

หุ่นยนต์งู  
SNAKE ROBOT



โดย  
นายวินัย เจตะวัฒนะ  
นายอริคม หาญเจริญศักดิ์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 45735  
วัน, เดือน, ปี 13 ก.พ. 2546

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

ปฏิญานี้พจนนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# หุ่นยนต์งู SNAKE ROBOT

โดย

นายวินัย เจตะวัฒนะ 41014388

นายอริคม หาญเจริญศักดิ์ 41014506

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. จงกล งามวิวิทย์

อาจารย์ สุมิตร พนาอุคมทรัพย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2544


ภาควิชา วิศวกรรมระบบควบคุม

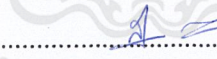
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง หุ่นยนต์งู (SNAKE ROBOT)

ผู้จัดทำ

1. นายวินัย                      เจตะวัฒนะ                      41014388
2. นายอริคม                      หาญเจริญศักดิ์                      41014506

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร. จงกล                      งามวิวิทย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ สุमितร์                      พนาอุดมทรัพย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้จัดทำขอขอบคุณ อาจารย์ จงกล งามวิวิทย์ และ อาจารย์ สุมิตร พนาอุดมทรัพย์ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำ และให้ความรู้ในการจัดทำมาโดยตลอด รวมทั้งแนวคิดริเริ่มที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการเป็นอย่างมาก และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ให้การสนับสนุน ในด้านอุปกรณ์ต่างๆ และที่ขาดไม่ได้ก็คือคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ส่งสอนมา ให้คณะผู้จัดทำมีความรู้ในด้านต่างๆ และขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ได้ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ที่สำคัญที่สุด ต้องขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของคณะผู้จัดทำที่ได้ให้การเลี้ยงดูอบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้าน รวมทั้งกำลังใจที่ดีที่มีให้เสมอมาที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หุ่นยนต์งู

โดย

นายวินัย

เจตตะวัฒน์

นายอริคม

หาญเจริญศักดิ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. จงกล งามวิวิทย์

อาจารย์ สุมิตร พนาอุดมทรัพย์

ปีการศึกษา 2544

### บทคัดย่อ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาและสร้างหุ่นยนต์งู โดยการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์งู การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์งูนี้มีลักษณะคล้ายการเคลื่อนที่ของงูที่มีลักษณะรูปแบบการเคลื่อนที่คล้ายกับฟิงชันก์ของชาซีน เรียกรการเคลื่อนที่นี้ว่า การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์ การเคลื่อนที่ดังกล่าวเกิดจากความสัมพันธ์ของแรงในกล้ามเนื้อของงู และแรงเสียดทานที่กระทำกับตัวงู คือแรงเสียดทานของงูในแนวตั้งฉากกับลำตัวต้องมากกว่าแรงเสียดทานในแนวสัมผัสกับลำตัว เพื่อที่จะยอมให้ผลของแรงภายในกล้ามเนื้อทั้งหมดสามารถเอาชนะแรงเสียดทานในแนวลำตัวของงู ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางนั้น และหุ่นยนต์ประเภทนี้สามารถเคลื่อนที่บนพื้นที่เรียบเท่านั้น จากสมมุติฐานเบื้องต้นดังกล่าวจึงออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ โดยการนำเอาล้อมาใช้ควบคุมแรงเสียดทานที่กระทำกับหุ่นยนต์ และทำการควบคุมความสัมพันธ์ของแรงบิดภายในกล้ามเนื้อของหุ่นยนต์ทำให้เกิดแรงผลักหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปด้านหน้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## SNAKE ROBOT

By

Vinai Jeatawattana

Atikom Halchareonsak

Advisor

Assoc. Prof. Jongkol Ngamwiwit

Sumit Panaudomsup

Academic year 2001

### ABSTRACT

Serpentine robots have a number of useful features and applications are fascinating to observe and may answer questions about biological equivalents.

The Snake Robot project is motivated through various applications of microcontroller in family MCS-51. In this project, microcontroller is programmed to perform the locomotion of snake robot. snake robot can move forward to the direction with different torques provided by actuators in serpentine patterns. It has many passive wheels attached to the body. Passive means there is no actuator on each wheel. The robot motion is constrained by each wheel, allowing motion in the tangential direction. The different torque can generate forces acting on snake robot's body. When these forces overcome the tangential friction, the forces will propel snake robot to move in forward direction.

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
ABSTRACT	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	1
1.1 วัตถุประสงค์	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	2
1.3 ขั้นตอนการออกแบบโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการ	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ</b>	3
2.1 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	3
2.1.1 ลักษณะทางชีววิทยาของงู	3
2.1.2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของงู	4
2.1.3 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	7
2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์	9
2.2.1 ลักษณะการจัดขายนอก	9
2.3 ระบบการแปลงและส่งสัญญาณข้อมูล	10
2.3.1 การทำงานของวงจรภาคเอาต์พุตแบบอนาล็อก	10
2.3.2 การทำงานของไอซี DAC0808	10
2.3.3 ความสัมพันธ์ของอินพุตและเอาต์พุตของไอซี DAC0808	11
2.3.4 อัตราการขยายของวงจรออปแอมป์(Op-Amp)	11
2.3.5 ค่าของข้อมูลอินพุต (data) ของวงจร	11
2.3.6 การกำหนดค่าของข้อมูลเพื่อกำหนดขนาดของสัญญาณเอาต์พุต	12
2.3.7 การทำงานของวงจรเลือกช่องสัญญาณ (Analog switch 74HC4051)	13
2.4 ระบบการควบคุมดิจิทัล	14
2.4.1 วงจรวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-Controller)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2	วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม ( Triangular Generator )	16
2.4.3	วงจร เปรียบเทียบแรงดัน (Voltage Comparator)	18
2.4.4	วงจรควบคุมดิซีมอเตอร์ ( ไอซี L293D)	21
2.4.5	โพเทนเชียลมิเตอร์ (Potentiometer)	25
<b>บทที่ 3</b>	<b>การออกแบบโครงงานและการสร้าง</b>	<b>24</b>
3.1	การออกแบบ โครงสร้างหุ่นยนต์	24
3.2	การออกแบบวงจรควบคุมข้อต่อ	26
3.3	การออกแบบวงจรประมวลผลและวงจรส่งข้อมูล	27
3.4	การออกแบบโปรแกรมการควบคุมข้อต่อ	34
3.5	Flow chart แสดงการทำงานของ โปรแกรมในส่วนต่างๆ	37
<b>บทที่ 4</b>	<b>การทดลองและผลการทดลอง</b>	<b>42</b>
4.1	การทดลองการควบคุมข้อต่อ	42
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปโครงงาน ปัญหาและข้อเสนอแนะ</b>	<b>44</b>
5.1	สรุปโครงงาน	44
5.2	ปัญหาในการทำโครงงาน	44
5.2.1	ปัญหาในการสร้างตัวหุ่นยนต์	44
5.2.2	ปัญหาในการควบคุม	44
5.3	ข้อเสนอแนะ	44
<b>หนังสืออ้างอิง</b>		
<b>ภาคผนวก</b>		

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของกระดูกสันหลังของงูแต่ละชนิด	3
รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของงูโดยร่างกายบางส่วนยกสูงขึ้น	4
รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนที่ในรูปแบบเป็นคลื่นต่อเนื่อง(Lateral Undulation)	5
รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ในบริเวณจำกัด(Concertina)	6
รูปที่ 2.5 แสดงชุดขับเคลื่อนล้อของหุ่นยนต์งู(Two-wheel cart)	7
รูปที่ 2.6 แสดงการเคลื่อนที่ในลักษณะไปตามแนวโค้ง	8
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการจัดขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	9
รูปที่ 2.8 แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก	10
รูปที่ 2.9 แสดงไอซีเลือกช่องสัญญาณ	13
รูปที่ 2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบคอนโทรลมอเตอร์แบบ close-loop	14
รูปที่ 2.11 แสดงกราฟผลตอบสนองทางเวลาของ PI-Controller	15
รูปที่ 2.12 แสดงวงจร PI-Controller	16
รูปที่ 2.13 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม( Triangular Generator )	17
รูปที่ 2.14 แสดงเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม( Triangular Generator )	18
รูปที่ 2.15 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรเปรียบเทียบแรงดัน(Voltage Comparator)	18
รูปที่ 2.16 แสดงวงจรเปรียบเทียบแรงดัน	19
รูปที่ 2.17 แสดงการทำงาน Pulse Width Modulation	19
รูปที่ 2.18 แสดงการประยุกต์ใช้งานวงจรเปรียบเทียบแรงดัน	20
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะขาของไอซีควบคุมดีซีมอเตอร์ L293D	21
รูปที่ 2.20 แสดงวงจรควบคุมดีซีมอเตอร์แบบ H-bridge	22
รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะโครงสร้างภายในของโพเทนชิโอมิเตอร์	23
รูปที่ 3.1 แสดงส่วนโครงสร้างลำตัว	24
รูปที่ 3.2 แสดงส่วนแผ่นรองดีซีมอเตอร์และแผงวงจรด้านบน	25
รูปที่ 3.3 แสดงส่วนส่วนล้อมอเตอร์กับโพเทนชิโอมิเตอร์	25
รูปที่ 3.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรควบคุมล้อ	26
รูปที่ 3.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการส่งข้อมูล	28
รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะการสุ่มค่าของโปรแกรม	34

รูปที่ 3.7 แสดงการหาค่ามุม $\theta$	35
รูปที่ 3.8 แสดงการหาค่ามุมระหว่างข้อต่อ	36
รูปที่ 4.1 แสดงมุมการบิดของข้อต่อ	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีหุ่นยนต์มีบทบาททั้งในด้านอุตสาหกรรมการผลิต และชีวิตความเป็นอยู่ของคนมากขึ้น วัตถุประสงค์ของการนำหุ่นยนต์มาใช้นั้นเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิต คุณภาพในการสร้างชิ้นงาน รวมถึงการรักษาความปลอดภัยลดความเสี่ยงในการทำงานของมนุษย์ ดังนั้นหุ่นยนต์เซอร์เพนไทน์(Serpentine robot)จึงถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในงานสำรวจสถานที่ที่ซับซ้อนและเป็นอันตรายต่อมนุษย์

ซึ่งมีพื้นฐานจากการสังเกตพฤติกรรมเคลื่อนที่ของงูมาประยุกต์ใช้เป็นทฤษฎีในการวิเคราะห์และการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นี้จะมีลักษณะคล้ายการเคลื่อนที่ของงูที่มีลักษณะรูปแบบการเคลื่อนที่คล้ายกับฟังก์ชันของ sine (Serpeniod curve) เรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์ การเคลื่อนที่ดังกล่าวเกิดจากความสัมผัสของแรงในกล้ามเนื้อของงู และแรงเสียดทานที่กระทำกับตัวงู คือแรงเสียดทานของงูในแนวตั้งฉากกับลำตัว ต้องมากกว่าแรงเสียดทานในแนวสัมผัสกับลำตัว เพื่อที่จะยอมให้ผลของแรงภายในกล้ามเนื้อทั้งหมดสามารถเอาชนะแรงเสียดทานในแนวลำตัวของงู ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นในทิศทางนั้น และหุ่นยนต์ประเภทนี้สามารถเคลื่อนที่บนพื้นที่เรียบเท่านั้น จากสมมุติฐานเบื้องต้นดังกล่าวทำการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ โดยการนำเอาล้อมาใช้ควบคุมแรงเสียดทานที่กระทำกับหุ่นยนต์ และทำการควบคุมความสัมผัสของแรงบิดภายในกล้ามเนื้อของหุ่นยนต์ทำให้เกิดแรงผลักรุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปด้านหน้าหรือถอยหลังได้ หุ่นยนต์นี้เป็นหุ่นยนต์ต้นแบบที่พัฒนาจากโครงสร้างของหุ่นยนต์หลายแกน(Multi-Joint Robot) เพื่อทำการทดสอบทฤษฎีพื้นฐานดังกล่าว และศึกษาถึงข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้นจากโครงสร้างที่ไม่เหมาะสม เพื่อนำไปพัฒนาออกแบบทั้งในด้านทางกลและระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพต่อไป และยังสามารถนำเอาศาสตร์ทางด้านปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้เพิ่มศักยภาพกับหุ่นยนต์

### 1.1 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและเข้าใจการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์
2. เพื่อศึกษาพื้นฐานการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และสามารถควบคุมได้ในระดับหนึ่ง
3. เป็นต้นแบบที่สามารถจะนำเอามาพัฒนาเพื่อประสิทธิภาพและการประยุกต์ใช้งานต่อไป

## 1.2 ขอบเขตของโครงการงาน

1. หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่โดยการบิดของข้อต่อ ได้
2. การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะเป็นไปในลักษณะคล้ายกับฟังก์ชันของ sine
3. หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในลักษณะตามการเปลี่ยนแปลงของโปรแกรมได้

## 1.3 ขั้นตอนการออกแบบโครงการงาน

การออกแบบโครงการงานของหุ่นยนต์นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน

1. ขั้นตอนการศึกษาธรรมชาติพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของงู
 

เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบส่วนของ โครงสร้างตัวหุ่นยนต์ โดยสร้างเป็นส่วนที่ใช้เป็นต้นแบบเพื่อการทดลองลักษณะการเคลื่อนที่ ถือเป็น ส่วน Mechanic
2. ขั้นตอนการศึกษาและออกแบบส่วนของวงจรควบคุมต่างๆ
  - วงจรควบคุมการบิดข้อต่อของหุ่นยนต์
  - วงจรควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์

การทำงานในส่วนนี้ประกอบด้วย วงจรควบคุมดีซีมอเตอร์ , วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัล เป็นสัญญาณอนาล็อก (Digital to Analog Converter) , วงจรเลือกช่องสัญญาณ ( Analog Switch ) และ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) ทั้งหมดนี้เป็นส่วนทาง Hardware
3. ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ถือเป็น ส่วน Software
4. ขั้นตอนการตรวจเช็คการทำงานขององค์ประกอบของหุ่นยนต์ทั้งหมด เพื่อทำการแก้ไขในส่วนที่เกิดข้อผิดพลาด ในขั้นตอนนี้ถือเป็นส่วนของการทดลอง
5. ขั้นตอนสรุปการทำโครงการงาน ข้อเสนอแนะและปัญหาในการทำงาน

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงการงาน

- ทำให้ผู้ทำโครงการงานได้แสดงความคิดสร้างสรรค์ออกมาได้อย่างเต็มที่
- อาจใช้เป็นเครื่องต้นแบบเพื่อนำมาพัฒนาให้ได้ประโยชน์อื่นๆต่อไป
- สามารถสร้างสรรค์สิ่งแปลกใหม่ออกมาใช้ประโยชน์ได้ต่อไป

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

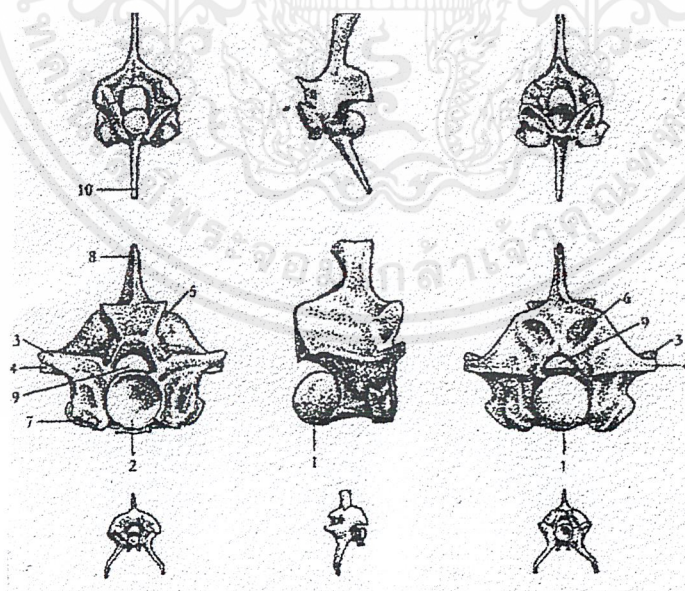
ในขั้นตอนการสร้างหุ่นยนต์เลียนแบบการเคลื่อนที่ของงูนั้นจะมีขั้นตอนดังนี้

1. การศึกษาลักษณะทางชีววิทยาของงู
2. การสร้างโครงสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของงู
3. การนำโครงสร้างแบบจำลองมาทดสอบหาลักษณะทางกายภาพและศึกษาวิธีการควบคุม

##### 2.1.1 ลักษณะทางชีววิทยาของงู

การตั้งเกิดลักษณะตามธรรมชาติของงู เกิดขึ้นเพื่อนำมาประเมินค่าหาความสัมพันธ์ต่างๆซึ่งสามารถที่จะนำมาจัดให้เป็นระบบ และใช้ในการศึกษาหรือพัฒนานำข้อดีมาประยุกต์ใช้งานต่อไป

งูเป็นสัตว์ที่มีกระดูกสันหลังมากที่สุดคือประมาณ 100-400 ข้อด้วยกันโดยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ กระดูกสันหลังของงูจะมีลักษณะเป็นบอลลกลมและเป็นข้อต่อเชื่อมโยงต่อกันเป็นจำนวนมาก ซึ่งจากลักษณะนี้เองทำให้งูสามารถโค้งบิดลำตัวได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะของกระดูกสันหลังของงูแต่ละชนิด

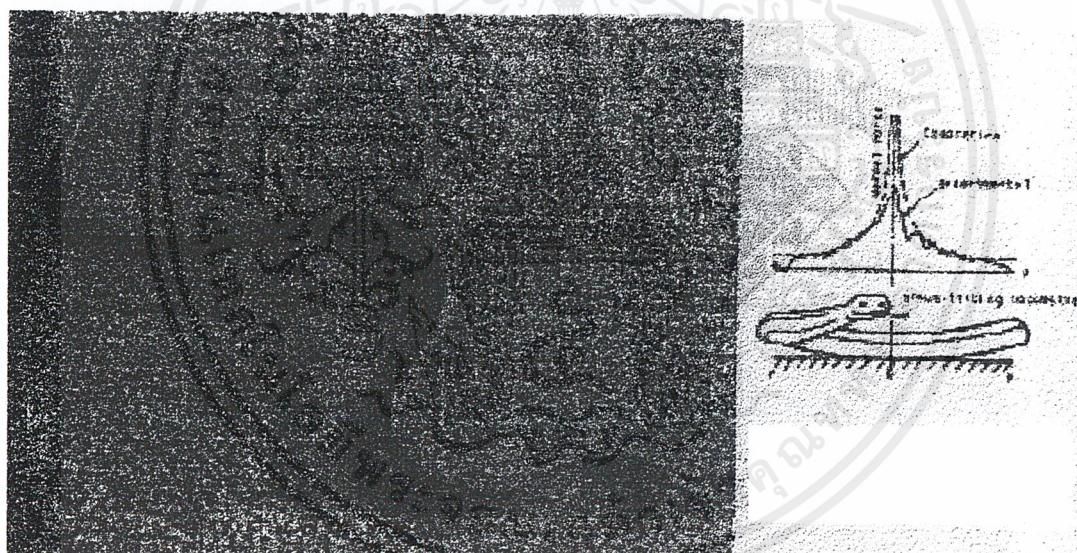
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างจำลองของงูจะต้องคำนึงถึงลักษณะโครงสร้างจริง และความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อของงูในแต่ละข้อซึ่งจะกระทำไต่ยากมาก

### 2.1.2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของงู

การเคลื่อนที่ของงูนั้น ได้มีการศึกษาโดยการติดตั้งเครื่องวัดขนาดของแรงกล้ามเนื้อของงูที่ใช้ในการเคลื่อนที่ไปบนพื้นดินพบว่า

- รูปแบบการเคลื่อนที่ของงูจะเป็นไปตามเส้นโค้งสมการชายนี้น ตลอดแนวโค้งของลำตัว และถูกนำมาหาความสัมพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์เรียกว่า “ การเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์ ” (Serpentoid Curve)
- ในขณะที่งูเคลื่อนที่นั้นจะมีส่วนของร่างกายบางส่วนยกตัวสูงขึ้น เรียกว่า “sinus-lifting” และน้ำหนักจะถูกทิ้งไปในส่วนที่ติดกับพื้นดิน ซึ่งจะทำให้เกิดการไถลหรือเคลื่อนที่ได้นั่นเอง แสดงดังรูปที่ 2.2



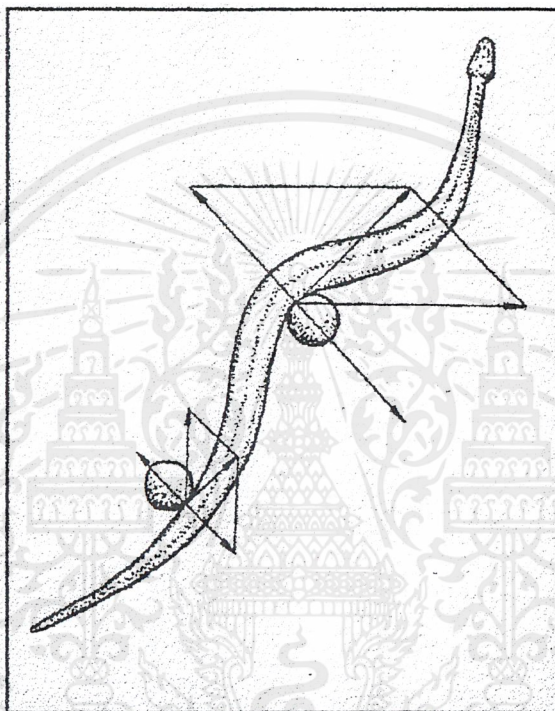
รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของงูโดยร่างกายบางส่วนยกตัวสูงขึ้น

จากพื้นฐานการเคลื่อนที่ของงูข้างต้นยังสามารถจำแนกรูปแบบการเคลื่อนที่ได้หลายรูปแบบด้วยกัน ทั้งนี้การเคลื่อนที่ของงูจะต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมในแต่ละที่ ซึ่งในที่นี้จะขอออกมาเพียง 2 รูปแบบเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การเคลื่อนที่แบบเป็นคลื่นต่อเนื่อง (lateral undulation)

เป็นการเคลื่อนที่ที่พบได้บ่อยครั้ง ทุกส่วนของร่างกายจะเคลื่อนที่ไปพร้อมๆกันอย่างต่อเนื่อง โดยจะมีความเร็วเท่าๆกันตลอดลำตัว จะเป็นลักษณะการถ่ายทอดคลื่นจากส่วนหน้าไปยังส่วนหลังในลักษณะที่คล้ายกับการว่ายน้ำ ซึ่งจะเกิดการผลักดันทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงการเคลื่อนที่ในรูปแบบเป็นคลื่นต่อเนื่อง(lateral undulation)

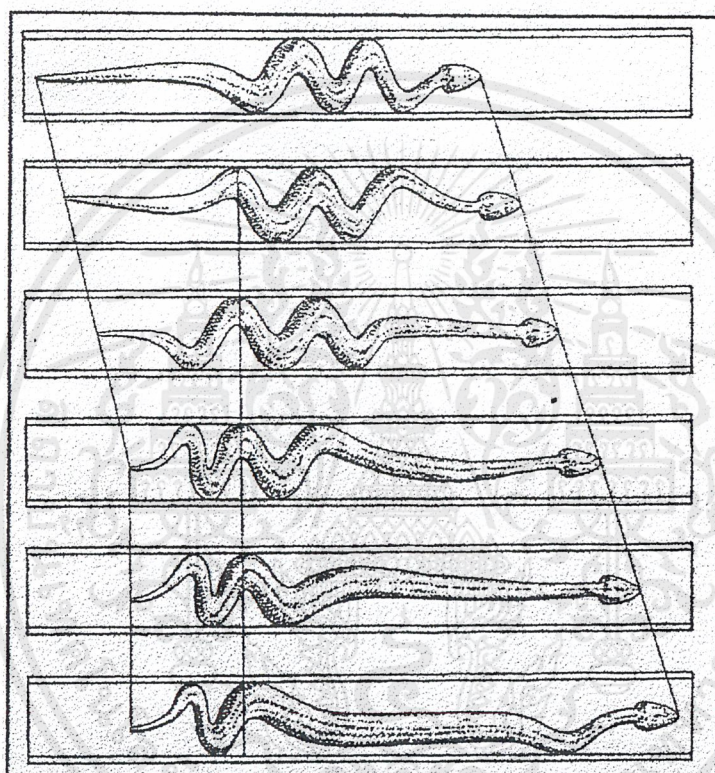
ในทางอุดมคติการเคลื่อนที่แบบนี้จะอยู่ในเป็นการเคลื่อนที่ที่อยู่ในขอบเขตเส้นทางเดินเดียวเท่านั้น ซึ่งมีการตั้งสมมติฐานขึ้นมาว่าการเคลื่อนที่แบบนี้จะเกิดขึ้นได้จะต้องใช้ร่างกายอย่างน้อย 3 ส่วน โดย 2 ส่วนจะมีหน้าที่ในการออกแรงขับเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ และส่วนที่ 3 จะมีหน้าที่รักษาสมดุล

ข้อเสียของการเคลื่อนที่ในรูปแบบนี้คือไม่เหมาะกับพื้นเรียบทำให้มีแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสน้อยมาก ซึ่งจะทำให้การเคลื่อนที่เป็นไปได้ยากลำบาก และยังต้องใช้พื้นที่ในการเคลื่อนที่ซึ่งทำให้ยากลำบากในการเคลื่อนที่ในที่แคบด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การเคลื่อนที่ในบริเวณจำกัด (concertina)

เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ต่างจากแบบแรกคือสามารถเคลื่อนที่ไปในที่แคบๆได้ โดยหลักการเคลื่อนที่ในรูปแบบนี้คือ การใช้ความแตกต่างของแรงเสียดทานในแต่ละส่วนของร่างกาย ส่วนที่มีแรงเสียดทานน้อยกว่าจะเป็นส่วนที่เกิดการเคลื่อนที่ ในขณะที่เดียวกัน ส่วนที่มีแรงเสียดทานมากกว่าจะหยุดอยู่กับที่ ดังนั้นจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.4

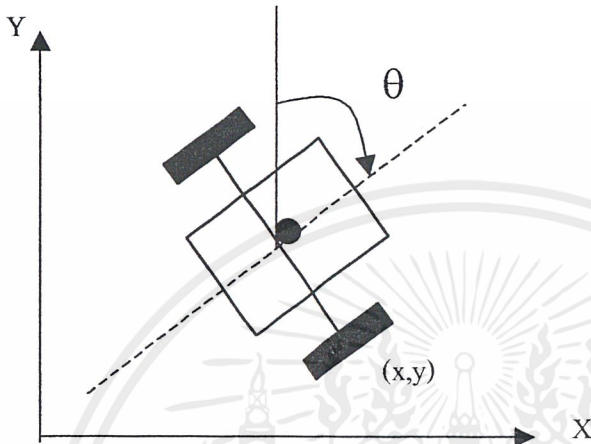


รูปที่ 2.4 แสดงการเคลื่อนที่ในบริเวณจำกัด(concertina)

การเคลื่อนที่ในรูปแบบนี้จะขึ้นอยู่กับค่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ แรงเสียดทานสถิตย์ ความเร็ว อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่รูปแบบนี้ไม่เหมาะกับการเคลื่อนที่ไปแนวขวางแต่จะเหมาะสมกับการเคลื่อนที่ในที่แคบๆเช่น ภายในท่อ

### 2.1.3 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ในที่นี่จะเกิดจากการนำชุดขับเคลื่อนหลายๆชุดเชื่อมต่อกันซึ่งการเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นได้ก็เนื่องมาจากการบิดตัวของแต่ละข้อต่อซึ่งจะทำให้ข้อต่อแต่ละข้อเกิดการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.5 แสดงชุดขับเคลื่อนข้อต่อของหุ่นยนต์(two-wheel cart)

