

ระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุลย์

TWO-WHEELS BALANCING SYSTEM



T119186

วิชา อุตสาหกรรม  
สุขเกษม จันท์ดี  
สุทธินันท์ สุบรรณ  
สุทธิพงษ์ นิมิตร์ตัน

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...119186  
วัน,เดือน,ปี...- 6 S.ค. 2554

b. 119186071  
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **TWO-WHEELS BALANCING SYSTEM**

**WARISTHA      UBOLBANDIT**

**SUKKASEM      JUNTA**

**SUTHINUN      SUKKARAT**

**SUTTIPONG      NIMKULRAD**



**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHATRONIC ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2010**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปริญญาโทปีการศึกษา 2553

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุล  
TWO-WHEELS BALANCING SYSTEM

|          |               |             |          |
|----------|---------------|-------------|----------|
| ผู้จัดทำ | นางสาววิรัชญา | อุบลบัณฑิต  | 50011400 |
|          | นายสุขเกษม    | จันทร์ดี    | 50011694 |
|          | นายสุทธินันท์ | สุขราษฎร์   | 50011711 |
|          | นายสุทธิพงษ์  | นิมกุลรัตน์ | 50011713 |

.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุมิตร พนาอุดมทรัพย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุล

โดย

|               |              |          |
|---------------|--------------|----------|
| นางสาววิรัชฐา | อุบลบัณฑิต   | 50011400 |
| นายสุกเกษม    | จันทร์ตะ     | 50011694 |
| นายสุทธินันท์ | สุขราษฎร์    | 50011711 |
| นายสุทธิพงษ์  | นันทกุลรัตน์ | 50011713 |

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ. สุมิตร พนาอุดมทรัพย์

ปีการศึกษา 2553

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอซึ่ง การศึกษาและการออกแบบระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุล โดยระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุลที่ทำการศึกษาค้นคว้าในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นระบบที่เน้นศึกษาโดยยึดพื้นฐานของระบบควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัม ซึ่งเป็นระบบที่ได้รับความสนใจมานานในแวดวงวิศวกรรมระบบควบคุม เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นและไม่มีเสถียรภาพ

การออกแบบและการศึกษาระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุลนี้ มีพื้นฐานมาจากระบบควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัม (Invert Pendulum) ซึ่งเป็นระบบที่นำมาใช้จริงในการสร้างพาหนะขนส่งส่วนบุคคลสองล้อที่มีชื่อเสียงโด่งดังนั่นก็คือ เซกเวย์เอชที (Segway HT) โดยในระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุลนี้ เป็นวิธีการควบคุมอย่างง่าย ด้วยเซนเซอร์ความเร่งและหลักการพื้นฐานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ประกอบกัน รวมถึงออกแบบระบบที่ใช้ในการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# TWO-WHEELS BALANCING SYSTEM

By

Miss Waristha Ubolbandit  
Mr. Sukgasaem Junta  
Mr. Suthinun Sukkarat  
Mr. Suttipong Nimkulrad

Advisor

Asst. Prof. Sumit Panaudomsub

Academic Year 2010

## Abstract

This thesis presents study case and design of balancing driving system. This balancing driving system which in this thesis is the system that main focus at the basic principle of invert pendulum control system. It was the one of the interested system of control engineers because of it non-linearity and unstability attributes

The design and the study case of this balancing driving system was based on the basic principle of invert pendulum control system that was use in the one of famous Two-Wheel transporter , Segway Human Transporter. In this balancing driving system is the simple control method by acceleration sensor and the principle method of electronic part combine together. Concluding design control system by microcontroller.

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปฏิญานិพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ผศ. สุมิตร พนาอุดมทรัพย์ ทั้งในด้านคำปรึกษาและการให้กำลังใจ ทางคณะผู้จัดทำรู้สึกขอบพระคุณและซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง

ขอบพระคุณ บิดา-มารดา ที่เข้าใจ และให้การสนับสนุนในการศึกษาและการทำงาน ตลอดจนสละกำลังทรัพย์มาโดยตลอด

ขอบคุณเพื่อนๆผู้ร่วมงาน ที่ช่วยกันทำงานและช่วยเหลือซึ่งกันและกันเป็นอย่างดี ทำให้งานสามารถดำเนินผ่านอุปสรรคไปได้ในทุกๆครึ่งเสมอ

ขอบคุณห้องวิจัยปริญญาโท ของ ดร.นพดล มณีรัตน์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และให้ยืมอุปกรณ์ที่ขาดเหลืออยู่เสมอๆ ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆที่คอยให้กำลังใจ และคำปรึกษาเป็นอย่างดี

และสุดท้าย ขอขอบคุณทุกๆท่านที่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องกับหนังสือเล่มนี้

ผู้จัดทำ

วริษฐา

สุเกษม

สุทธินันท์

สุทธิพงษ์

อุบลบัณฑิต

จันทร์ตะ

สุชราษฏร์

นันทกุลรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| บทคัดย่อ.....           | I   |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II  |
| กิตติกรรมประกาศ.....    | III |
| สารบัญ.....             | IV  |
| สารบัญรูป.....          | VII |
| สารบัญตาราง.....        | IX  |

|  |    |
|--|----|
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 1  |
| 1.1 กล่าวนำ.....   | 1  |
| 1.2 เป้าหมายและวัตถุประสงค์ของโครงการ.....                 | 2  |
| 1.3 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ.....                 | 2  |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน.....                        | 3  |
| 2.1 แบบจำลองของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม.....              | 3  |
| 2.1.1 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....                 | 3  |
| 2.1.2 แบบจำลองล้อทั้งสองของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม.....  | 5  |
| 2.1.3 แบบจำลองของก้านอินเวอร์ทเพนดูลัม.....                | 7  |
| 2.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์.....                           | 9  |
| 2.2.1 เซนเซอร์วัดความเร็ว.....                             | 9  |
| 2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์.....                            | 10 |
| 2.3.1 การควบคุมทิศทางมอเตอร์กระแสตรง.....                  | 10 |
| 2.3.2 หลักการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรง.....            | 12 |
| 2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....                                 | 12 |
| 2.4.1 คุณสมบัติต่างๆของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 16F877A..... | 12 |
| 2.5 การชดเชยระบบควบคุมด้วยตัวชดเชยชนิด PID.....            | 15 |
| 2.5.1 Proportional Mode of Control.....                    | 15 |
| 2.5.2 Integral Mode of Control.....                        | 16 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ(ต่อ)

หน้า

|   |           |
|---|-----------|
| 2.5.3 Derivative Mode of Control.....                             | 16        |
| <b>บทที่ 3 การออกแบบ</b>  |           |
| 3.1 การออกแบบ โครงสร้างทางกลศาสตร์ (Mechanic Design).....         | 17        |
| 3.1.1 การออกแบบฐานของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม.....               | 18        |
| 3.1.2 ฐานด้านข้างของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม.....                | 19        |
| 3.1.3 การออกแบบฐานของตุ้มถ่วงบนก้านเพนดูลัม.....                  | 19        |
| 3.1.4 ตัวยึดก้านเพนดูลัม.....                                     | 20        |
| 3.1.5 การออกแบบล้อของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม.....               | 21        |
| 3.1.6 ตัวยึดล้อของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม.....                  | 21        |
| 3.1.7 ตัวยึดมอเตอร์ของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม.....              | 22        |
| 3.2 การออกแบบวงจร.....  | 23        |
| 3.2.1 วงจรแปลงไฟ 12V เป็น 5V.....                                 | 23        |
| 3.2.2 วงจรขับมอเตอร์ด้วยไอซี L293D.....                           | 23        |
| 3.2.3 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์.....                                  | 24        |
| 3.2.4 วงจรแสดงผลทางหน้าจอ LCD.....                                | 24        |
| 3.3 การออกแบบ โปรแกรมการทำงาน.....                                | 25        |
| 3.3.1 ส่วนการอ่านค่าจากเซนเซอร์ความเร็ว.....                      | 26        |
| 3.3.2 ส่วนการควบคุมสมดุลแบบจำลอง.....                             | 26        |
| 3.3.3 ส่วนการควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์.....               | 26        |
| 3.3.4 ส่วนการแสดงผลบนหน้าจอแอลซีดี.....                           | 26        |
| 3.3.5 การออกแบบตัวชดเชยสำหรับระบบควบคุมชนิด PID.....              | 26        |
| <b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....</b>                         | <b>28</b> |
| 4.1 ผลการทดลองเอาต์พุตที่ออกมาจากเซนเซอร์.....                    | 28        |
| 4.2 ผลการทดลองวัดค่าตัวชี้วัดที่เปลี่ยนแปลงไปตามองศาการเอียง..... | 29        |
| 4.3 ผลการทดลองการแสดงผลผ่านทางหน้าจอ LCD.....                     | 31        |

## สารบัญ(ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป.....                 | 32   |
| 5.1 สรุปผลการทดลอง.....                       | 32   |
| 5.2 ปัญหาที่พบและอุปสรรค.....                 | 32   |
| 5.3 แนวทางแก้ไขและปรับปรุง.....               | 32   |
| 5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา..... | 33   |
| เอกสารอ้างอิง.....                            | 34   |
| ภาคผนวก ก.....                                | 35   |
| ภาคผนวก ข.....                                | 39   |



## VI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า   |
|--------|--|
| 1.1    | เชกเวย์เอชที.....1   |
| 2.1    | แบบจำลองโครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....2                            |
| 2.2    | แผนภาพแรงของล่อทั้งสอง.....5   |
| 2.3    | แผนภาพแรงของก้านอินเวิร์ทเพนคูล์ม.....7                                |
| 2.4    | แผนภาพแสดงทิศกาวัดความเร่งของเซนเซอร์.....9                            |
| 2.5    | วงจรเอชบริดจ์.....10   |
| 2.6    | ไอซี L293D และแผนภาพลักษณะการทำงานภายใน.....11                         |
| 2.7    | ลักษณะของสัญญาณพัลส์วัทมอดูเลชั่น ในลักษณะคิวตี้ไซเกิ้ลต่างๆกัน.....12 |
| 2.8    | แสดงสถาปัตยกรรมภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ 16F877A.....14                |
| 2.9    | แสดงตัวถังของ CPU PIC16F877A และการจัดวางตำแหน่งขาสัญญาณต่างๆ..15      |
| 3.1    | โครงสร้างหุ่นยนต์อินเวิร์ทเพนคูล์ม.....17                              |
| 3.2    | ฐานด้านบนของหุ่นยนต์อินเวิร์ทเพนคูล์ม.....18                           |
| 3.3    | ฐานด้านล่างของหุ่นยนต์อินเวิร์ทเพนคูล์ม.....18                         |
| 3.4    | ฐานด้านข้างของหุ่นยนต์อินเวิร์ทเพนคูล์ม.....19                         |
| 3.5    | ฐานของตุ้มถ่วงน้ำหนักบนก้านเพนคูล์ม.....20                             |
| 3.6    | ตัวยึดบนก้านเพนคูล์ม.....20  |
| 3.7    | ล่อของหุ่นยนต์อินเวิร์ทเพนคูล์ม.....21                                 |
| 3.8    | ตัวยึดล่อของหุ่นยนต์อินเวิร์ทเพนคูล์ม.....22                           |
| 3.9    | ตัวยึดมอเตอร์ของหุ่นยนต์อินเวิร์ทเพนคูล์ม.....22                       |
| 3.10   | วงจรแปลงไฟ 12V เป็น 5V.....23  |
| 3.11   | วงจรขับมอเตอร์ด้วย L293D.....23  |
| 3.12   | วงจรรองรับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์.....24                                  |
| 3.13   | แสดงวงจรการเชื่อมต่อกับแผงแสดงผล LCD.....24                            |
| 3.14   | แผนภาพแสดงหลักการการทำงานของแบบจำลอง.....25                            |
| 4.1    | แสดงลักษณะการเอียงและการเปรียบเทียบองศาของเซนเซอร์.....28              |

