุดต่ำสุด ที่ปลายคานแสดงถึงแนวการ ยกขา



ภาพที่ 4.4 มุมของขาเมื่อมีการเคลื่อนที่

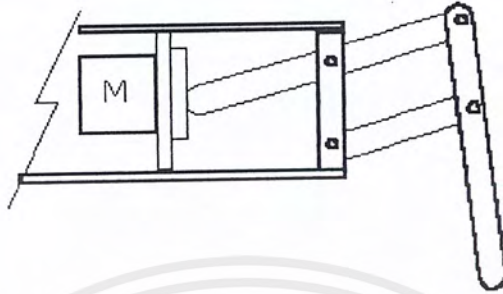


ภาพที่ 4.5 Simmulate ของ Four Bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

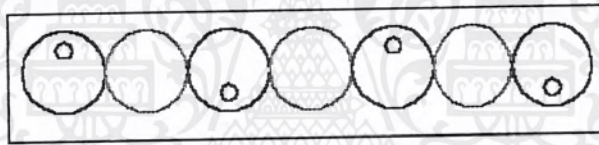
#### 4.4 ออกแบบชุดกลไกขา

ให้คานเชื่อมต่อแบบ 4 จุดต่อกับชุดเฟืองให้การเคลื่อนที่หมุนควงบนจุดหมุนเหมือนหุ่นยนต์แบบคานเชื่อมต่อแข็งเพื่อให้รูปแบบการเดินเหมือนเดิมดังภาพที่ 4.6



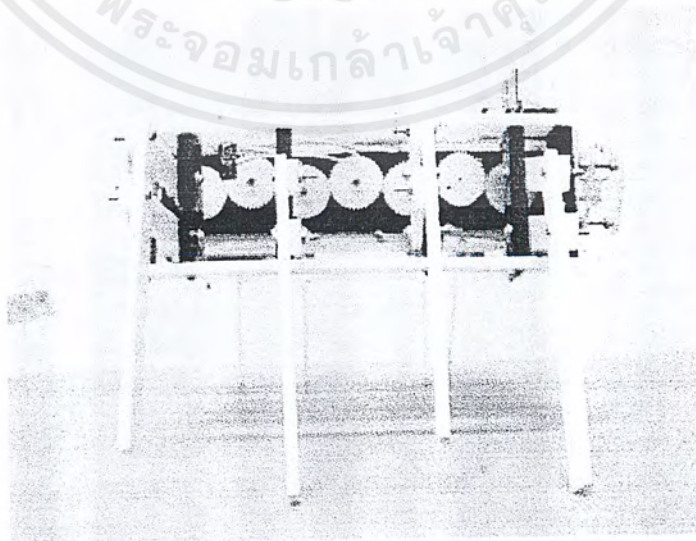
ภาพที่ 4.6 ชุดกลไกขา

กำหนดให้ลำดับการทำงานของก้านขาให้ยกสลับกัน  $180^\circ$  เพื่อให้กลไกขาสร้างจังหวะยกขาสลับกัน นำชุดเฟืองข้างมาจัดลำดับดังภาพที่ 4.7



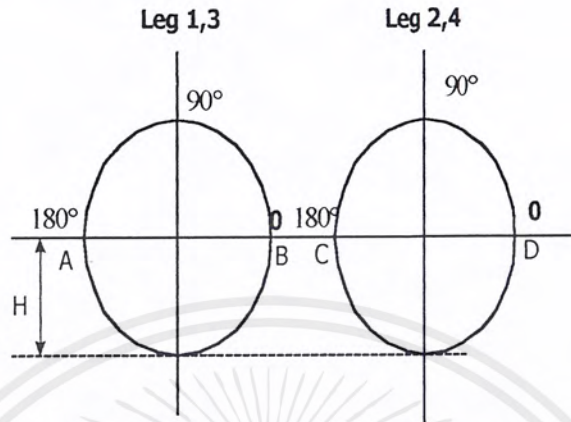
ภาพที่ 4.7 การวางชุดเฟือง

เมื่อทำการสังเคราะห์ตามทีออกแบบจากอุปกรณ์ที่หาง่ายจะได้ดังภาพที่ 4.8



เอกสารนี้ภาพที่ 4.8 ตั้งเครื่องให้ชุดขาหุ่นยนต์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงห่างของการยกขา ช่วงนี้ชุดกลไกขาทำให้เกิดการกระเพื่อม  $\theta = 180^\circ - 360^\circ$  เป็นช่วงที่เริ่มสัมผัสพื้นและยกออกจากพื้น

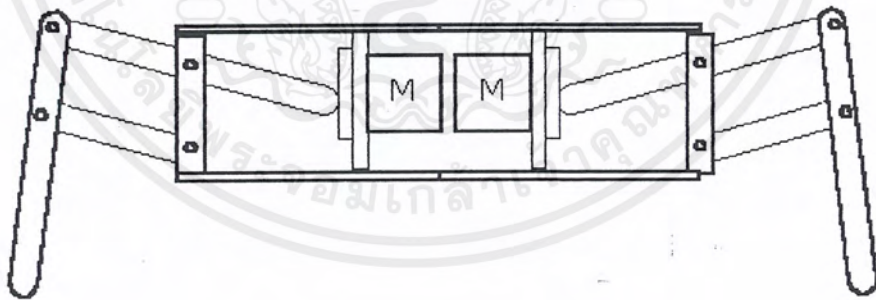


ภาพที่ 4.9 มุมของช่วงการยกขา

ช่วงที่ลำตัวกระเพื่อมจะเท่ากับ  $H_{Leg1,3} - H_{Leg2,4}$

#### 4.5 การออกแบบลำตัวหุ่น

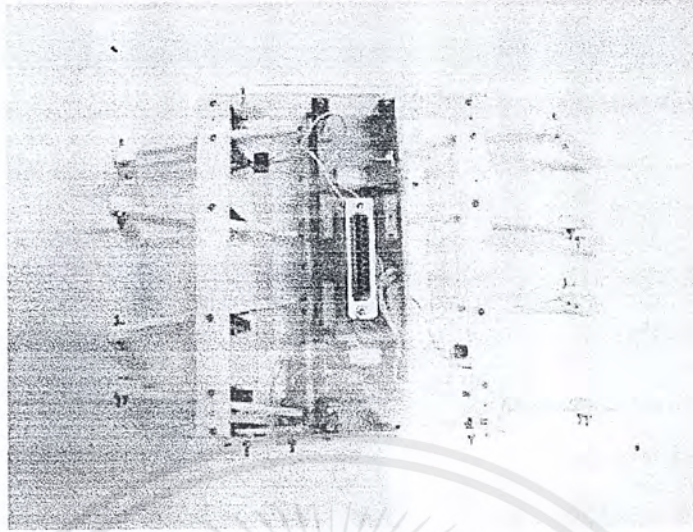
นำชุดกลไกที่ออกแบบทุกส่วนมาประกอบดังภาพที่ 4.10 ชุดกลไกซี่กซ้ายซี่กขวาเป็นอิสระ จากกันโดยจัดวางชุดกลไก ตรงกลางตัวหุ่นด้านเฟืองขับออก ดังภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 การออกแบบลำตัวหุ่น

จากการออกแบบตัวหุ่นยนต์ที่สมบูรณ์แล้วจึงนำมาทำการสังเคราะห์เป็นตัวหุ่นยนต์ โดยใช้อุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเบาและมีความแข็งแรง และหาง่าย หุ่นยนต์ที่ทำการสังเคราะห์เสร็จแล้วจะได้ดังภาพที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



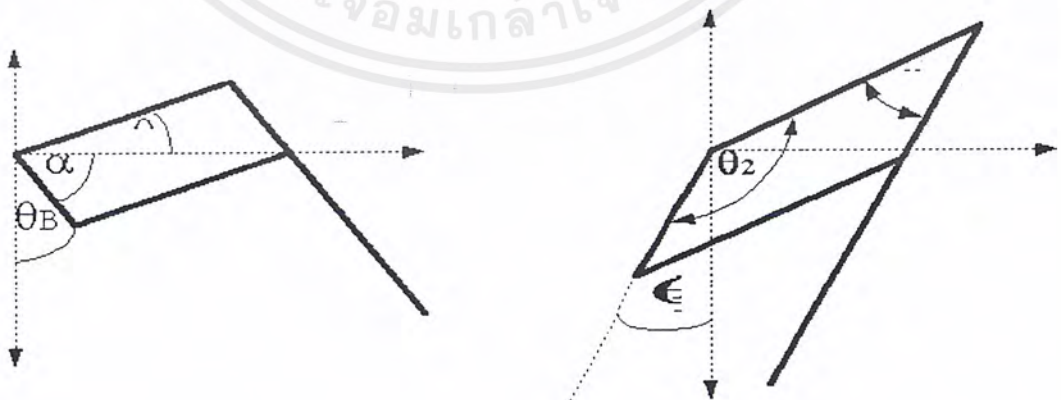
ภาพที่ 4.11 หุ่นยนต์ที่ทำการสังเคราะห์ลำตัวหุ่นเสร็จแล้ว

#### 4.6 วิธีลดการกระเพื่อมในช่วงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

วิธีที่ใช้เพื่อปรับการเดินที่กระเพื่อมให้ลดลงน้อยที่สุด คือ มุมขา Four - Bar ควรจะมีค่ามากเพื่อที่จะให้ตัวหุ่นเดินได้เสถียรภาพดีขึ้น อันเนื่องจากความสูงของปลายขาที่ระดับพื้นลดลง แนวทางในการปรับมุมขาให้มากขึ้นกว่าแบบเดิมคือการปรับมุม Link I

1. ให้  $\theta_1$  ช่วงบวกตัวคานจะกางออกมากค่า  $h$  จะลดลง
2. ให้  $\theta_1$  ช่วงลบตัวคานจะหุบเข้าค่า  $h$  จะมากขึ้น

เงื่อนไขของมุม  $\theta$  ยังคงเงื่อนไขเดิมทั้งหมดไม่ว่า  $\theta_1$  จะปรับไปเท่าใดก็ตามการเคลื่อนที่ของขาจะจำลองบนโปรแกรมได้ดังนี้



ภาพที่ 4.12 การปรับมุมขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

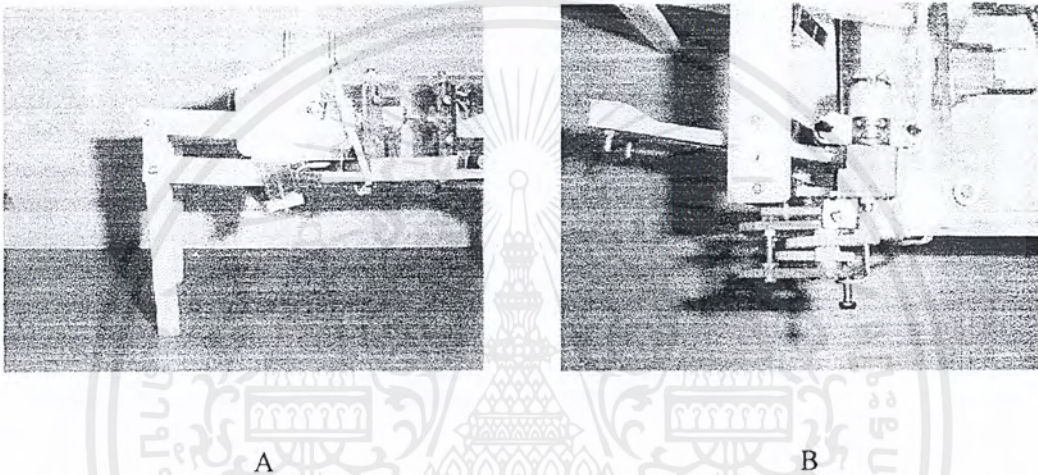
#### 4.6.1 สังกะระห้ซุดกลไกแบบปรับมุมขา

1. ใช้ซุดกลไกขาแบบเดิมมาประกอบกับซุดกลไกปรับมุมขาได้
2. สภาวะในการปรับค่ามุมมี  $\theta_1$  ช่วงบวกและลบเป็นค่ามุมหลักในการปรับมุมขาในขา