จากรูปที่ 2.5 (two-wheel cart) เมื่อนำมาพิจารณาสังเกตเพลลาของล้อของชุดขับเคลื่อนจะอยู่ตรงบริเวณกึ่งกลางของชุดขับเคลื่อนหรือผ่านจุดรวมมวล(COM)นั่นเอง ซึ่งการเคลื่อนที่ของจุดรวมมวลนี้อยู่ในคู่ลำดับ  $(x,y)$  และ  $\theta$  เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างทิศทางของชุดขับเคลื่อนกับแกน  $y$  และ  $\eta$  คือระยะทางการเคลื่อนที่ของจุดรวมมวล จากสมการ

$$x' \cos\theta - y' \sin\theta = 0$$

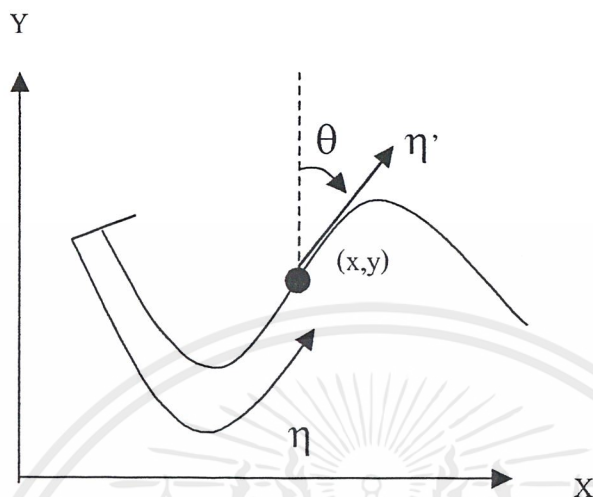
แสดงว่าการเคลื่อนที่ของชุดขับเคลื่อนจะไม่เกิดการไถลไปตามด้านข้าง แต่จะเกิดการเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่เคลื่อนที่ดังสมการ

$$x' \sin\theta - y' \cos\theta = \eta'$$

ซึ่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะเป็นไปตามลักษณะการเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์ (Serpenoid curve) ที่นี่กำหนด  $\eta$  คือระยะทางการเคลื่อนที่จากจุดอ้างอิง และ  $\theta(\eta)$  เป็นค่ามุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางการเคลื่อนที่ รูปที่ 2.6 แสดงการเคลื่อนที่ในลักษณะไปตามแนวโค้ง



รูปที่ 2.6 แสดงการเคลื่อนที่ในลักษณะไปตามแนวโค้ง

จากสมการ  $dx = \sin\theta d\eta$  ,  $dy = \cos\theta d\eta$

ดังนั้นเราจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง คู่ลำดับ  $(x,y)$  กับ ระยะทาง  $\eta$  คือ

$$dx/d\eta = \sin\theta , dy/d\eta = \cos\theta$$

จะได้  $x' = d\eta/dt * dx/d\eta = \eta' \sin\theta$

สมการที่ 1

และ  $y' = d\eta/dt * dy/d\eta = \eta' \cos\theta$

สมการที่ 2

ดังนั้น  $\eta(t) = \int_0^t \sqrt{x'^2 + y'^2} dt$

จากการเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์(Serpentoid curve)ค่าของมุม( $\theta$ ) จะเปลี่ยนแปลงไป ระยะทาง ( $\eta$ ) และความเร็วเชิงมุมของการบิดตัว ( $\omega$ ) โดยค่ามุมที่เปลี่ยนแปลงนี้จะเป็นไปตาม ฟังก์ชันซายน์ ดังสมการ

$$\theta = \omega \sin(k\eta)$$

แทนค่า  $\theta$  ลงในสมการที่ 1 และ 2 จะได้

$$dx/d\eta = \sin(\omega \sin(k\eta))$$

สมการที่ 3

$$dy/d\eta = \cos(\omega \sin(k\eta))$$

สมการที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากสมการที่ 3 และ 4 จะได้สมการตำแหน่งทุกๆตำแหน่งบนส่วนโค้งของการเคลื่อนที่แบบเซอร์เพนไทน์ ดังนี้

$$x(\eta) = \int_0^{\eta} \sin(\omega \sin(k\tau)) d\tau$$

$$y(\eta) = \int_0^{\eta} \cos(\omega \sin(k\tau)) d\tau$$

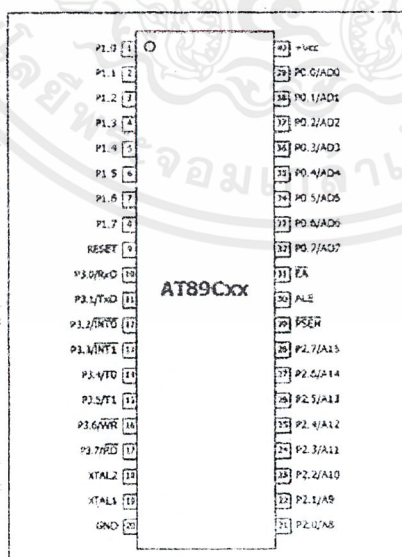
## 2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ได้ถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมมาตรฐานขนาด 8 บิตและถูกออกแบบให้มีความสามารถในการงานควบคุมประยุกต์ใช้งานในเรื่อง sequential real time control ,close loop control และ data control

### 2.2.1 ลักษณะการจัดขายภายนอก

ดังรูปที่ 2.7 แสดงการจัดขายภายนอกของชิป MCS-51 ซึ่งจะมีการแบ่งกลุ่มการจัดขายตามสถาปัตยกรรมของ MCS-51 อยู่ 4 กลุ่มคือ

1. กลุ่มขารับแหล่งจ่ายไฟฟ้าและระบบสัญญาณนาฬิกา
2. กลุ่มขาแอดเดรสและข้อมูล
3. กลุ่มขาควบคุม
4. กลุ่มขาพอร์ตแบบขนานและอนุกรม



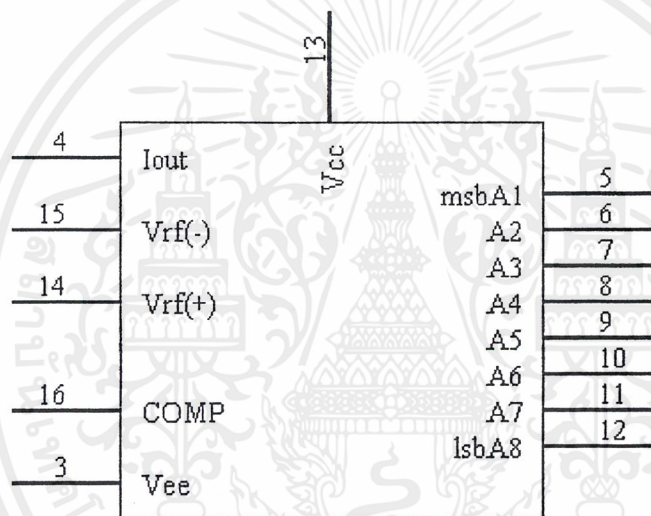
รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะการจัดขายของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 ระบบการแปลงและส่งสัญญาณข้อมูล

### 2.3.1 การทำงานของวงจรภาคเอาต์พุตแบบอนาล็อก (Digital to Analog Converter)

วงจรภาคเอาต์พุตแบบอนาล็อกนี้เราใช้ ไอซี DAC (Digital to Analog Converter) เป็นส่วนประกอบสำคัญของวงจร โดย ไอซี DAC จะทำหน้าที่ตรงข้ามกับไอซี ADC (Analog to Digital Converter) กล่าวคือจะมีหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณข้อมูลแบบดิจิทัลให้เป็นสัญญาณเอาต์พุตแบบอนาล็อก ซึ่งในที่นี้เราใช้ไอซีเบอร์ DAC0808 ซึ่งเป็น DAC ขนาด 8 บิต ซึ่ง DAC นี้จะให้สัญญาณเอาต์พุตออกมาเป็นอนาล็อกแต่ขนาดของสัญญาณที่ได้ยังมีขนาดต่ำไม่สามารถนำไปใช้ควบคุมทำงานอื่นได้โดยตรง ดังนั้นเราจึงมีวงจรขยายสัญญาณของเอาต์พุตให้มีขนาดสูงขึ้นก่อนที่จะนำไปใช้งาน



รูปที่ 2.8 แสดงวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก

### 2.3.2 การทำงานของไอซี DAC0808

ไอซี DAC0808 จะทำหน้าที่นำข้อมูลแบบดิจิทัลมาเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิงของวงจรแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณแบบอนาล็อกออกทางเอาต์พุตซึ่งขนาดของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของข้อมูลอินพุต โดยจะเป็นสัดส่วนแบบเชิงเส้น (linear) โดยขนาดของสัญญาณเอาต์พุตนั้นสามารถแบ่งขนาดได้ออกเป็นช่วงๆ (step) ตามขนาดของไอซี DAC ที่ใช้ ซึ่งค่า step นี้เป็นตัวแสดงถึงความละเอียดของสัญญาณเอาต์พุตของวงจร DAC ในแต่ละช่วงของการเปลี่ยนแปลงของจำนวนข้อมูลอินพุต เมื่อค่าข้อมูลเพิ่มขึ้น 1 ระดับ ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเพิ่มขึ้นเท่าไร ถ้าไอซี DAC มีจำนวนบิตมาก ค่าความละเอียดของเอาต์พุตก็จะมาก และถ้าไอซี DAC มีจำนวนบิตน้อยค่าความละเอียดของเอาต์พุตก็จะมีค่าน้อยตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3 ความสัมพันธ์ของอินพุทและเอาต์พุทของไอซี DAC0808

ไอซี DAC จะใช้การเปรียบเทียบจำนวนของข้อมูลแบบดิจิตอลกับแรงดันอ้างอิงของวงจร จากนั้นจึงเปลี่ยนขนาดของข้อมูลอินพุทนั้นกลับเป็นสัญญาณอนาล็อกส่งออกจากเอาต์พุทซึ่งขนาดของข้อมูลทางอินพุท กับขนาดของสัญญาณเอาต์พุทจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้

- กรณีที่ค่าของข้อมูลทางอินพุทมีค่าสูงสุด(เป็นลอจิกสูงมีสถานะเป็น “1” ทั้งหมดทุกบิตจะได้ขนาดของสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุทมีค่าเป็น 2 เท่า ของแรงดันอ้างอิงของวงจร)
- กรณีที่ค่าของข้อมูลอินพุทมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของข้อมูลสูงสุดจะได้ขนาดของสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุทมีค่าเท่ากับแรงดันอ้างอิงของวงจร

ทั้งนี้ขนาดของสัญญาณเอาต์พุทของวงจรจะกำหนดจากตัวแปรต่างๆดังนี้คือ

- แหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจร DAC
- แรงดันอ้างอิงของวงจร( voltage reference)

แรงดันอ้างอิงของวงจรนี้เป็นจุดอ้างอิงมาตรฐานของวงจรเป็นตัวกำหนดความเที่ยงตรงเป็นการเปลี่ยนขนาดของสัญญาณข้อมูลแบบดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาล็อก ซึ่งวงจรต้องการแรงดันอ้างอิงที่มีความเที่ยงตรงสูงเพราะหากแรงดันอ้างอิงของวงจรไม่มีความเที่ยงตรงแน่นอนมีการเปลี่ยนแปลงแล้วการทำงานของวงจรก็จะเปลี่ยนตามไปด้วย ซึ่งจะส่งผลให้สัญญาณอนาล็อกเอาต์พุทที่ได้เปลี่ยนแปลงขึ้นๆลงๆตามไปด้วย ถึงแม้ว่าค่าข้อมูลอินพุทที่ป้อนให้ไอซี DAC จะมีขนาดคงที่ก็ตาม และแรงดันอ้างอิงของวงร็วยังเป็นตัวกำหนดสัดส่วนของข้อมูลอินพุทและสัญญาณเอาต์พุทอีกด้วย

### 2.3.4 อัตราการขยายของวงจรออปแอมป์(Op-Amp)

จากที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า เอาต์พุท(สัญญาณอนาล็อก)ที่ได้จากไอซี DAC จะมีค่าต่ำไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ควบคุมได้ จึงต้องใช้วงจรขยายขนาดของสัญญาณให้สูงขึ้น ดังนั้นอัตราการขยายของวงจรจึงเป็นตัวกำหนดอัตราส่วนของขนาดของสัญญาณสูงสุดของสัญญาณด้วย

### 2.3.5 ค่าของข้อมูลอินพุท (data) ของวงจร

ค่าของข้อมูลอินพุทนี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของเอาต์พุทที่ได้จากไอซี DAC ซึ่งค่าของข้อมูลอินพุทนี้สามารถเปลี่ยนแปลงขึ้นลงได้ตลอดเวลาเพื่อควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุทในช่วงเวลาต่างๆตามความต้องการ ซึ่งถ้าค่าข้อมูลทางอินพุทมีค่ามากก็จะได้ขนาดของสัญญาณเอาต์พุทมาก แต่ถ้าขนาดของข้อมูลอินพุทมีค่าน้อยก็จะทำให้ขนาดของสัญญาณเอาต์พุทน้อยตามไปด้วยเช่นกัน

### 2.3.6 การกำหนดค่าของข้อมูลเพื่อกำหนดขนาดของสัญญาณเอาต์พุต

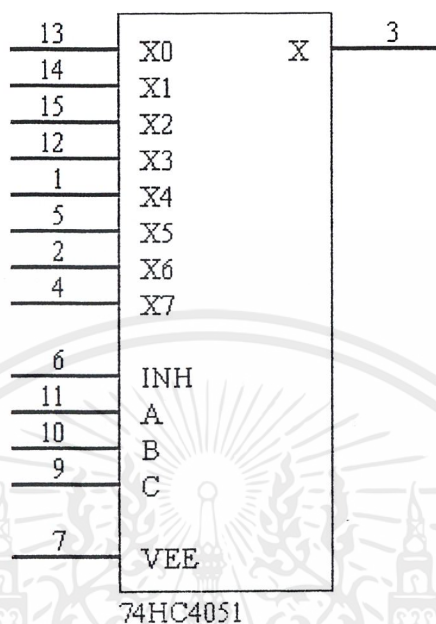
การที่เราจะสามารถกำหนดค่าของข้อมูลอินพุตของไอซี DAC เพื่อให้ได้ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตตามความต้องการของเรานั้น ก่อนอื่นเราต้องทราบความสามารถของไอซี DAC เสียก่อนว่าสามารถให้ค่าสัญญาณเอาต์พุตต่อ step เป็นเท่าไรเสียก่อน แล้วจึงหาว่าหากเราต้องการได้ค่าสัญญาณเอาต์พุตขนาดเท่านี้แล้วต้องใช้ step จึงจะได้ขนาดของสัญญาณตามที่ต้องการซึ่งค่า step นี้สามารถกำหนดได้จากจำนวนบิตของข้อมูลอินพุตของไอซี DAC ซึ่งในที่นี้ไอซี DAC0808 มีขนาด 8 บิต เราจะได้ข้อมูลอินพุตอยู่ระหว่าง 00H-FFH หรือ 0-255 นั่นก็คือไอซี DAC สามารถให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นช่วงๆทั้งหมด 256 ช่วง (0-255) นั่นเอง ซึ่งจะเห็นว่าถ้าอินพุตของ DAC มีมากเท่าไรเราก็จะได้ค่าความละเอียดมากขึ้นตามไปด้วย

ซึ่งเมื่อเราทราบว่าไอซี DAC มีค่า step ทั้งหมดเท่าไรแล้วก็สามารถหาได้ว่าใน 1 step จะได้ขนาดของสัญญาณเอาต์พุตเป็นเท่าไร โดยสามารถหาได้จากสูตร

$$\text{step} = \text{Analog Max} / \text{DAC step}$$

เมื่อ	step	คือ ค่าของสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุตต่อ 1 ช่วงข้อมูล
	Analog Max	คือ ค่าของขนาดสัญญาณอนาล็อกเอาต์พุตสูงสุดที่ใช้ในวงจร
	DAC step	คือ ค่าของจำนวน step ของ ไอซี DAC ที่ใช้ในวงจร (DAC 0808 ขนาด 8 บิต)

### 2.3.7 การทำงานของวงจรถูกเลือกของสัญญาณ (Analog switch 74HC4051)



รูปที่ 2.9 แสดง ไอซีเลือกช่องสัญญาณ

Analog switch(74HC4051) จะทำหน้าที่ควบคุมช่องสัญญาณอนาล็อกซึ่งรับมาจากจากเอาต์พุตของวงจรถูกเลือกสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก เพื่อส่งค่าไปยังวงจรถูกเลือกมอเตอร์ ไอซี 74HC4051 จะมีเอาต์พุตทั้งหมด 8 เอาต์พุต ( Y0-Y7 ) โดยสัญญาณควบคุม ( S0-S2 ) จะถูกส่งมาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) ซึ่งจะเป็นสัญญาณที่ใช้ในการเลือกช่องการส่งข้อมูล ในที่นี้ จะทำการส่งข้อมูลทั้งหมด 7 ช่องสัญญาณ ( วงจรถูกเลือกมอเตอร์ 7 วงจร )

การเลือกช่องการส่งข้อมูลของไอซี 74HC4051 เมื่ออินพุตของไอซี 74HC4051 เป็น 001 และ สัญญาณอนาล็อกจากวงจรถูกเลือกสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกถูกส่งมายังอินพุตของไอซี 74HC4051 แล้ว สัญญาณอนาล็อกนี้ก็จะถูกเลือกออกไปยังเอาต์พุต Y1 ผ่าน buffer ไปยังวงจรถูกเลือกมอเตอร์ 1 จากนั้นการส่งค่าสัญญาณอนาล็อกจะกระทำดังนี้แต่จะเปลี่ยนค่าการเลือกช่องและค่าสัญญาณอนาล็อกตามแต่ละการสั่งงานในแต่ละวงจรถูกเลือกมอเตอร์( 7 วงจร)

INPUT				OUTPUT
E	S0	S1	S2	
0	0	0	0	Y0
0	0	0	1	Y1
0	0	1	0	Y2
0	0	1	1	Y3
0	1	0	0	Y4
0	1	0	1	Y5
0	1	1	0	Y6

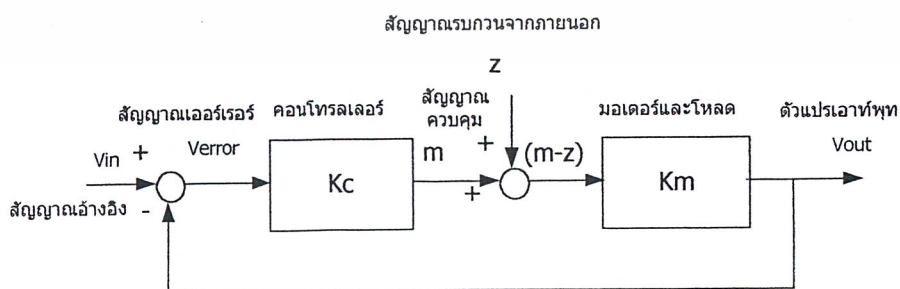
หมายเหตุ : สัญญาณอินพุต E(Enable) จะมีค่าเป็น “0” เสมอ

## ตารางที่ 2.1 แสดงการเลือกช่องสัญญาณการส่งข้อมูล

### 2.4 ระบบการควบคุมดิจิทัลซีมีโอเตอร์

#### 2.4.1 วงจรวงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-Controller)

ในระบบการคอนโทรลมอเตอร์ จุดมุ่งหมายของของตัวคอนโทรลเลอร์คือเพื่อที่จะปรับตัวแปรเอาต์พุตของระบบให้เข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้ และจะต้องรักษาค่าตัวแปรดังกล่าวให้อยู่ที่ค่าที่กำหนดนั้นซึ่งระบบการคอนโทรลมอเตอร์แบบพื้นฐานแสดงดังในรูปที่ 2.10 ตัวคอนโทรลเลอร์จะปรับตัวแปรเอาต์พุต ( $V_{out}$ ) โดยใช้สัญญาณควบคุม ( $m$ ) เพื่อไปทำให้สัญญาณเออร์เรอร์ (Verror) มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ และสัญญาณรบกวนจากภายนอกที่กระทำต่อระบบจะเข้ามาพร้อมกับตัวแปรได้ผลรวมเป็น  $m+z$



รูปที่ 2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมระบบคอนโทรลมอเตอร์แบบ close-loop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

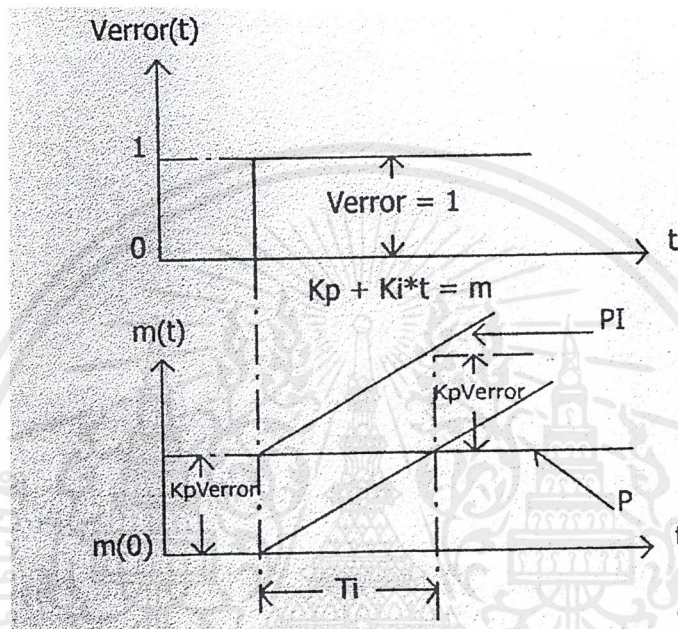
การคอนโทรลแบบนี้เราจะหาสัญญาณควบคุม (m) ได้จากสมการที่ 2.1

$$m = k_p \times V_{\text{error}} + k_i \int V_{\text{error}} dt + m(0)$$

โดยที่  $k_p = R_2/R_1$

และ  $k_i = 1/R_1 \cdot C_1$

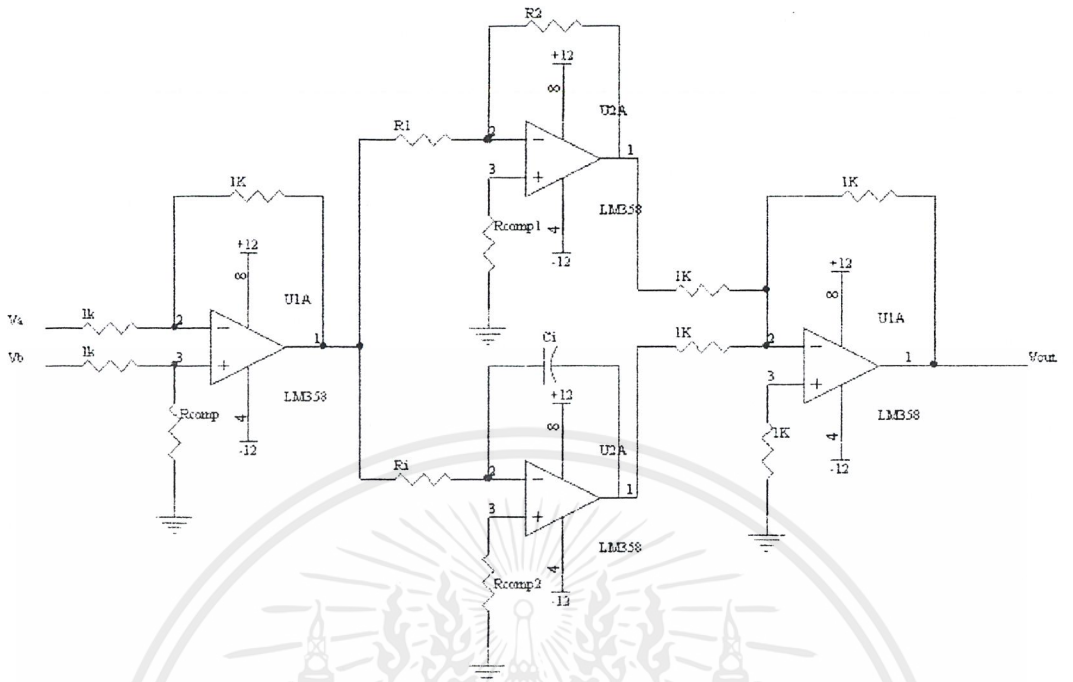
สมการที่ 2.1



รูปที่ 2.11 แสดงกราฟผลตอบสนองทางเวลาของ PI-Controller

ข้อดีของ ระบบควบคุมแบบพีไอ คือจะทำให้คุณสมบัติของทั้งแบบปรีอพออร์ชันนัลและแบบอินทิกรัลซึ่งสามารถทำให้ค่าออฟเซ็ทในแบบปรีอพออร์ชันนัลหมดไป และ  $K_i$  กำลังขยายของการอินทิกรัลสามารถจะปรับค่าได้อย่างอิสระ

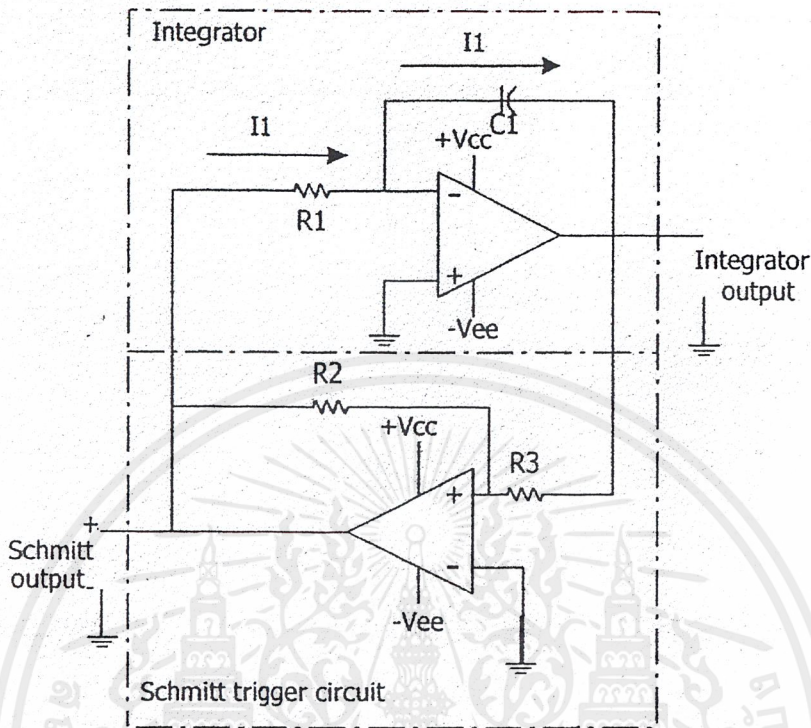
ระบบควบคุมแบบพีไอจะใช้กับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงโหลดมากๆ ได้ แต่โหลดควรจะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เมื่อเทียบกับ  $T_i$  เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการออสซิลเลท เนื่องจากโอเวอร์ชูทของอินทิกรัล และระบบมักจะให้โอเวอร์ชูทสูงก่อนที่จะเข้าสู่ที่นิ่ง



รูปที่ 2.12 แสดงวงจร PI-Controller

#### 2.4.2 วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangular generator)

วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม จะเป็นวงจรที่ทำหน้าที่สร้างสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangular signal) ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งจะประกอบไปด้วย วงจรอินทิกรัล (integrator) และ วงจร Noninverting schmitt trigger โดย เอาต์พุตของวงจร schmitt จะเป็นอินพุตให้กับวงจรอินทิกรัล และเอาต์พุตของวงจรอินทิกรัล จะเป็นอินพุตให้กับวงจร schmitt ซึ่ง วงจรอินทิกรัลจะให้เอาต์พุตออกมาเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม เมื่อได้รับอินพุตเป็นสัญญาณสามเหลี่ยม (Square wave) โดยวงจร schmitt จะให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณระดับ โวลเตจ ระหว่าง  $+V_{sat}$  และ  $-V_{sat}$  ในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งจะมีผลทำให้เอาต์พุตของวงจรอินทิกรัลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงตามค่าเอาต์พุตของ schmitt