## VII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ |  | หน้า |
|--------|--|------|
| 4.2    | แสดงค่า Duty Cycle ที่ประมาณ 25%.....                  | 30   |
| 4.3    | แสดงค่า Duty Cycle ที่ประมาณ 50%.....                  | 30   |
| 4.4    | แสดงค่า Duty Cycle ที่ประมาณ 75%.....                  | 30   |
| 4.5    | แสดงหน้าจอแอลซีดีเมื่อแบบจำลองอยู่ที่ตำแหน่งสมดุล..... | 31   |
| 4.6    | แสดงหน้าจอแอลซีดีเมื่อแบบจำลองมีการเอนตัว.....         | 31   |



### VIII

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 ตารางแสดงผลแรงดันเอาต์พุตจากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง.....29



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ เป็นสาขาวิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ทฤษฎีต่างๆ เพื่อออกแบบและควบคุมระบบทางไฟฟ้าและเครื่องกลให้ทำงานสอดคล้องกันอย่างสำเร็จผล อีกทั้งยังให้เป็นที่ไปตามวัตถุประสงค์อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ในรายวิชาโครงการ (Project1 01244020) นี้ จึงเลือกที่จะศึกษาในระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุล

ระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุลนี้เป็นเรื่องที่น่าสนใจศึกษากันอย่างแพร่หลาย โดยผลงานที่ถูกกล่าวถึงมากที่สุดนั่นคือเซกเวย์เฮชที (Segway Human Transporter : Segway HT) ของนาย ดิน คาเมน นักประดิษฐ์ชาวยุโรป ซึ่งตัวรถเซกเวย์นี้ มีการนำระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุลมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และอีกทั้งยังมีความเสถียรภาพมากอีกด้วย เพราะฉะนั้นแล้วในรายวิชาโครงการนี้ จึงเลือกที่จะศึกษาในระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุล โดยศึกษาในแบบจำลองของรถยนต์สองล้อในลักษณะที่มีเซกเวย์เฮชทีเป็นต้นแบบ



รูปที่ 1.1 เซกเวย์เฮชที

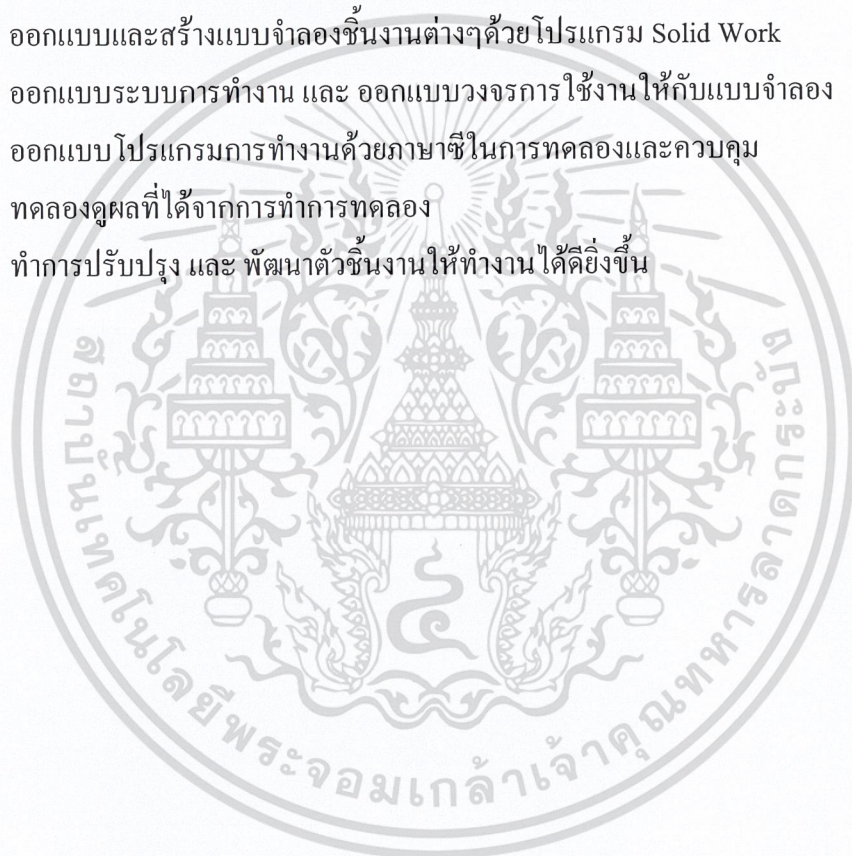
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 เป้าหมายและวัตถุประสงค์ของโครงการ

ศึกษาหลักการทำงานพื้นฐานของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมและระบบควบคุมโดยออกแบบอีกทั้งสร้างตัวแบบจำลองซึ่งสามารถรักษาสมดุลได้ด้วยตนเองบนล้อที่ขนาบอยู่บนแกนเดียวกัน โดยทำให้มีพื้นฐานการพื้นฐานที่คล้ายกับรถแข่งเวย์เอชซี

## 1.3 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ

1. ศึกษาระบบควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัม และ อุปกรณ์ต่างๆที่จะใช้ในโครงการ
2. ออกแบบและสร้างแบบจำลองชิ้นงานต่างๆด้วยโปรแกรม Solid Work
3. ออกแบบระบบการทำงาน และ ออกแบบวงจรการใช้งานให้กับแบบจำลอง
4. ออกแบบโปรแกรมการทำงานด้วยภาษาซีในการทดลองและควบคุม
5. ทดลองดูผลที่ได้จากการทำการทดลอง
6. ทำการปรับปรุง และ พัฒนาตัวชิ้นงานให้ทำงานได้ดียิ่งขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

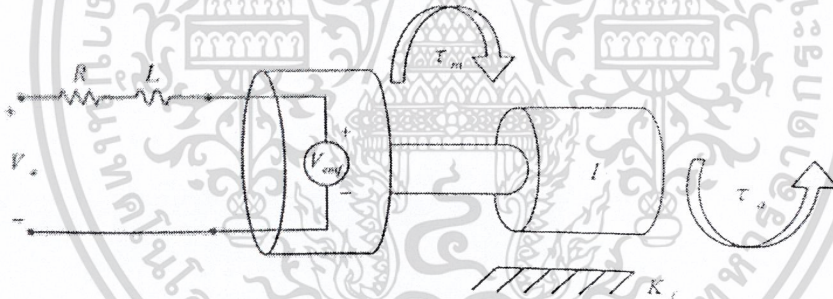
# ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

### 2.1 แบบจำลองของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

ในโครงการเรื่องระบบควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัม ระบบพลวัตของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมสามารถอธิบายด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาในการออกแบบตัวควบคุมสมมูลให้กับหุ่นยนต์ ดังนั้นในหัวข้อนี้กล่าวถึง สมการการเคลื่อนที่ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

#### 2.1.1 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

ในหัวข้อนี้อธิบายถึงระบบพลวัตของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยแบบจำลองปริภูมิสเทท โดยอธิบายจากความสัมพันธ์ของแรงดันอินพุทของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และแรงบิด (Torque) ที่ต้องการให้ควบคุมสมมูลของหุ่นยนต์



รูปที่ 2.1 แบบจำลองโครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.1 เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้รับแรงดันอินพุท  $V_a(t)$  เข้ามา ผ่านตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมอยู่ จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้า  $i(t)$  ในขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature) และมอเตอร์จะส่งแรงบิดออกไปเป็นเอาต์พุทซึ่งค่าแรงบิด  $\tau_m(t)$  ของมอเตอร์เป็นสัดส่วนของกระแสไฟฟ้า  $i(t)$  โดยมีค่า  $k_m$  เป็นค่าคงที่ของแรงบิด

$$\tau_m(t) = k_m i(t) \quad (2.1.1)$$

เมื่อมีแรงบิดเกิดขึ้น คอยล์ของมอเตอร์จะเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กด้วยความเร็วเชิงมุม  $\omega(t)$  ทำให้เกิดแรงเคลื่อนกระแสไฟฟ้าต้านกลับขึ้น (Back electromotive force voltage,  $V_{emf}(t)$ ) โดยมีค่า  $k_e$  เป็นค่าคงที่ของแรงดันไฟฟ้าต้านกลับ ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่(2.1.2)

$$V_{emf}(t) = k_e \omega(t) \quad (2.1.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchoff's voltage law) ทำให้เราสามารถสร้างสมการอนุพันธ์เชิงเส้น (Linear differential) ของมอเตอร์ได้ดังนี้

$$V_a(t) - Ri(t) - L \frac{di(t)}{dt} - V_{emf}(t) = 0 \quad (2.1.3)$$

เมื่อ R และ L คือค่าความต้านทานและค่าตัวเหนี่ยวนำที่อนุกรมอยู่ในขดลวดอาร์เมเจอร์

จากสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ และจากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน แรงเสียดทานของมอเตอร์สามารถจัดให้อยู่ในสมการเชิงเส้นของความเร็ว เมื่อสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแกนมอเตอร์คือ  $k_f$  และผลรวมของแรงบิด เท่ากับความเร่งที่แกนมอเตอร์ คูณกับค่าความเฉื่อยของโรเตอร์  $I_R(t)$  ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum M(t) = \tau_m(t) - k_f \omega(t) - \tau_a(t) = I_R \dot{\omega}(t) \quad (2.1.4)$$

จากสมการที่ (2.1.1) ถึง (2.1.4) สามารถจัดรูปสมการใหม่และเขียนแทนด้วยสมการของมอเตอร์พื้นฐานสองสมการ คือ

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L}i(t) - \frac{k_e}{L}\omega(t) + \frac{V_a(t)}{L} \quad (2.1.5)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{k_m}{I_R}i(t) - \frac{k_f}{I_R}\omega(t) - \frac{\tau_a(t)}{I_R} \quad (2.1.6)$$

เนื่องจากค่าความเหนี่ยวนำและค่าแรงเสียดทานของมอเตอร์ โดยทั่วไปมีค่าน้อยมาก ดังนั้นหากประมาณได้ค่าทั้งสองเป็นศูนย์ จะได้สมการอย่างง่ายของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ (2.1.7) และ (2.1.8)

$$i(t) = -\frac{k_e}{R}\omega(t) + \frac{1}{R}V_a(t) \quad (2.1.7)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{k_m}{I_R}i(t) - \frac{\tau_a(t)}{I_R} \quad (2.1.8)$$

และจากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.1.7) และ (2.1.8) สามารถเขียนสมการใหม่ โดยแทนตัวแปรกระแสไฟฟ้าในสมการที่ (2.1.7) ลงในสมการที่ (2.1.8) จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{k_m k_e}{I_R R} \omega(t) + \frac{k_m}{I_R R} V_a(t) - \frac{\tau_a(t)}{I_R} \quad (2.1.9)$$

ระบบพลวัตของมอเตอร์สามารถแสดงเป็นแบบจำลองปริภูมิสเททได้ด้วยตัวแปรตำแหน่งเชิงมุม  $\theta(t)$  และความเร็วเชิงมุม  $\omega(t)$  เมื่ออินพุตของมอเตอร์คือแรงดันไฟฟ้าและแรงบิดจะได้แบบจำลองปริภูมิสเททของระบบพลวัตของมอเตอร์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{k_m k_e}{I_R R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_m}{I_R R} & -\frac{1}{I_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(t) \\ \tau_a(t) \end{bmatrix} \quad (2.1.10)$$

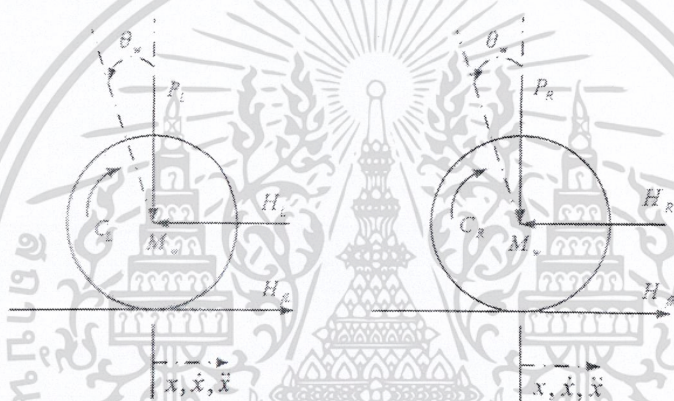
$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(t) \\ \tau_a(t) \end{bmatrix} \quad (2.1.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 แบบจำลองล้อทั้งสองของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

หุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมแบบสองล้อ มีระบบเชิงกลที่ยุ่งยาก เนื่องจากต้องวิเคราะห์ระบบของล้อและก้านเพนดูลัมแยกกันในตอนแรก แต่สุดท้ายระบบทั้งสองต้องนำมาใช้อธิบายพฤติกรรมการรักษาสมดุลของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมร่วมกัน

เมื่อหุ่นยนต์ถูกทำให้เบี่ยงเบนออกจากสมดุล แรงบิดจะถูกส่งออกจากมอเตอร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงปรับเปลี่ยนไปตามแรงที่เกิดขึ้น เริ่มต้นจากสมการการเคลื่อนที่ของล้อซ้าย และล้อขวา ซึ่งได้มาจากการเขียนแผนภาพแรงของล้อทั้งสอง จากนั้นจะได้สมการที่สำเร็จของล้อทั้งสองที่เหมือนกัน โดยในที่นี้จะแสดงสมการจากล้อขวา



รูปที่ 2.2 แผนภาพแรงของล้อทั้งสอง

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน พบว่า ผลรวมของแรงในแนวนอนอธิบายได้ดังสมการที่ (2.1.12) เมื่อ  $M_w$  คือ มวลของล้อและหุ่นยนต์  $\ddot{x}(t)$  คือความเร่งในแนวนอน  $H_{FR}$  คือ แรงเสียดทานระหว่างพื้นกับล้อ และ  $H_R$  คือแรงปฏิกิริยาระหว่างล้อกับหุ่นยนต์ในแนวนอน

$$\sum F(t) = M a(t)$$

$$M_w \ddot{x}(t) = H_{FR}(t) - H_R(t) \quad (2.1.12)$$

และผลรวมที่กระทำที่จุดศูนย์กลางของล้อ อธิบายได้โดยสมการที่ (2.1.13) เมื่อ  $I_w$  คือโมเมนต์ความเฉื่อยของล้อ  $\theta_w$  คือ มุมที่หมุนของล้อ  $C_R$  คือ แรงบิดของมอเตอร์ที่กระทำต่อล้อ และ  $r$  คือรัศมีของล้อ

$$\sum M_o(t) = I \alpha(t)$$

$$I_w \ddot{\theta}_w(t) = C_R(t) - r H_{FR}(t) \quad (2.1.13)$$

จากสมการพลวัตของมอเตอร์ในสมการที่ (2.1.4) เมื่อพิจารณาที่  $\mathbf{k}_f = 0$  แรงบิดของมอเตอร์แสดง

ได้สมการดังที่ (2.1.14) ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_m(t) = I_R \frac{d\omega(t)}{dt} + \tau_a(t) \quad (2.1.14)$$

เมื่อจัดรูปสมการ และทำการแทนค่าพารามิเตอร์จากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะได้สมการของแรงบิดเอาต์พุตสุทธิที่ให้กับล้อ ดังนี้

$$C_R(t) = I_R \frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{k_m k_e}{R} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{R} V_a(t) \quad (2.1.15)$$

เพราะฉะนั้น เราสามารถเขียนสมการ (2.1.13) ใหม่ได้ดังนี้

$$I_w \ddot{\theta}_w(t) = -\frac{k_m k_e}{R} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{R} V_a(t) - r H_{fR}(t) \quad (2.1.16)$$

ดังนั้นจะได้

$$H_{fR}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w(t) \quad (2.1.17)$$

เมื่อนำสมการที่(2.1.15) แทนในสมการที่(2.1.12) จะได้สมการสำหรับล้อทางซ้ายและล้อทางขวาดังนี้

สมการล้อทางซ้าย

$$M_w \ddot{x}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w(t) - H_L(t) \quad (2.1.18)$$

สมการล้อทางขวา

$$M_w \ddot{x}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w(t) - H_R(t) \quad (2.1.19)$$

เนื่องจากการเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่จุดศูนย์กลางของล้อ ทำให้การเคลื่อนที่เชิงมุมสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_w(t)r &= \ddot{x}(t) \quad \text{หรือ} \quad \ddot{\theta}_w(t) = \frac{\ddot{x}(t)}{r} \\ \dot{\theta}_w(t)r &= \dot{x}(t) \quad \text{หรือ} \quad \dot{\theta}_w(t) = \frac{\dot{x}(t)}{r} \end{aligned}$$

ดังนั้นสมการที่(2.1.18)และ(2.1.19)สามารถแปลงเป็นสมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นได้ดังนี้

สมการล้อทางซ้าย

$$M_w \ddot{x}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x}(t) - H_L(t) \quad (2.1.20)$$

สมการล้อทางขวา

$$M_w \ddot{x}(t) = -\frac{k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) + \frac{k_m}{Rr} V_a(t) - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x}(t) - H_R(t) \quad (2.1.21)$$

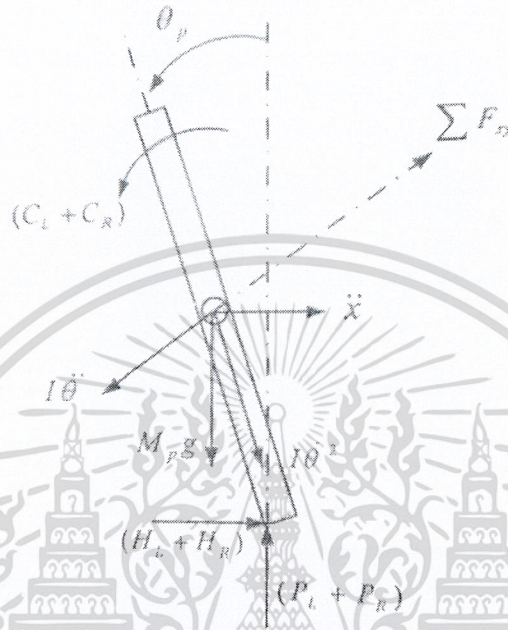
เมื่อนำสมการที่ (2.1.20) และ (2.1.21) มารวมกัน ก็จะสมการเขียนสมการรวมของล้อทั้งสองดังนี้

$$z \left( M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \ddot{x}(t) = -\frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) + \frac{2k_m}{Rr} V_a(t) - (H_L(t) + H_R(t)) \quad (2.1.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 แบบจำลองของก้านอินเวิร์ทเพนดูลัม

ในการวิเคราะห์ระบบเชิงกลของก้านอินเวิร์ทเพนดูลัม มีความต่อเนื่องมาจากระบบเชิงกลของล้อ โดยสามารถแสดงแผนภาพของก้านอินเวิร์ทเพนดูลัมได้ดังรูป 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพแรงของก้านอินเวิร์ทเพนดูลัม

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ผลรวมของแรงในแนวนอน อธิบายได้ดังสมการที่ (2.1.23) โดย  $M_p$  คือมวลของก้านเพนดูลัม  $l$  ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางถ่วงถึงจุดศูนย์กลางของก้านเพนดูลัม  $\theta_p$  คือมุมที่ก้านเพนดูลัมเบี่ยงเบนจากแกนสมดุลและจากการที่

$$\sum F_x(t) = M_p \ddot{x}(t)$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$(H_L(t) - H_R(t)) - M_p l \ddot{\theta}_p(t) \cos \theta_p(t) + M_p l \dot{\theta}_p^2(t) \sin \theta_p(t) = M_p \ddot{x}(t) \quad (2.1.23)$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$(H_L(t) - H_R(t)) = M_p \ddot{x}(t) + M_p l \ddot{\theta}_p(t) \cos \theta_p(t) - M_p l \dot{\theta}_p^2(t) \sin \theta_p(t) \quad (2.1.24)$$

และผลรวมแรงในแนวตั้งฉากของก้านเพนดูลัม สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.1.25) เมื่อ  $P_L, P_R$  คือแรงปฏิกิริยาระหว่างล้อและหุ่นยนต์ในแนวตั้ง โดยคิดจาก

$$\sum F_{xp}(t) = M_p \ddot{x}(t) \cos \theta_p(t)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$(H_L(t) + H_R(t))\cos\theta_p(t) + (P_L(t) + P_R(t))\sin\theta_p(t) - M_p g \sin\theta_p(t) - M_p l \ddot{\theta}_p(t) = M_p \dot{x}(t) \cos\theta_p(t) \quad (2.1.25)$$

ซึ่งผลรวมของโมเมนต์ที่จุดศูนย์กลางมวลของก้านเพนดูลัมคือ  $\sum M_o(t) = I\alpha(t)$  ฉะนั้นจะได้ว่า

$$-(H_L(t) + H_R(t))l\cos\theta_p(t) - (P_L(t) + P_R(t))l\sin\theta_p(t) - (C_L(t) + C_R(t)) = I_p \ddot{\theta}_p(t) \quad (2.1.26)$$

จากสมการที่ (2.1.15) แรงบิดจากมอเตอร์ที่ใช้ควบคุมสมดุขของก้านเพนดูลัม เมื่อผ่านการแปลงเชิงเส้น (Linear map) จะได้สมการดังนี้

$$(C_L(t) + C_R(t)) = \frac{-2k_m k_e \dot{x}(t)}{R} + \frac{2k_m}{R} V_a(t) \quad (2.1.27)$$

ซึ่งสามารถแทนค่าในสมการ (2.1.26) ได้ดังนี้

$$-(H_L(t) + H_R(t))l\cos\theta_p(t) - (P_L(t) + P_R(t))l\sin\theta_p(t) - \left( \frac{-2k_m k_e \dot{x}(t)}{R} + \frac{2k_m}{R} V_a(t) \right) = I_p \ddot{\theta}_p(t)$$

ดังนั้น

$$-(H_L(t) + H_R(t))l\cos\theta_p(t) - (P_L(t) + P_R(t))l\sin\theta_p(t) = I_p \ddot{\theta}_p(t) - \left( \frac{2k_m k_e}{R} \dot{x}(t) \right) + \left( \frac{2k_m}{R} V_a(t) \right) \quad (2.1.28)$$

คูณสมการที่ (2.1.25) ด้วย  $-l$

$$-(H_L(t) + H_R(t))l\cos\theta_p(t) - (P_L(t) + P_R(t))l\sin\theta_p(t) + M_p g l \sin\theta_p(t) - M_p l^2 \ddot{\theta}_p(t) = -M_p l \dot{x}(t) \cos\theta_p(t) \quad (2.1.29)$$

แทนค่าในสมการที่ (2.1.28) ในสมการที่ (2.1.29)

$$I_p \ddot{\theta}_p(t) - \frac{2k_m k_e}{R} \dot{x}(t) + \frac{2k_m}{R} V_a(t) + M_p l^2 \ddot{\theta}_p(t) + M_p g l \sin\theta_p(t) = -M_p l \dot{x}(t) \cos\theta_p(t) \quad (2.1.30)$$

เพื่อกำจัด  $(H_R(t) + H_L(t))$  จากสมการของมอเตอร์แทนสมการที่ (2.1.24) ในสมการที่ (2.1.22) จะได้

$$2\left(M_w + \frac{I_w}{r^2}\right)\ddot{x}(t) = \frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) + \frac{2k_m}{Rr} V_a(t) - M_p \ddot{x}(t) - M_p l \ddot{\theta}_p(t) \cos\theta_p(t) + M_p l \ddot{\theta}_p(t) \sin\theta_p(t) \quad (2.1.31)$$

จัดรูปสมการที่ (2.1.30) และ (2.1.31) จะได้สมการการเคลื่อนที่ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของระบบดังนี้

$$(I_p + M_p l^2) \ddot{\theta}_p(t) - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x}(t) + \frac{2k_m}{R} V_a(t) - M_p g l \sin\theta_p(t) = -M_p l \dot{x}(t) \cos\theta_p(t) \quad (2.1.32)$$

$$\frac{2k_m}{Rr} V_a(t) = \left( 2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right) \ddot{x}(t) + \frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x}(t) + M_p l \ddot{\theta}_p(t) \cos\theta_p(t) - M_p l \ddot{\theta}_p(t) \sin\theta_p(t) \quad (2.1.33)$$

จากสมการที่ (2.1.31) และสมการ (2.1.32) ข้างต้น สามารถทำการประมาณเชิงเส้น (Linearisation)