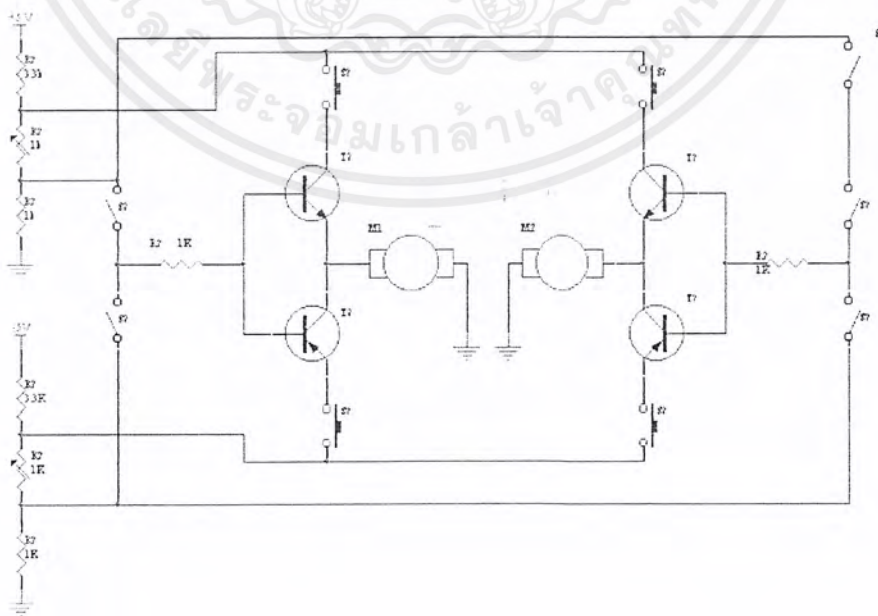
แบบ Four-Bar

3. กำหนดปรับมุมขาจะกระทำโดยผู้ควบคุม

ซุดกลไกปรับค่ามุม  $\theta_1$  ประกอบด้วยมอเตอร์กับซุดเกียร์บล็อกค้อกับซุดกลไกขาแสดงดังต่อภาพที่ 4.13



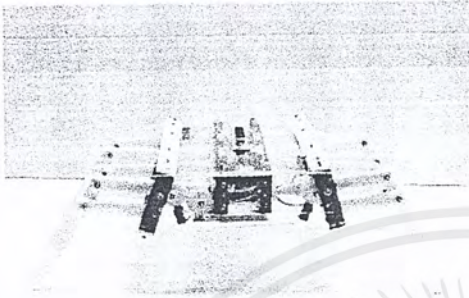
ภาพที่ 4.13 ซุดกลไกปรับมุมขา



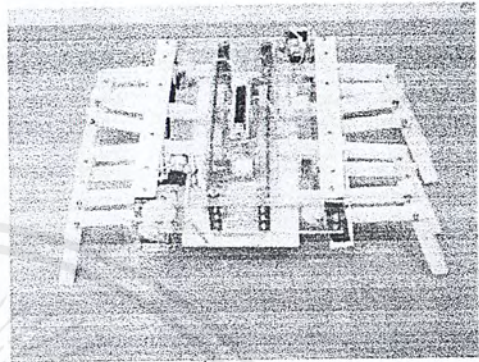
เอกสารภาพที่ 4.14 วงจรปรับมุมขาการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดกลไกประกอบด้วย เฟืองทดกำลัง , เฟืองปรับมุมขา , มอเตอร์ และวงจรควบคุมมอเตอร์ปรับมุมขา

เหตุที่ต้องใช้ชุดเฟืองทดกำลังเพราะกำลังขับของมอเตอร์ไม่เพียงพอที่จะยกและดันตัวหุ่นทางด้านข้างได้ ชุดเฟืองทดกำลังที่ใช้มีอัตราทด 25:1



ภาพก่อนติดตั้งชุดกลไกปรับมุมขา



ภาพหลังติดตั้งชุดกลไกปรับมุมขา

ภาพที่ 4.15 ชุดกลไกปรับมุมขา

ชุดวงจรควบคุมจะใช้ Limit switch มาใช้ในการควบคุมมอเตอร์ที่ทำหน้าที่ปรับมุมของขา โดยจะติดไว้ที่ขอบลำตัวของหุ่นยนต์ ดังแสดงในภาพที่ 4.15

## บทที่ 5

### การทดลอง

#### 5.1 การทดลองเปรียบเทียบระดับความสูง

วัตถุประสงค์เพื่อทดสอบหุ่นยนต์ที่ออกแบบสามารถลดการกระเพื่อมในการเดิน โดยที่มุมขาของหุ่นยนต์เท่ากับ  $103^\circ$  ณ ตำแหน่งเฟืองขับ  $\theta = 0$

#### 5.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ป้อนค่าSpeed ให้Controller สังเกตมุมของเฟืองขับให้อยู่ที่ตำแหน่ง  $\theta$  ที่ต้องการวัด นำค่าที่วัดจากความสูงจากพื้นถึงจุดหมุนของคาน ได้กรอกในตารางที่ 1, 2, 3
2. ปรับมุม  $\theta_1$  ของคานขาตามตารางที่ 2, 3 แล้วใส่ค่าที่วัดจากความสูงจากพื้นถึงจุดหมุนของคาน
3. ป้อนค่าSpeed, Bias ตามตารางที่ 4 สังเกตการเดินของหุ่นยนต์ 8 ขา แล้วกรอกผลใส่ตาราง

ตารางที่ 5.1 การทดสอบเปรียบเทียบช่วงความสูงในยกขาก้าวเดิน

$\theta$ (องศา)	ระดับความสูงแบบคานแข็ง (cm)	ระดับความสูงแบบ Four Bar (cm)
0	9.2	8.8
90	7.9	8.2
180	9.2	8.8
270	10.2	9.5
360	9.2	8.8

ตารางที่ 5.2 การทดลองปรับค่ามุม  $\theta_1$  ของคานที่ 1 เพื่อพิจารณาความสูงของลำตัว

มุม $\theta$ ของการหมุน (องศา)	ความสูงเมื่อ $\theta_1 = 30^\circ$ (cm)	ความสูงเมื่อ $\theta_1 = -30^\circ$ (cm)	ความสูงเมื่อ $\theta_1 = 0^\circ$ (cm)
0	5.9	9.2	8.8
90	5.5	8.5	8.2
180	5.9	9.2	8.8
270	6.4	10.1	9.5
360	5.9	9.2	8.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 การทดลองการเดินปรับค่ามุม  $\theta_1$  ของขาซิกซ้ายและขวาให้ต่างกัน

$\theta$ (องศา)	ด้านซ้ายปรับมุม $\theta_1 = 30^\circ$ (cm)	ด้านขวาปรับมุม $\theta_1 = -30^\circ$ (cm)	ค่ากระเพื่อมที่ลำตัว (cm)
0	5.9	9.2	3.3
90	5.5	8.5	3
180	5.9	9.2	3.3
270	6.4	10.1	3.7
360	5.9	9.2	3.3

ตารางที่ 5.4 การทดลองความสามารถในการเดิน ของหุ่นยนต์ 8 ขา

การทดสอบหุ่นยนต์	Rigid Bar	Four Bar	หมายเหตุ
เดินตรง	O	O	ความเร็วมอเตอร์เท่ากัน
ถอยหลัง	O	O	ความเร็วมอเตอร์เท่ากัน
เลี้ยวซ้าย	O	O	ความเร็วมอเตอร์ต่างกัน
เลี้ยวขวา	O	O	ความเร็วมอเตอร์ต่างกัน
กางขาทั้งสองข้างออก		O	$\theta_1$
หุบขาทั้งสองข้าง		O	$-\theta_1$
เอียงขาขวา		O	
เอียงขาซ้าย		O	
เดินกระเพื่อมมาก	O		$\Delta h$ มาก
เดินกระเพื่อมน้อย		O	$\Delta h$ น้อย



ภาพที่ 5.1 หุ่นยนต์แมงมุม 8 ขาที่นำมาทดสอบวัดค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### บทสรุป

หุ่นยนต์ 8 ขา แบบคานเชื่อมต่อแข็ง มีปัญหาในการเดินที่ลำตัวหุ่นกระเพื่อมตามจังหวะของการก้าวขา ทำให้หุ่นยนต์เดินไม่ตรงแนวเส้นทดสอบการเดิน

แนวทางที่ใช้ลดปัญหาของการเดินที่กระเพื่อมต้องลดช่วงยกขาให้น้อยลง วิธีที่นำมาใช้คือนำหลักการของ Four - Bar Link มาใช้ ในช่วงที่หุ่นยนต์ก้าวเดินมุมภายในขาจะปรับตามคานที่บังคับมุมช่วงยกจะลดลง และ เมื่อได้ปรับมุมขาให้มากขึ้นช่วงยกจะลดลง

ในการทดลองแสดงให้เห็นช่วงความแตกต่างในการยกขาที่ก้าวเดิน ของขาแบบ 4 คานเชื่อมต่อจะน้อยกว่าขาแบบคานเชื่อมต่อแข็ง โดยที่มุมที่ป้อนให้กลไกขาเหมือนกัน ช่วงการกระเพื่อมของลำตัวขาแบบ Four Bar จะลดน้อยลงมาก

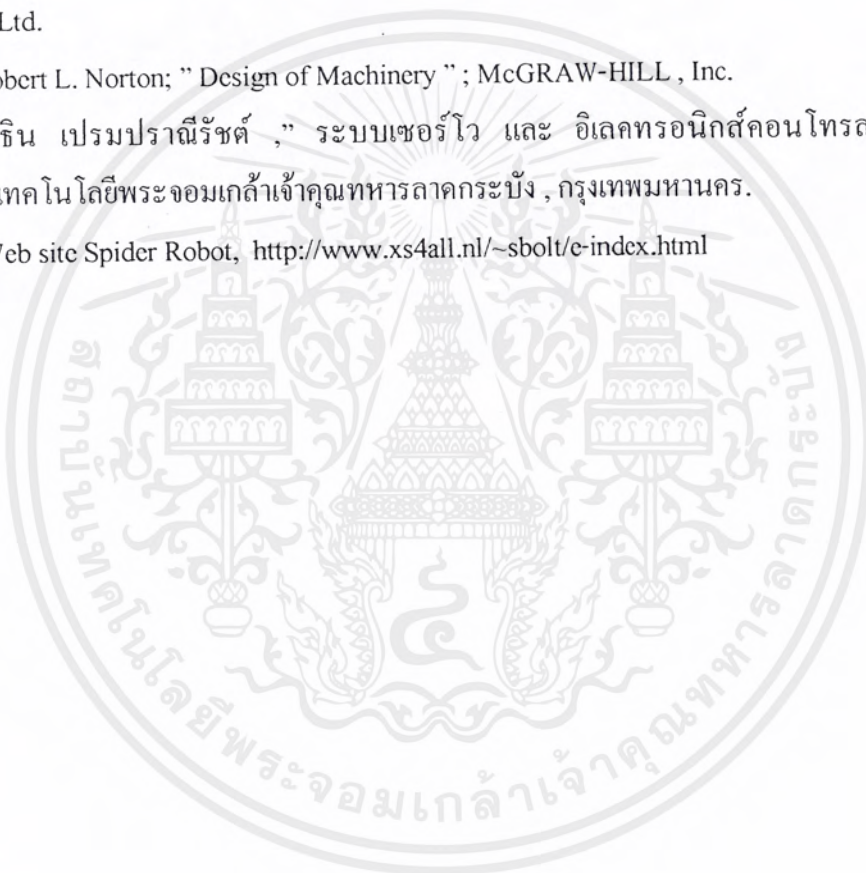
เมื่อเพิ่มมุม  $\theta_1$  ของ Link 1 กลไกขาจะแผ่ออก ช่วงยกขาของหุ่นลดลง การกระเพื่อมของลำตัวลดน้อยลงมากจนเกือบไม่กระเพื่อม

เมื่อลดมุม  $\theta_1$  ของ Link 1 ตัวหุ่นจะยกสูงขึ้นขาจะหุบเข้าช่วงยกของหุ่นจะเพิ่มขึ้นการเดินมีกระเพื่อมที่ลำตัวมาก

ทั้งสองวิธีในการเพิ่มลดมุม Link แสดงให้เห็นผลของการปรับมุมขาที่มีผลต่อการเดินที่ทำให้ลำตัวหุ่นยนต์ 8 ขากระเพื่อมที่ลำตัว ตามช่วงยกของขาหุ่น