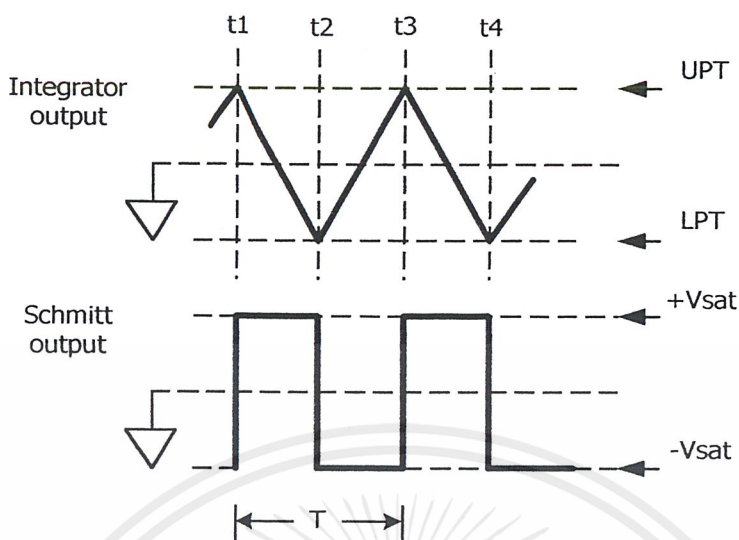


รูปที่ 2.13 แสดงวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangular generator)

ณ  $t_1$  เอาต์พุตของวงจรอินทิกรัล อยู่ที่ UPT และเอาต์พุตของวงจร schmitt เป็น  $+V_{sat}$  เนื่องจากสัญญาณอินพุตของวงจรอินทิกรัล เป็นบวก ทำให้มีกระแส  $I_1$  ไหลผ่าน  $R_1$  และ  $C_1$  ซึ่งจะเกิดการประจุ  $C_1$  ทำให้เกิดสัญญาณบวกทางซ้ายและสัญญาณลบทางขวา จะเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณในลักษณะที่เป็นลบ จาก  $t_1$  ไปยัง  $t_2$

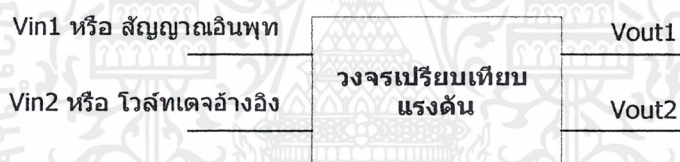
ณ  $t_2$  เอาต์พุตของวงจร schmitt จะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจาก  $+V_{sat}$  เป็น  $-V_{sat}$  ทำให้กระแส  $I_1$  ไหลย้อนกลับ และ  $C_1$  คายประจุ ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณในลักษณะที่เป็นบวกขึ้นตลอดช่วง  $t_2$  ถึง  $t_3$  จนกว่าจะถึงจุด UPT ของวงจร schmitt และจะเป็นจุดที่เอาต์พุตของวงจร schmitt เป็น  $+V_{sat}$  อีกครั้ง ดังนั้นจะเกิดเป็นลักษณะดังเช่นเดิมซึ่งเป็นการวนรอบต่อไปอีก

วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและกราฟเอาต์พุตในแต่ละส่วนของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.13 และ 2.14 ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 แสดงเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

### 2.4.3 วงจร เปรียบเทียบแรงดัน(Voltage comparator)

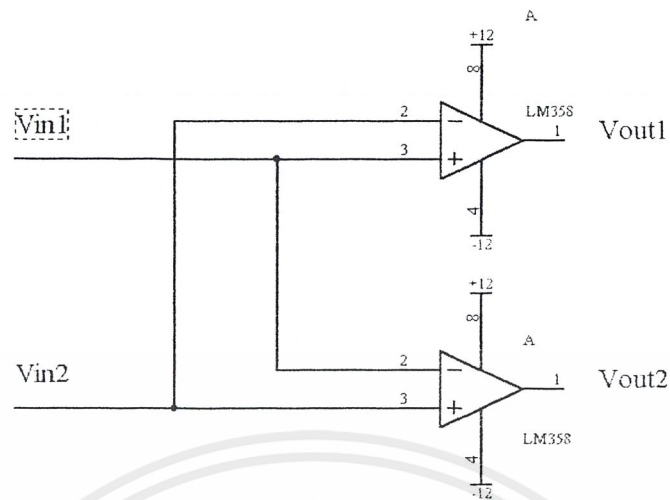


รูปที่ 2.15 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรเปรียบเทียบแรงดัน(Voltage comparator)

ลักษณะการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน วงจรจะทำการเปรียบเทียบแรงดันระหว่างจุด  $V_{in1}$  และ  $V_{in2}$  โดย  $V_{in2}$  นั้นจะใช้เป็นแรงดันอ้างอิง (Input reference voltage) ที่เปลี่ยนแปลงได้สำหรับ Op-amp1 และ Op-amp2 โดยป้อนที่ขา Inverting ของ Op-amp1 และที่ขา Noninverting ของ Op-amp2 ส่วน  $V_{in1}$  นั้นเป็นแรงดันที่นำไปเปรียบเทียบกับแรงดันอ้างอิง โดย  $V_{in1}$  นั้น ป้อนที่ขา Noninverting ของ Op-amp และที่ขา Inverting ของ Op-amp2

ลักษณะเงื่อนไขเบื้องต้นของการทำงานของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

- เมื่อ  $V_{in1} = V_{in2}$  จะได้  $V_{out1} = V_{out2}$
- เมื่อ  $V_{in1} > V_{in2}$  จะได้  $V_{out1} = \text{high}$  ,  $V_{out2} = \text{low}$
- เมื่อ  $V_{in1} < V_{in2}$  จะได้  $V_{out1} = \text{low}$  ,  $V_{out2} = \text{high}$



รูปที่ 2.16 แสดงวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

### หลักการควบคุมการสร้างพัลส์ (Pulse Width Modulation)

ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ให้คงที่ หรือวงจรสวิทชิงซึ่งพัลส์ที่ต้องการควบคุมแรงดันให้คงที่ นิยมใช้หลักการควบคุมความกว้างของพัลส์(P.W.M)ซึ่งเป็นการควบคุมโดยเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาที่อยู่ปรณส์วิตซ์อิเล็กทรอนิกส์



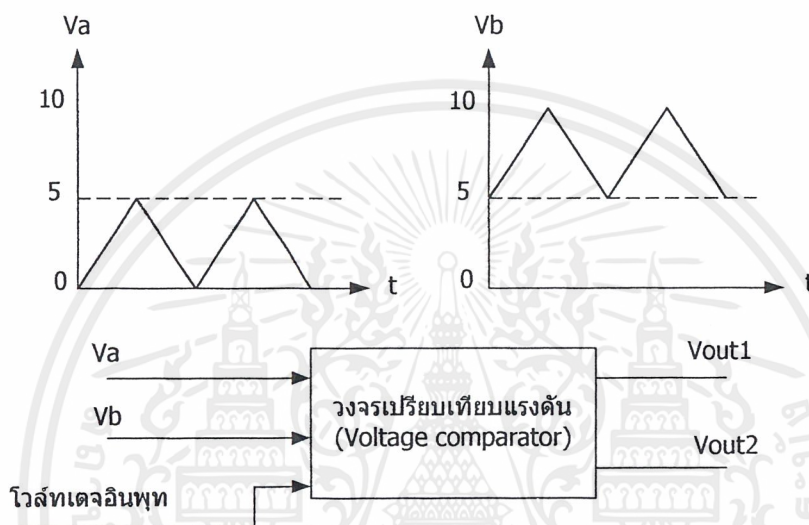
รูปที่ 2.17 แสดงการทำงาน Pulse width modulation

วงจรสร้างสัญญาณ Pulse width modulation (P.W.M)เป็นตัวกำเนิดสัญญาณความถี่ และควบคุมความกว้างของสัญญาณพัลส์ตามที่ค่าคำสั่งจ่ายให้กับวงจร จากรูปที่ 2.17 กำหนดค่าคำสั่งเป็น  $V_{ref}$  ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นภายในวงจร P.W.M โดยหน้าที่ของ P.W.M คือ สร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและเปรียบเทียบสัญญาณสามเหลี่ยมกับระดับแรงดัน  $V_{ref}$  ซึ่งจะได้เอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์ที่เปลี่ยนแปลงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Duty Cycle ตามผลการเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุตนี้จะนำไปผ่านวงจรจับมอดเตอร์เพื่อควบคุมความเร็วของมอเตอร์ต่อไป

ในการนำไปประยุกต์ใช้งานนั้น วงจรเปรียบเทียบแรงดันจะทำงานควบคู่กับ วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม เพื่อใช้ในการสร้างสัญญาณ Pulse width modulation(P.W.M) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงการประยุกต์ใช้งานวงจรเปรียบเทียบแรงดัน

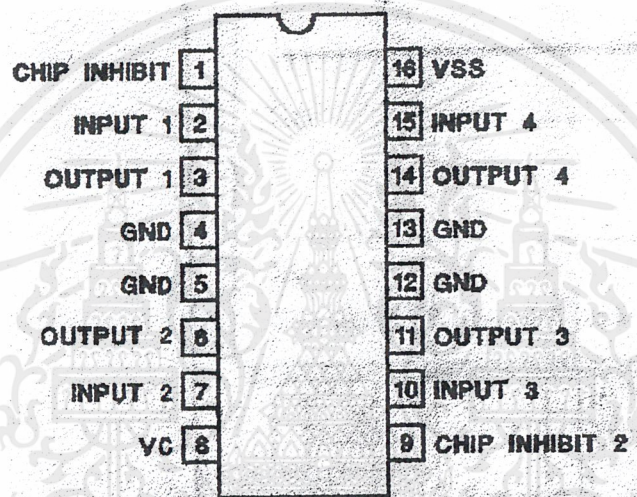
จากสัญญาณสามเหลี่ยมจะถูกสร้างมาจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม ซึ่งจะถูแยกออกเป็น 2 สัญญาณ ให้สัญญาณที่ 1 (Va) มีระดับแรงดันอยู่ระหว่าง 0 ถึง +5 โวลต์ และสัญญาณที่ 2 (Vb) มีระดับแรงดันอยู่ระหว่าง +5 ถึง +10 โวลต์ ซึ่งสัญญาณทั้งสองจะถูกนำไปเป็นอินพุทของวงจรเปรียบเทียบแรงดัน เพื่อทำการเปรียบเทียบสัญญาณทั้งสองกับสัญญาณ โวลต์เดจระดับอ้างอิง(Vin) ซึ่งจะเป็นค่าโวลต์เดจเออร์เรอร์จากวงจรPI-Controller และ เอาต์พุทของวงจรจะออกมาในลักษณะเป็นสัญญาณ Pulse width modulation ดังนี้

- Vin มีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง +5 โวลต์ จะได้ Vout1 = สัญญาณพัลส์ และ Vout2 = 0 โวลต์
- Vin มีค่าอยู่ในช่วง +5 ถึง +10 โวลต์ จะได้ Vout1 = 0 โวลต์ และ Vout2 = สัญญาณพัลส์
- Vin มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ จะได้ Vout1 = 0 โวลต์ และ Vout2 = 0 โวลต์

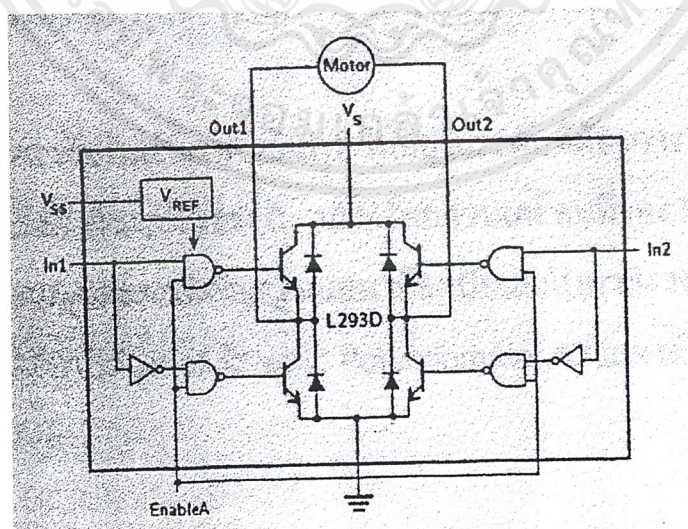
ซึ่งสัญญาณเอาต์พุท Vout1 และ Vout2 จะถูกนำไปใช้ควบคุมวงจรถวลมอดเตอร์ต่อไป

#### 2.4.4 วงจรควบคุมดีซีมอเตอร์ ( ไอซี L293D )

วงจรควบคุมดีซีมอเตอร์ ไอซีเบอร์ L293D เป็นไอซีขนาด 16 ขา ภายในจะประกอบไปด้วย วงจรควบคุมมอเตอร์แบบ H-bridge ซึ่งทำงานด้วยทรานซิสเตอร์ชนิดไบโพลาร์จำนวน 2 วงจร ดังรูปที่ 2.20 จะแสดงวงจรควบคุมมอเตอร์แบบ H-bridge หนึ่งวงจรภายในของไอซีควบคุมดีซีมอเตอร์(L293D) ซึ่งคุณสมบัติของวงจรควบคุมดีซีมอเตอร์นี้จะสามารถจ่ายกระแสเอาต์พุต ให้กับดีซีมอเตอร์ได้ถึง 600 mA ช่วงการทำงานสามารถใช้งานได้ถึง 36V และจะรับสัญญาณอินพุต In1 และ In2 ในการควบคุมทิศทางการหมุนของดีซีมอเตอร์



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะขาของไอซีควบคุมดีซีมอเตอร์ L293D



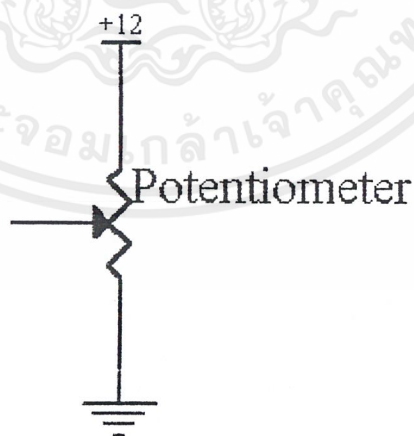
รูปที่ 2.20 แสดงวงจรควบคุมดีซีมอเตอร์แบบ H-bridge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมทิศทางการหมุนของดีซีมอเตอร์นั้นจะให้ค่าระดับแรงดัน +5 โวลต์ (high) หรือ 0 โวลต์ (low) แก่อินพุท In1 และ In2 ซึ่งหากจ่ายระดับแรงดัน +5 โวลต์ให้กับ In1 และ จ่ายแรงดัน 0 โวลต์ให้กับ In2 ก็จะสามารถควบคุมมอเตอร์ให้หมุนในทิศทางหนึ่ง ในทางกลับกันหากจ่ายระดับแรงดัน 0 โวลต์ให้กับ In1 และจ่ายแรงดัน +5 โวลต์ให้กับ In2 แล้วจะทำให้มอเตอร์หมุนกลับทิศ

#### 2.4.5 โปเทนเชียลมิเตอร์ (Potentiometer)

โปเทนเชียลมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอินพุทที่ป้อนให้กับโปเทนเชียลมิเตอร์จะอยู่ในรูปการเคลื่อนที่แบบเชิงกล ซึ่งอาจเป็นการเคลื่อนที่แบบหมุนหรือการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นก็ได้ เมื่อป้อนโวลต์เตจเข้ากับปลายข้างที่อยู่กับที่ของโปเทนเชียลมิเตอร์ เอาต์พุท โวลต์เตจจากปลายของส่วนเคลื่อนที่ของโปเทนเชียลมิเตอร์ จะแปรผันโดยตรงกับความเร็วของการหมุนและระยะของการเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น โดยในระบบการควบคุมตำแหน่งดีซีมอเตอร์ จะนำโปเทนเชียลมิเตอร์มาใช้งานในส่วนของการส่งข้อมูลป้อนกลับเพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งของโหลดกับตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการควบคุม ผลต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบ โปเทนเชียลมิเตอร์จะกำเนิดสัญญาณในรูปของสัญญาณเออร์เรอร์ ออกมาเป็นโวลต์เตจซึ่งจะถูกนำไปขยาย และนำไปใช้ในการควบคุมดีซีมอเตอร์เพื่อขับเคลื่อน โหลดให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะ โครงสร้างภายในของ โปเทนเชียลมิเตอร์

## บทที่ 3

### การออกแบบโครงงานและการสร้าง

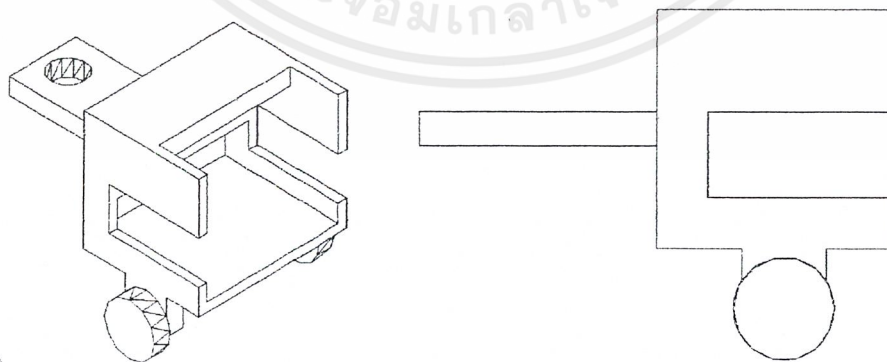
#### 3.1 การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์

จากสมมติฐานลักษณะการเคลื่อนที่ของรูปแบบเคลื่อนที่ต่อเนื่อง เราจะเคลื่อนที่ด้วยการบิดของข้อต่อแต่ละข้อต่ออย่างสัมพันธ์กัน ดังนั้นเราจะออกแบบลักษณะของหุ่นยนต์ โดยการสร้างชุดขับเคลื่อนที่มี 2 ล้อ แทนข้อต่อของงู ในที่นี่จะใช้ทั้งหมด 8 ข้อต่อด้วยกัน ซึ่งแต่ละข้อต่อนั้นจะเชื่อมต่อกันด้วยคีมอเตอร์ และ โปเทนเชียลมิเตอร์ทำหน้าที่ตรวจเช็คตำแหน่งของการบิดของข้อต่อแต่ละข้อ

ทั้งนี้การออกแบบ โครงสร้างของแต่ละข้อต่อจะต้องคำนึงถึงขนาด มุม และลักษณะในการควบคุม โดยโครงสร้างของหุ่นยนต์แต่ละข้อต่อจะแยกออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

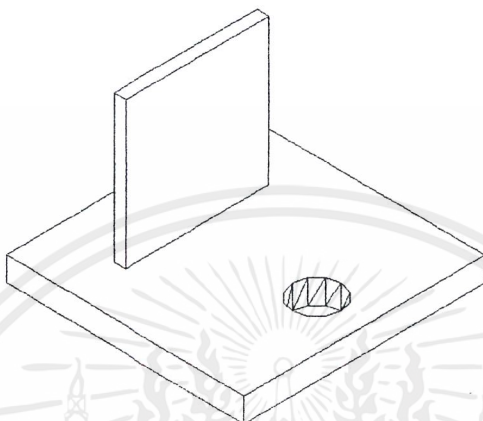
- ส่วนของโครงลำตัว
- ส่วนแผ่นรองคีมอเตอร์และแผงวงจรด้านบน
- ส่วนล้อคีมอเตอร์กับ โปเทนเชียลมิเตอร์

ส่วนโครงลำตัวจะมีลักษณะเป็นกล่อง ขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร สูง 4 เซนติเมตร และส่วนที่ยื่นออกมาเพื่อต่อกับข้อต่อถัดไปยาว 5.5 เซนติเมตร ด้านล่างจะประกอบด้วย ส่วนยึดเพลาล้อ ล้อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1



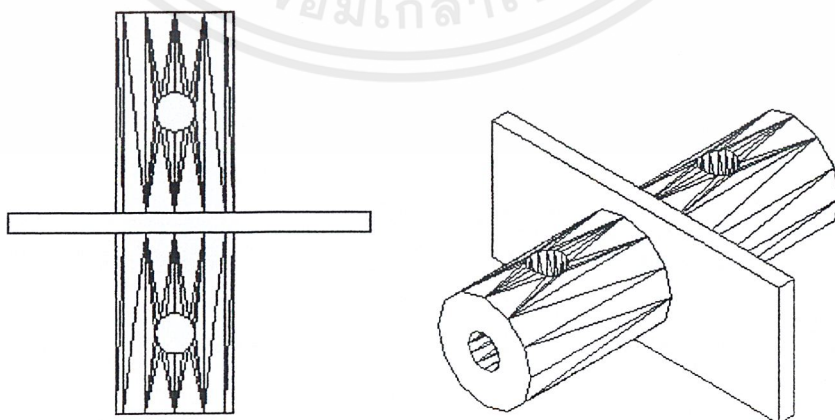
รูปที่ 3.1 แสดงส่วน โครงสร้างลำตัว

ส่วนแผ่นรองคีมอเตอร์และแผงวงจรด้านบน เป็นแผ่นพลาสติกขนาดกว้าง 8 เซนติเมตร ยาว 8 เซนติเมตร ในส่วนนี้จะมีรูเอาไว้สำหรับการยึดคีมอเตอร์มอเตอร์และจะมีส่วนที่ตั้งขึ้นติดอยู่ด้านบนขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร ยาว 6 เซนติเมตร ซึ่งจะเป็นส่วนที่ยึดแผงวงจรควบคุมคีมอเตอร์ด้านบน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงส่วนแผ่นรองคีมอเตอร์และแผงวงจรด้านบน

ส่วนล้อคอมอเตอร์กับโพเทนซีอเมเตอร์ มีหน้าที่ล้อคอมอเตอร์ โพเทนซีอเมเตอร์เข้ากับส่วนโครงสร้างลำตัวแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยจะเป็นลักษณะเป็นทรงกระบอก 2 ส่วน ส่วนบนสูง 0.9 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร มีหน้าที่ล้อแกนคีมอเตอร์ ส่วนล่างสูง 1.2 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร มีหน้าที่ล้อโพเทนซีอเมเตอร์ และจะขึ้นด้วยแผ่นปริ้นท์ขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร ซึ่งมีหน้าที่ล้อกับ โครงสร้างลำตัวของแต่ละข้อ



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนส่วนล้อคอมอเตอร์กับ โพเทนซีอเมเตอร์

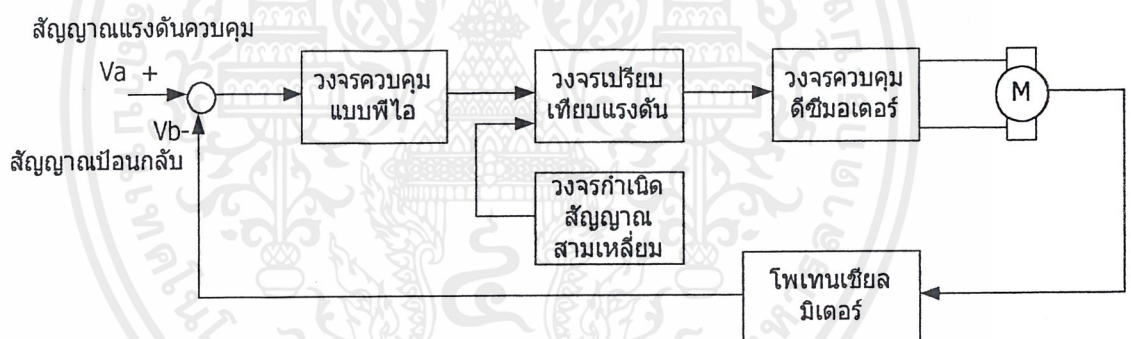
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบวงจรควบคุมข้อต่อ

การออกแบบวงจรควบคุมข้อต่อหุ่นยนต์จะใช้การควบคุมดีซีมอเตอร์ขนาด 12 โวลท์ ให้สามารถทำงานไปกลับได้ 2 ทิศทางและสามารถที่จะควบคุมให้หมุนช้าหรือเร็วได้ การควบคุมนั้นจะถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่าน วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก และวงจรควบคุมการส่งสัญญาณ

ดังรูปที่ 3.4 แสดงบล็อกไดอะแกรม ซึ่งแสดงให้เห็นถึงส่วนประกอบโดยรวมของวงจรควบคุมข้อต่อ แบ่งออกเป็น 5 ส่วนดังนี้

- วงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-controller)
- วงจรเปรียบเทียบแรงดัน (Voltage comparator)
- วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม (Triangular generator)
- วงจรควบคุมดีซีมอเตอร์ (L293D)
- ส่วนการป้อนกลับ (Potentiometer)



รูปที่ 3.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมวงจรควบคุมข้อต่อ

#### การทำงานของวงจรควบคุมข้อต่อ

สัญญาณ โวลท์เตจควบคุม ( $V_a$ ) จะเป็นสัญญาณอินพุทของวงจรควบคุมดีซีมอเตอร์ โดยวงจรควบคุมแบบพีไอจะทำหน้าที่ปรับปรุงสัญญาณเพื่อให้วงจรสามารถตอบสนองได้ทันที จากนั้นสัญญาณจากวงจรควบคุมแบบพีไอจะถูกส่งไปเป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณสามเหลี่ยมที่สร้างมาจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม สัญญาณที่ได้จากวงจรถือเปรียบเทียบกับแรงดันจะเป็นสัญญาณลักษณะ สัญญาณพัลส์ (Pulse with modulation หรือ P.W.M) จากสัญญาณพัลส์ที่ได้ก็จะถูกส่งไปยังวงจรควบคุมดีซีมอเตอร์ (ไอซี L293D) เพื่อควบคุมทิศทางและ

ความเร็วของดีซีมอเตอร์ ในส่วนของสัญญาณป้อนกลับนั้นจะใช้โพเทนเชียลมิเตอร์เพื่อควบคุมตำแหน่งของข้อต่อ ซึ่ง สัญญาณ โวลต์เตจที่ได้จากโพเทนเชียลมิเตอร์(Vb)จะถูกส่งกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณโวลต์เตจอินพุท(Va) ในลักษณะของการลบ ซึ่งหากค่าสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบยังไม่เป็น 0 โวลต์ ดีซีมอเตอร์ก็จะยังหมุนต่อไปจนกว่าค่าสัญญาณ โวลต์เตจที่ส่งกลับมาจะเป็น 0 โวลต์

### 3.3 การออกแบบวงจรประมวลผลและวงจรส่งข้อมูล

วงจรส่วนนี้เป็นวงจรประมวลผล แปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อก และวงจรเลือกช่องสัญญาณการส่งข้อมูล โดยเราจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวประมวลผลค่าโวลต์เตจในระดับต่างๆ ส่งสัญญาณในรูปของสัญญาณดิจิตอลผ่านวงจรแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นสัญญาณอนาล็อก จากนั้นจะส่งไปยังวงจรเลือกช่องส่งสัญญาณ พร้อมทั้งทำการเลือกช่องสัญญาณเพื่อทำการเลือกว่าจะส่งสัญญาณค่าสังคมนั้นไปที่วงจรควบคุมดีซีมอเตอร์ของแต่ละข้อ