เพื่อให้ได้แบบจำลองปริภูมิสเทตเชิงเส้น เมื่อเราพิจารณา  $\theta_p = \pi + \phi$  โดย  $\phi$  นั้นคือมุมขนาดเล็กที่เบี่ยงเบนออกจากแนวตั้งฉาก ทำให้เราสามารถประมาณได้ว่า

$$\cos\theta_p(t) \cong -1, \sin\theta_p(t) \cong \left( \frac{d\theta_p(t)}{dt} \right)^2 \cong 0$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ซึ่งได้จากการประมาณเชิงเส้น อธิบายได้โดย

$$(I_p + M_p l^2) \ddot{\phi}(t) - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x}(t) + \frac{2k_m}{R} V_a(t) - M_p g l \phi(t) = M_p l \dot{x}(t) \quad (2.1.34)$$

จัดรูปสมการที่ (2.1.34) ให้อยู่ในรูปของตัวแปรสเทตจะได้สมการดังนี้

$$\ddot{\phi}(t) = \frac{M_p l}{(I_p + M_p l^2)} \dot{x}(t) + \frac{2k_m k_e}{Rr (I_p + M_p l^2)} \dot{x}(t) - \frac{2k_m}{R (I_p + M_p l^2)} V_a(t) + \frac{M_p g l}{(I_p + M_p l^2)} \phi(t) \quad (2.1.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\dot{x}(t) = \frac{2k_m}{Rr \left( 2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} V_a(t) - \frac{2k_m k_e}{Rr \left( 2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} \dot{x}(t) + \frac{M_p l}{\left( 2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} \ddot{\theta}^-(t) \tag{2.1.36}$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.1.35) ในสมการที่ (2.1.34) และสมการที่ (2.1.36) ในสมการที่ (2.1.33) และจัดรูปสมการจะได้สมการปริภูมิสเททของระบบดังนี้เมื่อกำหนดให้

$$\alpha = \left[ I_p \beta + 2M_p l^2 \left( M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \right] \quad \beta = \left( 2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)$$

จากแบบจำลองปริภูมิสเททข้างต้นโดยในปริภูมิอินพุตนี้เราสมมติให้ล้อของหุ่นยนต์สัมผัสกับพื้นตลอดเวลา และสมมติให้ไม่มีการเลื่อนไถลของล้อ อีกทั้งสมมติว่าไม่มีแรงเสียดทานเชิงมุมของล้อ

## 2.2 หลักการทำงานของเซนเซอร์

### 2.2.1 เซนเซอร์วัดความเร่ง

เซนเซอร์วัดความเร่งชนิดสองแกนนี้ใช้วัดความเร่งที่เกิดจากแรงภายนอกมากระทำ นอกจากนี้ยังสามารถนำมาประยุกต์เพื่อหาเวกเตอร์ทิศทางของความเร่ง วัดความโน้มเอียง และความสั่นสะเทือน จากความสามารถที่หลากหลายดังกล่าวจึงนำมาประยุกต์เพื่อใช้หามุมที่เปลี่ยนแปลงได้

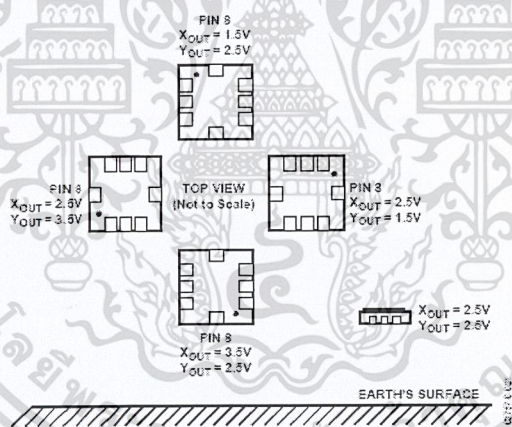
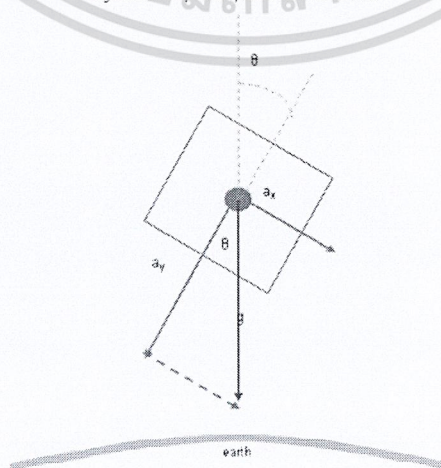


Figure 21. Output Response vs. Orientation



### รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงทิศการวัดความเร่งของเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์วัดความเร่งที่เลือกใช้เลือกใช้เซนเซอร์ชนิด ADXL 203 ซึ่งสามารถวัดความเร่งได้สองแกน ให้สัญญาณเอาต์พุตเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยเราจะสามารถทราบมุมมองสามมิติได้โดยสมการง่าย ๆ ของการแตกมุมมอง หรือตรีโกณธรรมค่านั้นเอง โดยเราสามารถทราบมุม  $\theta$  ได้จากสมการตรีโกณดังนี้

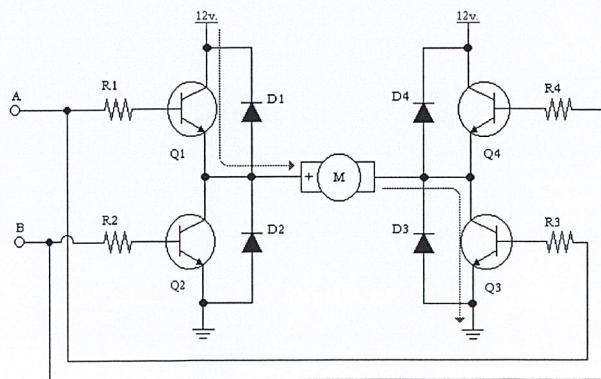
$$\theta = \arctan(a_x / a_y) \quad (2.2.1)$$

## 2.3 หลักการทำงานของมอเตอร์

ในโครงงานระบบควบคุมหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมนั้น ได้ทำการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อนตัวหุ่นยนต์ เพื่อรักษาภาพสมดุลไว้ ซึ่งการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีการควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ มอเตอร์กระแสตรงเป็นเครื่องกลทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลผ่านทางแกนหมุนหรือเพลลา มอเตอร์สามารถที่จะหมุนได้เนื่องจากมีสนามแม่เหล็ก 2 แหล่งกระทำต่อกัน โดยที่สนามแม่เหล็กทั้ง 2 แหล่ง อาจจะเป็นแบบที่ได้จากการจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวดสเตเตอร์ (Stator Winding) และขดลวดสเตเตอร์ และใช้การผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ เนื่องจากลดความสูญเสียได้เพราะไม่มีขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Winding) ทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น นอกจากนี้มอเตอร์กระแสตรงยังมีขนาดเล็ก และราคาถูกสนามแม่เหล็กเกิดจากสนามแม่เหล็กถาวร เกิดจากการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในขดลวดอาร์เมเจอร์ จะทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่โรเตอร์ ซึ่งจะทำให้เกิดการหมุนได้นั่นเอง

### 2.3.1 การควบคุมทิศทางของมอเตอร์กระแสตรง

การควบคุมทิศการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงสามารถทำได้ โดยการควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการกลับขั้วไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขั้วมอเตอร์โดยการควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้านั้น ส่วนใหญ่แล้วจะใช้วิธีการต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เรียกว่า วงจรเอชบริดจ์ (H-bridge) เข้ากับมอเตอร์ดังรูป



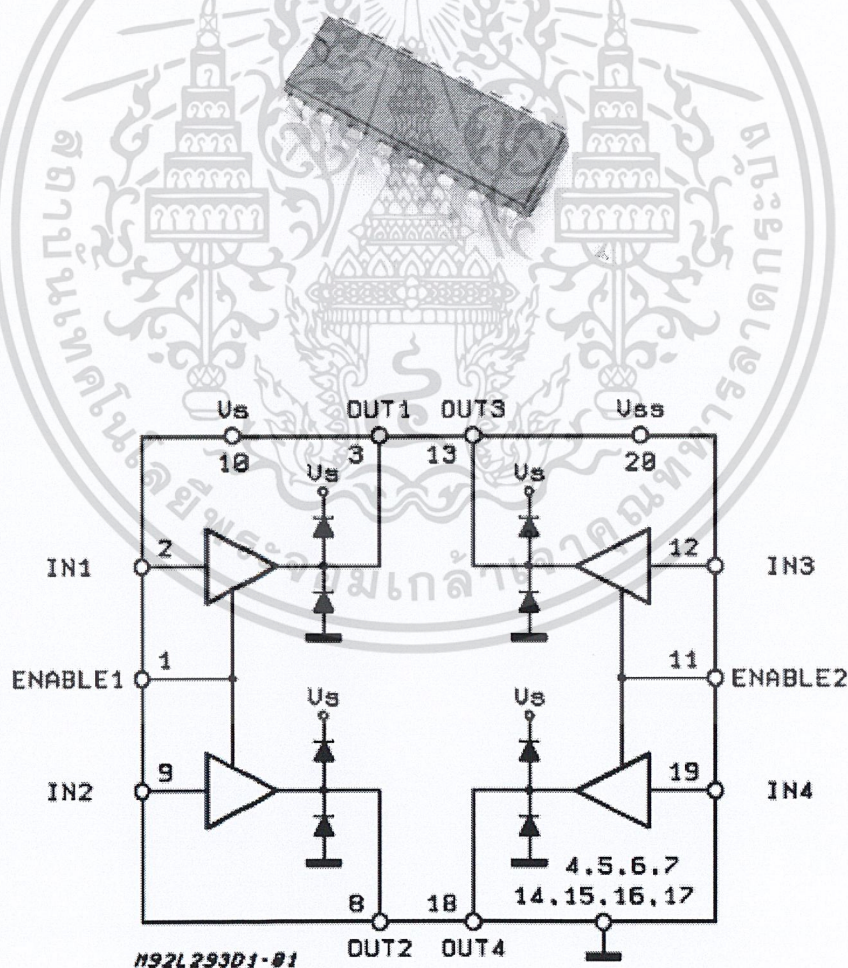
รูปที่ 2.5 วงจรเอชบริดจ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจรเอชบริดจ์ คือเมื่อจ่ายไฟที่จุด A จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q1 และ Q3 ทำงานส่งผลให้มีกระแสไหลจากแหล่งจ่าย ผ่านขาคอลเล็กเตอร์ (Collector) และอิมิตเตอร์ (Emitter) ของ Q1 ผ่านเข้าสู่ขั้วบวก (+) ของมอเตอร์ ผ่านไปยังขาคอลเล็กเตอร์ และ อิมิตเตอร์ ของ Q3 ทำให้มีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ในทิศทางบวก และครบวงจร จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุน ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ในขณะเดียวกันหากจ่ายไฟที่จุด B จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q4 ทำงานส่งผลให้มีกระแสไหล จากแหล่งจ่ายผ่านขาคอลเล็กเตอร์ และอิมิตเตอร์ ของ Q4 ผ่านเข้าสู่ขั้วลบ (-) ของมอเตอร์ ผ่านไปยังขาคอลเล็กเตอร์ และ อิมิตเตอร์ ของ Q2 ทำให้มีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ในทิศทางบวก และครบวงจร จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุน ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาได้

สำหรับโครงการชิ้นนี้เลือกวงจรขับมอเตอร์เป็นไอซีขับมอเตอร์สำเร็จรูปเบอร์ L293D ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกับวงจรเอชบริดจ์ทุกประการ



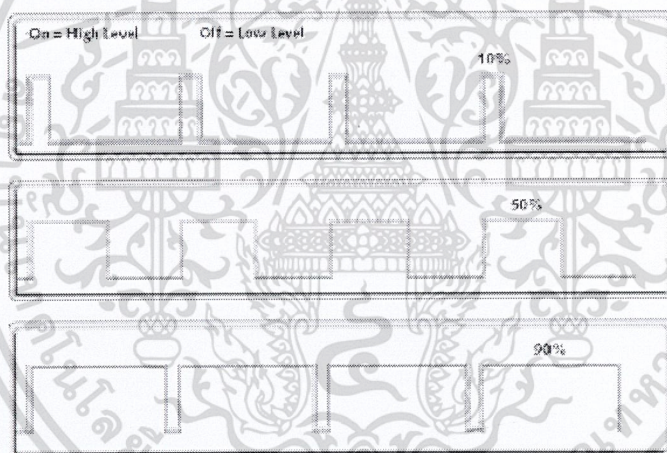
รูปที่ 2.6 ไอซี L293D และแผนภาพลักษณะการทำงานภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 หลักการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง

เนื่องจากส่วนของขดลวดสเตเตอร์ เป็นแม่เหล็กถาวร การควบคุมความเร็วจึงทำได้โดยการเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ที่ขดลวดอาเมเจอร์ ซึ่งค่าความต่างศักย์นี้จะแปรผันตรงกับความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ โดยวิธีที่จะเปลี่ยนระดับความต่างศักย์ไฟฟ้า จะใช้คลื่นรูปสี่เหลี่ยมที่สามารถเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาในการเปิดและปิดแหล่งจ่ายได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยเราจะเรียกสัญญาณนี้ว่า สัญญาณพัลส์วidth มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation)

ซึ่งในโครงการนี้ได้ใช้สัญญาณพัลส์วidth มอดูเลชันจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวป้อนค่าให้กับขา ENABLE ของไอซี L293D ทำให้มอเตอร์นั้นสามารถวิ่งด้วยความต่างศักย์คงที่ ซึ่งในโรงงานนี้คือ 12V แต่วิ่งด้วยความเร็วต่างๆกันออกไปโดยการปรับความกว้างของพัลส์ หรือที่เรียกว่าค่าดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) เมื่อความกว้างของพัลส์มีค่ามากจะทำให้ค่าเฉลี่ยของแรงดันมีค่ามากหรือทำให้มอเตอร์หมุนเร็ว ในขณะที่เดียวกันถ้าหากว่าความกว้างของพัลส์มีค่าน้อย ก็จะทำให้ค่าเฉลี่ยของแรงดันมีค่าน้อยหรือทำให้มอเตอร์หมุนได้ช้า



รูปที่ 2.7 ลักษณะของสัญญาณพัลส์วidth มอดูเลชัน ในลักษณะการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลที่ต่างกัน

## 2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในโครงการนี้เลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด 16F877A ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติต่างๆของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A สามารถสรุปอย่างคร่าวๆ ได้ดังนี้

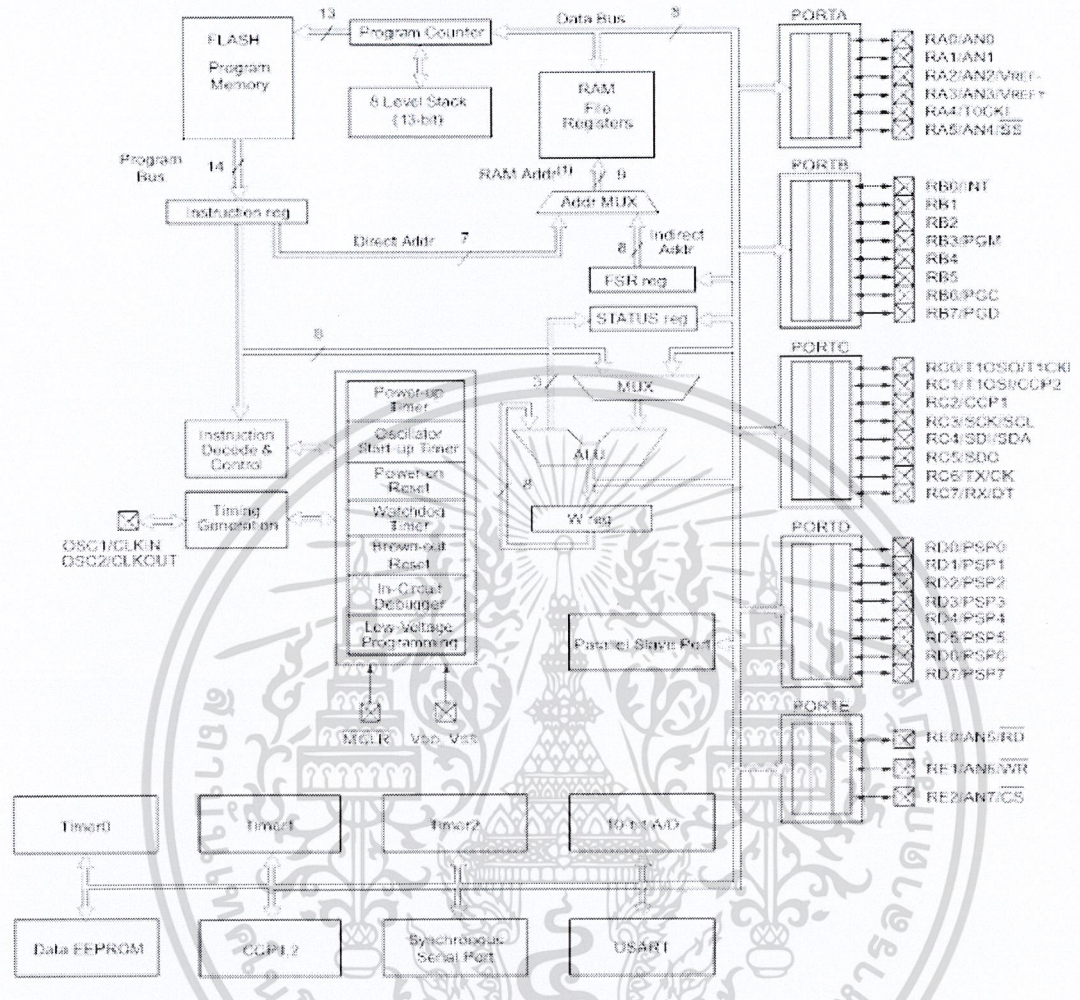
### 2.4.1 คุณสมบัติต่างๆของไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ 16F877A

- 35 Instructor คำสั่ง
- ในการปฏิบัติงานคำสั่งต่างๆจะใช้ Cycle เดียวและ 2 Cycle สำหรับคำสั่งที่กระโดด
- ความถี่สูงสุดที่ทำงานได้คือ 20MHz
- การทำงานจะเป็นลักษณะ Pipeline ทำให้มีทำงานที่เร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

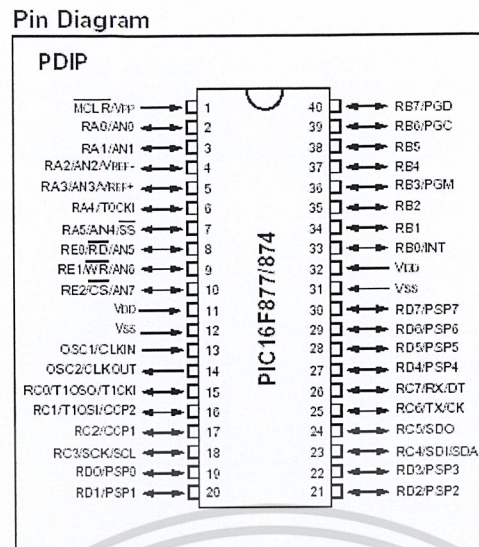
- หน่วยความจำโปรแกรม Flash Program Memory มีขนาด 8k (14 bits Words)
- หน่วยความจำข้อมูล (RAM) 368 Bytes
- หน่วยความจำข้อมูล (EEPROM) 256 Bytes
- สามารถตอบสนองการอินเทอร์รัพท์ได้ถึง 14 แหล่ง
- STACK 8 ระดับ
- เพาเวอร์อนรีเซต(POR), เพาเวอร์อัป ไทเมอร์(PWRT) และ Oscillator Start-up Timer
- Watchdog Timer
- สามารถเลือกการป้องกันข้อมูลได้ (Code Protection)
- โหมดประหยัดพลังงาน (Sleep Mode)
- เลือกโหมดของสัญญาณนาฬิกาได้หลายโหมด
- สามารถโปรแกรมโดยใช้แรงดัน +5V ได้
- ฟังก์ชันการโปรแกรมแบบ ICSP (In-Circuit Serial Programming)
- ทำงานที่ไฟเลี้ยง 2.0V ถึง 5.5V
- กระแสที่ซิงค์และซอร์สของพอร์ตคือ 25mA
- Timer/Counter จำนวน 3 ตัว คือ Timer0 , Timer1 และ Timer2
- โมดูล Capture/Compare/PWM จำนวน 2 ชุด
- Analog to Digital converter ความละเอียด 10 บิต 8 แชนแนล ในตัว
- มีโมดูลการสื่อสาร USART
- มีโมดูลตรวจจับระดับแรงดันไฟเลี้ยง Brown – Out reset (BOR)
- มีพอร์ต I/O 5 พอร์ต ประกอบไปด้วย A,B,C,D และ E แต่ละพอร์ตจะมีจำนวนบิตไม่เท่ากัน ซึ่งทั้งหมดรวมกันแล้วจะมี I/O จำนวน 33 บิต ดังนี้
  - Port A = RA5 – RA0 จำนวน 6 บิต
  - Port B = RB7 – RB0 จำนวน 8 บิต
  - Port C = RC7 – RC0 จำนวน 8 บิต
  - Port D = RD7 – RD0 จำนวน 8 บิต

| Device    | Program FLASH | Data Memory | Data EEPROM |
|-----------|---------------|-------------|-------------|
| PIC16F874 | 4K            | 192 Bytes   | 128 Bytes   |
| PIC16F877 | 8K            | 368 Bytes   | 256 Bytes   |



รูปที่ 2.8 แสดงสถาปัตยกรรมภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC16F877A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงตัวถังของ CPU PIC16F877A และการจัดวางตำแหน่งขาสัญญาณต่างๆ

ขาสัญญาณของ PIC16F877A นี้จะมีทั้งหมด 40 ขา ประกอบไปด้วยขาที่ทำหน้าที่ต่างๆ โดยจะมีขาสัญญาณ I/O Port ทั้งหมดจำนวน 33 ขา โดยสามารถนำไปเป็น อินพุต/เอาต์พุตได้หมดทุกขา ยกเว้นขา RA4 ซึ่งโครงสร้างภายในเป็นแบบ Open Drain ดังนั้นหากต้องการนำไปใช้เป็นขาสัญญาณเอาต์พุตจะต้องต่อตัวต้านทานพูลอัพ (Pull-up) ไว้ด้วย ส่วนขาที่เหลือสามารถใช้งานได้ตามปกติ นอกจากขาสัญญาณ I/O แล้ว ยังประกอบไปด้วยขาสัญญาณอื่นๆ อีกคือ ขาไฟเลี้ยง, กราวด์, ขารีเซ็ต และ ขาออสซิลเลเตอร์

## 2.5 การชดเชยระบบควบคุมด้วยตัวชดเชยชนิด PID

ตัวชดเชยที่ดีนั้น จะต้องมีคุณสมบัติในการชดเชยทั้งในตอนที่ระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (มีเสถียรภาพ, มีค่าผิดพลาดที่สถานะคงตัวน้อยมาก หรือไม่มีเลย) และมีคุณสมบัติในการชดเชยในตอนที่ระบบอยู่ในสภาวะชั่วคราว (มีความเร็วในการตอบสนอง, มีผลตอบสนองที่พอดี (Overshoot ต่ำ)) ซึ่งระบบควบคุมชนิด P, I, D นี้จะมีคุณสมบัติของตนเองต่างกันออกไปตามชนิด ซึ่งในโครงการนี้จำเป็นต้องใช้ตัวชดเชยของระบบชนิด PID เข้ามาช่วยในการทรงตัวของหุ่นยนต์ เพราะว่า ดังนั้นในรายงานนี้จะสรุปคุณสมบัติและข้อดีข้อเสียของตัวชดเชยชนิด PID ไว้ดังนี้

### 2.5.1 Proportional Mode of control (P – control)

ตัวชดเชยชนิด P – control นี้มีข้อดีคือลดเวลาที่จะใช้ในการเข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ หรือก็คือทำให้มีผลตอบสนองของระบบที่ไวขึ้น แต่ว่าทั้งนี้จะทำให้เกิด Overshoot ที่มากขึ้นตามไปด้วย