## บรรณานุกรม

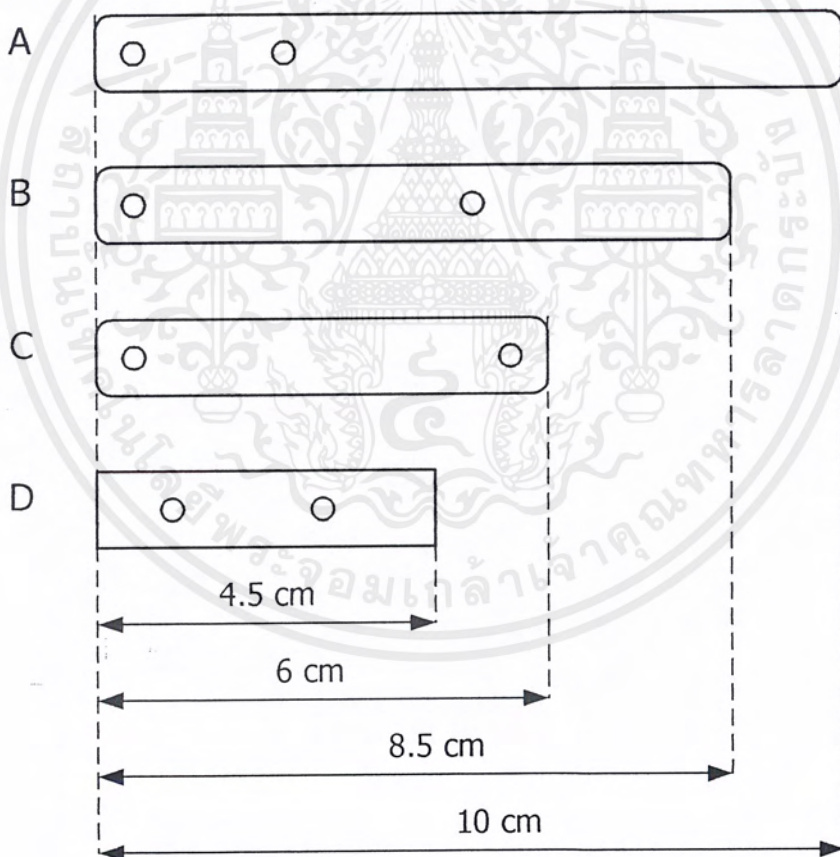
- [1] Hamilton H. mabic , chavles F. Reinholtz ,“ MECHANISMS AND DYNAMICS OF MACHINERY “, Fourth Edition , JOHN WILEY & SONS , Inc., 1987
- [2] Richard C. Dorf , Robert H. Bishop ,” MODERN CONTROL SYSTEM “, Eighth Edition , ADDISON WESLEY LONGMAN , Inc.
- [3] Joseph L. Jones , Anita M. Flynn ,” Mobile Robots Inspiration to Implementation “, A K Peters , Ltd.
- [4] Robert L. Norton; ” Design of Machinery ”; McGRAW-HILL , Inc.
- [5] โยธิน เปรมปราณีรัชต์ ,” ระบบเซอร์โว และ อิเล็กทรอนิกส์คอนโทรลมอเตอร์ “, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง , กรุงเทพมหานคร.
- [6] Web site Spider Robot, <http://www.xs4all.nl/~sbolt/e-index.html>



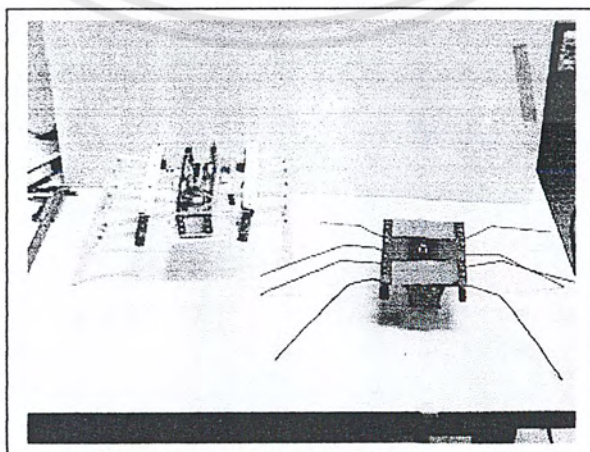
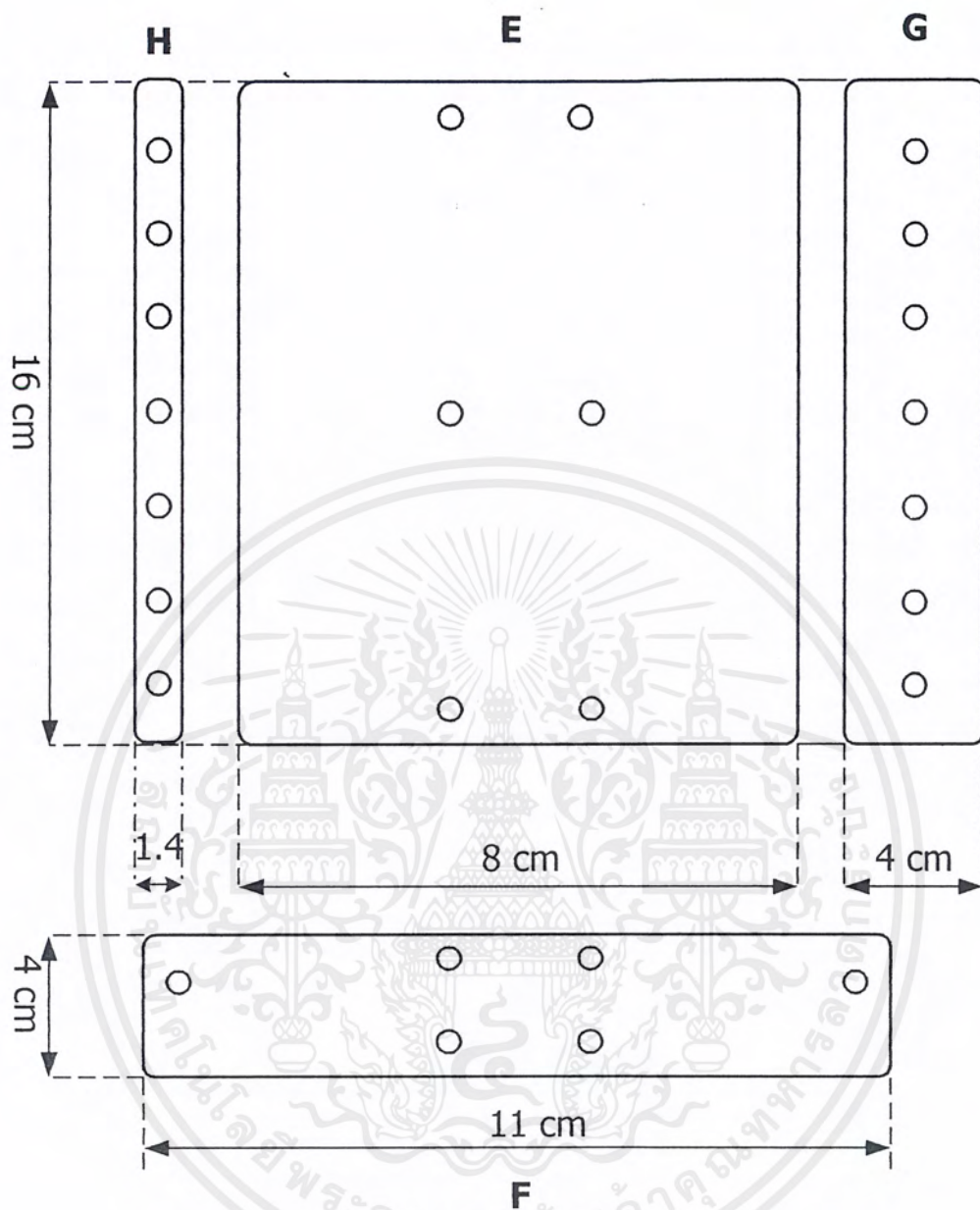
## ภาคผนวก

ขนาดของส่วนประกอบหุ่นยนต์แมงมุม 8 ขา มีดังนี้

- ชุดกลไกขาประกอบด้วย ชิ้นส่วนกลไกขา A 8 ชิ้น , B 8 ชิ้น , C 8 ชิ้น และ D 20 ชิ้น
- ชุดลำตัวหุ่นประกอบด้วย ชิ้นส่วน E, F, G อย่างละ 2 ชิ้น H 4 ชิ้น
- มอเตอร์เกียร์ 4 ตัว
- เฟืองขับ 16 อัน, ชุดเฟืองทด 2 ชุด
- สกรู, น๊อต, แผ่นวัสดุที่นำมาสร้างตัวหุ่นยนต์

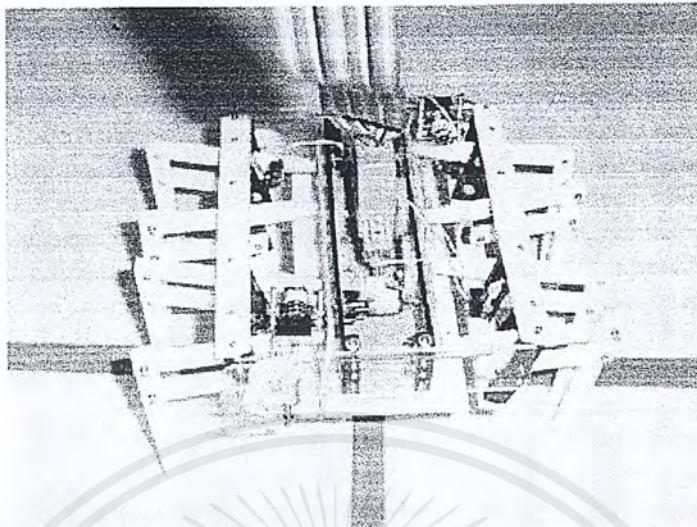


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

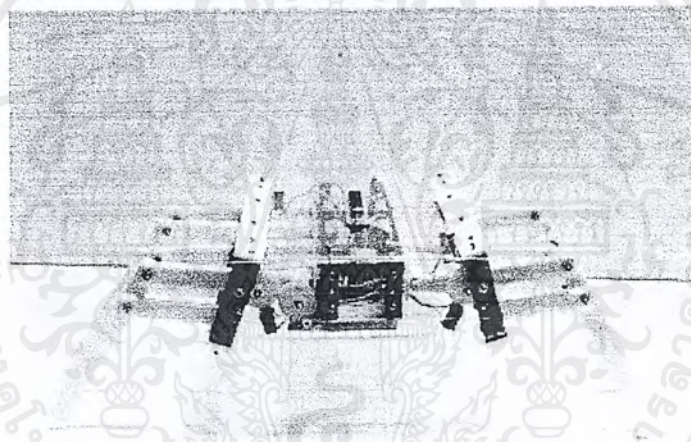


ภาพ A การเปรียบเทียบหุ่นยนต์แบบ Four-Bar 8 ขา กับหุ่นยนต์แบบ Rigid Bar 8 ขา  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประมวลภาพหุ่นยนต์ แบบ Four-Bar 8 ขา



ภาพB เมื่อหุ่นยนต์อยู่ในช่วง  $-\theta_1$  ลำตัวหุ่นจะยกสูงจากพื้น

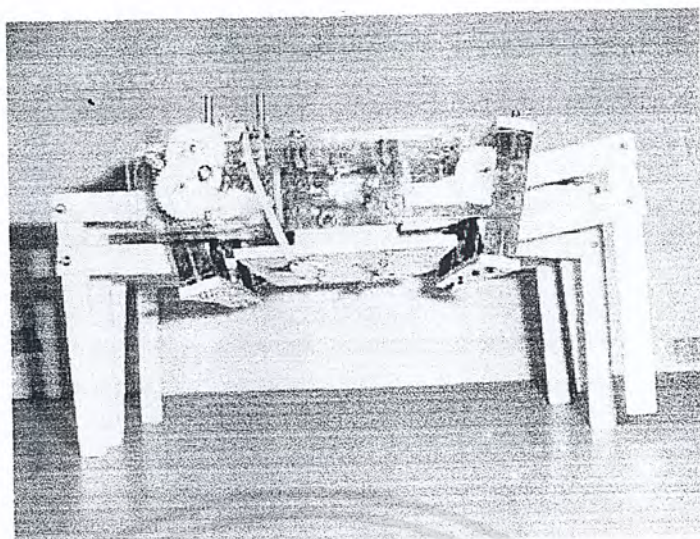


ภาพC เมื่อหุ่นยนต์ขึ้นเมื่อ  $+\theta_1$  ความสูงของลำตัวจะลดต่ำลง

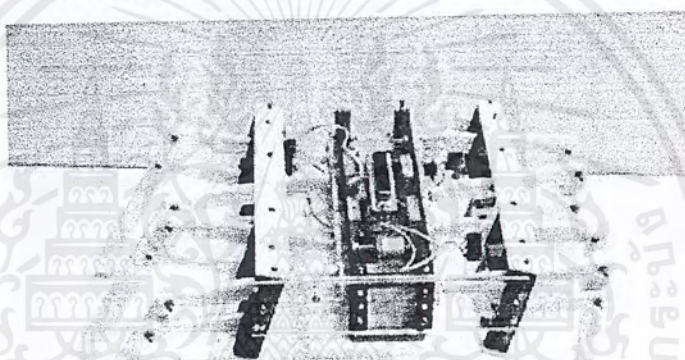


ภาพD เมื่อ  $\theta = 0$  และ  $\theta = 0$  จะเป็นความสูงจริงของหุ่นยนต์

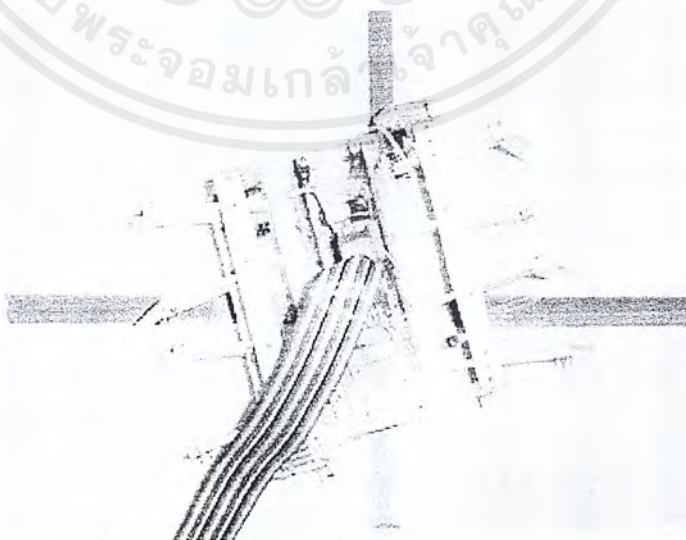
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยเป็นการเขียนขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพE ในขณะที่เดินเดียวSpeed Motor จะต่างกัน