#### 3.3.1 การออกแบบค่าเอาต์พุทของวงจร DAC0808

กำหนดดังนี้

- ไอซี DAC0808 ขนาด 8 บิต
- สัญญาณเอาต์พุทมีขนาดสูงสุด +12 V
- ค่าสัญญาณเอาต์พุทต่อ 1 ครั้งของการเปลี่ยนแปลง(1 step) เป็น  $STEP = 12/256 \approx 0.05$  V

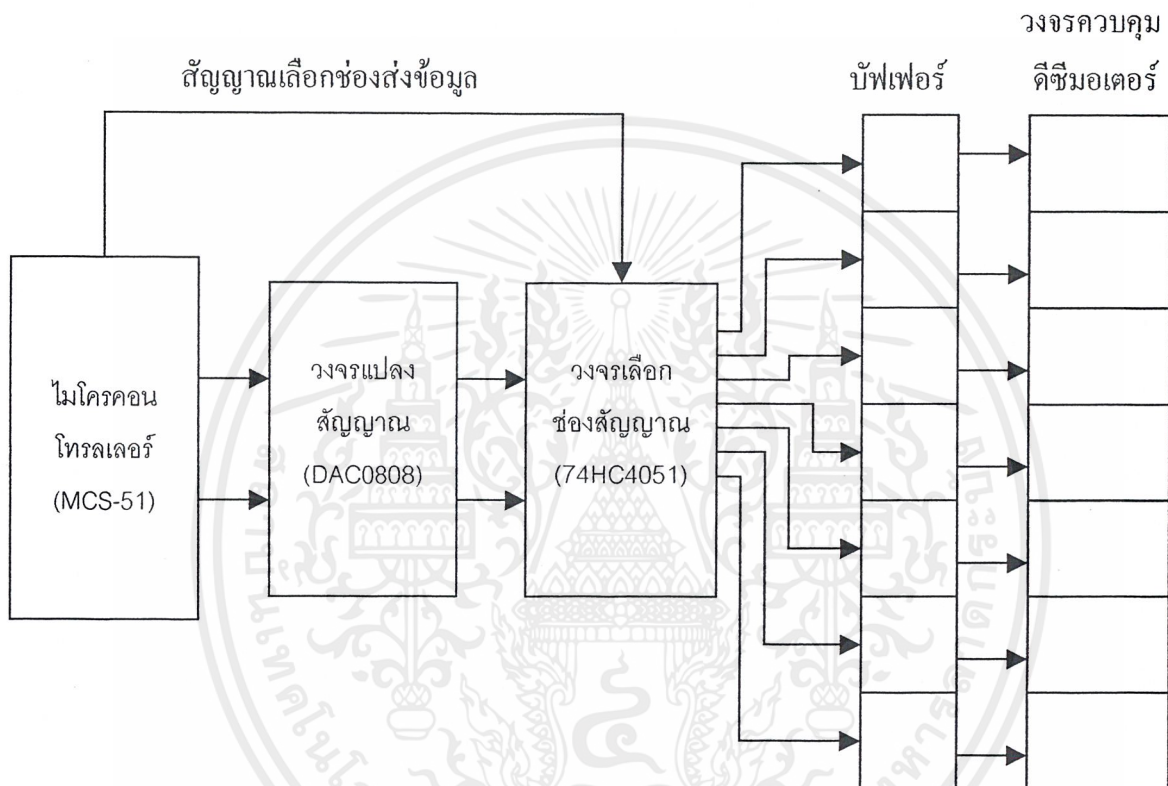
จะเห็นได้ว่าเราได้ค่าของสัญญาณเอาต์พุทต่อ step มีค่าประมาณ 0.05 โวลต์ หรืออาจกล่าวได้ว่าหากเราให้ข้อมูลอินพุทกับวงจรด้วยค่า 01H (00000001B) เราจะได้สัญญาณเอาต์พุทมีขนาดประมาณ 0.05 โวลต์ ดังนั้นสมมติว่าเราต้องการ 2.5 โวลต์ เราต้องให้ค่าข้อมูลอินพุทเป็น

$$\begin{aligned} DATA &= 2.5 / 0.05 \\ &= 50D \text{ หรือ } 32H (00110010B) \end{aligned}$$

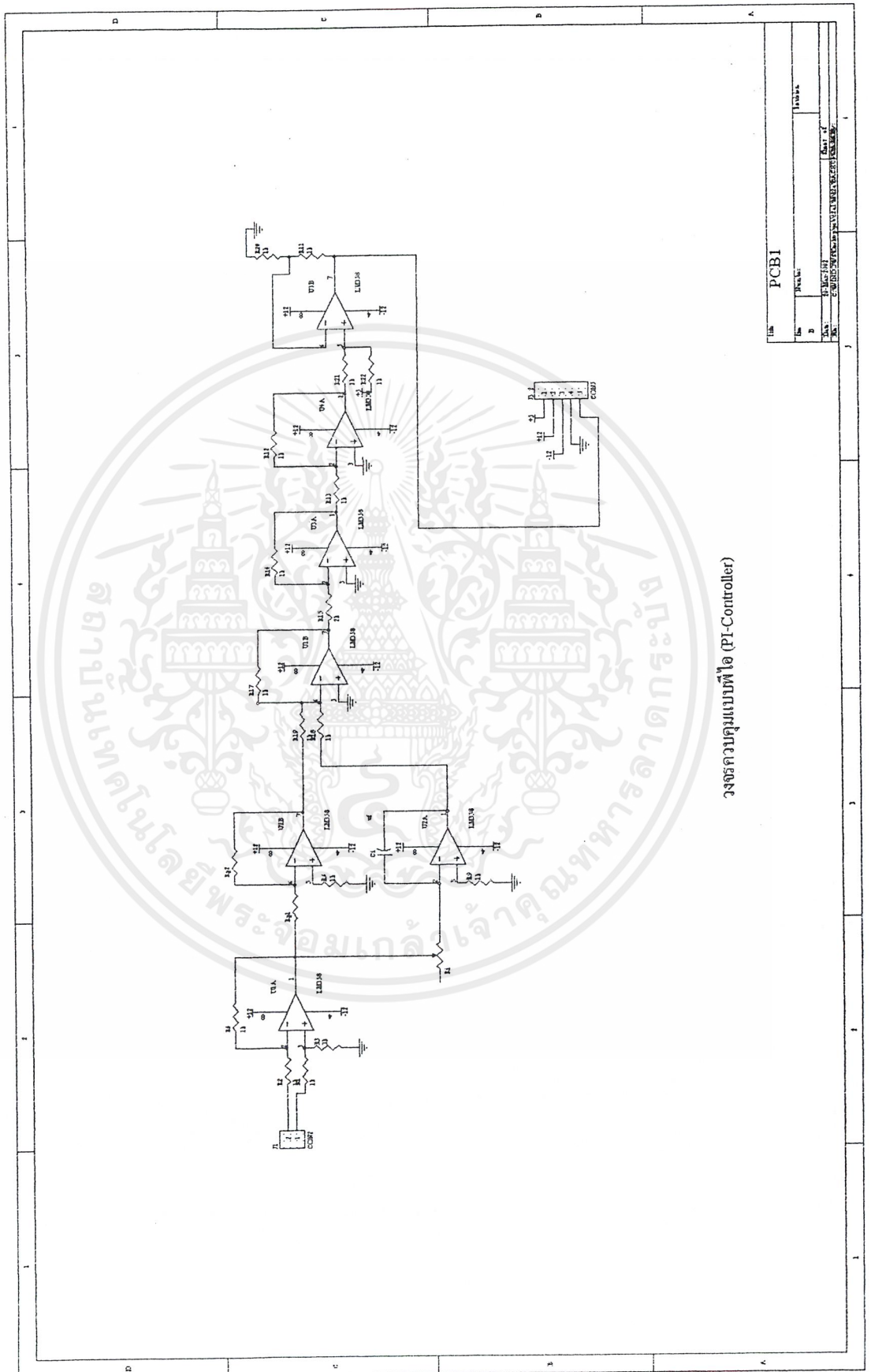
ทั้งนี้ในการปฏิบัติจริงนั้นค่าเอาต์พุทสูงสุดจะไม่ได้ตามค่าโวลต์เตจอ้างอิงที่ป้อนให้(+12 โวลต์) ซึ่งอาจลดลงมาถึง +10 โวลต์ ดังนั้นค่าเอาต์พุทอนาล็อกของการเปลี่ยนแปลงในแต่ละครั้งก็จะมีค่าประมาณ  $10/256 \approx 0.04$  โวลต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบจากการคำนวณข้างต้นแล้วยังถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้ (ต่างกันน้อยมาก)

### 3.3.2 การออกแบบการส่งค่าข้อมูลของไอซีเลือกช่องส่งสัญญาณ

ไอซี 74HC4051 จะรับอินพุตสัญญาณอนาล็อกจากวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก และรับสัญญาณการเลือกช่องสัญญาณจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเอาต์พุตจะมีทั้งหมด 7 เอาต์พุต จะถูกต่อเชื่อมเข้ากับวงจรควบคุมดิซีมอเตอร์ทั้งหมด 7 วงจร โดยผ่านบัฟเฟอร์



รูปที่ 3.5 แสดงบล็อกไดอะแกรมการส่งข้อมูล

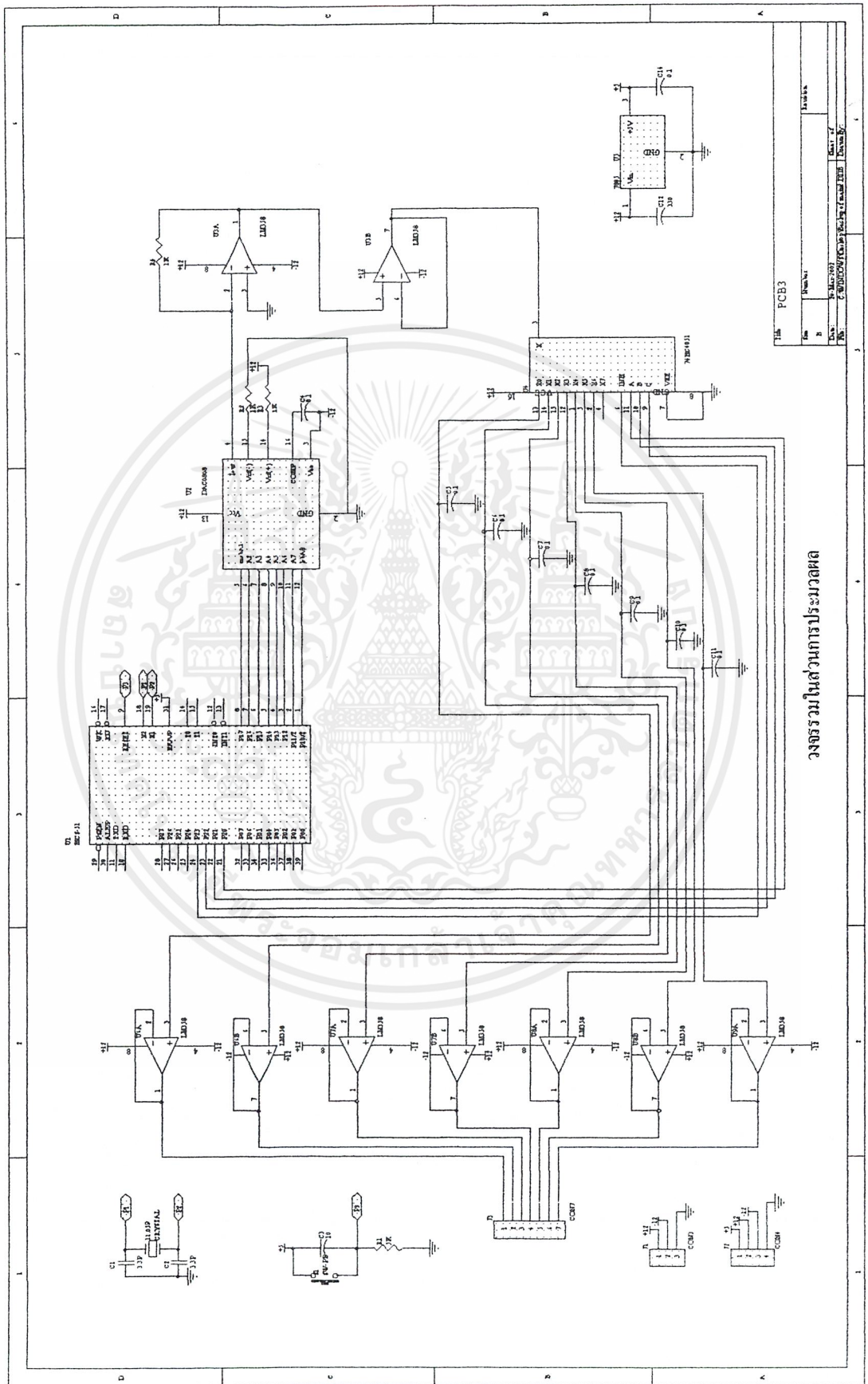


Title		PCBI	
Drawn by	Checked by	Reviewed by	
Date	Date of Issue	Date of Revision	
No.		No.	

วงจรควบคุมแบบพีไอ (PI-Controller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

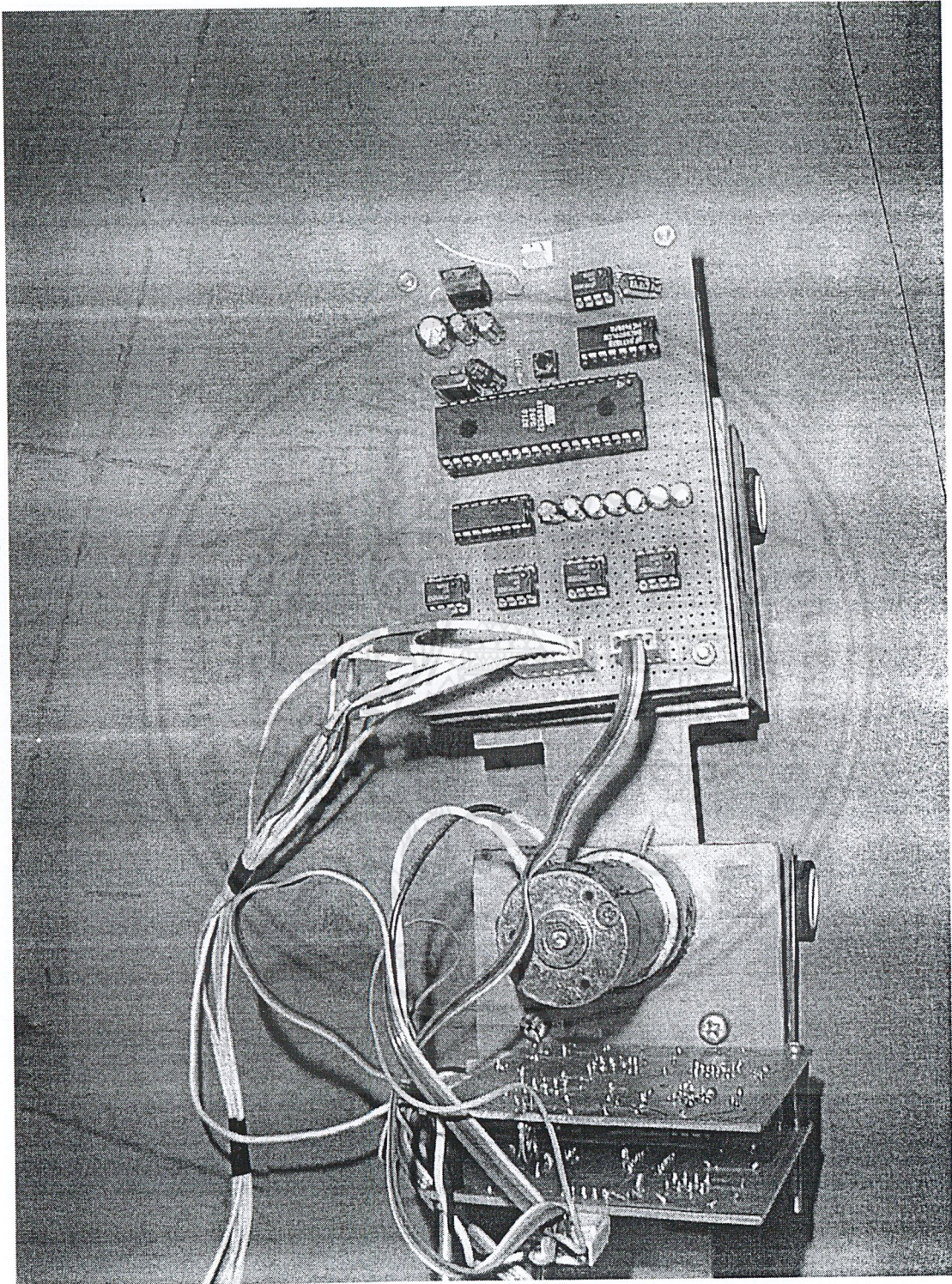




วงจรมติในส่วนการประมวลผล

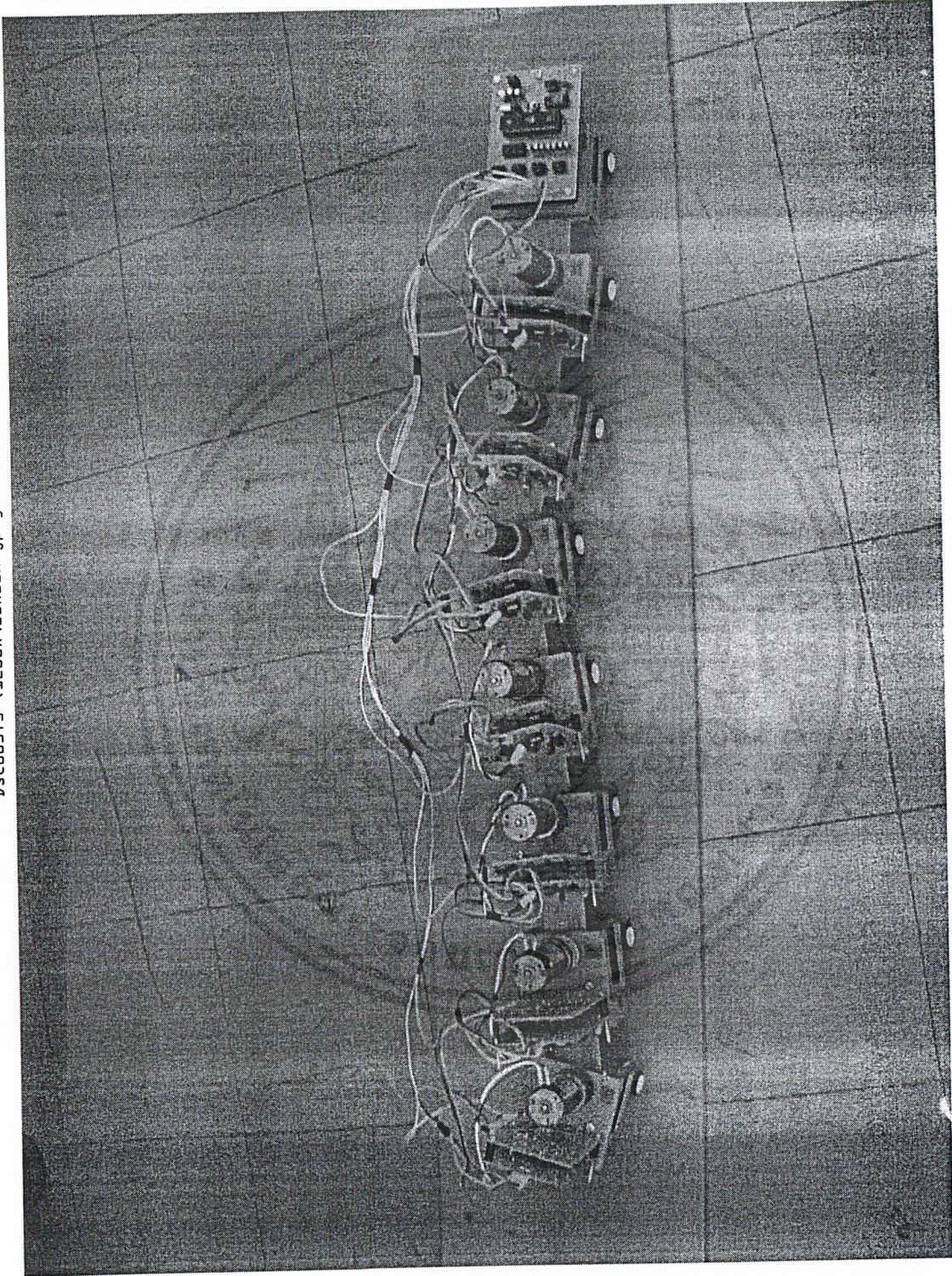
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DSC00377 (1280x160x16M jpeg)



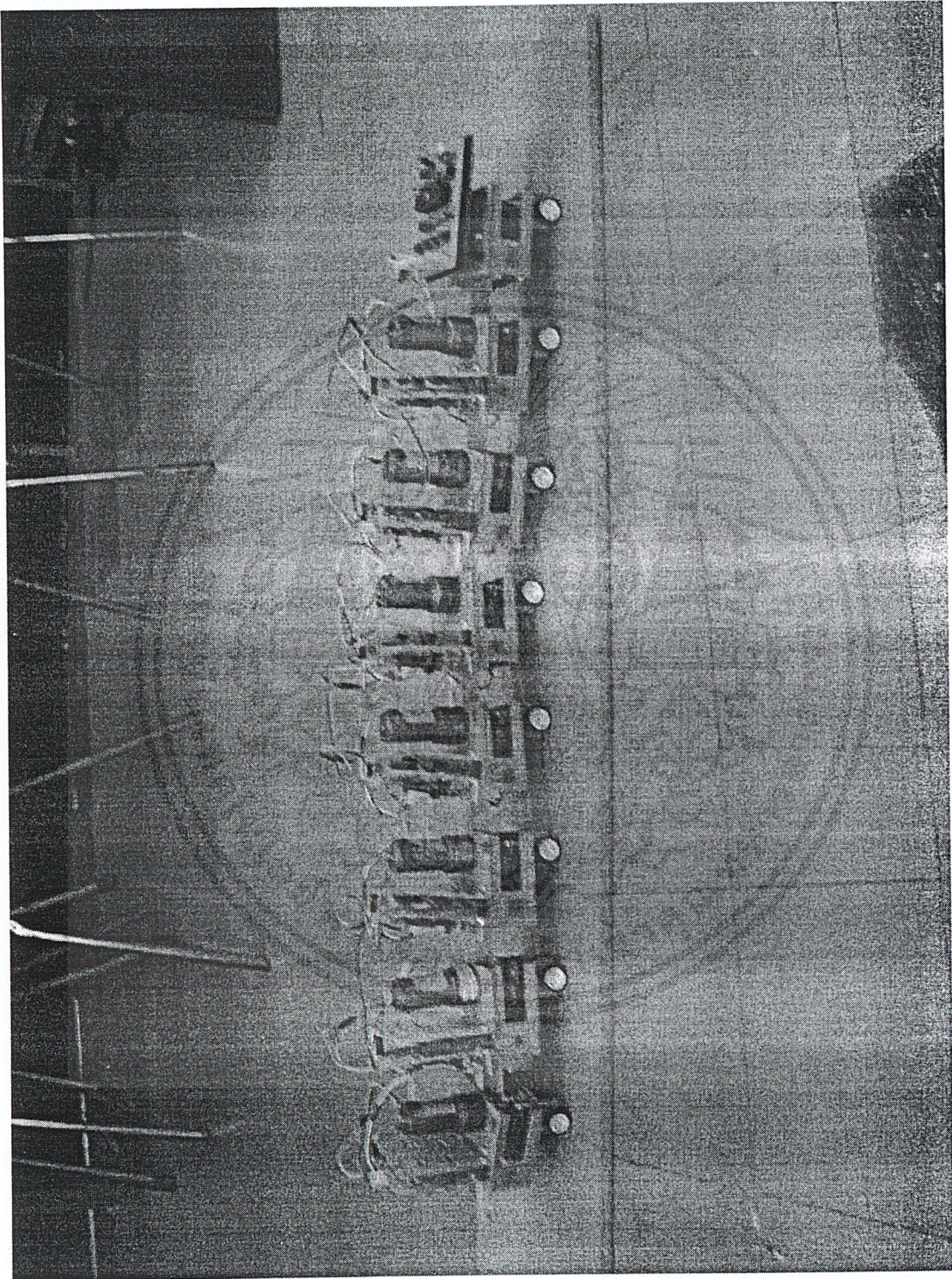
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DSC00373 (1280x960x1.6M jpeg)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsc00374 (1280x960x16M jpeg)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การออกแบบโปรแกรมการควบคุมข้อต่อ

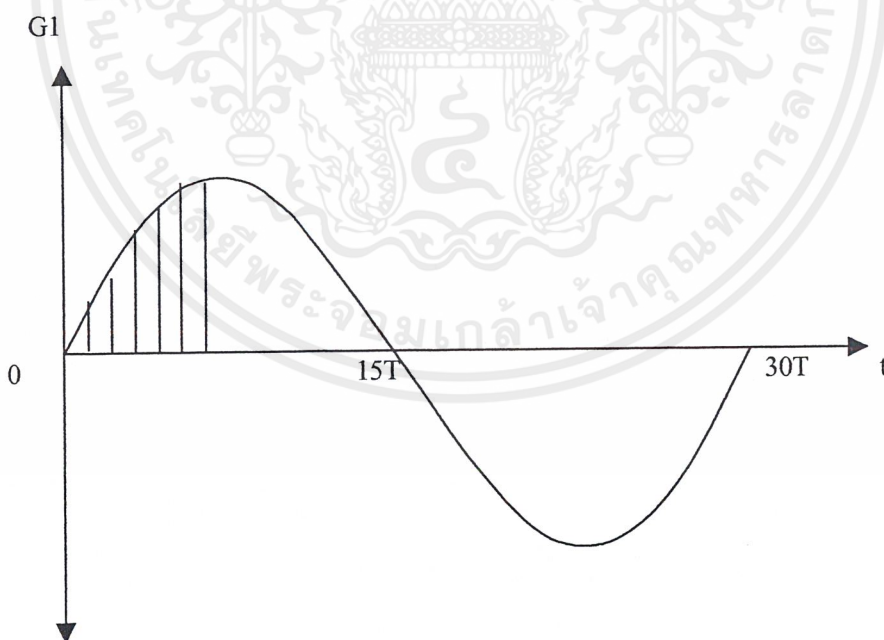
การออกแบบ โปรแกรมจะเป็นส่วนในการคำนวณหามุมระหว่างข้อต่อและแปลงไปเป็นสัญญาณดิจิทัล เพื่อนำไปส่งเป็นค่าอินพุทให้แก่วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก ซึ่งจะนำไปใช้ในการควบคุมข้อต่อ

ในการหามุมระหว่างข้อต่อเกิดจากการสุ่มค่าในฟังก์ชันซายน์ โดยจะใช้สมการที่ 3.1 ในการหาค่าจุดต่างในฟังก์ชันซายน์

$$G1 = \sin(\omega t) \tag{สมการที่ 3.1}$$

โดยที่  $G1$  เป็นค่าจุดที่ได้จากการสุ่มค่า  
 $A$  เป็นค่าแอมป์ริจูด(amplitude)  
 $\omega t$  เป็นค่าเวลาที่จะใช้ในการสุ่มค่า

ใน โปรแกรมจะทำการบันทึกค่าที่เกิดจากการสุ่มค่า 30 ครั้ง ต่อ 1 คาบเวลา ดังรูปที่ 3.6 โดยที่กำหนดให้  $A = 1$