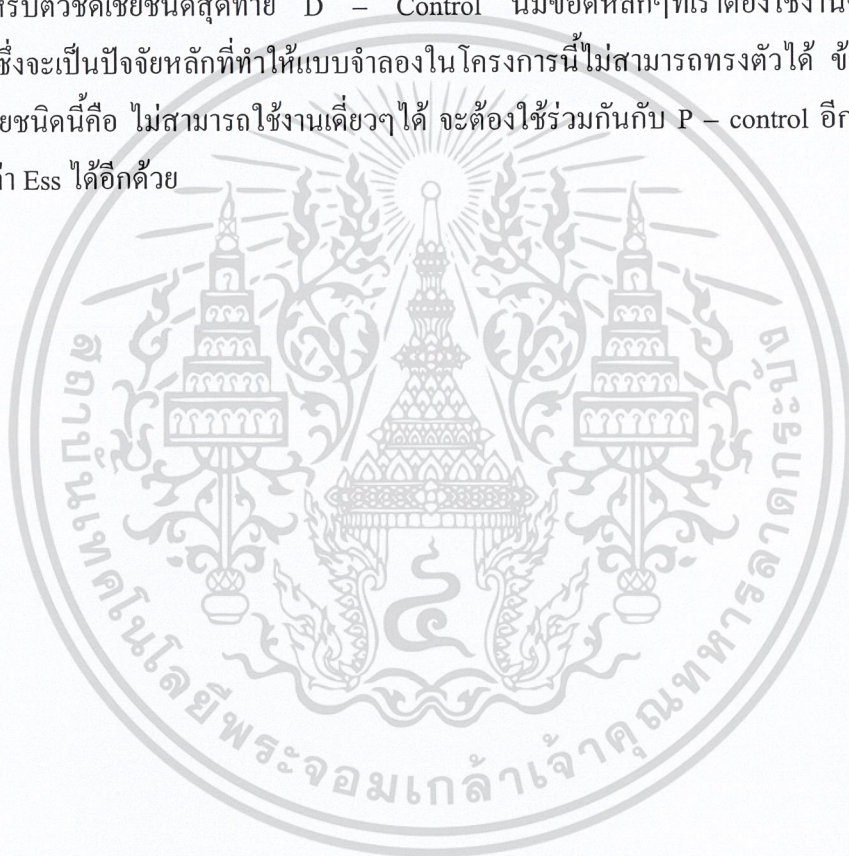
นอกจากนี้หากว่าค่าผิดพลาดของระบบ (Ess – Steady state error) มีไม่มากเกินไป เรายังมาสามารถใช้ตัวควบคุมชนิด P นี้เพิ่มเกินเพื่อปรับค่า o/p ให้ Ess มีค่าลดน้อยลง หรือไม่มีเลย

### 2.5.2 Integral Mode of control ( I – control )

สำหรับตัวควบคุมชนิด I – control นี้มีข้อดีคือการขจัดค่า Ess โดยไม่มีผลกระทบต่อโดยไม่กระทบต่อผลตอบสนองในช่วงสภาวะชั่วคราว (Transient Response) แต่ว่าข้อเสียคือ ไม่สามารถใช้งานเดี่ยวๆได้จะต้องใช้งานร่วมกับกับ P – control อีกข้อเสียหนึ่งที่เกิดปัญหาคือ ไม่สามารถลดค่า Overshoot ได้ และถ้าหากปรับเกินไม่ดีก็จะทำให้ผลตอบสนองของระบบแกว่งอีกด้วย

### 2.5.3 Derivative Mode of control ( D – control )

สำหรับตัวควบคุมชนิดสุดท้าย D – Control นี้มีข้อดีหลักๆที่เราต้องใช้งานคือการลด Overshoot ซึ่งจะเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้แบบจำลองในโครงการนี้ไม่สามารถทรงตัวได้ ข้อเสียหนึ่งของตัวควบคุมนี้คือ ไม่สามารถใช้งานเดี่ยวๆได้ จะต้องใช้ร่วมกับกับ P – control อีกทั้ง ยังไม่สามารถลดค่า Ess ได้อีกด้วย



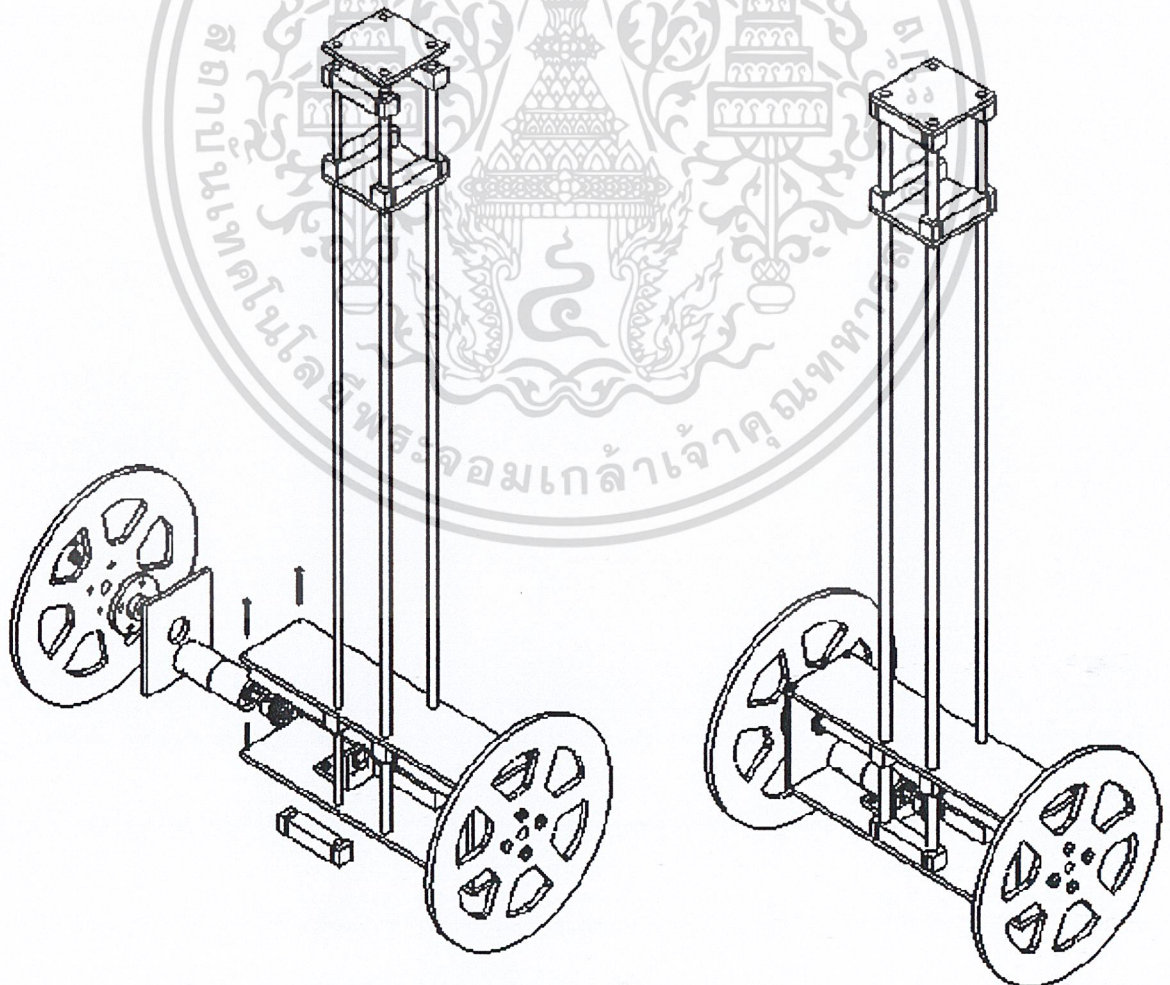
บทที่ 3

การออกแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบส่วนต่างๆของโครงการระบบควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัมซึ่งแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อใหญ่คือ การออกแบบโครงสร้างทางกลศาสตร์ การออกแบบทางวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และการออกแบบในส่วนของโปรแกรมควบคุมภายในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

3.1 การออกแบบโครงสร้างทางกลศาสตร์ (Mechanic Design)

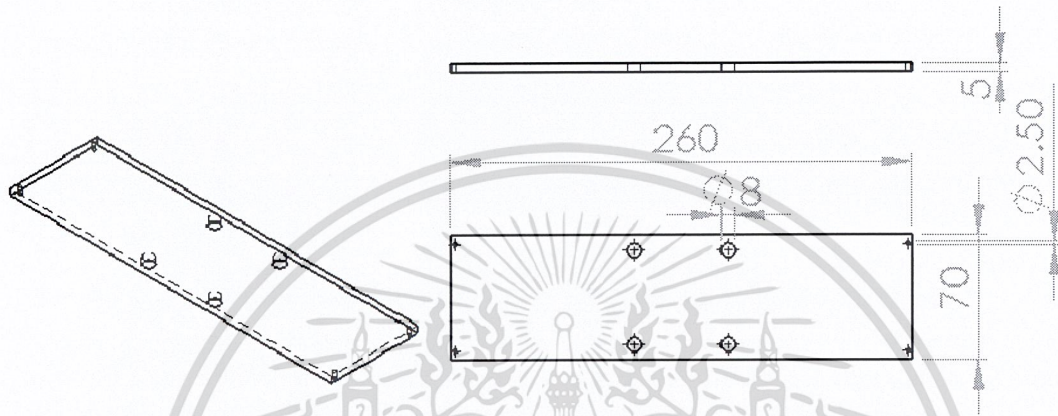
ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม โดยจากรูปที่ 3.1 ได้แสดงถึงโครงสร้างของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมที่ออกแบบขึ้นส่วนต่างๆและประกอบเสร็จสมบูรณ์แล้วด้วยโปรแกรม SolidWorks



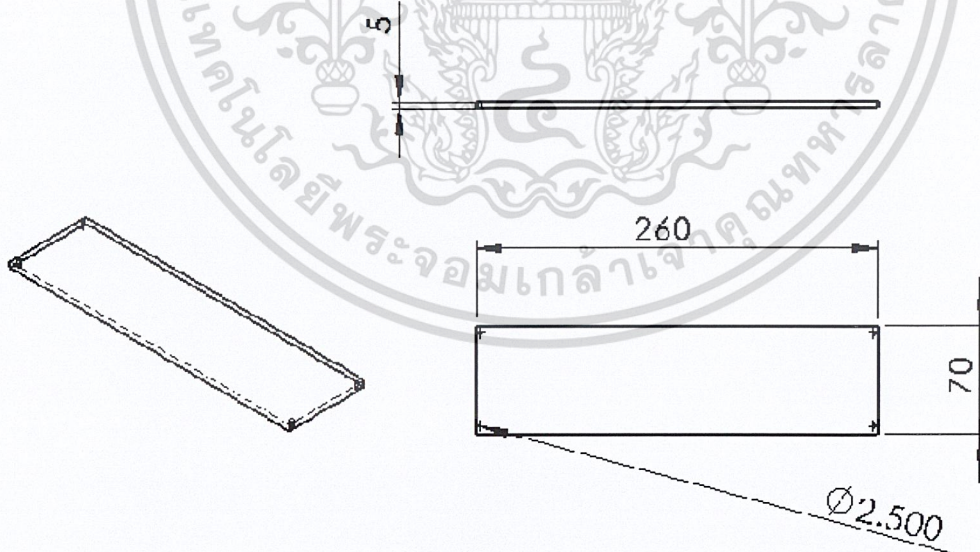
รูปที่ 3.1 โครงสร้างหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

### 3.1.1 การออกแบบฐานของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

ส่วนฐานของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมประกอบด้วยแผ่นอะคริลิก ความกว้าง 70 มิลลิเมตร ยาว 260 มิลลิเมตรหนา 5 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำให้ง่ายต่อการติดตั้ง และมีน้ำหนักเบาเพราะทำจากแผ่นอะคริลิก จากการออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks ฐานของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมทั้งสอง มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ฐานด้านบนของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