ภาพF เมื่อปรับ $\theta$ , ซิกซายขวาให้แตกต่างกัน

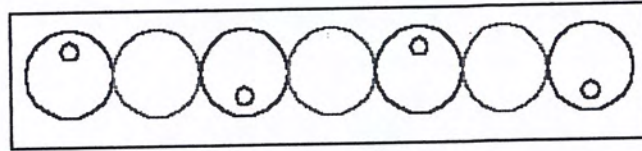


ภาพG เมื่อทดสอบการเดินเดียวของหุ่นยนต์ แบบ Four-Bar 8 ขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ขั้นตอนการสร้างหุ่นยนต์แบบ 8 ขา

1. เริ่มจากการสร้างชุดเฟืองขับ ให้ติดตั้งเฟืองบน แผ่น G แล้วยึดมอเตอร์ดังภาพ H และจัดตำแหน่งเฟือง ให้ต่างกัน 180 องศา

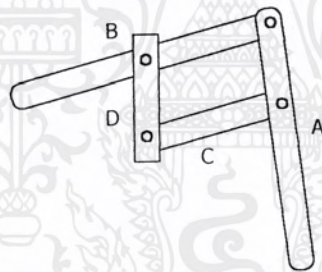


+



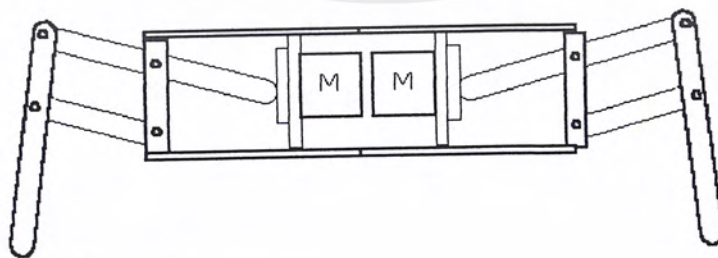
ภาพ H การประกอบชุดเฟืองขับ

2. นำชุดเฟืองมาประกบกับแผ่น E และ D ทำเป็นลำตัวหุ่นยนต์
3. ทำชุดกลไกขาแบบ Four-Bar ประกอบทั้งหมด 8 ชุด ดังภาพ I



ภาพ I แสดงถึงกลไกขา

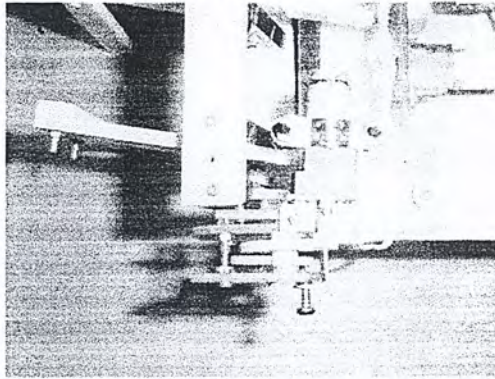
4. นำแผ่น H มาประกอบกลไกที่แผ่น D แล้วนำไปประกบกับลำตัวดังภาพ J



ภาพ J ยึดชุดกลไกทั้งหมด

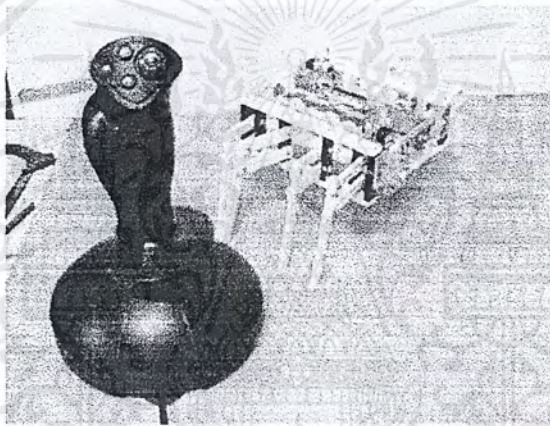
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ประกอบมอเตอร์กับชุดเฟืองทด สำหรับปรับมุมขา เข้ากับส่วนกลไก ขาทั้ง 2 ซีคองภาพ K



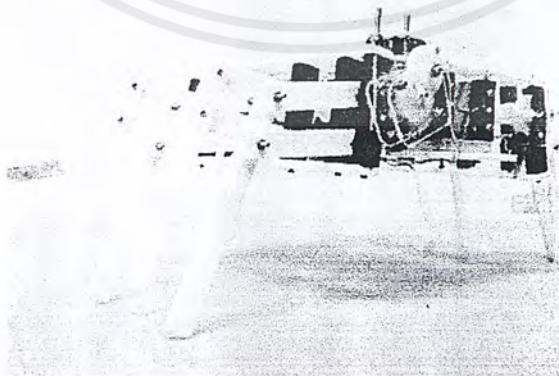
ภาพ K แสดงชุดเฟืองทด ปรับมุม  $\theta$  ของชุดกลไกขา

6. สังเคราะห์ชุดควบคุมกลไกสัมพันธ์ และใช้ Joy Stickเป็นตัวป้อนค่าต่างๆ ดังภาพ L



ภาพ L หุ่นยนต์กับชุดควบคุม

7. สอบเทียบค่า (Calibration) ปรับวงจรควบคุม ในการควบคุมหุ่นยนต์  
8. ทดสอบการเดิน ตามความสามารถของกลไก จะได้หุ่นยนต์ที่สำเร็จดังภาพ M



ภาพ M หุ่นยนต์เมื่อสร้างเสร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LM124, LM124A, LM224, LM224A LM324, LM324A, LM324Y, LM2902, LM2902Q QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS

SLOS066E—SEPTEMBER 1975—REVISED FEBRUARY 1997

- **Wide Range of Supply Voltages:**  
Single Supply . . . 3 V to 30 V  
(LM2902 and LM2902Q  
3 V to 26 V), or Dual Supplies
- **Low Supply Current Drain Independent of Supply Voltage . . . 0.8 mA Typ**
- **Common-Mode Input Voltage Range Includes Ground Allowing Direct Sensing Near Ground**
- **Low Input Bias and Offset Parameters:**  
Input Offset Voltage . . . 3 mV Typ  
A Versions . . . 2 mV Typ  
Input Offset Current . . . 2 nA Typ  
Input Bias Current . . . 20 nA Typ  
A Versions . . . 15 nA Typ
- **Differential Input Voltage Range Equal to Maximum-Rated Supply Voltage . . . 32 V (26 V for LM2902 and LM2902Q)**
- **Open-Loop Differential Voltage Amplification . . . 100 V/mV Typ**
- **Internal Frequency Compensation**

## description

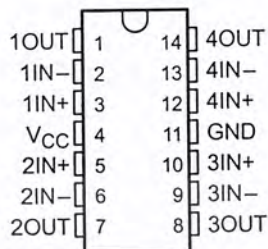
These devices consist of four independent high-gain frequency-compensated operational amplifiers that are designed specifically to operate from a single supply over a wide range of voltages. Operation from split supplies is also possible when the difference between the two supplies is 3 V to 30 V (for the LM2902 and LM2902Q, 3 V to 26 V) and  $V_{CC}$  is at least 1.5 V more positive than the input common-mode voltage. The low supply current drain is independent of the magnitude of the supply voltage.

Applications include transducer amplifiers, dc amplification blocks, and all the conventional operational amplifier circuits that now can be more easily implemented in single-supply-voltage systems. For example, the LM124 can be operated directly from the standard 5-V supply that is used in digital systems and easily provides the required interface electronics without requiring additional  $\pm 15$ -V supplies.

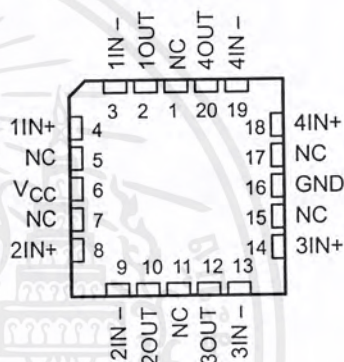
The LM2902Q is manufactured to demanding automotive requirements.

The LM124 and LM124A are characterized for operation over the full military temperature range of  $-55^{\circ}\text{C}$  to  $125^{\circ}\text{C}$ . The LM224 and LM224A are characterized for operation from  $-25^{\circ}\text{C}$  to  $85^{\circ}\text{C}$ . The LM324 and LM324A are characterized for operation from  $0^{\circ}\text{C}$  to  $70^{\circ}\text{C}$ . The LM2902 and LM2902Q are characterized for operation from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $125^{\circ}\text{C}$ .

LM124, LM124A . . . J OR W PACKAGE  
ALL OTHERS . . . D, DB, N OR PW PACKAGE  
(TOP VIEW)

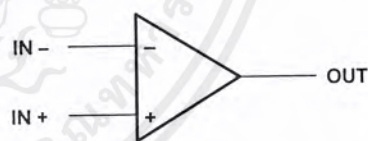


LM124, LM124A . . . FK PACKAGE  
(TOP VIEW)




NC — No internal connection

## symbol (each amplifier)



PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

 **TEXAS  
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 1997, Texas Instruments Incorporated

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรมเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**LM124, LM124A, LM224, LM224A  
LM324, LM324A, LM324Y, LM2902, LM2902Q  
QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS066E- SEPTEMBER 1975 - REVISED FEBRUARY 1997

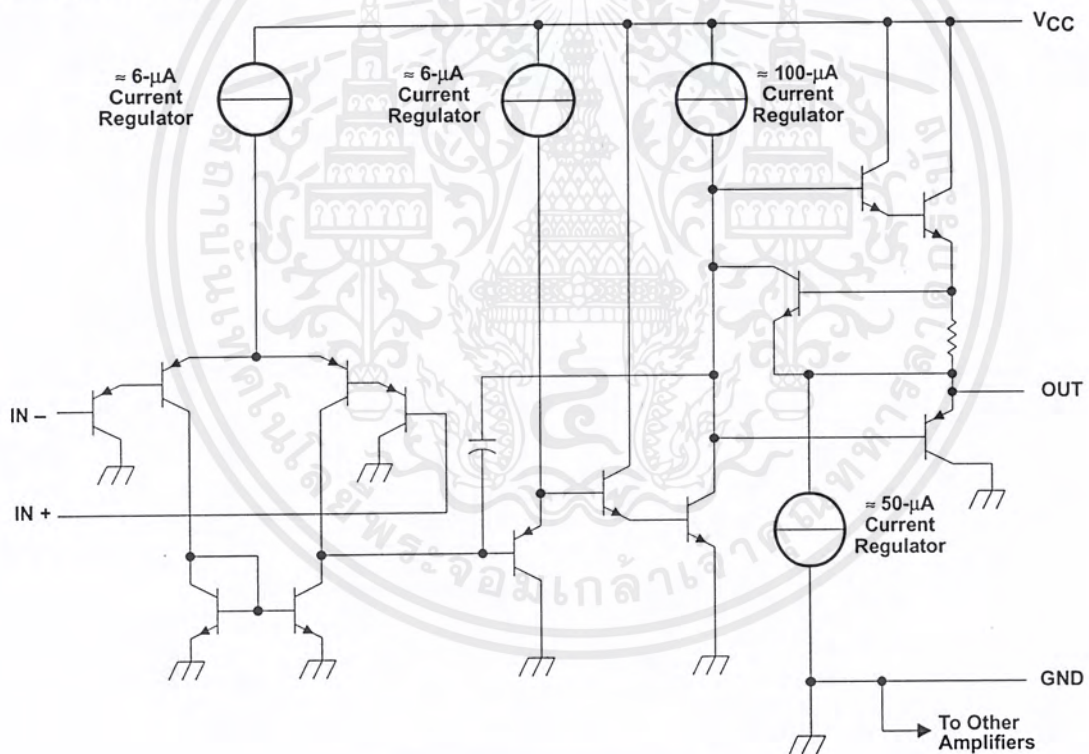
**AVAILABLE OPTIONS**

T <sub>A</sub>	V <sub>IO</sub> max AT 25°C	PACKAGED DEVICES							CHIP FORM (Y)
		SMALL OUTLINE (D)†	VERY SMALL OUTLINE (DB)‡	CHIP CARRIER (FK)	CERAMIC DIP (J)	PLASTIC DIP (N)	TSSOP (PW)‡	FLAT PACK (W)	
0°C to 70°C	7 mV	LM324D	LM324DBLE	—	—	LM324N	LM324PWLE	—	LM324Y
	3 mV	LM324AD	—	—	—	LM324AN	LM324APWLE	—	
-25°C to 85°C	5 mV	LM224D	—	—	—	LM224N	—	—	—
	3 mV	LM224AD	—	—	—	LM224AN	—	—	
-40°C to 125°C	7 mV	LM2902D	LM2902DBLE	—	—	LM2902N	LM2902PWLE	—	—
		LM2902QD	—	—	—	LM2902QN	—	—	
-55°C to 125°C	5 mV	—	—	LM124FK	LM124J	—	—	LM124W	—
	2 mV	—	—	LM124AFK	LM124AJ	—	—	—	

† The D package is available taped and reeled. Add the suffix R to the device type (e.g., LM324DR).