รูปที่ 3.6 แสดงลักษณะการสุ่มค่าของ โปรแกรม

จากนั้นนำจุดที่ได้จากการสุ่มค่า 2 จุดมาหาความชัน จากสมการที่ 3.2

$$M = (G2 - G1) / (\omega t2 - \omega t1)$$

สมการที่ 3.2

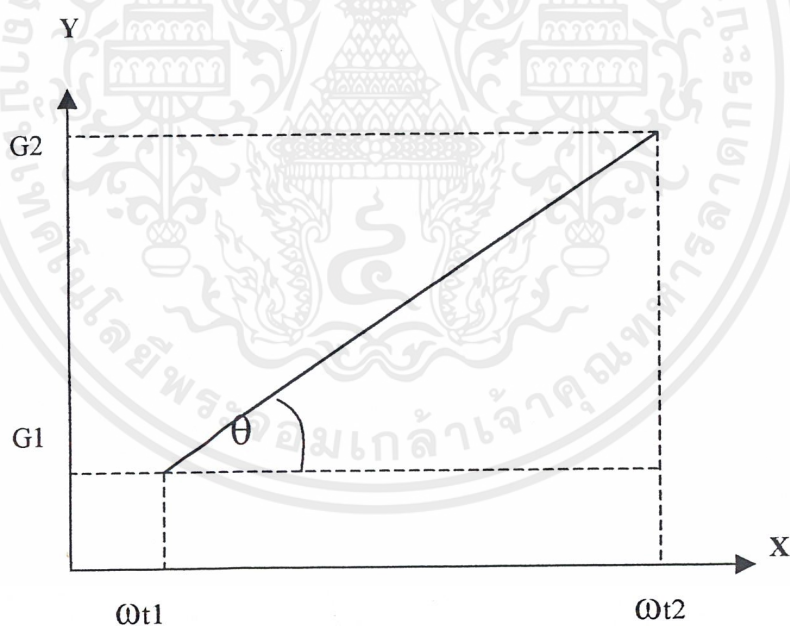
โดยที่	M	เป็นค่าความชัน
	G1	เป็นค่าจุดที่ได้จากการสุ่มค่าครั้งก่อนหน้า
	G2	เป็นค่าจุดที่ได้จากการสุ่มค่าปัจจุบัน
	$\omega t1$	เป็นค่าเวลาที่จะใช้ในการสุ่มค่าครั้งก่อนหน้า
	$\omega t2$	เป็นค่าเวลาที่จะใช้ในการสุ่มค่าปัจจุบัน

นำค่าความชันที่ได้มาแปลงเป็นมุมจากสมการที่ 3.3

$$\theta = \text{Arctan} (M)$$

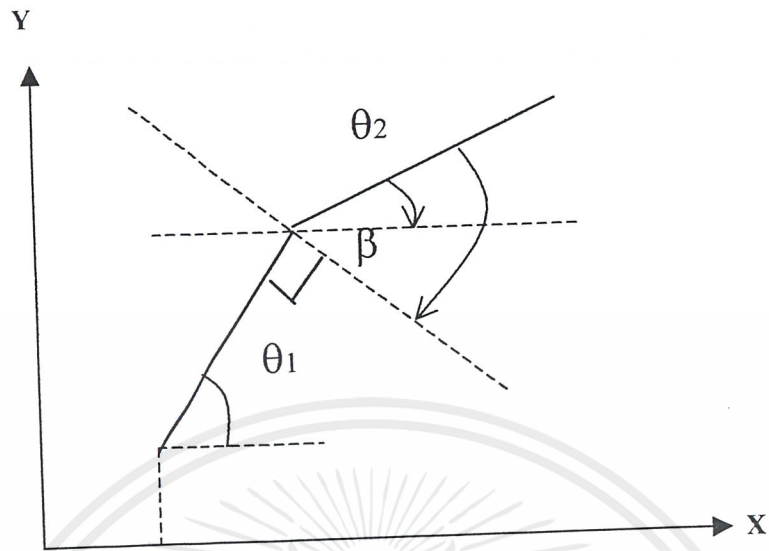
สมการที่ 3.3

โดยที่  $\theta$  เป็นค่ามุม(องศา)  
 M เป็นค่าความชัน

รูปที่ 3.7 แสดงการหาค่ามุม  $\theta$ 

จากนั้นนำมุมที่ได้ในแต่ละครั้งมาหามุมระหว่างข้อต่อจากรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงการหาค่ามุมระหว่างข้อต่อ

$$\beta = \theta_2 + (90^\circ - \theta_1)$$

สมการที่ 3.4

- โดยที่  $\beta$  เป็นมุมระหว่างข้อต่อ  
 $\theta_1$  เป็นมุมของตัวรถ 1 ทำกับ แกน x  
 $\theta_2$  เป็นมุมของตัวรถ 2 ทำกับ แกน x

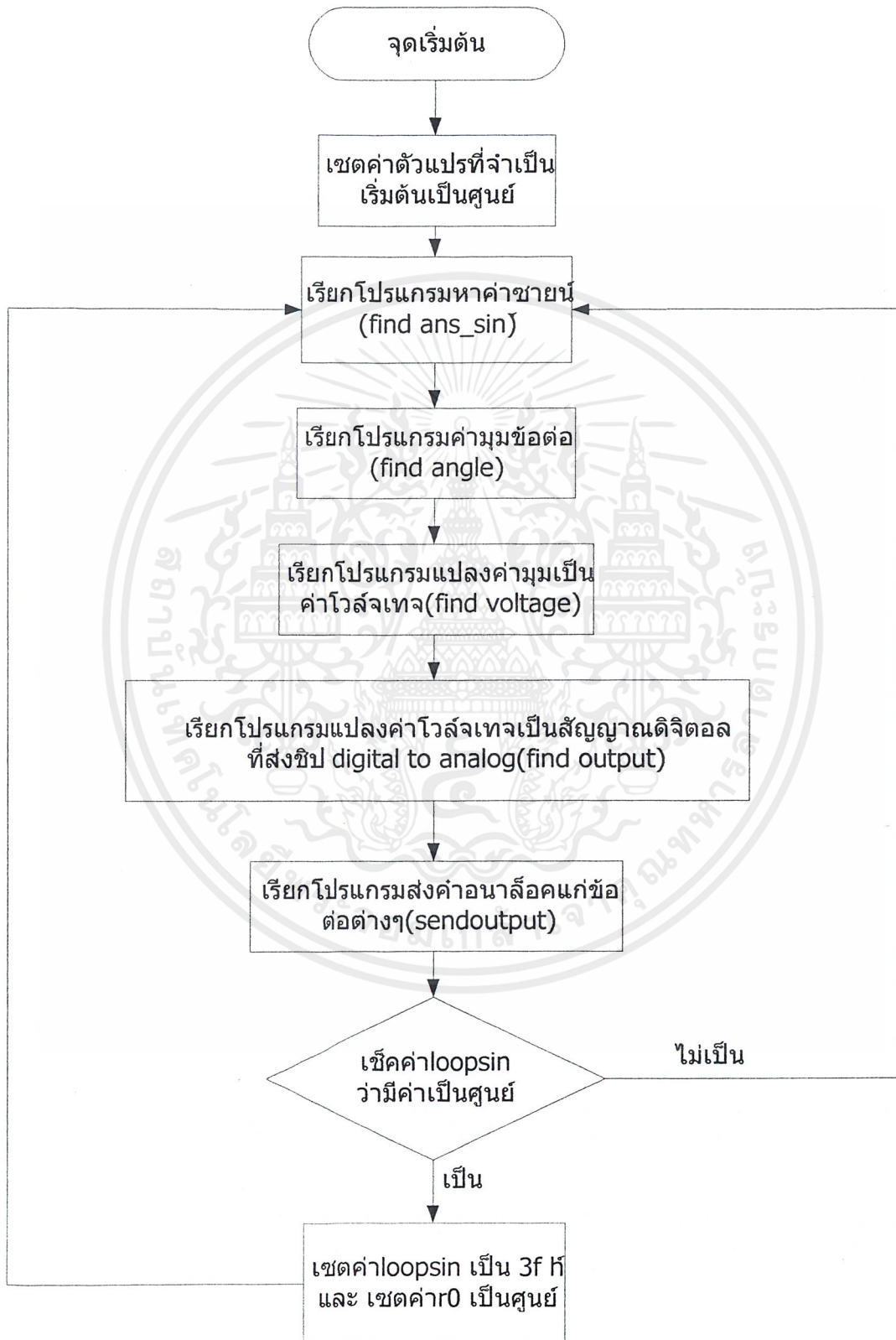
นำมุมที่ได้ระหว่างข้อต่อไปหาค่าโวลต์(volt) ที่จะนำไปสั่งวงจรควบคุมข้อต่อ ซึ่งได้จากสมการที่ 3.5

$$v = v_s + ((\beta * 9) / 180^\circ)$$

สมการที่ 3.5

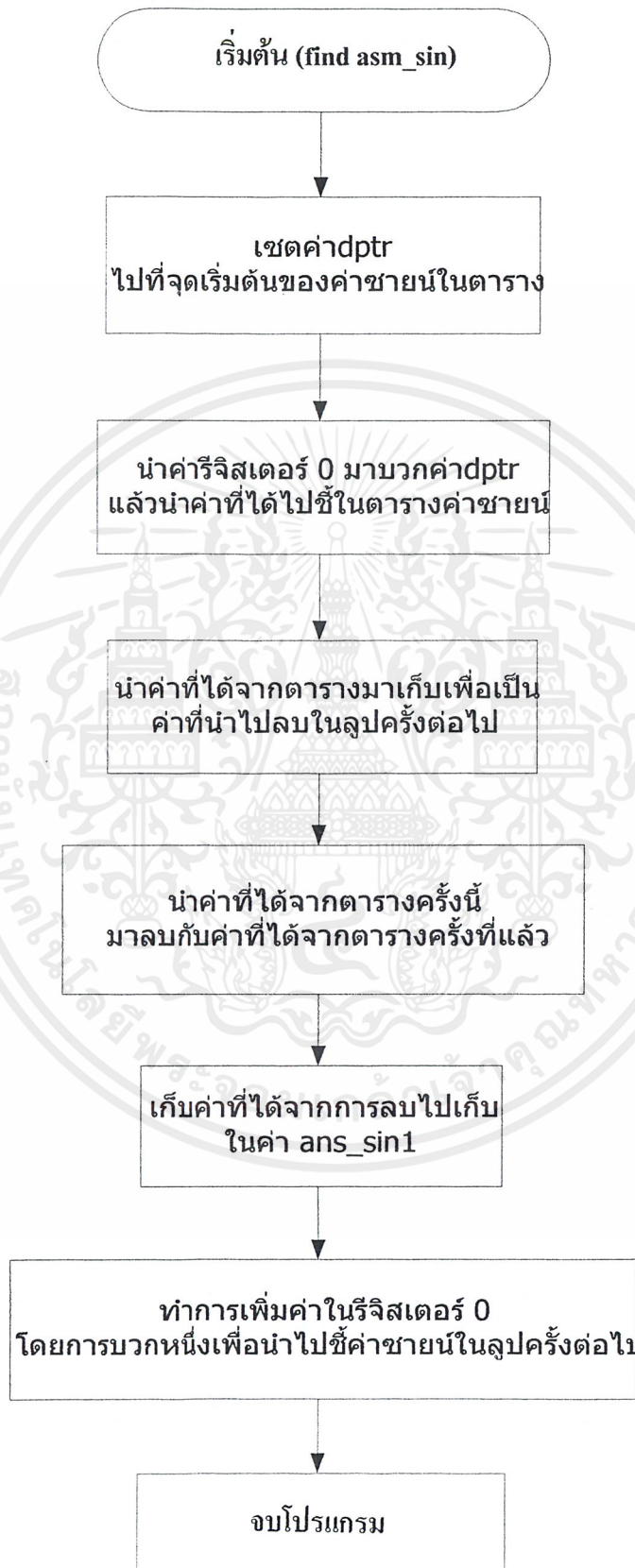
- โดยที่  $v$  เป็นโวลต์ที่ส่งไปยังวงจรควบคุม  
 $v_s$  เป็นโวลต์เริ่มต้นที่  $0^\circ$   
 $\beta$  เป็นมุมระหว่างข้อต่อ

3.5 Flow chart แสดงการทำงานของโปรแกรมในส่วนต่างๆ  
โปรแกรมหลัก



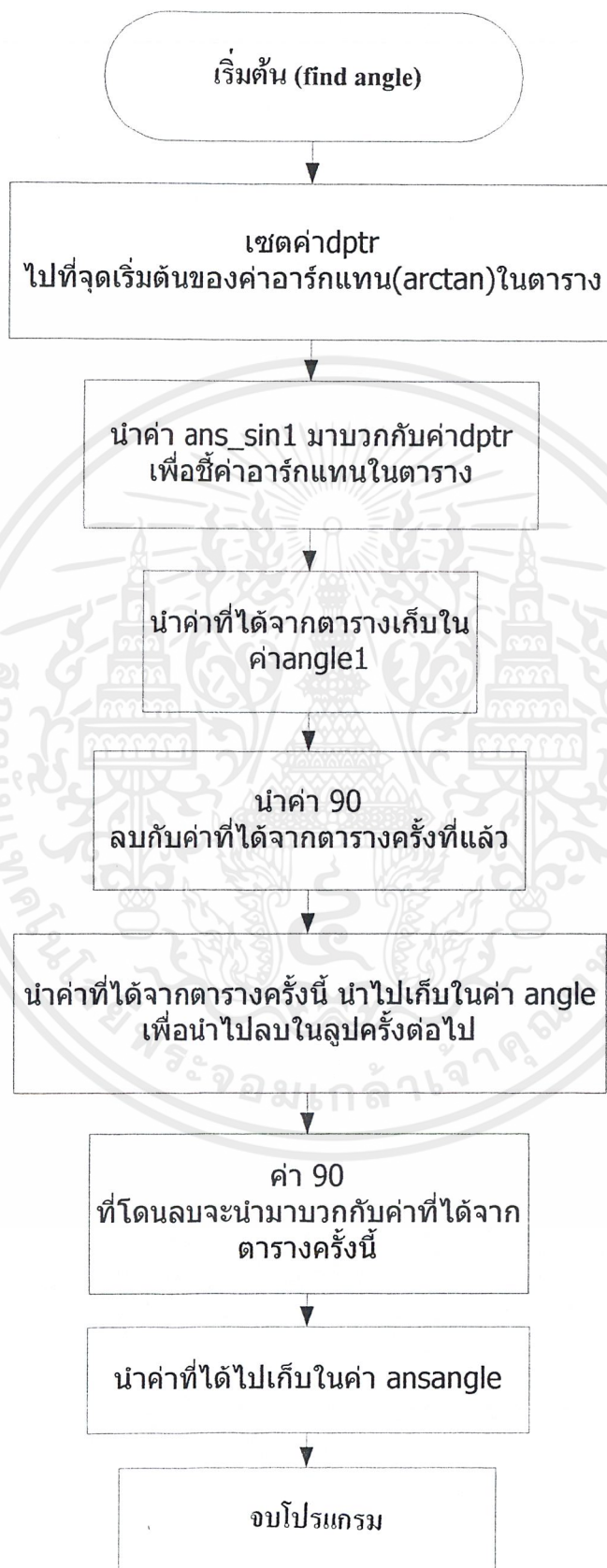
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Find ans\_sin (การหาค่า sine)



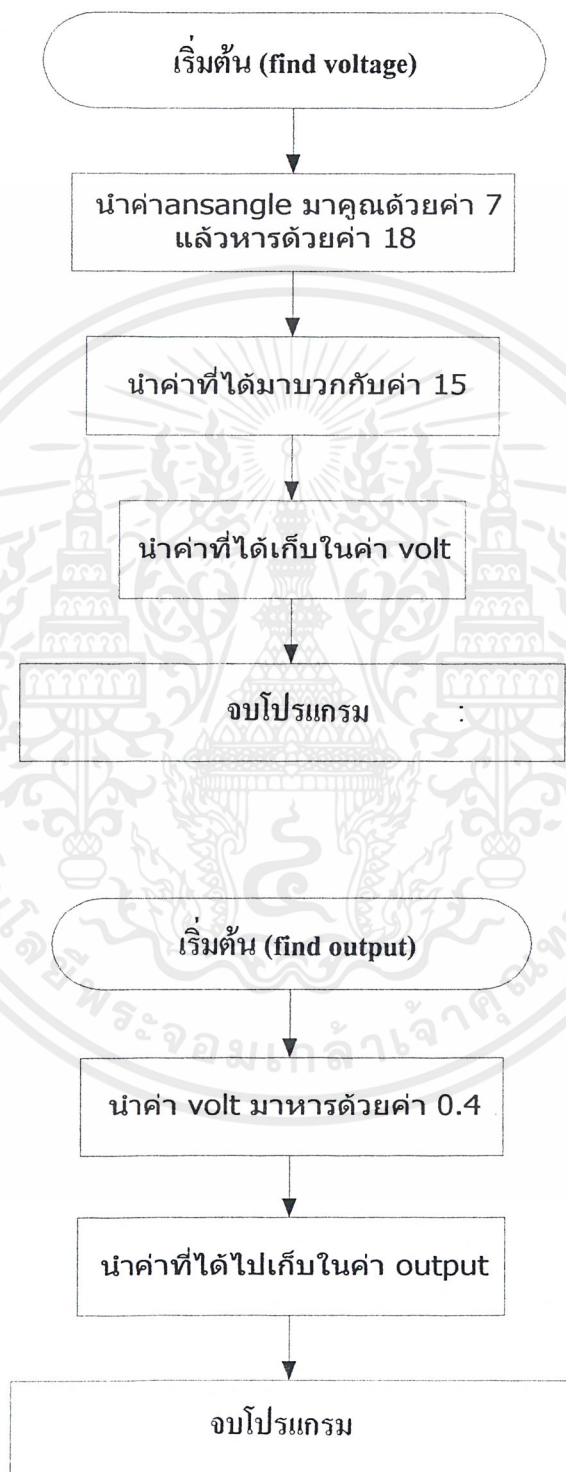
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมหาค่ามุมระหว่างข้อต่อ



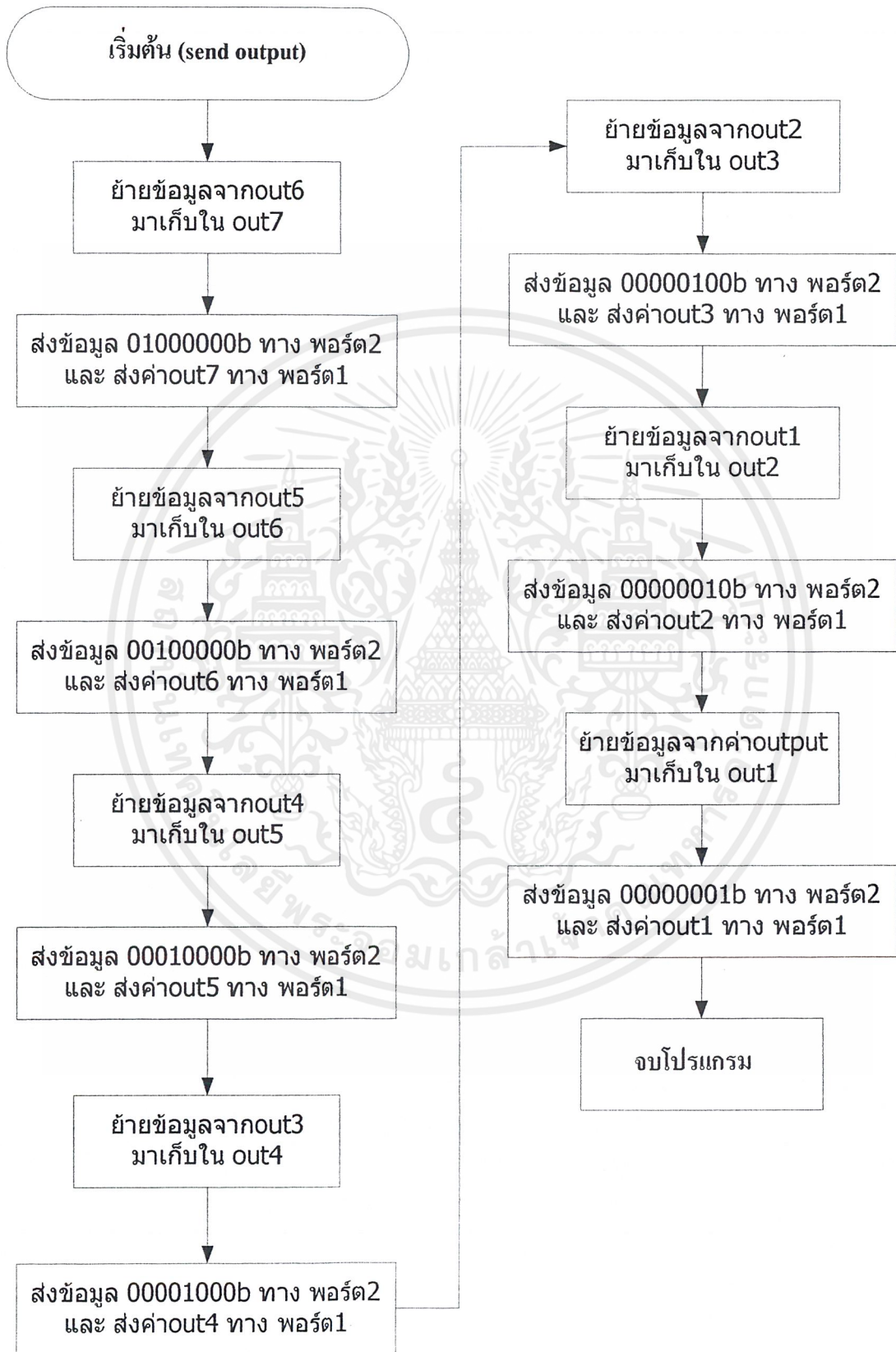
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการหาค่าโวลต์เตจและโปรแกรมการหาค่าในการส่งสัญญาณเอาต์พุต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมการส่งสัญญาณโวลต์เตจเอาต์พุต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

การควบคุมข้อต่อจะทำได้โดยการควบคุมดิชรีมอเตอร์ให้หมุนหรือบิดข้อต่อได้ตามค่ามุมที่ต้องการ ซึ่งในขั้นแรกเริ่มนั้นจะต้องทำการทดลองป้อนสัญญาณให้กับวงจรควบคุมดิชรีมอเตอร์ของแต่ละข้อต่อก่อนเพื่อเป็น สัญญาณอ้างอิงในการป้อนคำสั่งเพื่อควบคุมให้ข้อต่อบิดตัวได้ตามค่ามุมที่ต้องการเสียก่อน จากนั้นการทดลองขั้นต่อมาจะต้องทำการทดลองโดยการป้อน โปรแกรมสั่งการทำงานแก่ทุกๆข้อต่อเพื่อสังเกตลักษณะการเคลื่อนที่ว่าเป็นอย่างไร

#### 4.1 การทดลองการควบคุมข้อต่อ

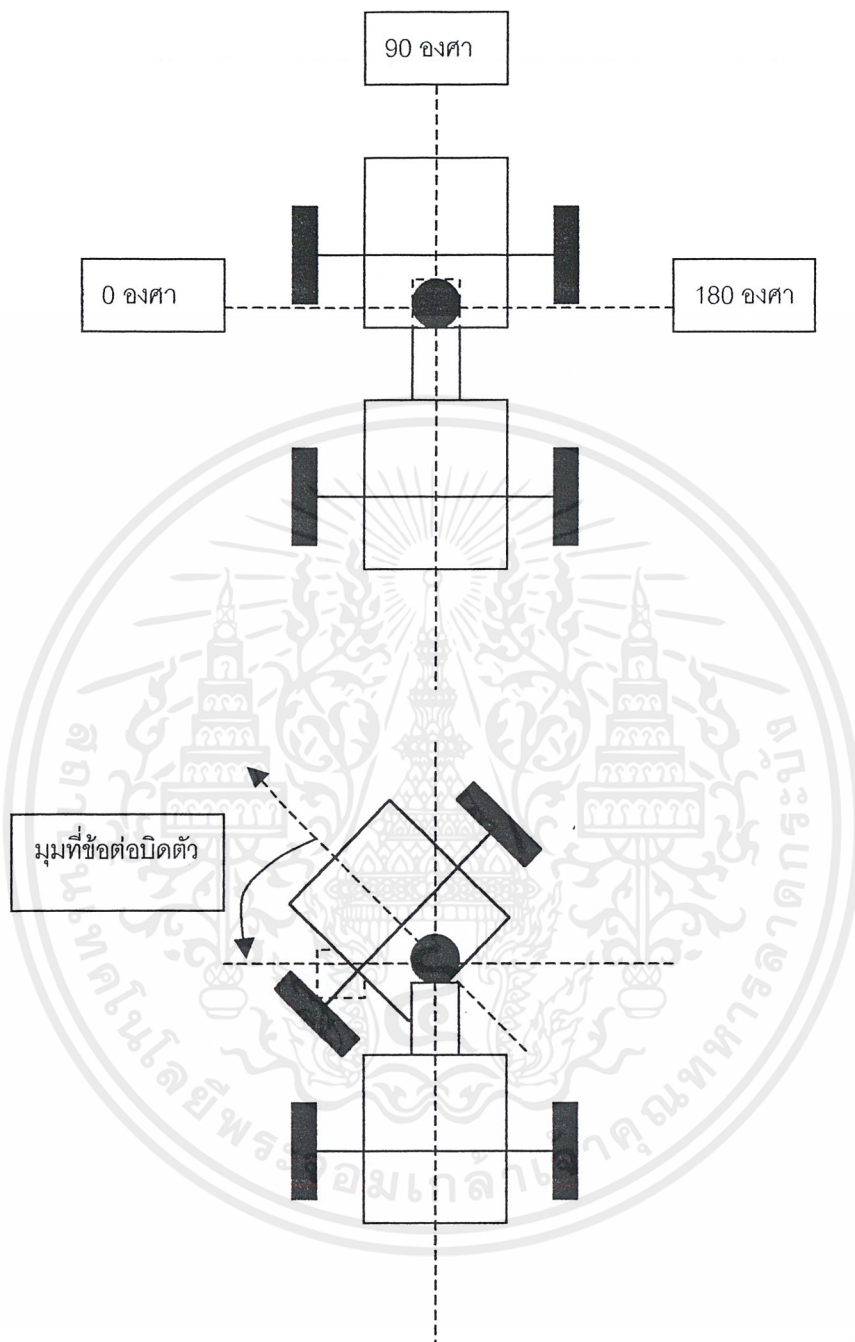
ในขั้นตอนนี้เราจะทำการป้อนแรงดันในระดับต่างๆเพื่อทดสอบหาค่าการเปลี่ยนแปลงของมุมการบิดของข้อต่อ ซึ่งในการทดลองนี้เราจะป้อนแรงดันในช่วง 0 ถึง +10 โวลต์ ดังตารางที่ 4.1

ระดับแรงดัน(โวลต์)	มุมที่ข้อต่อบิดตัวโดยประมาณ(องศา)
1	10
2	25
3	40
4	55
5	75
5.5	90
6	95
7	110
8	125
9	145
10	170

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าการบิดของข้อต่อในแต่ละระดับแรงดัน

#### ผังรูปที่ 4.1 แสดงการบิดตัวของข้อต่อของหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 แสดงมุมการบิดของข้อต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปโครงการ ปัญหาและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปโครงการ

ในปฏิญานิพนธ์นี้ได้แสดงถึงการออกแบบวงจรในการควบคุมมอเตอร์ของข้อต่อหุ่นยนต์ ให้เป็นตามมุมที่ต้องการได้อย่างใกล้เคียง ยังแสดงถึงการสร้างโครงสร้างของหุ่นยนต์ และแสดงว่าการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของหุ่นยนต์ไม่จำเป็นต้องใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนไปข้างหน้า แต่ใช้แรงขับของมอเตอร์ของข้อต่อหุ่นยนต์เป็นตัวที่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า