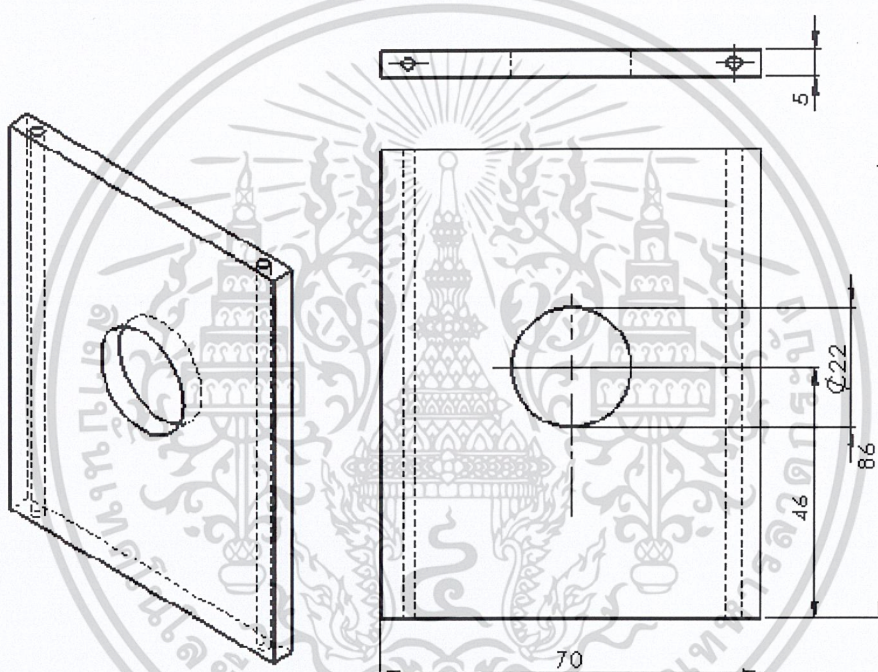


รูปที่ 3.3 ฐานด้านล่างของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 ฐานด้านข้างของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

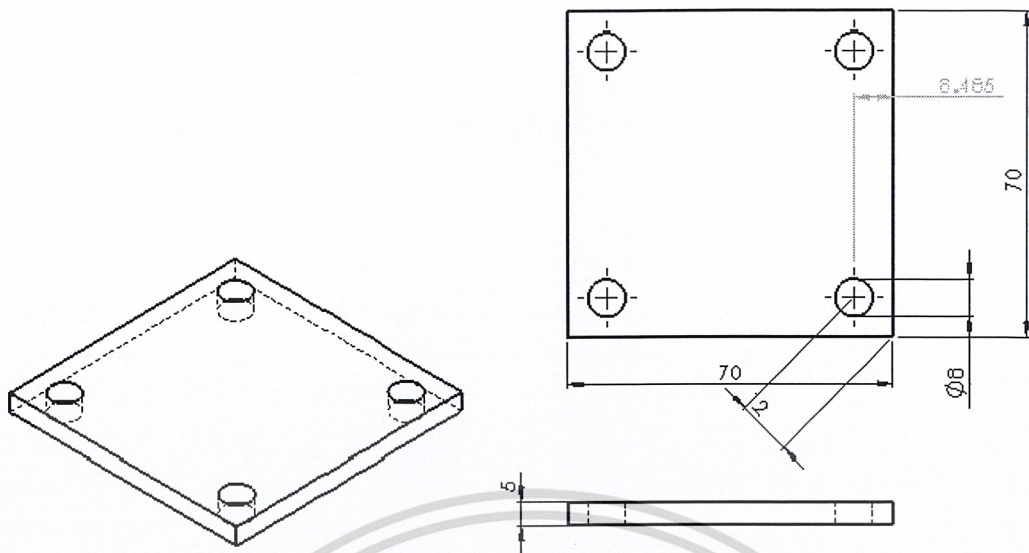
ชิ้นส่วนนี้ได้ออกแบบมาให้อยู่ระหว่าง ส่วนของฐานด้านบนและด้านล่างของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม โดยขนาดของส่วนฐานด้านข้างต้องมีขนาดใหญ่พอสำหรับติดตั้งมอเตอร์ระหว่างฐานด้านบน และด้านล่างได้ โดยออกแบบให้มีขนาดความกว้าง 70 มิลลิเมตร ยาว 86 มิลลิเมตร เจาะรูความกว้างรัศมีเท่ากับ 11 มิลลิเมตร สำหรับติดลูกปืน และรัศมี 1.5 มิลลิเมตร ด้านข้างสำหรับยึดตัวมอเตอร์ และด้านบนสำหรับยึดฐานด้านบน และด้านล่างให้ยึดกับฐานด้านข้าง โดยฐานด้านข้างของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมมีทั้งหมด 2 ชิ้น คือ ชิ้นด้านซ้าย และ ด้านขวา ซึ่งมีลักษณะเหมือนกัน ทำด้วยแผ่นอะคริลิก หนา 5 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ฐานด้านข้างของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

### 3.1.3 การออกแบบฐานของตุ้มถ่วงบนก้านเพนดูลัม

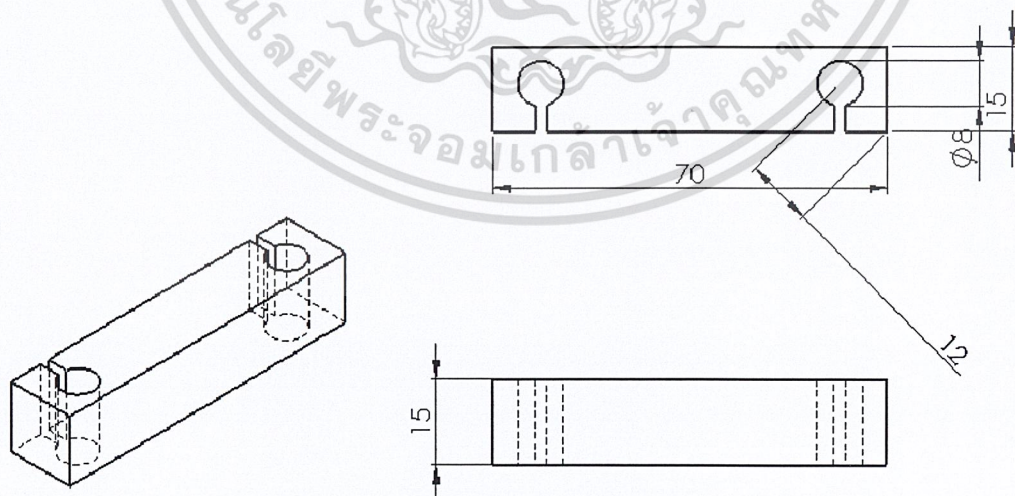
จากการออกแบบให้มีตุ้มถ่วงน้ำหนักอยู่บนก้านเพนดูลัม อีกทั้งให้ก้านเพนดูลัมทำด้วยแท่งอะลูมิเนียมสำเร็จรูปจำนวน 4 แท่ง ทำให้ต้องออกแบบฐานของตุ้มน้ำหนักที่รองรับกับแท่งอะลูมิเนียม จึงออกแบบให้ฐานของตุ้มถ่วงน้ำหนักมีขนาดกว้าง 70 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร และมีช่องสำหรับแท่งอะลูมิเนียมทั้ง 4 แท่ง ตัวฐานทำด้วยแผ่นอะคริลิก หนา 5 มิลลิเมตร ที่มีความแข็งแรงสำหรับรองรับน้ำหนักของแบตเตอรี่ โดยฐานของตุ้มน้ำหนักบนก้านเพนดูลัม มีลักษณะดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ฐานของตุ้มถ่วงน้ำหนักบนก้านเพนดูลัม

#### 3.1.4 ตัวยึดก้านเพนดูลัม

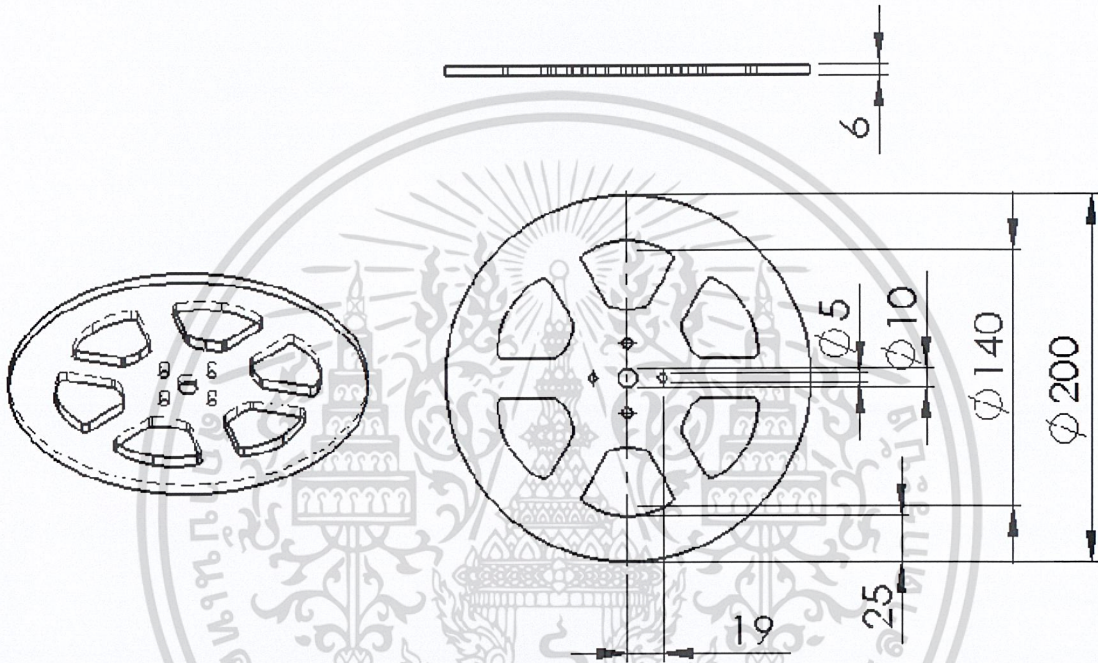
เนื่องจากก้านเพนดูลัมเป็นแท่งอะลูมิเนียม ตัวยึดนี้ออกแบบมาเพื่อยึดแท่งอะลูมิเนียมเข้ากับฐานของหุ่นยนต์ และฐานของตุ้มถ่วงน้ำหนัก ตัวยึดจึงต้องมีความแข็งแรงพอสมควร ดังนั้นจึงออกแบบให้ตัวยึดมีความกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 70 มิลลิเมตร และหนาเท่ากับ 15 มิลลิเมตร เจาะรูที่ปลายทั้งสองด้านสำหรับใส่แท่งอะลูมิเนียม ในโครงงานหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมมีตัวยึดบนก้านเพนดูลัมทั้งหมด 6 ตัว มีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวยึดบนก้านเพนดูลัม

### 3.1.5 การออกแบบล้อยของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

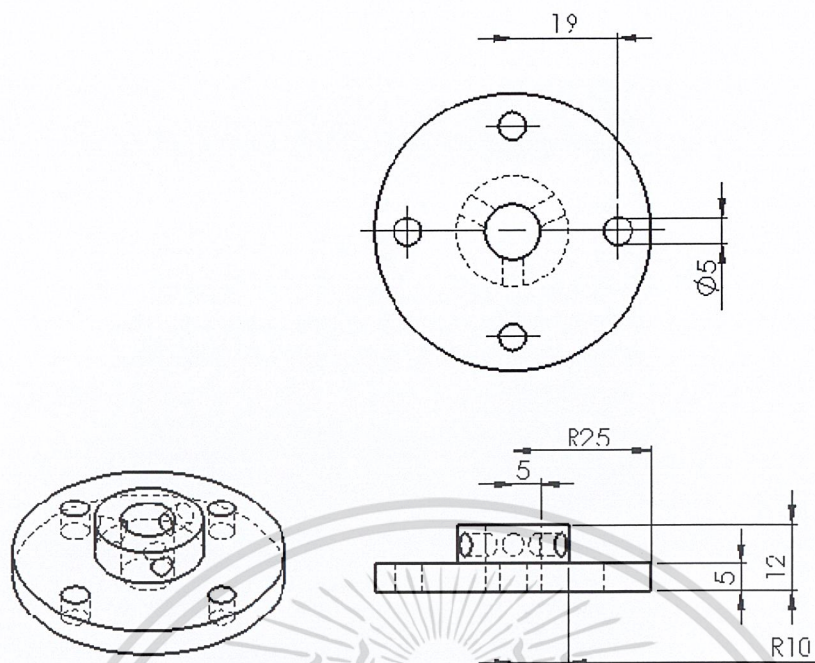
ล้อยของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมนี้ มีส่วนสำคัญต่อความยากง่ายของการควบคุมสมดุลของหุ่นยนต์เพนดูลัม โดยในโครงการงานระบบควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัมนี้ ได้มีการทดลองใช้ล้อยที่มีรัศมีความกว้างที่ต่างกัน พบว่าล้อยที่มีรัศมีกว้างทำให้การควบคุมสมดุลทำได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าล้อยมีรัศมีที่กว้างเกินไปก็จะทำให้ไม่สมดุลกับก้านเพนดูลัมเดิม ดังนั้นหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมนี้ได้ออกแบบล้อยให้มีรัศมีความกว้าง 100 มิลลิเมตร และใช้วัสดุเป็นแผ่นอะคริลิกหนา 6 มิลลิเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ล้อยของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