‡ The DB and PW packages are only available left-end taped and reeled.

**schematic (each amplifier)**



COMPONENT COUNT (total device)	
Epi-FET	1
Transistors	95
Diodes	4
Resistors	11
Capacitors	4



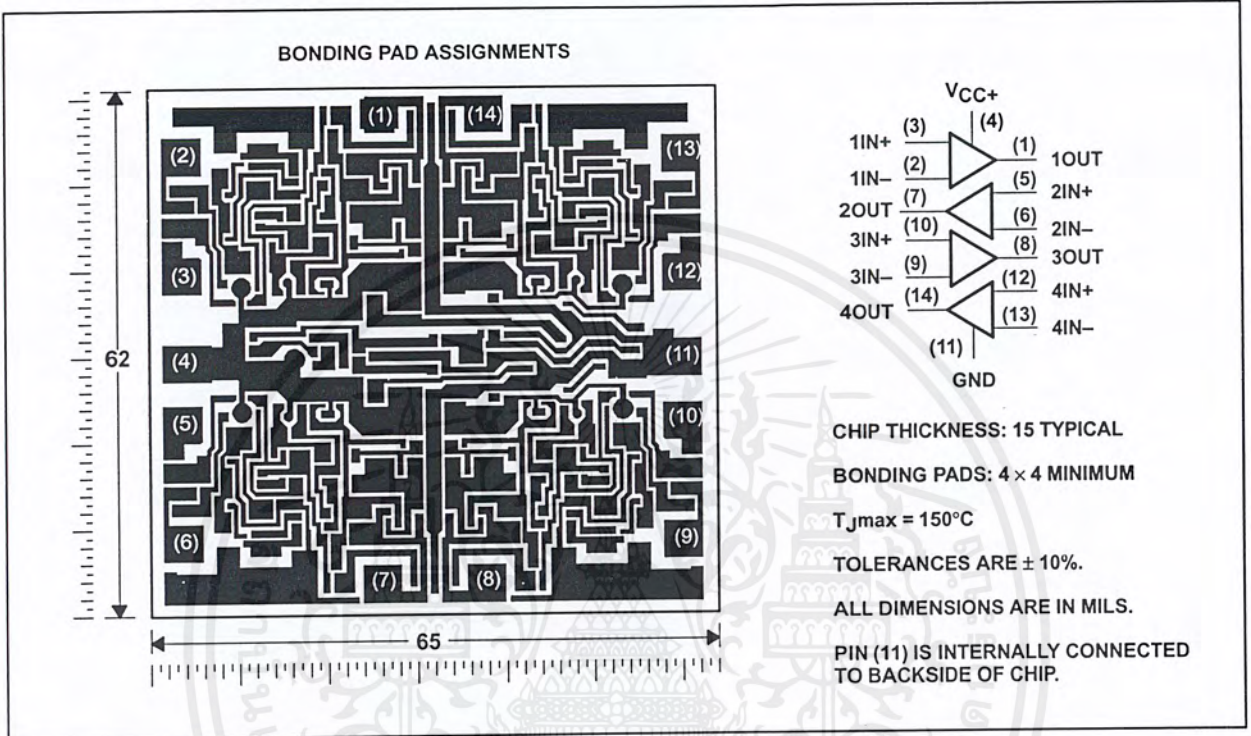
3-2 ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับช่างใช้ หรือเพื่อการค้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM124, LM124A, LM224, LM224A  
 LM324, LM324A, LM324Y, LM2902, LM2902Q  
**QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS**  
 SLOS066E—SEPTEMBER 1975—REVISED FEBRUARY 1997

**LM324Y chip information**

This chip, when properly assembled, displays characteristics similar to the LM324. Thermal compression or ultrasonic bonding may be used on the doped-aluminum bonding pads. Chips may be mounted with conductive epoxy or a gold-silicon preform.



POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

**LM124, LM124A, LM224, LM224A  
LM324, LM324A, LM324Y, LM2902, LM2902Q  
QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS066E—SEPTEMBER 1975—REVISED FEBRUARY 1997

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)†

		LM124, LM124A LM224, LM224A LM324, LM324A	LM2902, LM2902Q	UNIT
Supply voltage, $V_{CC}$ (see Note 1)		32	26	V
Differential input voltage, $V_{ID}$ (see Note 2)		$\pm 32$	$\pm 26$	V
Input voltage, $V_I$ (either input)		-0.3 to 32	-0.3 to 26	V
Duration of output short circuit (one amplifier) to ground at (or below) $T_A = 25^\circ\text{C}$ , $V_{CC} \leq 15\text{ V}$ (see Note 3)		unlimited	unlimited	
Continuous total dissipation		See Dissipation Rating Table		
Operating free-air temperature range, $T_A$	LM124, LM124A	-55 to 125		°C
	LM224, LM224A	-25 to 85		
	LM324, LM324A	0 to 70		
	LM2902, LM2902Q		-40 to 125	
Storage temperature range		-65 to 150	-65 to 150	°C
Case temperature for 60 seconds		FK package	260	°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 60 seconds		J or W package	300	°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds		D, DB, N, or PW package	260	°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES: 1. All voltage values (except differential voltages and  $V_{CC}$  specified for the measurement of  $I_{OS}$ ) are with respect to the network GND.  
2. Differential voltages are at  $IN+$  with respect to  $IN-$ .  
3. Short circuits from outputs to  $V_{CC}$  can cause excessive heating and eventual destruction.

DISSIPATION RATING TABLE

PACKAGE	$T_A \leq 25^\circ\text{C}$ POWER RATING	DERATING FACTOR	DERATE ABOVE $T_A$	$T_A = 70^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 85^\circ\text{C}$ POWER RATING	$T_A = 125^\circ\text{C}$ POWER RATING
D	900 mW	7.6 mW/°C	32°C	611 mW	497 mW	N/A
DB	775 mW	6.2 mW/°C	25°C	496 mW	403 mW	N/A
FK	900 mW	11.0 mW/°C	68°C	878 mW	713 mW	273 mW
J (LM124_)	900 mW	11.0 mW/°C	68°C	878 mW	713 mW	273 mW
J (all others)	900 mW	8.2 mW/°C	40°C	654 mW	531 mW	N/A
N	900 mW	9.2 mW/°C	52°C	734 mW	596 mW	N/A
PW	700 mW	5.6 mW/°C	25°C	448 mW	364 mW	N/A
W	900 mW	8.0 mW/°C	37°C	636 mW	516 mW	196 mW



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

3-4 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

**LM124, LM124A, LM224, LM224A**  
**LM324, LM324A, LM324Y, LM2902, LM2902Q**  
**QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIER**  
 SLOS066E – SEPTEMBER 1975 – REVISED FEBRUARY 1997

electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{CC} = 5\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	T <sub>A</sub> ‡	LM124, LM224			LM324			LM2902, LM2902Q			UNIT
			MIN	TYP§	MAX	MIN	TYP§	MAX	MIN	TYP§	MAX	
V <sub>IO</sub>	V <sub>CC</sub> = 5 V to MAX, V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub> , V <sub>O</sub> = 1.4 V	25°C Full range	3	3	5	3	3	7	3	3	7	mV
I <sub>IO</sub>	V <sub>O</sub> = 1.4 V	25°C Full range	2	2	30	2	2	50	2	2	50	nA
I <sub>IB</sub>	V <sub>O</sub> = 1.4 V	25°C Full range	-20	-20	-150	-20	-20	-250	-20	-20	-250	nA
V <sub>ICR</sub>	V <sub>CC</sub> = 5 V to MAX	25°C Full range	0 to V <sub>CC</sub> - 1.5	0 to V <sub>CC</sub> - 1.5	0 to V <sub>CC</sub> - 2	0 to V <sub>CC</sub> - 1.5	0 to V <sub>CC</sub> - 2	0 to V <sub>CC</sub> - 1.5	0 to V <sub>CC</sub> - 1.5	0 to V <sub>CC</sub> - 2	0 to V <sub>CC</sub> - 2	V
V <sub>OH</sub>	R <sub>L</sub> = 2 kΩ R <sub>L</sub> = 10 kΩ	25°C 25°C	V <sub>CC</sub> - 1.5	V <sub>CC</sub> - 1.5	V <sub>CC</sub> - 1.5	V <sub>CC</sub> - 1.5	V <sub>CC</sub> - 1.5	V <sub>CC</sub> - 1.5	V <sub>CC</sub> - 1.5	V <sub>CC</sub> - 1.5	V <sub>CC</sub> - 1.5	V
V <sub>OL</sub>	V <sub>CC</sub> = MAX, R <sub>L</sub> = 2 kΩ V <sub>CC</sub> = MAX, R <sub>L</sub> ≥ 10 kΩ	Full range Full range	26	26	28	26	26	28	26	26	28	mV
A <sub>VD</sub>	R <sub>L</sub> ≤ 10 kΩ V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>O</sub> = 1 V to 11 V, R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	Full range 25°C Full range	50	50	100	25	25	100	15	15	100	V/mV
CMRR	V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub>	25°C	70	80	80	65	65	80	50	50	80	dB
k <sub>SVR</sub>		25°C	65	100	100	65	65	100	50	50	100	dB
V <sub>O1</sub> /V <sub>O2</sub>	f = 1 kHz to 20 kHz V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>ID</sub> = 1 V, V <sub>O</sub> = 0	25°C 25°C	-20	-30	-60	-20	-20	-30	-20	-20	-30	dB
I <sub>O</sub>	V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>O</sub> = 15 V V <sub>ID</sub> = -1 V, V <sub>O</sub> = 200 mV	Full range 25°C	10	20	20	10	10	20	10	10	20	mA
I <sub>OS</sub>	V <sub>CC</sub> at 5 V, GND at -5 V V <sub>O</sub> = 2.5 V, No load	Full range	5	5	±60	5	5	±60	5	5	±60	μA
I <sub>CC</sub>	V <sub>CC</sub> = MAX, V <sub>O</sub> = 0.5 V <sub>CC</sub> , No load	Full range	0.7	1.2	1.2	0.7	0.7	1.2	0.7	0.7	1.2	mA

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified. MAX V<sub>CC</sub> for testing purposes is 26 V for LM2902 and LM2902Q, 30 V for the others.  
 ‡ Full range is -55°C to 125°C for LM124, -25°C to 85°C for LM224, 0°C to 70°C for LM324, and -40°C to 125°C for LM2902 and LM2902Q.  
 § All typical values are at T<sub>A</sub> = 25°C.



**LM124, LM124A, LM224, LM224A**  
**LM324, LM324A, LM324Y, LM2902, LM2902Q**  
**QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS**  
 SLOS066E - SEPTEMBER 1975 - REVISED FEBRUARY 1997

electrical characteristics at specified free-air temperature,  $V_{CC} = 5\text{ V}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	T <sub>A</sub> ‡	LM124A			LM224A			LM324A			UNIT
			MIN	TYP§	MAX	MIN	TYP§	MAX	MIN	TYP§	MAX	
V <sub>IO</sub>	V <sub>CC</sub> = 5 V to 30 V, V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub> , V <sub>O</sub> = 1.4 V	25°C Full range	2	2	3	2	2	3	2	2	3	mV
I <sub>IO</sub>	V <sub>O</sub> = 1.4 V	25°C Full range	10	10	10	2	2	2	15	2	30	nA
I <sub>IB</sub>	V <sub>O</sub> = 1.4 V	25°C Full range	-50	-50	-100	-15	-15	-80	-15	-15	-100	nA
V <sub>ICR</sub>	V <sub>CC</sub> = 30 V	25°C	0 to V <sub>CC</sub> -1.5	0 to V <sub>CC</sub> -1.5	0 to V <sub>CC</sub> -1.5	0 to V <sub>CC</sub> -1.5	0 to V <sub>CC</sub> -1.5	0 to V <sub>CC</sub> -1.5	0 to V <sub>CC</sub> -1.5	0 to V <sub>CC</sub> -1.5	0 to V <sub>CC</sub> -1.5	V
V <sub>OH</sub>	R <sub>L</sub> = 2 kΩ, V <sub>CC</sub> = 30 V, R <sub>L</sub> = 2 kΩ	Full range	26	26	26	26	26	26	26	26	26	V
V <sub>OL</sub>	R <sub>L</sub> = 10 kΩ, V <sub>CC</sub> = 30 V, R <sub>L</sub> ≥ 10 kΩ	Full range	27	27	28	27	27	28	27	27	28	V
A <sub>V(D)</sub>	R <sub>L</sub> ≤ 10 kΩ, V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>O</sub> = 1 V to 11 V, R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	Full range	25	25	20	25	25	20	25	25	20	mV
CMRR	V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub>	25°C	70	70	80	70	70	80	65	65	80	V/mV
k <sub>SVR</sub>	Supply-voltage rejection ratio (ΔV <sub>CC</sub> /ΔV <sub>IO</sub> )	25°C	65	65	100	65	65	100	65	65	100	dB
V <sub>O1</sub> /V <sub>O2</sub>	Crosstalk attenuation f = 1 kHz to 20 kHz	25°C	120	120	120	120	120	120	120	120	120	dB
I <sub>O</sub>	V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>ID</sub> = 1 V, V <sub>O</sub> = 0	Full range	-20	-20	-60	-20	-20	-60	-20	-20	-60	mA
I <sub>OS</sub>	V <sub>CC</sub> = 15 V, V <sub>ID</sub> = -1 V, V <sub>O</sub> = 15 V	Full range	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	-10	mA
I <sub>OS</sub>	V <sub>ID</sub> = -1 V, V <sub>O</sub> = 200 mV	25°C	5	5	5	5	5	5	5	5	5	μA
I <sub>CC</sub>	V <sub>CC</sub> at 5 V, V <sub>O</sub> = 0	25°C	±40	±40	±60	±40	±40	±60	±40	±40	±60	mA
I <sub>CC</sub>	V <sub>O</sub> = 2.5 V, No load	Full range	0.7	0.7	1.2	0.7	0.7	1.2	0.7	0.7	1.2	mA
I <sub>CC</sub>	V <sub>CC</sub> = 30 V, V <sub>O</sub> = 15 V, No load	Full range	1.4	1.4	3	1.4	1.4	3	1.4	1.4	3	mA

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified.