#### 5.2 ปัญหาในการทำโครงการ

##### 5.2.1 ปัญหาในการสร้างตัวหุ่นยนต์

- ผู้จัดทำขาดความรู้ทางด้านเครื่องกล จึงไม่สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้
- ขบวนการเลือกและจัดหาวัสดุที่นำมาสร้างหุ่นยนต์ใช้เวลานานเกินควร
- ปัญหาจากการขาดประสบการณ์ในการสร้างหุ่นยนต์ทำให้เกิดความผิดพลาดในการต่อวงจรบ่อยครั้งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองในการทดลอง
- ปัญหาจากวัสดุอุปกรณ์ซึ่งหาได้ยาก และมีราคาแพง

##### 5.2.2 ปัญหาในการควบคุม

- การควบคุมข้อต่ออาจจะคลาดเคลื่อนจากมุมที่ต้องการจริงบ้าง
- การโปรแกรมใน MCS-51 ค่าที่ได้จากสมการที่ต้องคำนวณ อาจจะคลาดเคลื่อนเนื่องจากโปรแกรมมีข้อจำกัดในการคำนวณทางคณิตศาสตร์

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา หุ่นยนต์ให้มีความสามารถในการทำงานได้ดีขึ้น โดยจะนำเสนอเป็นข้อๆดังนี้

- หุ่นยนต์ที่ได้จัดทำขึ้นมานี้เป็นเพียงการนำแนวคิดพื้นฐานของการเคลื่อนที่ของงูมาเท่านั้น ซึ่งยังไม่สามารถนำไปใช้งานจริงได้ ทั้งนี้จะเป็นเพียงการจุดประกายความคิดใหม่ๆ เพื่อการพัฒนาให้หุ่นยนต์ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จนถึงขั้นสามารถนำไปใช้งานจริงได้
- พัฒนาให้สามารถควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ได้

```

=====
;
;               program snake robot
=====
ans_sin    equ 10h
ans_sin1   equ 11h
angle      equ 12h
angle1     equ 13h
ansangle   equ 14h
loopsin    equ 15h
ansvolt1   equ 16h
volt       equ 17h
ansvolt    equ 18h
ansoutput  equ 19h
output     equ 1ah
out1       equ 20h
out2       equ 21h
out3       equ 22h
out4       equ 23h
out5       equ 24h
out6       equ 25h
out7       equ 26h
    org 0200h
sin:db09,19,29,38,47,56,64,71,78,84,89,93,96,98,99,99,99,97,94,90,86,80,74,67,59,5
1,42,33,23,14,04,00,246,236,226,217,208,199,191,184,177,171,166,162,159,157,156,
156,156,158,161,165,169,175,181,188,196,204,213,222,232,241,251
    org 0300h
arctan: db 00,05,11,16,21,26,30,34,38,41,45
    org 03f0h
arctan1: db 00,00,00,00,210,214,217,221,225,229,234,239,244,250,00,00
    org 8000h
        mov p1,#00h    ;cleae value port1
        mov p2,#00h    ;cleae value port2
        mov r0,#00h    ;cleae value register0
        mov ans_sin,#00h ;cleae value ans_sin
        mov angle,#00h  ;cleae value angle
        mov loopsin,#3fh ;set value loopsin
;
;               program findans_sin
=====
findans_sin: mov dptr,#sin    ;set value dptr at the first value  of sin table
        mov a,r0            ;set the pointer value of the sin table
        movc a,@a+dptr     ;move the pointer of sin table value at acc
        mov r1,a           ;hold the next value of ans_sin
        clr c
        subb a,ans_sin
        mov ans_sin,r1    ;store the next value of ans_sin
        mov ans_sin1,a    ;store the answer of program findans_sin
        inc r0            ; increase the pointer value of sin table

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

=====
;
;               program findangle
;
;
findangle:  mov dptr,#arctan ;set value dptr at the first value of arctan table
            mov a,ans_sin1  ;set the pointer value of arctan table( the pointer value
of arctan table = the answer of program findans_sin)
            movc a,@a+dptr  ;move the pointer of arctan table value at acc
            mov angle1,a    ;store the angle value from arctan table
            mov a,#90
            clr c
            subb a,angle
            clr c
            mov angle,angle1 ;store the next angle value from arctan table
            add a,angle1
            mov ansangle,a  ;store the answer of program findangle
=====

```

```

=====
;
;               program findvoltage
;
;
            mov b,#10
            div ab
            mov r2,a
            jz volt1
            mov a,#00
findvolt1:  add a,#05
            djnz r2,findvolt1
volt1:     mov ansvolt1,a
            mov a,b
            mov b,#02
            div ab
            mov r2,a
            jz volt2
            mov a,#00
findvolt2: add a,#01
            djnz r2,findvolt2
volt2:     add a,ansvolt1
            add a,#13
            mov volt,a ;store the answer of program findvoltage
=====