‡ Full range is -55°C to 125°C for LM124A, -25°C to 85°C for LM224A, and 0°C to 70°C for LM324A.

§ All typical values are at T<sub>A</sub> = 25°C.



**LM124, LM124A, LM224, LM224A**  
**LM324, LM324A, LM324Y, LM2902, LM2902Q**  
**QUADRUPLE OPERATIONAL AMPLIFIERS**

SLOS066E – SEPTEMBER 1975 – REVISED FEBRUARY 1997

electrical characteristics,  $V_{CC} = 5\text{ V}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS†	LM324Y			UNIT	
		MIN	TYP	MAX		
$V_{IO}$ Input offset voltage			3	7	mV	
$I_{IO}$ Input offset current	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$ , $V_{IC} = V_{ICRmin}$ , $V_O = 1.4\text{ V}$		2	50	nA	
$I_{IB}$ Input bias current			-20	-250	nA	
$V_{ICR}$ Common-mode input voltage range	$V_{CC} = 5\text{ V to MAX}$		0 to $V_{CC}-1.5$		V	
$V_{OH}$ High-level output voltage	$R_L = 10\text{ k}\Omega$		$V_{CC}-1.5$		V	
$V_{OL}$ Low-level output voltage	$R_L \leq 10\text{ k}\Omega$		5	20	mV	
$A_{VD}$ Large-signal differential voltage amplification	$V_{CC} = 15\text{ V}$ , $V_O = 1\text{ V to }11\text{ V}$ , $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$		15	100	V/mV	
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin}$		65	80	dB	
$k_{SVR}$ Supply-voltage rejection ratio ( $\Delta V_{CC\pm}/\Delta V_{IO}$ )			65	100	dB	
$I_O$ Output current	$V_{CC} = 15\text{ V}$ , $V_{ID} = 1\text{ V}$ , $V_O = 0$		-20	-30	-60	mA
	$V_{CC} = 15\text{ V}$ , $V_{ID} = -1\text{ V}$ , $V_O = 15\text{ V}$		10	20		
	$V_{ID} = 1\text{ V}$ , $V_O = 200\text{ mV}$		12	30		
$I_{OS}$ Short-circuit output current	$V_{CC}$ at 5 V, GND at -5 V, $V_O = 0$		$\pm 40$	$\pm 60$	mA	
$I_{CC}$ Supply current (four amplifiers)	$V_O = 2.5 V_{CC}$ , No load		0.7	1.2	mA	
	$V_{CC} = \text{MAX}$ , $V_O = 0.5 V_{CC}$ , No load		1.1	3		

† All characteristics are measured under open-loop conditions with zero common-mode input voltage unless otherwise specified. MAX  $V_{CC}$  for testing purposes is 30 V.



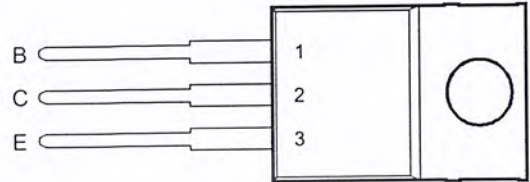
# TIP100, TIP101, TIP102 NPN SILICON POWER DARLINGTONS

Copyright © 1997, Power Innovations Limited, UK

AUGUST 1978 - REVISED MARCH 1997

- Designed for Complementary Use with TIP105, TIP106 and TIP107
- 80 W at 25°C Case Temperature
- 8 A Continuous Collector Current
- Maximum  $V_{CE(sat)}$  of 2.5 V at  $I_C = 8$  A

TO-220 PACKAGE  
(TOP VIEW)



Pin 2 is in electrical contact with the mounting base.

MDTRACA

## absolute maximum ratings at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

RATING		SYMBOL	VALUE	UNIT
Collector-base voltage ( $I_E = 0$ )	TIP100	$V_{CBO}$	60	V
	TIP101		80	
	TIP102		100	
Collector-emitter voltage ( $I_B = 0$ )	TIP100	$V_{CEO}$	60	V
	TIP101		80	
	TIP102		100	
Emitter-base voltage		$V_{EBO}$	5	V
Continuous collector current		$I_C$	8	A
Peak collector current (see Note 1)		$I_{CM}$	15	A
Continuous base current		$I_B$	1	A
Continuous device dissipation at (or below) 25°C case temperature (see Note 2)		$P_{tot}$	80	W
Continuous device dissipation at (or below) 25°C free air temperature (see Note 3)		$P_{tot}$	2	W
Unclamped inductive load energy (see Note 4)		$\frac{1}{2}LI_C^2$	10	mJ
Operating junction temperature range		$T_j$	-65 to +150	°C
Storage temperature range		$T_{stg}$	-65 to +150	°C
Lead temperature 3.2 mm from case for 10 seconds		$T_L$	260	°C

NOTES: 1. This value applies for  $t_p \leq 0.3$  ms, duty cycle  $\leq 10\%$ .

2. Derate linearly to 150°C case temperature at the rate of 0.64 W/°C.

3. Derate linearly to 150°C free air temperature at the rate of 16 mW/°C.

4. This rating is based on the capability of the transistor to operate safely in a circuit of:  $L = 20$  mH,  $I_{B(on)} = 5$  mA,  $R_{BE} = 100 \Omega$ ,  $V_{BE(off)} = 0$ ,  $R_S = 0.1 \Omega$ ,  $V_{CC} = 20$  V.

## PRODUCT INFORMATION

Information is current as of publication date. Products conform to specifications in accordance with the terms of Power Innovations standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

# TIP100, TIP101, TIP102 NPN SILICON POWER DARLINGTONS

AUGUST 1978 - REVISED MARCH 1997

## electrical characteristics at 25°C case temperature

PARAMETER		TEST CONDITIONS			MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{(BR)CEO}$	Collector-emitter breakdown voltage	$I_C = 30 \text{ mA}$ (see Note 5)	$I_B = 0$	TIP100	60			V
				TIP101	80			
				TIP102	100			
$I_{CEO}$	Collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 30 \text{ V}$ $V_{CE} = 40 \text{ V}$ $V_{CE} = 50 \text{ V}$	$I_B = 0$ $I_B = 0$ $I_B = 0$	TIP100			50	$\mu\text{A}$
				TIP101			50	
				TIP102			50	
$I_{CBO}$	Collector cut-off current	$V_{CB} = 60 \text{ V}$ $V_{CB} = 80 \text{ V}$ $V_{CB} = 100 \text{ V}$	$I_E = 0$ $I_E = 0$ $I_E = 0$	TIP100			50	$\mu\text{A}$
				TIP101			50	
				TIP102			50	
$I_{EBO}$	Emitter cut-off current	$V_{EB} = 5 \text{ V}$	$I_C = 0$				8	mA
$h_{FE}$	Forward current transfer ratio	$V_{CE} = 4 \text{ V}$ $V_{CE} = 4 \text{ V}$	$I_C = 3 \text{ A}$	(see Notes 5 and 6)	1000		20000	
			$I_C = 8 \text{ A}$		200			
$V_{CE(sat)}$	Collector-emitter saturation voltage	$I_B = 6 \text{ mA}$ $I_B = 80 \text{ mA}$	$I_C = 3 \text{ A}$	(see Notes 5 and 6)			2	V
			$I_C = 8 \text{ A}$				2.5	
$V_{BE}$	Base-emitter voltage	$V_{CE} = 4 \text{ V}$	$I_C = 8 \text{ A}$	(see Notes 5 and 6)			2.8	V
$V_{EC}$	Parallel diode forward voltage	$I_E = 8 \text{ A}$	$I_B = 0$	(see Notes 5 and 6)			3.5	V

NOTES: 5. These parameters must be measured using pulse techniques,  $t_p = 300 \mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$ .

6. These parameters must be measured using voltage-sensing contacts, separate from the current carrying contacts.

## thermal characteristics

PARAMETER		MIN	TYP	MAX	UNIT
$R_{\theta JC}$	Junction to case thermal resistance			1.56	$^{\circ}\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$	Junction to free air thermal resistance			62.5	$^{\circ}\text{C/W}$
$C_{\theta C}$	Thermal capacitance of case		0.9		$\text{J}/^{\circ}\text{C}$

## resistive-load-switching characteristics at 25°C case temperature

PARAMETER	TEST CONDITIONS †			MIN	TYP	MAX	UNIT
$t_d$	$I_C = 8 \text{ A}$ $V_{BE(off)} = -5 \text{ V}$	$I_{B(on)} = 80 \text{ mA}$ $R_L = 5 \Omega$	$I_{B(off)} = -80 \text{ mA}$ $t_p = 20 \mu\text{s}$ , dc $\leq 2\%$		35		ns
$t_r$					350		ns
$t_s$					1.8		$\mu\text{s}$
$t_f$					2.45		$\mu\text{s}$

† Voltage and current values shown are nominal; exact values vary slightly with transistor parameters.

## PRODUCT INFORMATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS

TYPICAL DC CURRENT GAIN  
vs  
COLLECTOR CURRENT

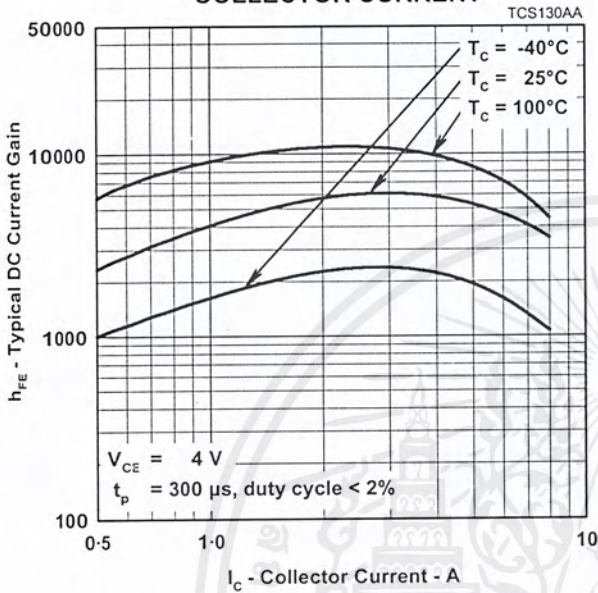


Figure 1.

COLLECTOR-EMITTER SATURATION VOLTAGE  
vs  
COLLECTOR CURRENT

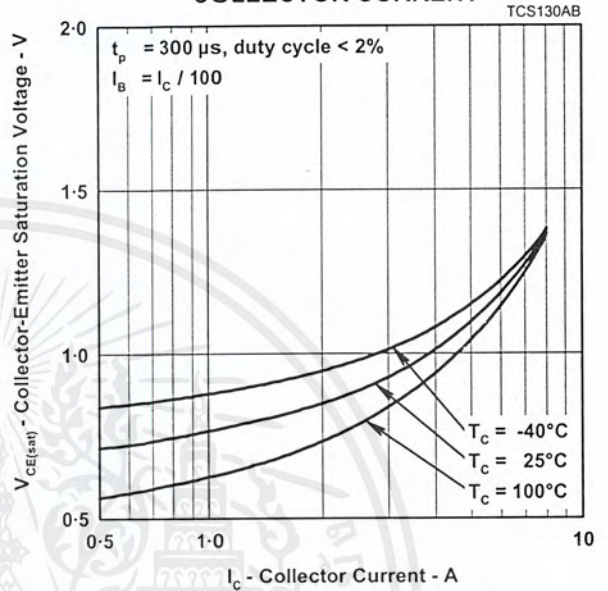


Figure 2.

BASE-EMITTER SATURATION VOLTAGE  
vs  
COLLECTOR CURRENT

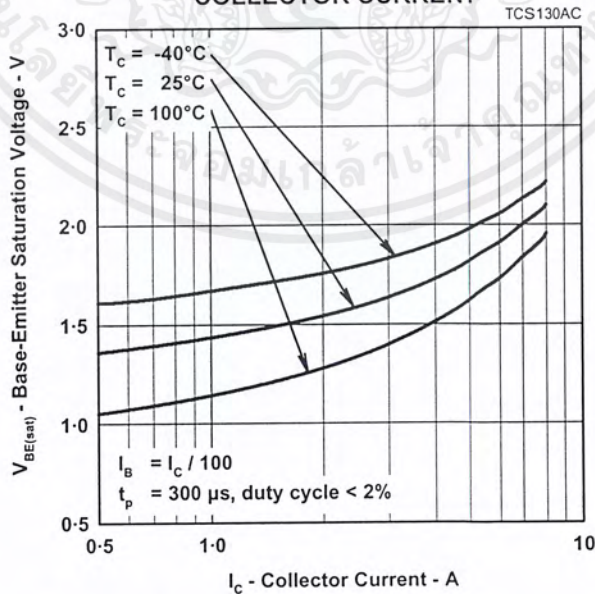


Figure 3.

PRODUCT INFORMATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการซึ่งงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# TIP100, TIP101, TIP102 NPN SILICON POWER DARLINGTONS

AUGUST 1978 - REVISED MARCH 1997

## MAXIMUM SAFE OPERATING REGIONS

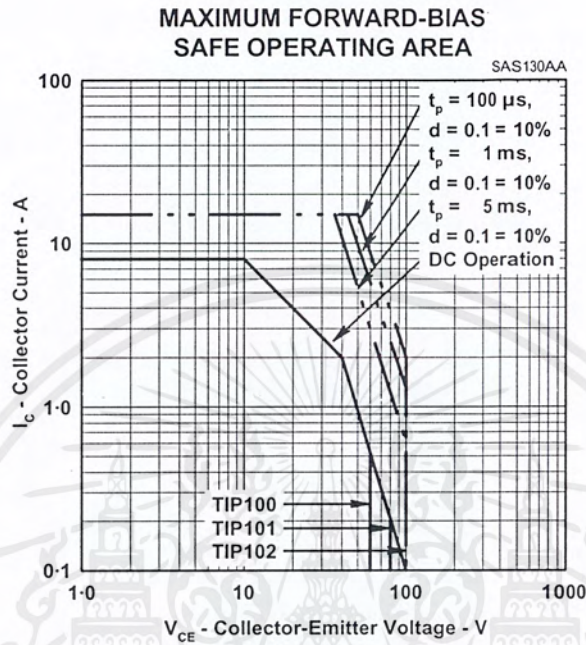


Figure 4.

## THERMAL INFORMATION

### MAXIMUM POWER DISSIPATION VS CASE TEMPERATURE

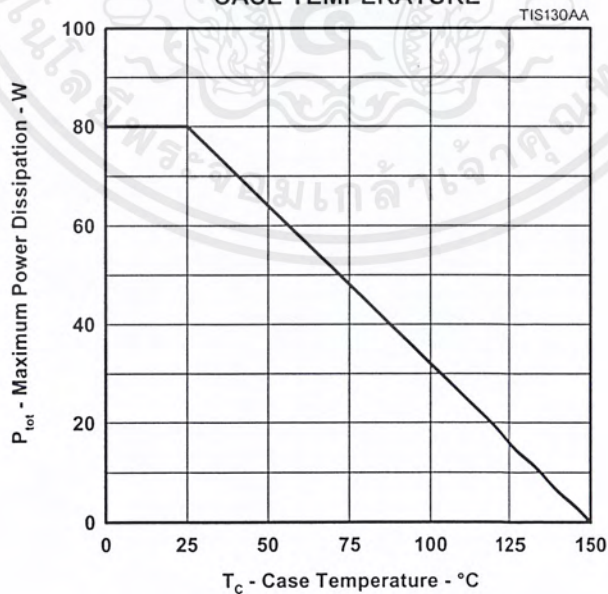


Figure 5.

## PRODUCT INFORMATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TIP100, TIP101, TIP102 NPN SILICON POWER DARLINGTONS

AUGUST 1978 - REVISED MARCH 1997

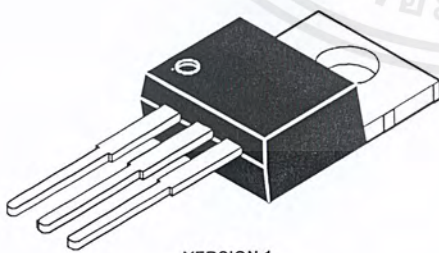
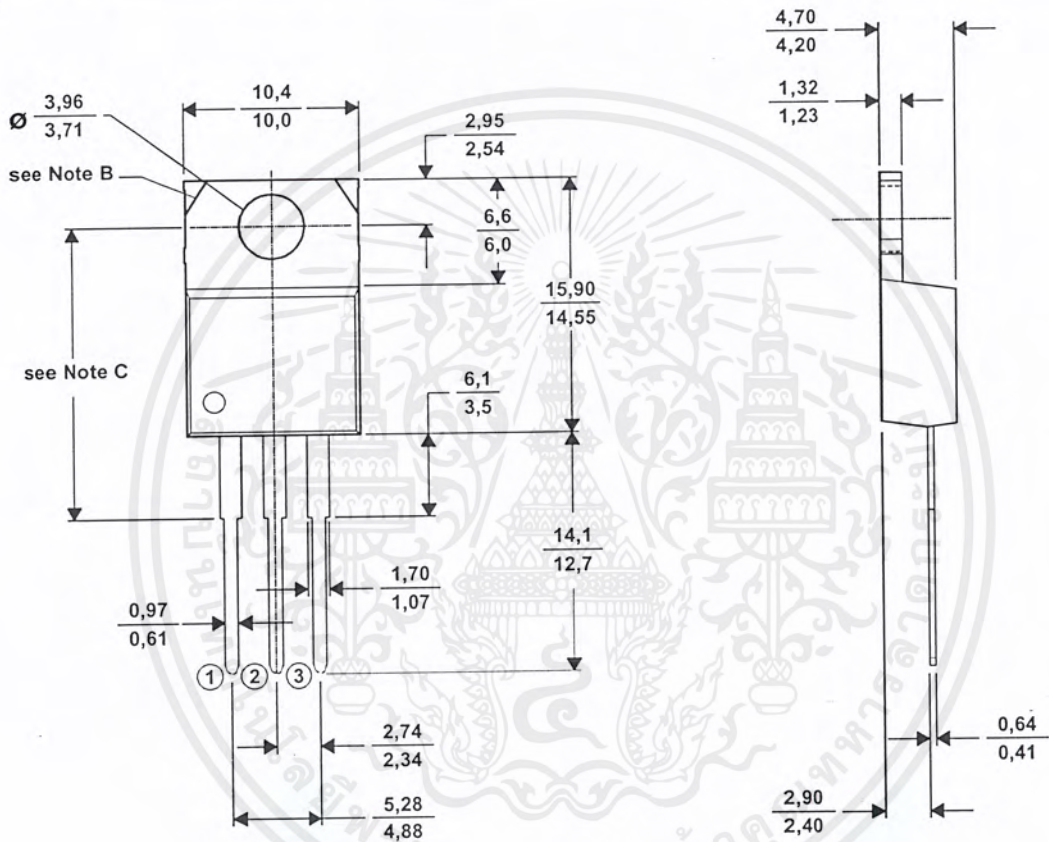
## MECHANICAL DATA

### TO-220

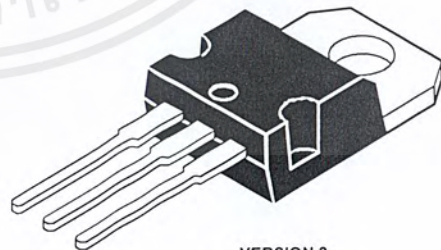
#### 3-pin plastic flange-mount package

This single-in-line package consists of a circuit mounted on a lead frame and encapsulated within a plastic compound. The compound will withstand soldering temperature with no deformation, and circuit performance characteristics will remain stable when operated in high humidity conditions. Leads require no additional cleaning or processing when used in soldered assembly.

TO220



VERSION 1



VERSION 2

ALL LINEAR DIMENSIONS IN MILLIMETERS

- NOTES: A. The centre pin is in electrical contact with the mounting tab.  
B. Mounting tab corner profile according to package version.  
C. Typical fixing hole centre stand off height according to package version.  
Version 1, 18.0 mm. Version 2, 17.6 mm.

MDXXBE

## PRODUCT INFORMATION

ขอสงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารนี้ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางพาณิชย์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



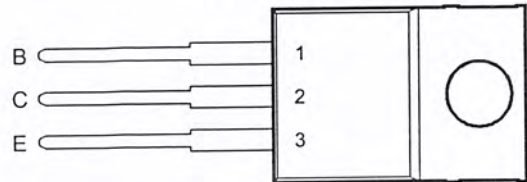
# TIP105, TIP106, TIP107 PNP SILICON POWER DARLINGTONS

Copyright © 1997, Power Innovations Limited, UK

AUGUST 1978 - REVISED MARCH 1997

- Designed for Complementary Use with TIP100, TIP101 and TIP102
- 80 W at 25°C Case Temperature
- 8 A Continuous Collector Current
- Maximum  $V_{CE(sat)}$  of 2.5 V at  $I_C = 8$  A

TO-220 PACKAGE  
(TOP VIEW)



Pin 2 is in electrical contact with the mounting base.

MDTRACA

## absolute maximum ratings at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

RATING		SYMBOL	VALUE	UNIT
Collector-base voltage ( $I_E = 0$ )	TIP105	$V_{CBO}$	-60	V
	TIP106		-80	
	TIP107		-100	
Collector-emitter voltage ( $I_B = 0$ )	TIP105	$V_{CEO}$	-60	V
	TIP106		-80	
	TIP107		-100	
Emitter-base voltage		$V_{EBO}$	-5	V
Continuous collector current		$I_C$	-8	A
Peak collector current (see Note 1)		$I_{CM}$	-15	A
Continuous base current		$I_B$	-1	A
Continuous device dissipation at (or below) 25°C case temperature (see Note 2)		$P_{tot}$	80	W
Continuous device dissipation at (or below) 25°C free air temperature (see Note 3)		$P_{tot}$	2	W
Unclamped inductive load energy (see Note 4)		$\frac{1}{2}LI_C^2$	10	mJ
Operating junction temperature range		$T_j$	-65 to +150	°C
Storage temperature range		$T_{stg}$	-65 to +150	°C
Lead temperature 3.2 mm from case for 10 seconds		$T_L$	260	°C

- NOTES: 1. This value applies for  $t_p \leq 0.3$  ms, duty cycle  $\leq 10\%$ .  
 2. Derate linearly to 150°C case temperature at the rate of 0.64 W/°C.  
 3. Derate linearly to 150°C free air temperature at the rate of 16 mW/°C.  
 4. This rating is based on the capability of the transistor to operate safely in a circuit of:  $L = 20$  mH,  $I_{B(on)} = -5$  mA,  $R_{BE} = 100 \Omega$ ,  $V_{BE(off)} = 0$ ,  $R_S = 0.1 \Omega$ ,  $V_{CC} = -20$  V.

## PRODUCT INFORMATION

Information is current as of publication date. Products conform to specifications in accordance with the terms of Power Innovations standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

# TIP105, TIP106, TIP107

## PNP SILICON POWER DARLINGTONS

AUGUST 1978 - REVISED MARCH 1997

### electrical characteristics at 25°C case temperature

PARAMETER	TEST CONDITIONS			MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{(BR)CEO}$ Collector-emitter breakdown voltage	$I_C = -30 \text{ mA}$ (see Note 5)	$I_B = 0$	TIP105 TIP106 TIP107	-60 -80 -100			V
$I_{CEO}$ Collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = -30 \text{ V}$ $V_{CE} = -40 \text{ V}$ $V_{CE} = -50 \text{ V}$	$I_B = 0$ $I_B = 0$ $I_B = 0$	TIP105 TIP106 TIP107			-50 -50 -50	$\mu\text{A}$
$I_{CBO}$ Collector cut-off current	$V_{CB} = -60 \text{ V}$ $V_{CB} = -80 \text{ V}$ $V_{CB} = -100 \text{ V}$	$I_E = 0$ $I_E = 0$ $I_E = 0$	TIP105 TIP106 TIP107			-50 -50 -50	$\mu\text{A}$
$I_{EBO}$ Emitter cut-off current	$V_{EB} = -5 \text{ V}$	$I_C = 0$				-8	mA
$h_{FE}$ Forward current transfer ratio	$V_{CE} = -4 \text{ V}$ $V_{CE} = -4 \text{ V}$	$I_C = -3 \text{ A}$ $I_C = -8 \text{ A}$	(see Notes 5 and 6)	1000 200		20000	
$V_{CE(sat)}$ Collector-emitter saturation voltage	$I_B = -6 \text{ mA}$ $I_B = -80 \text{ mA}$	$I_C = -3 \text{ A}$ $I_C = -8 \text{ A}$	(see Notes 5 and 6)			-2 -2.5	V
$V_{BE}$ Base-emitter voltage	$V_{CE} = -4 \text{ V}$	$I_C = -8 \text{ A}$	(see Notes 5 and 6)			-2.8	V
$V_{EC}$ Parallel diode forward voltage	$I_E = -8 \text{ A}$	$I_B = 0$	(see Notes 5 and 6)			-3.5	V

NOTES: 5. These parameters must be measured using pulse techniques,  $t_p = 300 \mu\text{s}$ , duty cycle  $\leq 2\%$ .