```

```

=====
;
;               program findoutput
;
;
            mov b,#10
            div ab
            mov r2,a
            jz output1
            mov a,#00
findoutput: add a,#20
            djnz r2,findoutput
output1:   mov ansoutput,a
            mov a,b
            mov r2,a

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        jz output2
        mov a,#00
findoutput1: add a,#02
            djnz r2,findoutput1
output2:   add a,ansoutput
            mov ansoutput,a
            mov a,volt
            mov b,#10
            div ab
            mov r2,a
            jz output3
            mov a,#00
findoutput2: add a,#05
            djnz r2,findoutput2
output3:   add a,ansoutput
            mov ansoutput,a
            mov a,b
            mov b,#02
            div ab
            mov r2,a
            jz output4
            mov a,#00
findoutput3: add a,#01
            djnz r2,findoutput3
output4:   add a,ansoutput
            mov output,a ;store the answer of program findoutput
;=====
;               program sendoutput
;=====
sendoutput: mov out7,out6
            mov p2,#01000000b
            mov p1,out7
            mov out6,out5
            mov p2,#00100000b
            mov p1,out6
            mov out5,out4
            mov p2,#00010000b
            mov p1,out5
            mov out4,out3
            mov p2,#00001000b
            mov p1,out4
            mov out3,out2
            mov p2,#00000100b
            mov p1,out3
            mov out2,out1
            mov p2,#00000010b
            mov p1,out2
            mov out1,output
            mov p2,#00000001b
            mov p1,out1

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
djnz loopsin,callfindsin
mov r0,#00h
mov loopsin,#3fh
ajmp findans_sin
callfindsin:  ajmp findans_sin
end
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. S.Hirose:Biologically Inspired Robot:Snake-Like Locomotors and Manipulators(tranal) Oxford University Press(1993)
2. Limbless Locomotion : Learning to Crawl with a Snake Robot K.Dowling ,Doctoral dissertation ,tech report CMU-RI-TR-97-48,Robotic Institute ,Carnegie Mellon University,December,1997





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# LM158/LM258/LM358/LM2904

## Low Power Dual Operational Amplifiers

### General Description

The LM158 series consists of two independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, dc gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM158 series can be directly operated off of the standard +5V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional  $\pm 15V$  power supplies.

The LM358 is also available in a chip sized package (8-Bump micro SMD) using National's micro SMD package technology.

### Unique Characteristics

- In the linear mode the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.
- The unity gain cross frequency is temperature compensated.
- The input bias current is also temperature compensated.

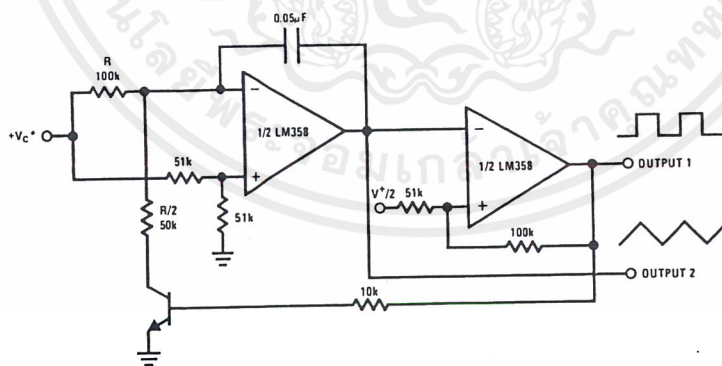
### Advantages

- Two internally compensated op amps
- Eliminates need for dual supplies
- Allows direct sensing near GND and  $V_{OUT}$  also goes to GND
- Compatible with all forms of logic
- Power drain suitable for battery operation
- Pin-out same as LM1558/LM1458 dual op amp

### Features

- Available in 8-Bump micro SMD chip sized package, (See AN-1112)
- Internally frequency compensated for unity gain
- Large dc voltage gain: 100 dB
- Wide bandwidth (unity gain): 1 MHz (temperature compensated)
- Wide power supply range:
  - Single supply: 3V to 32V
  - or dual supplies:  $\pm 1.5V$  to  $\pm 16V$
- Very low supply current drain (500  $\mu A$ )—essentially independent of supply voltage
- Low input offset voltage: 2 mV
- Input common-mode voltage range includes ground
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage swing: 0V to  $V^+ - 1.5V$

### Voltage Controlled Oscillator (VCO)



DS007787-23

## Absolute Maximum Ratings (Note 9)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

	LM158/LM258/LM358 LM158A/LM258A/LM358A	LM2904
Supply Voltage, $V^*$	32V	26V
Differential Input Voltage	32V	26V
Input Voltage	-0.3V to +32V	-0.3V to +26V
Power Dissipation (Note 1)		
Molded DIP	830 mW	830 mW
Metal Can	550 mW	
Small Outline Package (M)	530 mW	530 mW
micro SMD	435mW	
Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) (Note 2) $V^* \leq 15V$ and $T_A = 25^\circ C$	Continuous	Continuous
Input Current ( $V_{IN} < -0.3V$ ) (Note 3)	50 mA	50 mA
Operating Temperature Range		
LM358	0°C to +70°C	-40°C to +85°C
LM258	-25°C to +85°C	
LM158	-55°C to +125°C	
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Lead Temperature, DIP (Soldering, 10 seconds)	260°C	260°C
Lead Temperature, Metal Can (Soldering, 10 seconds)	300°C	300°C
Soldering Information		
Dual-In-Line Package		
Soldering (10 seconds)	260°C	260°C
Small Outline Package		
Vapor Phase (60 seconds)	215°C	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.		
ESD Tolerance (Note 10)	250V	250V

## Electrical Characteristics

$V^* = +5.0V$ , unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM158A			LM358A			LM158/LM258			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	(Note 5), $T_A = 25^\circ C$	1	2		2	3		2	5		mV
Input Bias Current	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$ , $T_A = 25^\circ C$ , $V_{CM} = 0V$ , (Note 6)	20	50		45	100		45	150		nA
Input Offset Current	$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$ , $V_{CM} = 0V$ , $T_A = 25^\circ C$		2	10		5	30		3	30	nA
Input Common-Mode Voltage Range	$V^* = 30V$ , (Note 7) (LM2904, $V^* = 26V$ ), $T_A = 25^\circ C$	0		$V^* - 1.5$	0		$V^* - 1.5$	0		$V^* - 1.5$	V
Supply Current	Over Full Temperature Range $R_L = \infty$ on All Op Amps $V^* = 30V$ (LM2904 $V^* = 26V$ ) $V^* = 5V$		1	2		1	2		1	2	mA
		0.5	1.2		0.5	1.2		0.5	1.2		mA

## Electrical Characteristics

$V^+ = +5.0V$ , unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM358			LM2904			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	(Note 5), $T_A = 25^\circ C$		2	7		2	7	mV
Input Bias Current	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$ , $T_A = 25^\circ C$ , $V_{CM} = 0V$ , (Note 6)		45	250		45	250	nA
Input Offset Current	$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$ , $V_{CM} = 0V$ , $T_A = 25^\circ C$		5	50		5	50	nA
Input Common-Mode Voltage Range	$V^+ = 30V$ , (Note 7) (LM2904, $V^+ = 26V$ ), $T_A = 25^\circ C$	0		$V^+ - 1.5$	0		$V^+ - 1.5$	V
Supply Current	Over Full Temperature Range $R_L = \infty$ on All Op Amps $V^+ = 30V$ (LM2904 $V^+ = 26V$ ) $V^+ = 5V$		1 0.5	2 1.2		1 0.5	2 1.2	mA mA

## Electrical Characteristics

$V^+ = +5.0V$ , (Note 4), unless otherwise stated

Parameter		Conditions	LM158A			LM358A			LM158/LM258			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Large Signal Voltage Gain		$V^+ = 15V$ , $T_A = 25^\circ C$ , $R_L \geq 2 k\Omega$ , (For $V_O = 1V$ to 11V)	50	100		25	100		50	100		V/mV
Common-Mode Rejection Ratio		$T_A = 25^\circ C$ , $V_{CM} = 0V$ to $V^+ - 1.5V$	70	85		65	85		70	85		dB
Power Supply Rejection Ratio		$V^+ = 5V$ to 30V (LM2904, $V^+ = 5V$ to 26V), $T_A = 25^\circ C$	65	100		65	100		65	100		dB
Amplifier-to-Amplifier Coupling		$f = 1 kHz$ to 20 kHz, $T_A = 25^\circ C$ (Input Referred), (Note 8)	-120			-120			-120			dB
Output Current	Source	$V_{IN^+} = 1V$ , $V_{IN^-} = 0V$ , $V^+ = 15V$ , $V_O = 2V$ , $T_A = 25^\circ C$	20	40		20	40		20	40		mA
	Sink	$V_{IN^-} = 1V$ , $V_{IN^+} = 0V$ $V^+ = 15V$ , $T_A = 25^\circ C$ , $V_O = 2V$	10	20		10	20		10	20		mA
		$V_{IN^-} = 1V$ , $V_{IN^+} = 0V$ $T_A = 25^\circ C$ , $V_O = 200 mV$ , $V^+ = 15V$	12	50		12	50		12	50		$\mu A$
Short Circuit to Ground		$T_A = 25^\circ C$ , (Note 2), $V^+ = 15V$	40	60		40	60		40	60		mA
Input Offset Voltage		(Note 5)	4			5			7			mV
Input Offset Voltage Drift		$R_S = 0\Omega$	7	15		7	20		7			$\mu V/^\circ C$
Input Offset Current		$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$	30			75			100			nA
Input Offset Current Drift		$R_S = 0\Omega$	10	200		10	300		10			$pA/^\circ C$
Input Bias Current		$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$	40	100		40	200		40	300		nA
Input Common-Mode Voltage Range		$V^+ = 30V$ , (Note 7) (LM2904, $V^+ = 26V$ )	0		$V^+ - 2$	0		$V^+ - 2$	0		$V^+ - 2$	V

**Electrical Characteristics** (Continued) $V^+ = +5.0V$ , (Note 4), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM158A			LM358A			LM158/LM258			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Large Signal Voltage Gain	$V^+ = +15V$ ( $V_O = 1V$ to $11V$ ) $R_L \geq 2 k\Omega$	25			15			25			V/mV
Output Voltage Swing	$V_{OH}$	$V^+ = +30V$ (LM2904, $V^+ = 26V$ ) $R_L = 2 k\Omega$			26			26			V
	$V_{OL}$	$R_L = 10 k\Omega$			27 28			27 28			V
Output Current	Source	$V_{IN}^+ = +1V, V_{IN}^- = 0V,$ $V^+ = 15V, V_O = 2V$			5 20			5 20			mV
	Sink	$V_{IN}^- = +1V, V_{IN}^+ = 0V,$ $V^+ = 15V, V_O = 2V$			10 20			10 20			mA
					10 15			5 8			mA

**Electrical Characteristics** $V^+ = +5.0V$ , (Note 4), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM358			LM2904			Units			
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max				
Large Signal Voltage Gain	$V^+ = 15V, T_A = 25^\circ C,$ $R_L \geq 2 k\Omega$ , (For $V_O = 1V$ to $11V$ )	25	100		25	100		V/mV			
Common-Mode Rejection Ratio	$T_A = 25^\circ C,$ $V_{CM} = 0V$ to $V^+ - 1.5V$	65	85		50	70		dB			
Power Supply Rejection Ratio	$V^+ = 5V$ to $30V$ (LM2904, $V^+ = 5V$ to $26V$ ), $T_A = 25^\circ C$	65	100		50	100		dB			
Amplifier-to-Amplifier Coupling	$f = 1 kHz$ to $20 kHz, T_A = 25^\circ C$ (Input Referred), (Note 8)	-120			-120			dB			
Output Current	Source	$V_{IN}^+ = 1V,$ $V_{IN}^- = 0V,$ $V^+ = 15V,$ $V_O = 2V, T_A = 25^\circ C$			20 40			20 40			mA
	Sink	$V_{IN}^- = 1V, V_{IN}^+ = 0V,$ $V^+ = 15V, T_A = 25^\circ C,$ $V_O = 2V$			10 20			10 20			mA
		$V_{IN}^- = 1V,$ $V_{IN}^+ = 0V,$ $T_A = 25^\circ C, V_O = 200 mV,$ $V^+ = 15V$			12 50			12 50			$\mu A$
Short Circuit to Ground	$T_A = 25^\circ C$ , (Note 2), $V^+ = 15V$	40 60			40 60			mA			
Input Offset Voltage	(Note 5)	9			10			mV			
Input Offset Voltage Drift	$R_S = 0\Omega$	7			7			$\mu V/^\circ C$			
Input Offset Current	$I_{IN(+)} - I_{IN(-)}$	150			45 200			nA			
Input Offset Current Drift	$R_S = 0\Omega$	10			10			$pA/^\circ C$			
Input Bias Current	$I_{IN(+)}$ or $I_{IN(-)}$	40 500			40 500			nA			
Input Common-Mode Voltage Range	$V^+ = 30V$ , (Note 7) (LM2904, $V^+ = 26V$ )	0			$V^+ - 2$			V			

## Electrical Characteristics (Continued)

$V^+ = +5.0V$ , (Note 4), unless otherwise stated

Parameter	Conditions	LM358			LM2904			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Large Signal Voltage Gain	$V^+ = +15V$ ( $V_O = 1V$ to $11V$ ) $R_L \geq 2 k\Omega$	15			15			V/mV
Output Voltage Swing	$V_{OH}$	$V^+ = +30V$ (LM2904, $V^+ = 26V$ )	$R_L = 2 k\Omega$ $R_L = 10 k\Omega$		26 27 28		22 23 24	V V
	$V_{OL}$	$V^+ = 5V, R_L = 10 k\Omega$		5	20	5	100	mV
Output Current	Source	$V_{IN}^+ = +1V, V_{IN}^- = 0V,$ $V^+ = 15V, V_O = 2V$		10	20	10	20	mA
	Sink	$V_{IN}^- = +1V, V_{IN}^+ = 0V,$ $V^+ = 15V, V_O = 2V$		5	8	5	8	mA

**Note 1:** For operating at high temperatures, the LM358/LM358A, LM2904 must be derated based on a  $+125^\circ C$  maximum junction temperature and a thermal resistance of  $120^\circ C/W$  for MDIP,  $182^\circ C/W$  for Metal Can,  $189^\circ C/W$  for Small Outline package, and  $230^\circ C/W$  for micro SMD, which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM258/LM258A and LM158/LM158A can be derated based on a  $+150^\circ C$  maximum junction temperature. The dissipation is the total of both amplifiers—use external resistors, where possible, to allow the amplifier to saturate or to reduce the power which is dissipated in the integrated circuit.

**Note 2:** Short circuits from the output to  $V^+$  can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of  $V^+$ . At values of supply voltage in excess of  $+15V$ , continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

**Note 3:** This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the op amps to go to the  $V^+$  voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than  $-0.3V$  (at  $25^\circ C$ ).

**Note 4:** These specifications are limited to  $-55^\circ C \leq T_A \leq +125^\circ C$  for the LM158/LM158A. With the LM258/LM258A, all temperature specifications are limited to  $-25^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$ , the LM358/LM358A temperature specifications are limited to  $0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$ , and the LM2904 specifications are limited to  $-40^\circ C \leq T_A \leq +85^\circ C$ .

**Note 5:**  $V_O = 1.4V$ ,  $R_S = 0\Omega$  with  $V^+$  from 5V to 30V; and over the full input common-mode range (0V to  $V^+ - 1.5V$ ) at  $25^\circ C$ . For LM2904,  $V^+$  from 5V to 26V.

**Note 6:** The direction of the input current is out of the IC due to the PNP input stage. This current is essentially constant, independent of the state of the output so no loading change exists on the input lines.

**Note 7:** The input common-mode voltage of either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than  $0.3V$  (at  $25^\circ C$ ). The upper end of the common-mode voltage range is  $V^+ - 1.5V$  (at  $25^\circ C$ ), but either or both inputs can go to  $+32V$  without damage ( $+26V$  for LM2904), independent of the magnitude of  $V^+$ .

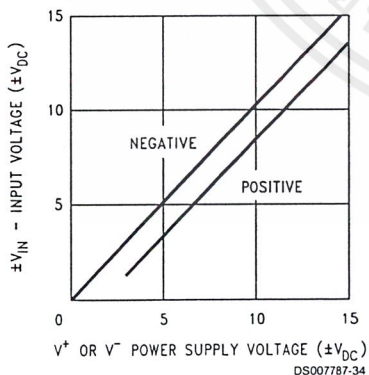
**Note 8:** Due to proximity of external components, insure that coupling is not originating via stray capacitance between these external parts. This typically can be detected as this type of capacitance increases at higher frequencies.

**Note 9:** Refer to RETS158AX for LM158A military specifications and to RETS158X for LM158 military specifications.

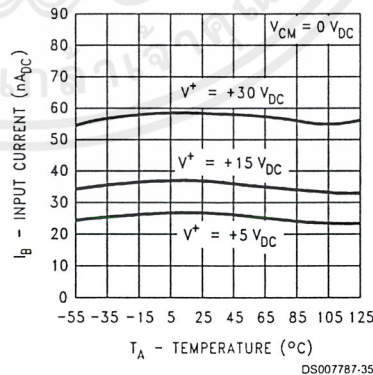
**Note 10:** Human body model,  $1.5 k\Omega$  in series with 100 pF.

## Typical Performance Characteristics

### Input Voltage Range

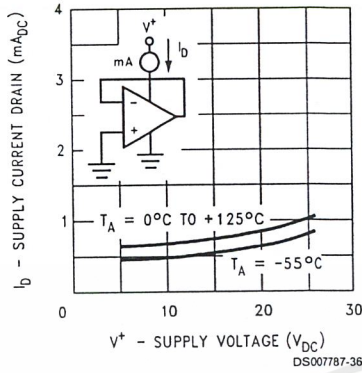


### Input Current

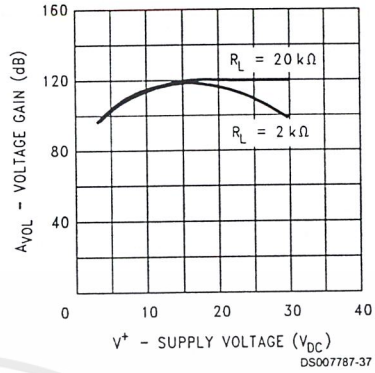


## Typical Performance Characteristics (Continued)

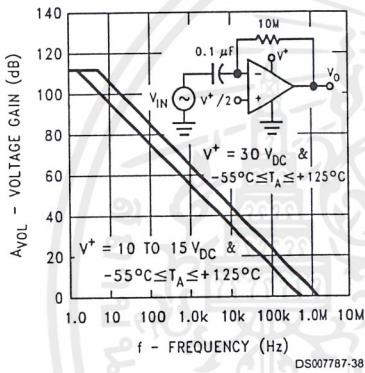
Supply Current



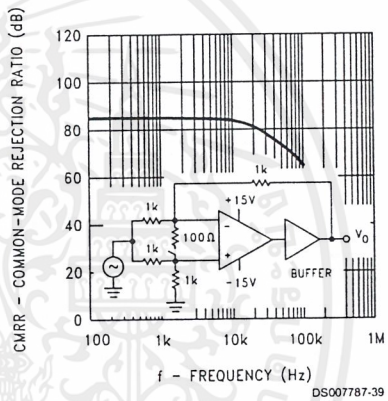
Voltage Gain



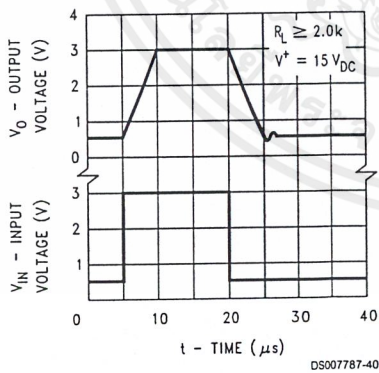
Open Loop Frequency Response



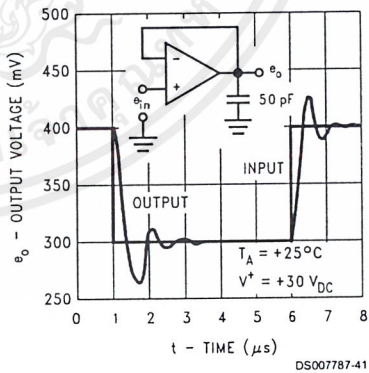
Common-Mode Rejection Ratio



Voltage Follower Pulse Response

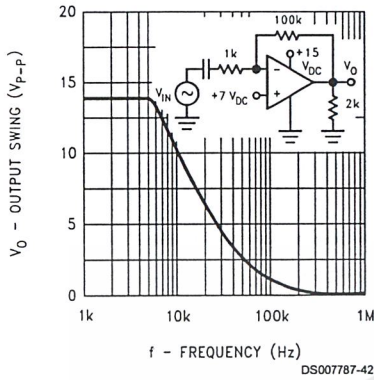


Voltage Follower Pulse Response (Small Signal)

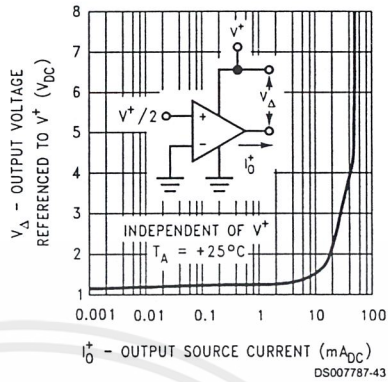


## Typical Performance Characteristics (Continued)

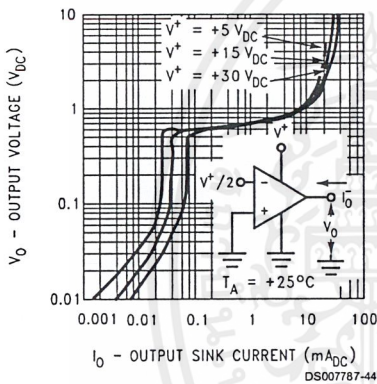
### Large Signal Frequency Response



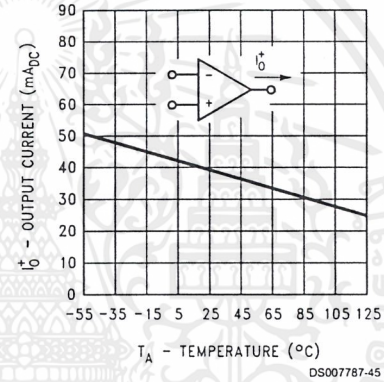
### Output Characteristics Current Sourcing



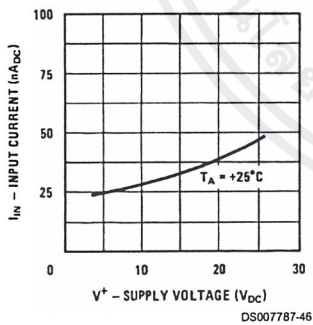
### Output Characteristics Current Sinking



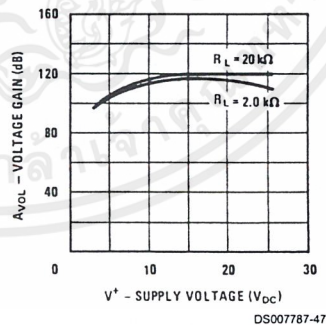
### Current Limiting



### Input Current (LM2902 only)



### Voltage Gain (LM2902 only)



## Application Hints

The LM158 series are op amps which operate with only a single power supply voltage, have true-differential inputs, and remain in the linear mode with an input common-mode voltage of 0 V<sub>DC</sub>. These amplifiers operate over a wide range of power supply voltage with little change in performance characteristics. At 25°C amplifier operation is possible down to a minimum supply voltage of 2.3 V<sub>DC</sub>.

Precautions should be taken to insure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed backwards in a test socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

Large differential input voltages can be easily accommodated and, as input differential voltage protection diodes are not needed, no large input currents result from large differential input voltages. The differential input voltage may be larger

## Application Hints (Continued)

than  $V^+$  without damaging the device. Protection should be provided to prevent the input voltages from going negative more than  $-0.3 V_{DC}$  (at  $25^\circ\text{C}$ ). An input clamp diode with a resistor to the IC input terminal can be used.

To reduce the power supply current drain, the amplifiers have a class A output stage for small signal levels which converts to class B in a large signal mode. This allows the amplifiers to both source and sink large output currents. Therefore both NPN and PNP external current boost transistors can be used to extend the power capability of the basic amplifiers. The output voltage needs to raise approximately 1 diode drop above ground to bias the on-chip vertical PNP transistor for output current sinking applications.

For ac applications, where the load is capacitively coupled to the output of the amplifier, a resistor should be used, from the output of the amplifier to ground to increase the class A bias current and prevent crossover distortion. Where the load is directly coupled, as in dc applications, there is no crossover distortion.

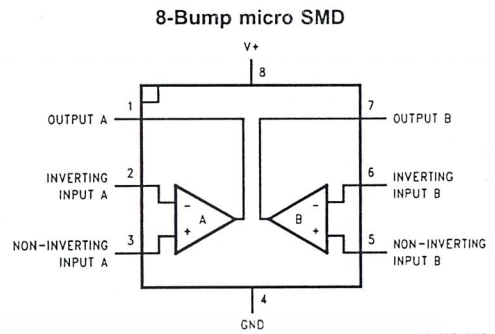
Capacitive loads which are applied directly to the output of the amplifier reduce the loop stability margin. Values of 50 pF can be accommodated using the worst-case non-inverting unity gain connection. Large closed loop gains or resistive isolation should be used if larger load capacitance must be driven by the amplifier.

The bias network of the LM158 establishes a drain current which is independent of the magnitude of the power supply voltage over the range of  $3 V_{DC}$  to  $30 V_{DC}$ .

Output short circuits either to ground or to the positive power supply should be of short time duration. Units can be destroyed, not as a result of the short circuit current causing metal fusing, but rather due to the large increase in IC chip dissipation which will cause eventual failure due to excessive junction temperatures. Putting direct short-circuits on more than one amplifier at a time will increase the total IC power dissipation to destructive levels, if not properly protected with external dissipation limiting resistors in series with the output leads of the amplifiers. The larger value of output source current which is available at  $25^\circ\text{C}$  provides a larger output current capability at elevated temperatures (see typical performance characteristics) than a standard IC op amp.

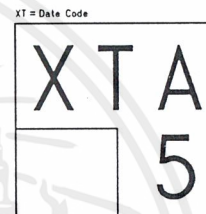
The circuits presented in the section on typical applications emphasize operation on only a single power supply voltage. If complementary power supplies are available, all of the standard op amp circuits can be used. In general, introducing a pseudo-ground (a bias voltage reference of  $V^+/2$ ) will allow operation above and below this value in single power supply systems. Many application circuits are shown which take advantage of the wide input common-mode voltage range which includes ground. In most cases, input biasing is not required and input voltages which range to ground can easily be accommodated.

## Connection Diagrams



Top View  
(Bump Side Down)

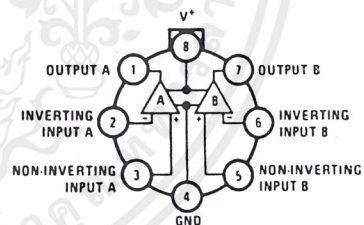
### micro SMD Marking Orientation



Bumps are numbered counter-clockwise.

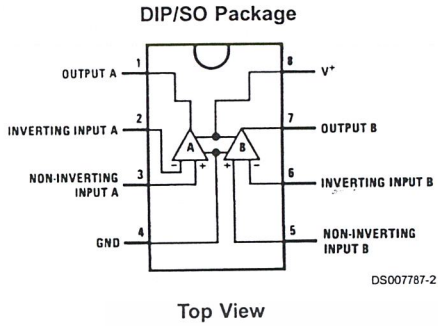
Top View

### Metal Can Package



Top View

## Connection Diagrams (Continued)



## Ordering Information

Package	Temperature Range				NSC Drawing
	-55°C to 125°C	-25°C to 85°C	0°C to 70°C	-40°C to 85°C	
SO-8			LM358AM LM358AMX LM358M LM358MX	LM2904M	M08A
8-Pin Molded DIP			LM358AN LM358N	LM2904N	N08E
8-Pin Ceramic DIP	LM158AJ/883(Note 11) LM158J/883(Note 11) LM158J LM158AJLQML(Note 12) LM158AJQMLV(Note 12)				J08A
TO-5, 8-Pin Metal Can	LM158AH/883(Note 11) LM158H/883(Note 11) LM158AH LM158H LM158AHLQML(Note 12) LM158AHLQMLV(Note 12)	LM258H	LM358H		H08C
8-Bump micro SMD			LM358BP LM358BPX		BPA08AAB

**Note 11:** LM158 is available per SMD #5962-8771001

LM158A is available per SMD #5962-8771002

**Note 12:** See STD Mil DWG 5962L87710 for Radiation Tolerant Devices

# Push-Pull Four Channel Driver

## FEATURES

- Output Current 1A Per Channel (600mA for L293D)
- Peak Output Current 2A Per Channel (1.2A for L293D)
- Inhibit Facility
- High Noise Immunity
- Separate Logic Supply
- Over-Temperature Protection

## DESCRIPTION

The L293 and L293D are quad push-pull drivers capable of delivering output currents to 1A or 600mA per channel respectively. Each channel is controlled by a TTL-compatible logic input and each pair of drivers (a full bridge) is equipped with an inhibit input which turns off all four transistors. A separate supply input is provided for the logic so that it may be run off a lower voltage to reduce dissipation.

Additionally the L293D includes the output clamping diodes within the IC for complete interfacing with inductive loads.

Both devices are available in 16-pin Batwing DIP packages. They are also available in Power S01C and Hermetic DIL packages.

## TRUTH TABLE

V <sub>i</sub> (each channel)	V <sub>INH</sub> *	V <sub>o</sub>
H	H	H
L	H	L
H	L	X**
L	L	X**

\*Relative to the considered channel

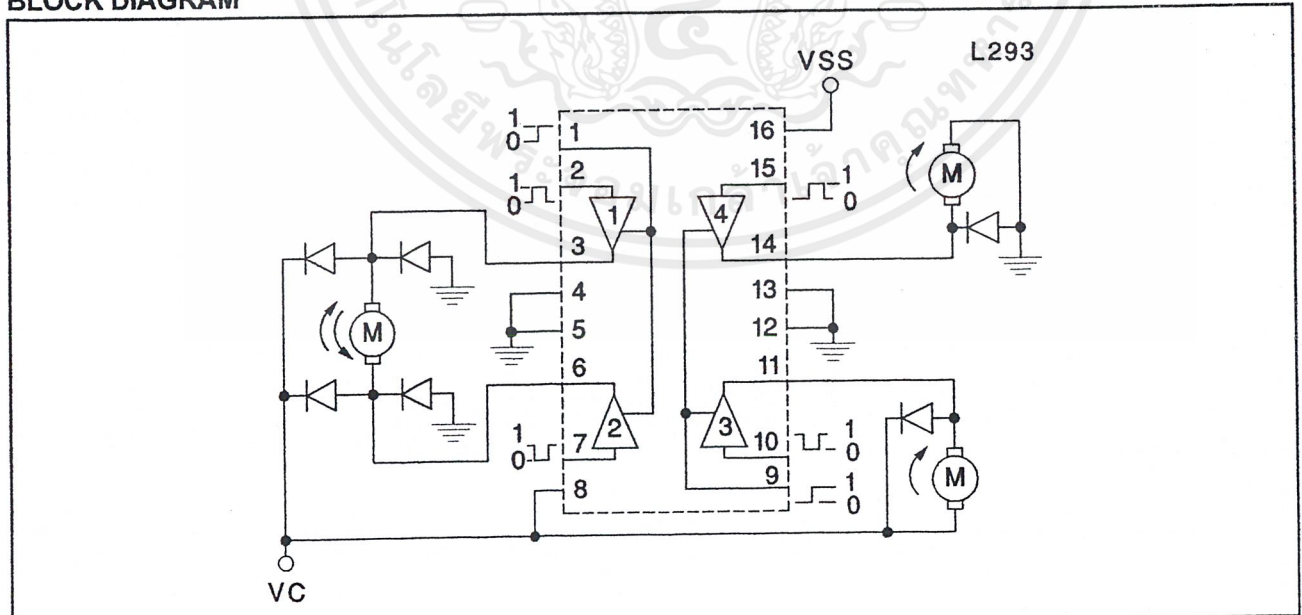
\*\*High output impedance

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Collector Supply Voltage, V <sub>c</sub> .....	36V
Logic Supply Voltage, V <sub>ss</sub> .....	36V
Input Voltage, V <sub>i</sub> .....	7V
Inhibit Voltage, V <sub>INH</sub> .....	7V
Peak Output Current (Non-Repetitive), I <sub>OUT</sub> (L293) .....	2A
I <sub>OUT</sub> (L293D) .....	1.2A
Total Power Dissipation at T <sub>ground-pins</sub> = 80°C, N Batwing pkg, (Note) .....	5W
Storage and Junction Temperature, T <sub>stg</sub> , T <sub>j</sub> .....	-40 to +150°C

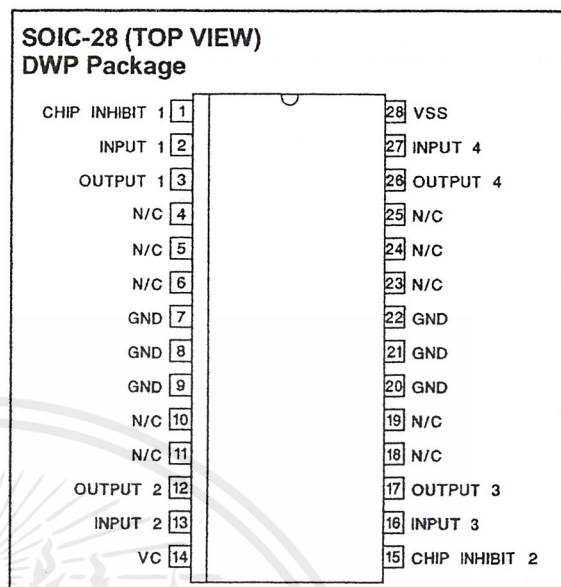
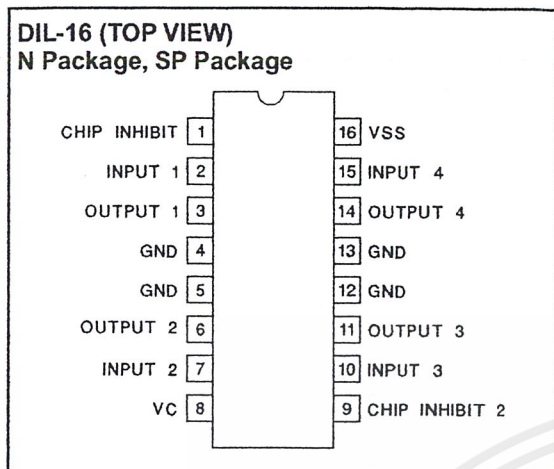
Note: Consult packaging section of Databook for thermal limitations and considerations of packages.

## BLOCK DIAGRAM



Note: Output diodes are internal in L293D.

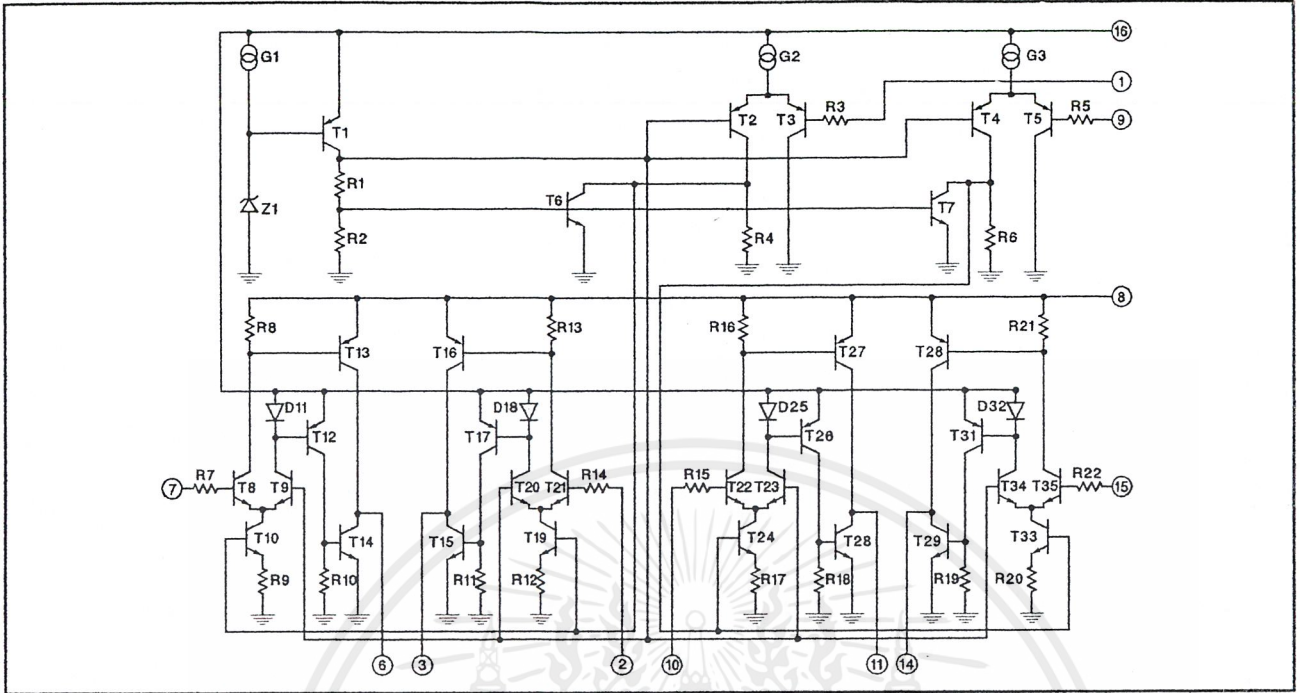
CONNECTION DIAGRAMS



**ELECTRICAL CHARACTERISTICS:** (For each channel,  $V_C = 24V$ ,  $V_{SS} = 5V$ ,  $T_{AMB} = 25^\circ C$ , unless otherwise specified;  $T_A = T_J$ )

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITION	MIN.	TYP.	MAX.	UNITS
Collector Supply Voltage	$V_C$				36	V
Logic Supply Voltage	$V_{SS}$		4.5		36	V
Collector Supply Current	$I_C$	$V_I = L, I_O = 0, V_{INH} = H$		2	6	mA
		$V_I = H, I_O = 0, V_{INH} = H$		16	24	mA
		$V_{INH} = L$			4	mA
Total Quiescent Logic Supply Current	$I_{SS}$	$V_I = L, I_O = 0, V_{INH} = H$		44	60	mA
		$V_I = H, I_O = 0, V_{INH} = H$		16	22	mA
		$V_{INH} = L$		16	24	mA
Input Low Voltage	$V_{IL}$		-0.3		1.5	V
Input High Voltage	$V_{IH}$	$V_{SS} \leq 7V$	2.3		$V_{SS}$	V
		$V_{SS} \geq 7V$	2.3		7	V
Low Voltage Input Current	$I_{IL}$	$V_I = 0V$			-10	$\mu A$
High Voltage Input Current	$I_{IH}$	$V_I = 4.5V$		30	100	$\mu A$
Inhibit Low Voltage	$V_{INH, L}$		-0.3		1.5	V
Inhibit High Voltage	$V_{INH, H}$	$V_{SS} \leq 7V$	2.3		$V_{SS}$	V
		$V_{SS} > 7V$	2.3		7	V
Low Voltage Inhibit Current	$I_{INH, L}$			-30	-100	$\mu A$
High Voltage Inhibit Current	$I_{INH, H}$				10	$\mu A$
Source Output Saturation Voltage	$V_{CEsatH}$	$I_O = -1A$ (-0.6A for L293D)		1.4	1.8	V
Sink Output Saturation Voltage	$V_{CEsatL}$	$I_O = 1A$ (0.6A for L293D)		1.2	1.8	V
Clamp Diode Forward Voltage (L293D only)	$V_F$	$I_F = 0.6A$		1.3		V
Rise Time	$T_R$	0.1 to 0.9 $V_O$ (See Figure 1)		100		ns
Fall Time	$T_F$	0.9 to 0.1 $V_O$ (See Figure 1)		350		ns
Turn-on Delay	$T_{ON}$	0.5 $V_I$ to 0.5 $V_O$ (See Figure 1)		750		ns
Turn-off Delay	$T_{OFF}$	0.5 $V_I$ to 0.5 $V_O$ (See Figure 1)		200		ns

**SCHEMATIC DIAGRAM**



**APPLICATION INFORMATION**

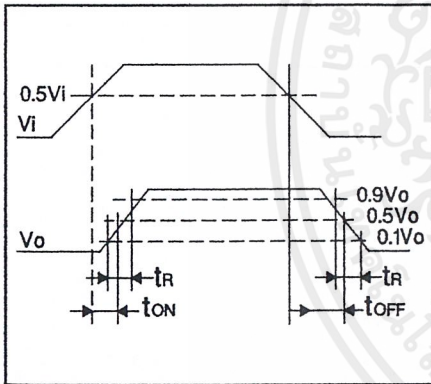


Figure 1: Switching Times

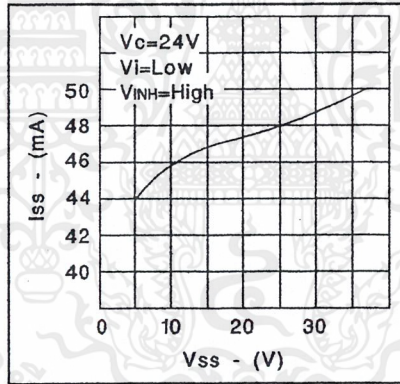


Figure 2: Quiescent Logic Supply Current vs Logic Supply Voltage

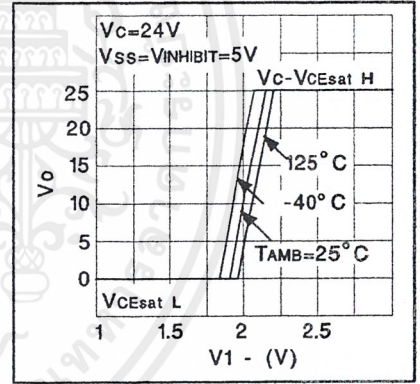


Figure 3: Output Voltage vs Input Voltage

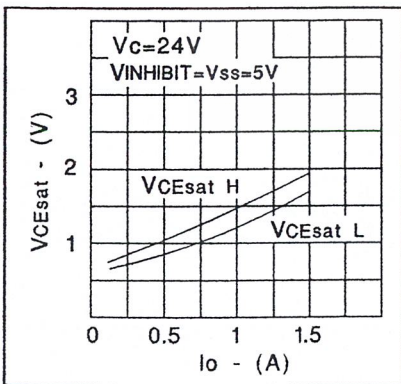


Figure 4: L293 Saturation vs Output Current

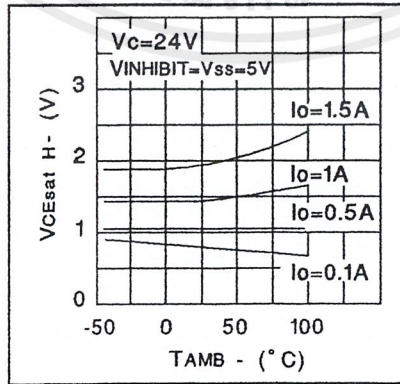


Figure 5: L293 Source Saturation vs Ambient Temperature

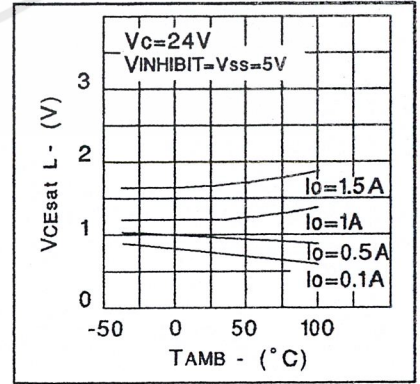


Figure 6: L293 Sink Saturation Voltage vs Ambient Temperature

NOTE: For L293D curves, multiply output current by 0.6.

APPLICATION INFORMATION (Cont.)

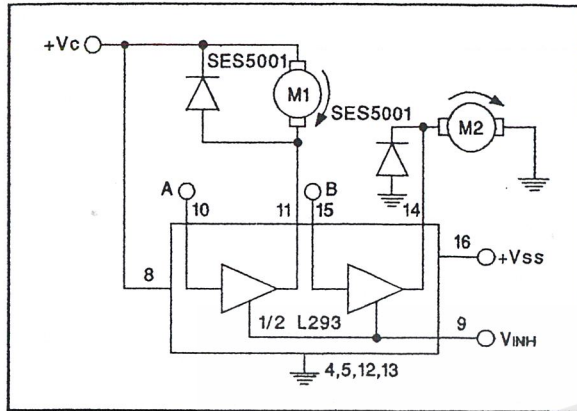


Figure 7: DC Motor Controls (with Connection to Ground and to Supply Voltage)

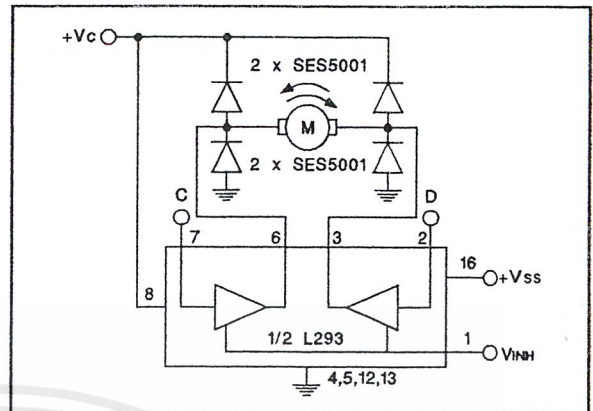


Figure 8: Bidirectional DC Motor Control

VINH	A	M1	B	M2
H	H	Fast Motor Stop	H	Run
H	L	Run	L	Fast Motor Stop
L	X	Free Running Motor Stop	X	Free Running Motor Stop

L = Low H = High X = Don't Care

INPUTS		FUNCTION
VINH = H	C = H; D = L	Turn Right
	C = L; D = H	Turn Left
	C = D	Fast Motor Stop
VINH = L	C = X; D = X	Free Running Motor Stop

L = Low H = High X = Don't Care

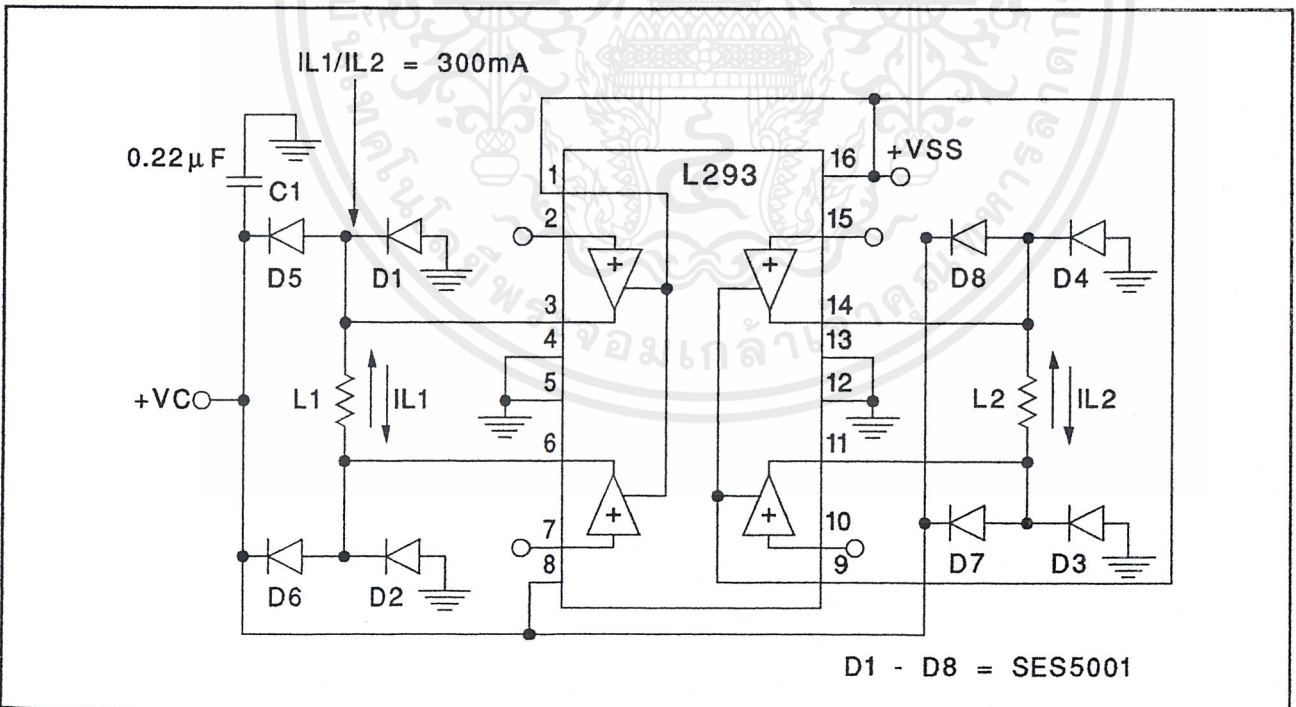


Figure 9: Bipolar Stepping Motor Control

**MOUNTING INSTRUCTIONS**

The Rthj-amp of the L293 can be reduced by soldering the GND pins to a suitable copper area of the printed circuit board or to an external heatsink.

The diagram of Figure 13 shows the maximum package power Ptot and the  $\theta_{JA}$  as a function of the side "l" of two equal square copper areas having a thickness of 35 $\mu$  (see

Figure 10). In addition, it is possible to use an external heatsink (see Figure 11).

During soldering the pins' temperature must not exceed 260°C and the soldering time must not be longer than 12 seconds.

The external heatsink or printed circuit copper area must be connected to electrical ground.

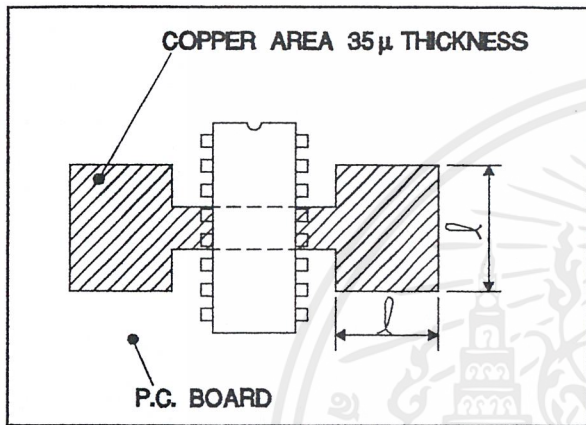


Figure 10: Example of P.C. Board Copper Area which is used as Heatsink

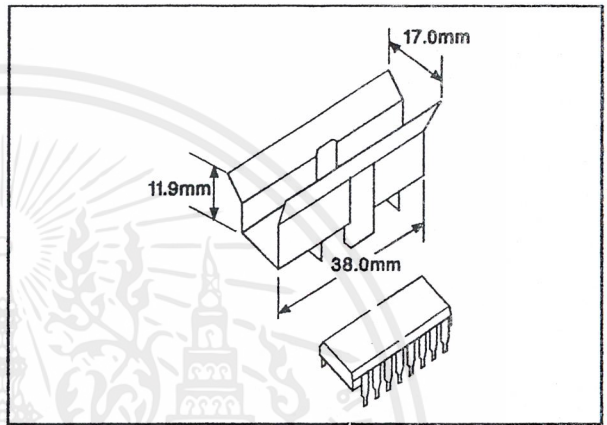


Figure 11: External Heatsink Mounting Example ( $\theta_{JA} = 25^{\circ}\text{C/W}$ )

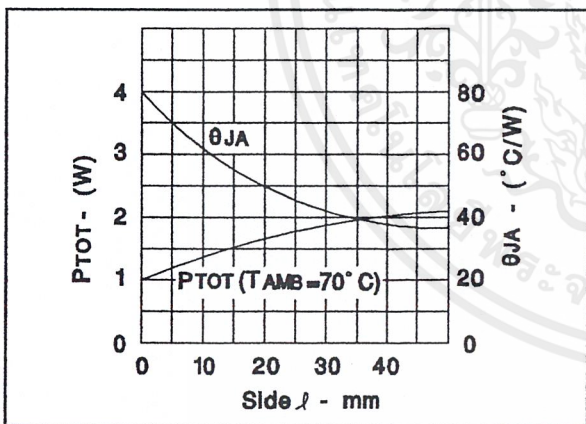


Figure 12: Maximum Package Power and Junction to Ambient Thermal Resistance

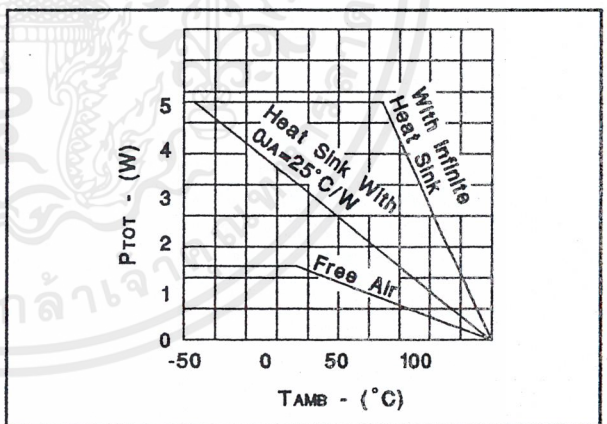


Figure 13: Maximum Allowable Power Dissipation vs Ambient Temperature

# DATA SHEET

For a complete data sheet, please also download:

- The IC06 74HC/HCT/HCU/HCMOS Logic Family Specifications
- The IC06 74HC/HCT/HCU/HCMOS Logic Package Information
- The IC06 74HC/HCT/HCU/HCMOS Logic Package Outlines

## 74HC/HCT4051

8-channel analog  
multiplexer/demultiplexer

Product specification  
File under Integrated Circuits, IC06

December 1990

Philips  
Semiconductors



# PHILIPS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 8-channel analog multiplexer/demultiplexer

## 74HC/HCT4051

### FEATURES

- Wide analog input voltage range:  $\pm 5$  V.
- Low "ON" resistance:  
80  $\Omega$  (typ.) at  $V_{CC} - V_{EE} = 4.5$  V  
70  $\Omega$  (typ.) at  $V_{CC} - V_{EE} = 6.0$  V  
60  $\Omega$  (typ.) at  $V_{CC} - V_{EE} = 9.0$  V
- Logic level translation:  
to enable 5 V logic to communicate with  $\pm 5$  V analog signals
- Typical "break before make" built in
- Output capability: non-standard
- $I_{CC}$  category: MSI

### GENERAL DESCRIPTION

The 74HC/HCT4051 are high-speed Si-gate CMOS devices and are pin compatible with the "4051" of the

"4000B" series. They are specified in compliance with JEDEC standard no. 7A.

The 74HC/HCT4051 are 8-channel analog multiplexers/demultiplexers with three digital select inputs ( $S_0$  to  $S_2$ ), an active LOW enable input ( $\bar{E}$ ), eight independent inputs/outputs ( $Y_0$  to  $Y_7$ ) and a common input/output ( $Z$ ).

With  $\bar{E}$  LOW, one of the eight switches is selected (low impedance ON-state) by  $S_0$  to  $S_2$ . With  $\bar{E}$  HIGH, all switches are in the high impedance OFF-state, independent of  $S_0$  to  $S_2$ .

$V_{CC}$  and GND are the supply voltage pins for the digital control inputs ( $S_0$  to  $S_2$ , and  $\bar{E}$ ). The  $V_{CC}$  to GND ranges are 2.0 to 10.0 V for HC and 4.5 to 5.5 V for HCT. The analog inputs/outputs ( $Y_0$  to  $Y_7$ , and  $Z$ ) can swing between  $V_{CC}$  as a positive limit and  $V_{EE}$  as a negative limit.  $V_{CC} - V_{EE}$  may not exceed 10.0 V.

For operation as a digital multiplexer/demultiplexer,  $V_{EE}$  is connected to GND (typically ground).

### QUICK REFERENCE DATA

$V_{EE} = GND = 0$  V;  $T_{amb} = 25$  °C;  $t_r = t_f = 6$  ns

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	TYPICAL		UNIT
			HC	HCT	
$t_{PZH}/t_{PZL}$	turn "ON" time $\bar{E}$ to $V_{OS}$ $S_n$ to $V_{OS}$	$C_L = 15$ pF; $R_L = 1$ k $\Omega$ ; $V_{CC} = 5$ V	22	22	ns
			20	24	ns
$t_{PHZ}/t_{PLZ}$	turn "OFF" time $\bar{E}$ to $V_{OS}$ $S_n$ to $V_{OS}$		18	16	ns
			19	20	ns
$C_I$	input capacitance		3.5	3.5	pF
$C_{PD}$	power dissipation capacitance per switch	notes 1 and 2	25	25	pF
$C_S$	max. switch capacitance independent (Y) common (Z)		5	5	pF
			25	25	pF

### Notes

1.  $C_{PD}$  is used to determine the dynamic power dissipation ( $P_D$  in  $\mu$ W):

$$P_D = C_{PD} \times V_{CC}^2 \times f_i + \sum \{ (C_L + C_S) \times V_{CC}^2 \times f_o \}$$

where:

$f_i$  = input frequency in MHz

$f_o$  = output frequency in MHz

$\sum \{ (C_L + C_S) \times V_{CC}^2 \times f_o \}$  = sum of outputs

$C_L$  = output load capacitance in pF

$C_S$  = max. switch capacitance in pF

$V_{CC}$  = supply voltage in V

2. For HC the condition is  $V_I = GND$  to  $V_{CC}$   
For HCT the condition is  $V_I = GND$  to  $V_{CC} - 1.5$  V

8-channel analog multiplexer/demultiplexer

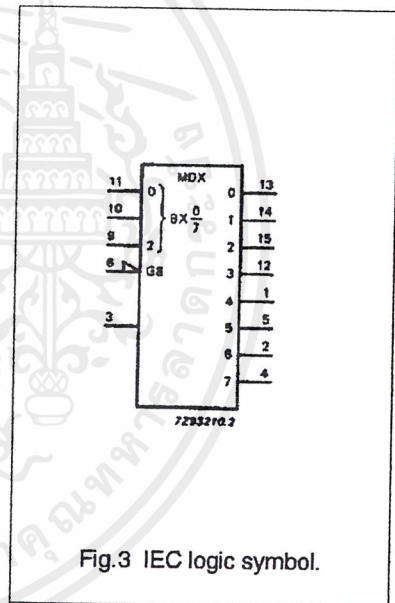
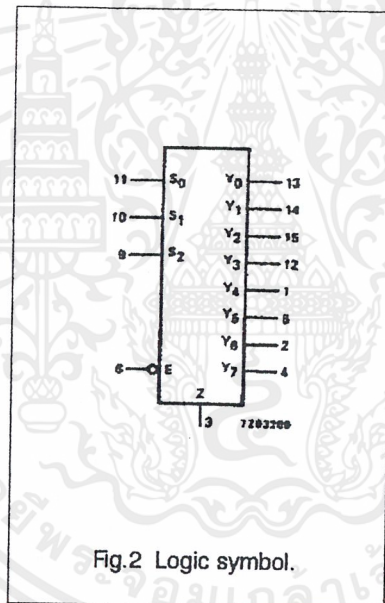
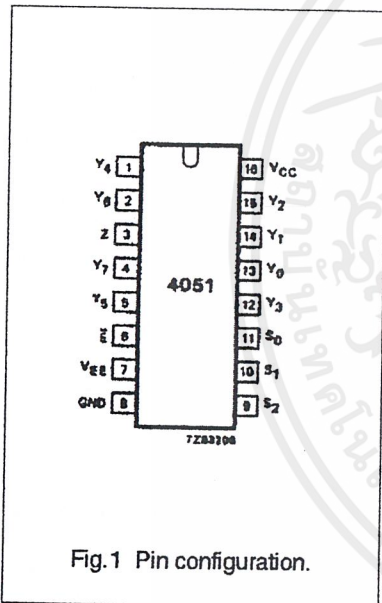
74HC/HCT4051

ORDERING INFORMATION

See '74HC/HCT/HCU/HCMOS Logic: Package information'.

PIN DESCRIPTION

PIN NO.	SYMBOL	NAME AND FUNCTION
3	Z	common input/output
6	$\bar{E}$	enable input (active LOW)
7	$V_{EE}$	negative supply voltage
8	GND	ground (0 V)
11, 10, 9	$S_0$ to $S_2$	select inputs
13, 14, 15, 12, 1, 5, 2, 4	$Y_0$ to $Y_7$	independent inputs/outputs
16	$V_{CC}$	positive supply voltage



8-channel analog multiplexer/demultiplexer

74HC/HCT4051

APPLICATIONS

- Analog multiplexing and demultiplexing
- Digital multiplexing and demultiplexing
- Signal gating

FUNCTION TABLE

INPUTS				channel ON
$\bar{E}$	$S_2$	$S_1$	$S_0$	
L	L	L	L	$Y_0 - Z$
L	L	L	H	$Y_1 - Z$
L	L	H	L	$Y_2 - Z$
L	L	H	H	$Y_3 - Z$
L	H	L	L	$Y_4 - Z$
L	H	L	H	$Y_5 - Z$
L	H	H	L	$Y_6 - Z$
L	H	H	H	$Y_7 - Z$
H	X	X	X	none

Notes

1. H = HIGH voltage level  
L = LOW voltage level  
X = don't care

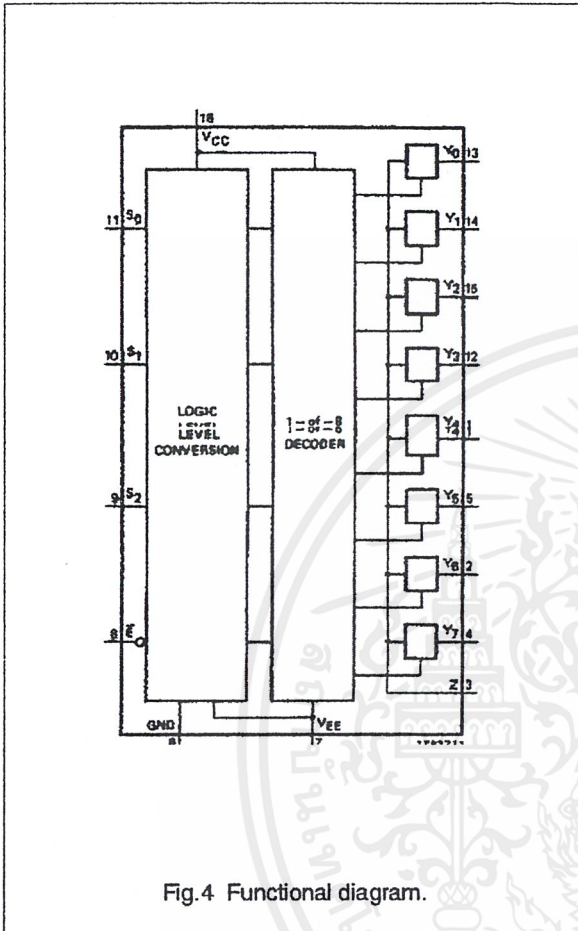


Fig.4 Functional diagram.

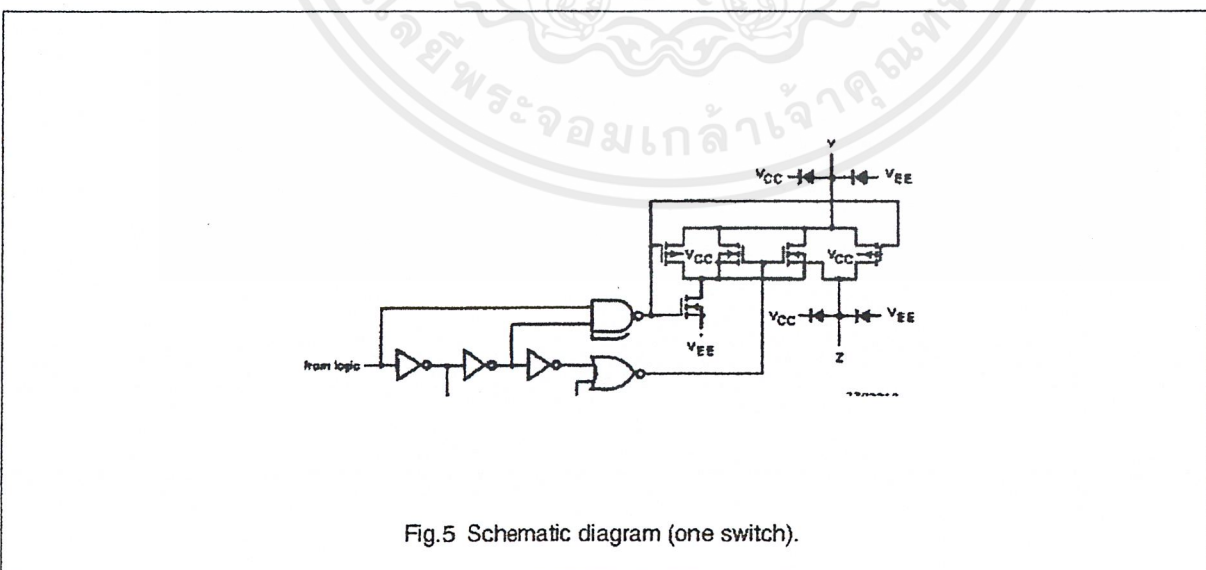


Fig.5 Schematic diagram (one switch).

## DAC0808 8-Bit D/A Converter

### General Description

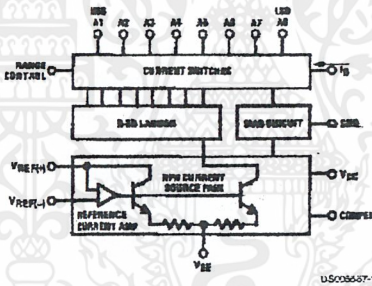
The DAC0808 is an 8-bit monolithic digital-to-analog converter (DAC) featuring a full scale output current settling time of 150 ns while dissipating only 33 mW with  $\pm 5V$  supplies. No reference current ( $I_{REF}$ ) trimming is required for most applications since the full scale output current is typically  $\pm 1$  LSB of  $255 I_{REF}/256$ . Relative accuracies of better than  $\pm 0.19\%$  assure 8-bit monotonicity and linearity while zero level output current of less than  $4 \mu A$  provides 8-bit zero accuracy for  $I_{REF} \geq 2$  mA. The power supply currents of the DAC0808 is independent of bit codes, and exhibits essentially constant device characteristics over the entire supply voltage range.

The DAC0808 will interface directly with popular TTL, DTL or CMOS logic levels, and is a direct replacement for the MC1508/MC1408. For higher speed applications, see DAC0800 data sheet.

### Features

- Relative accuracy:  $\pm 0.19\%$  error maximum
- Full scale current match:  $\pm 1$  LSB typ
- Fast settling time: 150 ns typ
- Noninverting digital inputs are TTL and CMOS compatible
- High speed multiplying input slew rate: 8 mA/ $\mu s$
- Power supply voltage range:  $\pm 4.5V$  to  $\pm 18V$
- Low power consumption: 33 mW @  $\pm 5V$

### Block and Connection Diagrams



Dual-In-Line Package

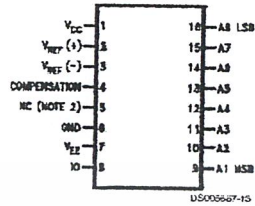


Top View  
Order Number DAC0808  
See NS Package M16A or N16A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Block and Connection Diagrams (Continued)

Small-Outline Package



## Ordering Information

ACCURACY	OPERATING TEMPERATURE RANGE	N PACKAGE (N16A) (Note 1)		SO PACKAGE (M16A)
		DAC0808LCN	MC1408P8	DAC0808LCM
8-bit	0°C ≤ T <sub>A</sub> ≤ +75°C			

Note 1: Devices may be ordered by using either order number.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Absolute Maximum Ratings (Note 2)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

### Power Supply Voltage

$V_{CC}$	+18 $V_{DC}$
$V_{EE}$	-18 $V_{DC}$

Digital Input Voltage,  $V_5$ - $V_{12}$  -10  $V_{DC}$  to +18  $V_{DC}$

Applied Output Voltage,  $V_O$  -11  $V_{DC}$  to +18  $V_{DC}$

Reference Current,  $I_{14}$  5 mA

Reference Amplifier Inputs,  $V_{14}$ ,  $V_{15}$   $V_{CC}$ ,  $V_{EE}$

Power Dissipation (Note 4) 1000 mW

ESD Susceptibility (Note 5) TBD

Storage Temperature Range -65°C to +150°C

Lead Temp. (Soldering, 10 seconds)

Dual-In-Line Package (Plastic) 260°C

Dual-In-Line Package (Ceramic) 300°C

Surface Mount Package

Vapor Phase (60 seconds) 215°C

Infrared (15 seconds) 220°C

## Operating Ratings

Temperature Range

DAC0808

$T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$

$0 \leq T_A \leq +75^\circ\text{C}$

## Electrical Characteristics

( $V_{CC} = 5V$ ,  $V_{EE} = -15 V_{DC}$ ,  $V_{REF}/R_{14} = 2 \text{ mA}$ , and all digital inputs at high logic level unless otherwise noted.)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
$E_r$	Relative Accuracy (Error Relative to Full Scale $I_O$ )	(Figure 4)				%
	DAC0808LC (LM1408-8)				$\pm 0.19$	%
	Setting Time to Within $\frac{1}{2}$ LSB (Includes $t_{PLH}$ )	$T_A = 25^\circ\text{C}$ (Note 7), (Figure 5)		150		ns
$t_{PLH}$ , $t_{PHL}$	Propagation Delay Time	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , (Figure 5)		30	100	ns
$TCI_O$	Output Full Scale Current Drift			$\pm 20$		ppm/°C
MSB	Digital Input Logic Levels	(Figure 3)				
$V_{IH}$	High Level, Logic "1"		2			$V_{DC}$
$V_{IL}$	Low Level, Logic "0"				0.8	$V_{DC}$
MSB	Digital Input Current	(Figure 3)				
	High Level	$V_{IH} = 5V$		0	0.040	mA
	Low Level	$V_{IL} = 0.8V$		-0.003	-0.8	mA
$I_{15}$	Reference Input Bias Current	(Figure 3)		-1	-3	$\mu\text{A}$
	Output Current Range	(Figure 3)				
		$V_{EE} = -5V$	0	2.0	2.1	mA
		$V_{EE} = -15V$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$	0	2.0	4.2	mA
$I_O$	Output Current	$V_{REF} = 2.000V$ , $R_{14} = 1000\Omega$ , (Figure 3)				
	Output Current, All Bits Low	(Figure 3)	1.9	1.99	2.1	mA
		(Figure 3)		0	4	$\mu\text{A}$
	Output Voltage Compliance (Note 3)	$E_r \leq 0.19\%$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$			-0.55, +0.4	$V_{DC}$
	$V_{EE} = -5V$ , $I_{REF} = 1 \text{ mA}$				-5.0, +0.4	$V_{DC}$
	$V_{EE}$ Below -10V					
$SRI_{REF}$	Reference Current Slew Rate	(Figure 6)	4	8		mA/ $\mu\text{s}$
	Output Current Power Supply Sensitivity	$-5V \leq V_{EE} \leq -18.5V$		0.05	2.7	$\mu\text{A/V}$
	Power Supply Current (All Bits Low)	(Figure 3)				
$I_{CC}$				2.3	22	mA
$I_{EE}$				-4.3	-13	mA
$V_{CC}$ , $V_{EE}$	Power Supply Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$ , (Figure 3)	4.5	5.0	5.5	$V_{DC}$
			-4.5	-15	-18.5	$V_{DC}$
	Power Dissipation					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Electrical Characteristics (Continued)

( $V_{CC} = 5V$ ,  $V_{EE} = -15V$ ,  $V_{REF}/R14 = 2\text{ mA}$ , and all digital inputs at high logic level unless otherwise noted.)

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
	All Bits Low	$V_{CC} = 5V$ , $V_{EE} = -5V$		33	170	mW
	All Bits High	$V_{CC} = 5V$ , $V_{EE} = -15V$		106	305	mW
		$V_{CC} = 15V$ , $V_{EE} = -5V$		90		mW
		$V_{CC} = 15V$ , $V_{EE} = -15V$		160		mW

**Note 2:** Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its specified operating conditions.

**Note 3:** Range control is not required.

**Note 4:** The maximum power dissipation must be derated at elevated temperatures and is dictated by  $T_{JMAX}$ ,  $\theta_{JA}$ , and the ambient temperature,  $T_A$ . The maximum allowable power dissipation at any temperature is  $P_D = (T_{JMAX} - T_A)/\theta_{JA}$  or the number given in the Absolute Maximum Ratings, whichever is lower. For this device,  $T_{JMAX} = 125^\circ\text{C}$ , and the typical junction-to-ambient thermal resistance of the dual-in-line J package when the board mounted is  $100^\circ\text{C/W}$ . For the dual-in-line N package, this number increases to  $175^\circ\text{C/W}$  and for the small outline M package this number is  $100^\circ\text{C/W}$ .

**Note 5:** Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 k $\Omega$  resistor.

**Note 6:** All current switches are tested to guarantee at least 50% of rated current.

**Note 7:** All bits switched.

**Note 8:** Pin-out numbers for the DAL080X represent the dual-in-line package. The small outline package pinout differs from the dual-in-line package.

## Typical Application

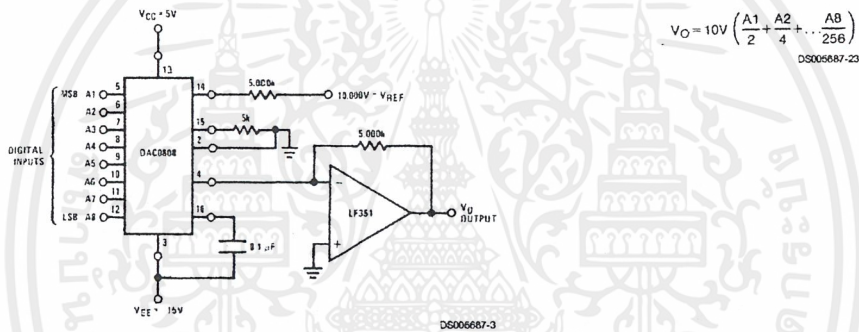
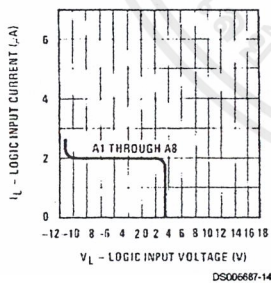


FIGURE 1. +10V Output Digital to Analog Converter (Note 8)

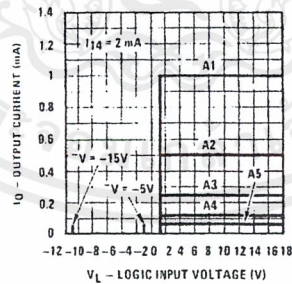
## Typical Performance Characteristics $V_{CC} = 5V$ , $V_{EE} = -15V$ , $T_A = 25^\circ\text{C}$ , unless otherwise noted

### Logic Input Current vs Input Voltage



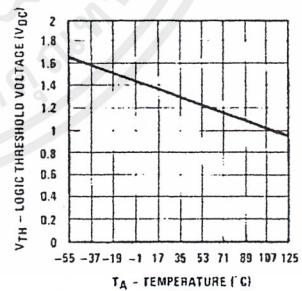
DS006687-14

### Bit Transfer Characteristics



DS006687-15

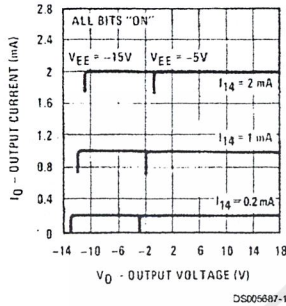
### Logic Threshold Voltage vs Temperature



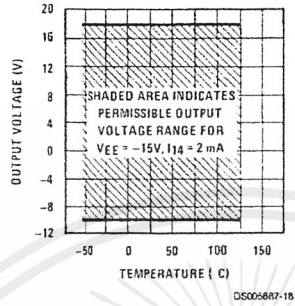
DS006687-16

**Typical Performance Characteristics**  $V_{CC} = 5V$ ,  $V_{EE} = -15V$ ,  $T_A = 25^\circ C$ , unless otherwise noted (Continued)

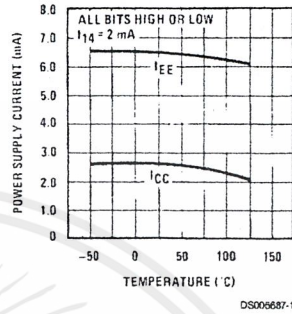
**Output Current vs Output Voltage (Output Voltage Compliance)**



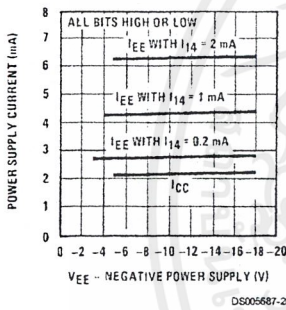
**Output Voltage Compliance vs Temperature**



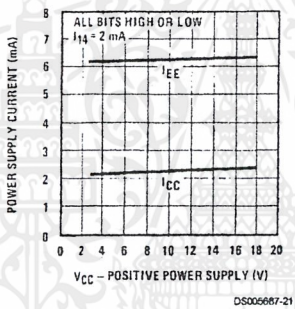
**Typical Power Supply Current vs Temperature**



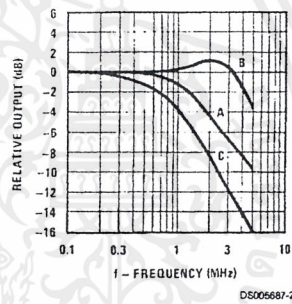
**Typical Power Supply Current vs VEE**



**Typical Power Supply Current vs VCC**



**Reference Input Frequency Response**



Unless otherwise specified:  $R_{14} = R_{15} = 1\text{ k}\Omega$ ,  $C = 15\text{ pF}$ , pin 16 to  $V_{EE}$ ;  $R_L = 50\Omega$ , pin 4 to ground.

**Curve A:** Large Signal Bandwidth Method of Figure 7,  $V_{REF} = 2\text{ Vp-p}$  offset 1V above ground.

**Curve B:** Small Signal Bandwidth Method of Figure 7,  $R_L = 250\Omega$ ,  $V_{REF} = 50\text{ mVp-p}$  offset 200 mV above ground.

**Curve C:** Large and Small Signal Bandwidth Method of Figure 9 (no op amp,  $R_L = 50\Omega$ ),  $R_S = 50\Omega$ ,  $V_{REF} = 2V$ ,  $V_S = 100\text{ mVp-p}$  centered at 0V.