6. These parameters must be measured using voltage-sensing contacts, separate from the current carrying contacts.

### thermal characteristics

PARAMETER	MIN	TYP	MAX	UNIT
$R_{\theta JC}$ Junction to case thermal resistance			1.56	$^{\circ}\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$ Junction to free air thermal resistance			62.5	$^{\circ}\text{C/W}$
$C_{\theta C}$ Thermal capacitance of case		0.9		$\text{J}^{\circ}\text{C}$

### resistive-load-switching characteristics at 25°C case temperature

PARAMETER	TEST CONDITIONS †			MIN	TYP	MAX	UNIT
$t_d$ Delay time	$I_C = -8 \text{ A}$ $V_{BE(off)} = 5 \text{ V}$	$I_{B(on)} = -80 \text{ mA}$ $R_L = 5 \Omega$	$I_{B(off)} = 80 \text{ mA}$ $t_p = 20 \mu\text{s}$ , dc $\leq 2\%$		35		ns
$t_r$ Rise time					300		ns
$t_s$ Storage time					900		ns
$t_f$ Fall time					1.3		$\mu\text{s}$

† Voltage and current values shown are nominal; exact values vary slightly with transistor parameters.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับภายในใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
**PRODUCT INFORMATION**  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TYPICAL CHARACTERISTICS

TYPICAL DC CURRENT GAIN  
VS  
COLLECTOR CURRENT

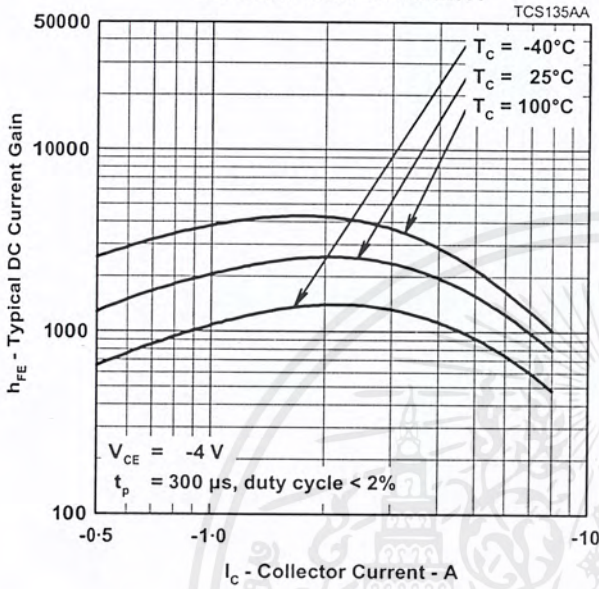


Figure 1.

COLLECTOR-EMITTER SATURATION VOLTAGE  
VS  
COLLECTOR CURRENT

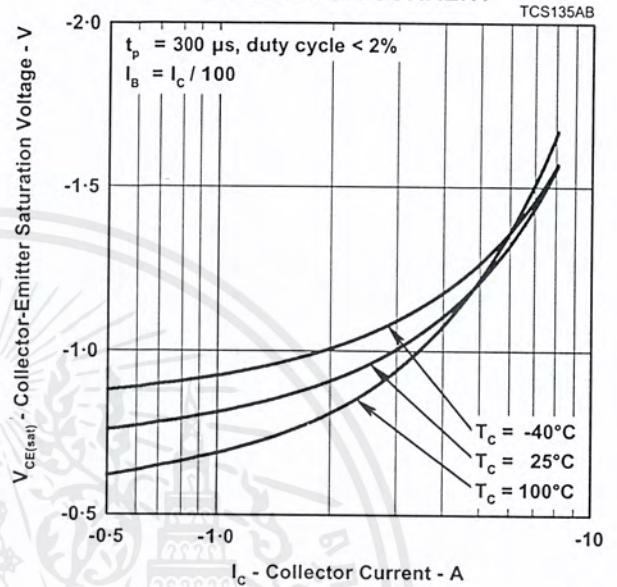


Figure 2.

BASE-EMITTER SATURATION VOLTAGE  
VS  
COLLECTOR CURRENT

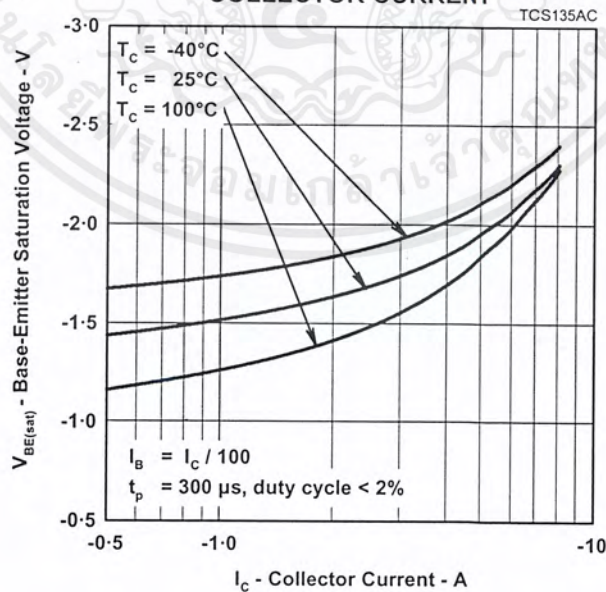


Figure 3.

PRODUCT INFORMATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปผลิตหรือจำหน่ายโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TIP105, TIP106, TIP107  
PNP SILICON POWER DARLINGTONS

AUGUST 1978 - REVISED MARCH 1997

MAXIMUM SAFE OPERATING REGIONS

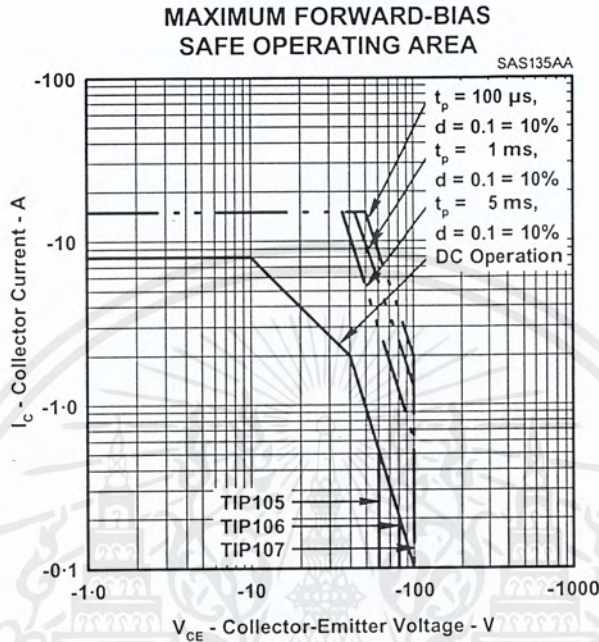


Figure 4.

THERMAL INFORMATION

MAXIMUM POWER DISSIPATION  
vs  
CASE TEMPERATURE

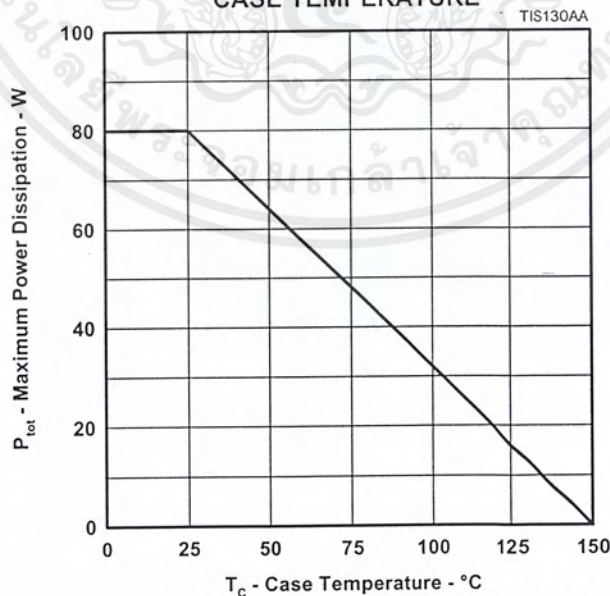


Figure 5.

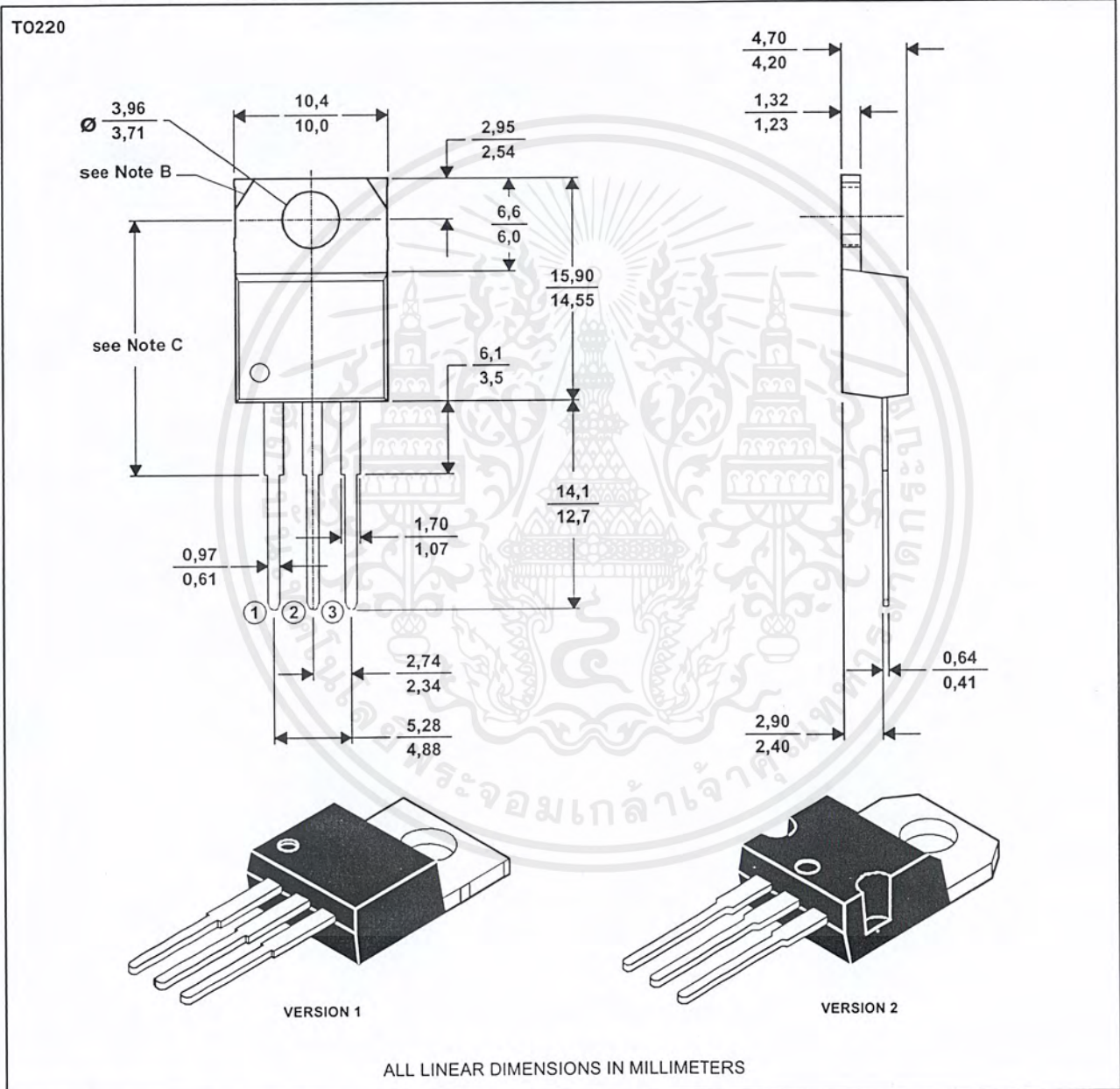
**PRODUCT INFORMATION**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทซึ่งมุ่งเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MECHANICAL DATA

TO-220  
3-pin plastic flange-mount package

This single-in-line package consists of a circuit mounted on a lead frame and encapsulated within a plastic compound. The compound will withstand soldering temperature with no deformation, and circuit performance characteristics will remain stable when operated in high humidity conditions. Leads require no additional cleaning or processing when used in soldered assembly.



- NOTES: A. The centre pin is in electrical contact with the mounting tab.  
 B. Mounting tab corner profile according to package version.  
 C. Typical fixing hole centre stand off height according to package version.  
 Version 1, 18.0 mm. Version 2, 17.6 mm.

MDXXBE

PRODUCT INFORMATION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจาก Power INNOVATIONS  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