### 3.1.6 ตัวยึดล้อยของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

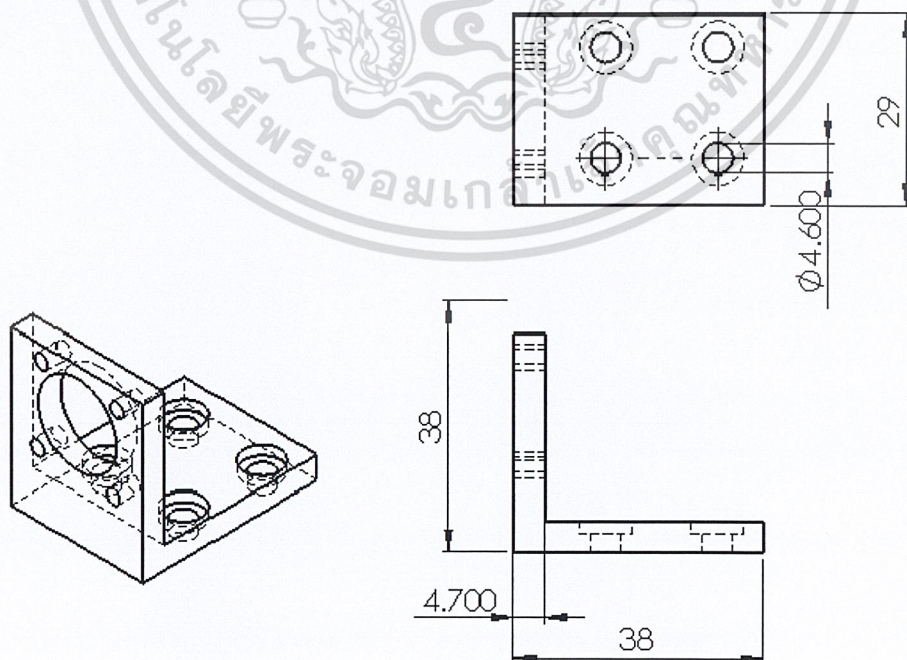
ตัวยึดล้อยของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัมนี้ มีหน้าที่ยึดล้อย เข้ากับมอเตอร์บนตัวของหุ่นยนต์ เนื่องจากชิ้นส่วนนี้ได้รับแรงกระทำโดยตรงจากมอเตอร์ และเนื่องจากต้องการความแข็งแรงจึงนำอะลูมิเนียมมาผลิตเป็นตัวยึดล้อย ทำให้ได้ตัวยึดที่แข็งแรง และมีน้ำหนักเบา โดยตัวยึดล้อยนี้มีลักษณะเป็นจานวงกลมมีรัศมีความกว้างเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร และมีแป้นกลมขนาดรัศมีความกว้าง 10 มิลลิเมตร โดยเจาะรูสำหรับเพลามอเตอร์ขนาดรัศมี 5 มิลลิเมตรพอดีโดยมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ตัวยึดล้อของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

### 3.1.7 ตัวยึดมอเตอร์ของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

เนื่องจากในโครงการนี้ใช้ระบบขับเคลื่อนทั้งสองล้อโดยการใช่มอเตอร์เพียงตัวเดียว ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่เชิงมุมที่เท่ากันในการหมุนแต่ละครั้ง ฉะนั้นจะเห็นได้ในการออกแบบว่า จะต้องออกแบบตัวยึดมอเตอร์ให้ยกสูงขึ้นมาจากฐานของหุ่นอินเวอร์ทเพนดูลัม เพื่อให้เฟืองสองตัวสามารถขบกันได้พอดีในตำแหน่งกึ่งกลางความสูงของฐานหุ่น



รูปที่ 3.9 ตัวยึดมอเตอร์ของหุ่นยนต์อินเวอร์ทเพนดูลัม

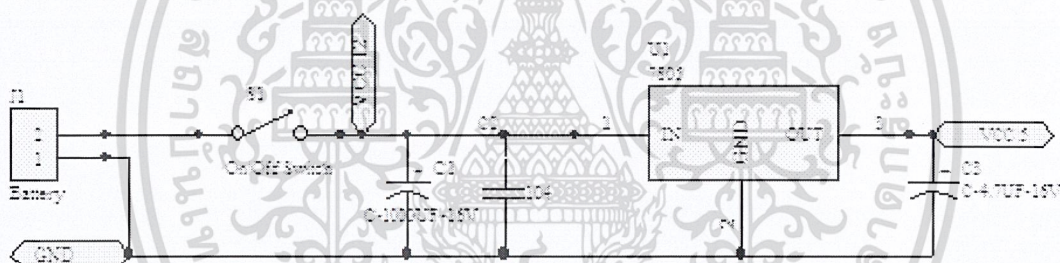
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบวงจร

ในโครงงานนี้ ได้ทำการออกแบบวงจรย่อยต่างๆมากมายอาทิเช่น วงจรแปลงไฟ วงจรรองรับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขับมอเตอร์ แต่ทั้งนี้ ได้ทำการออกแบบตัวแผ่นลายทองแดงของวงจร (Print Circuit Board) ให้อยู่รวมในแผ่นเดียวกัน โดยจะทำการอธิบายแยกเป็นส่วนๆ และทำการอธิบายรวมอีกครั้งในท้ายหัวข้อ ดังนี้

#### 3.2.1 วงจรแปลงไฟ 12V เป็น 5V

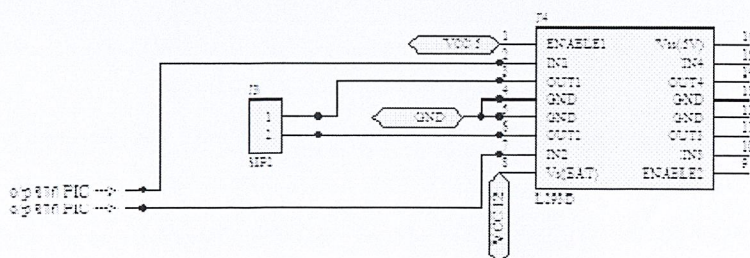
เนื่องจากโครงงานนี้ มอเตอร์ที่ใช้ขับเป็นมอเตอร์ที่ใช้แรงดันไฟ 12V ในการขับ ทำให้เราต้องเลือกใช้แหล่งจ่ายพลังงาน หรือ แบตเตอรี่ให้เพียงพอต่อการขับมอเตอร์ แต่ถ้าว่าวงจรส่วนอื่นๆ อาทิเช่น วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรเซ็นเซอร์ ฯลฯ ต้องใช้ไฟเลี้ยงไอซีต่างๆไม่เกินแรงดัน 5V ดังนั้น เพื่อให้เกิดการประหยัด และไม่เป็นการเปลืองพื้นที่ จึงเลือกใช้แบตเตอรี่ 12V แล้วนำไฟนั้นส่วนหนึ่งไปขับมอเตอร์ อีกส่วนหนึ่งไปแปลงเป็นไฟฟ้าแรงดัน 5V แล้วจึงนำไฟที่แปลงไปใช้ในวงจร หรือ ไอซีต่างๆ ซึ่งสำหรับโครงงานนี้เลือกใช้ไอซี 7805 เป็นตัวแปลงไฟหลัก โดยสามารถแสดงเป็นแผนภาพวงจรได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรแปลงไฟ 12V เป็น 5V

#### 3.2.2 วงจรขับมอเตอร์ด้วยไอซี L293D

ในโครงงานนี้เลือกที่จะใช้เป็นวงจรขับมอเตอร์ชนิดไอซีสำเร็จรูป แบบ H-bridge เนื่องจากการประหยัดพื้นที่ใช้สอยของตัวโครงงานและทำให้เราไม่ต้องต่อ H-bridge เอง อีกทั้งยังทำให้น่าหนักเบาอีกด้วย โดยสามารถแสดงเป็นแผนภาพ Schematic Diagram ได้ดังรูปที่ 3.11

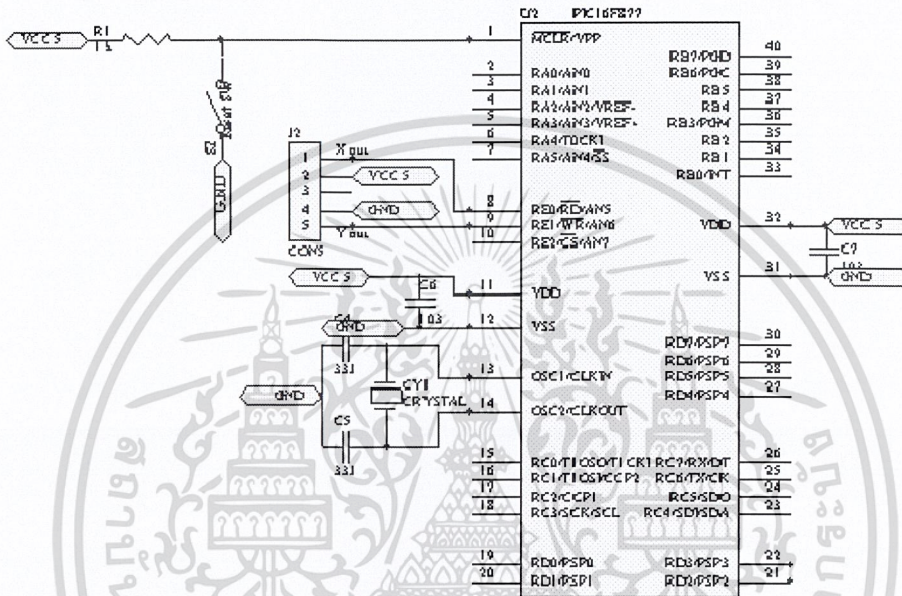


รูปที่ 3.11 วงจรขับมอเตอร์ด้วย L293D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์

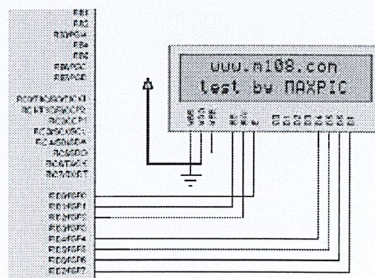
โดยปกติแล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์ไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวมันเองเพียงอย่างเดียว แต่จะต้องมีวงจรอิเล็กทรอนิกส์มารองรับด้วย อาทิเช่น Clock, Switch Reset เป็นต้น ทั้งนี้ยังได้มีการเพิ่มในส่วนของการรับค่าจากเซ็นเซอร์โดยการใช้ Terminal ชนิด 5pin รองรับ และนำเอาค่าที่ได้มาจากเซ็นเซอร์มาเข้าที่ขา RE0 และ RE1 อีกด้วย และซึ่งในโครงงานนี้มีการต่อวงจรรองรับสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรรองรับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

### 3.2.4 วงจรแสดงผลทางหน้าจอ LCD

เพื่อให้การคำนวณค่าต่างๆเป็นไปได้ง่าย อีกทั้งทราบค่าที่ส่งออกมาจาก Duty Cycle และทราบค่า Analog ที่รับเข้ามาจากเซ็นเซอร์ จึงจำเป็นต้องมีหน้าจอ LCD เพื่อแสดงค่า Analog และค่า Duty Cycle ที่ส่งออกมาในขณะนั้น โดยหน้าจอแสดงผล LCD ที่ใช้นี้ ใช้การสื่อสารติดต่อกันชนิด 4 bit โดยทั้งนี้ เราสามารถแสดงวงจรการเชื่อมต่อระหว่างหน้าจอแสดงผล LCD กับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ดังรูปที่ 3.13

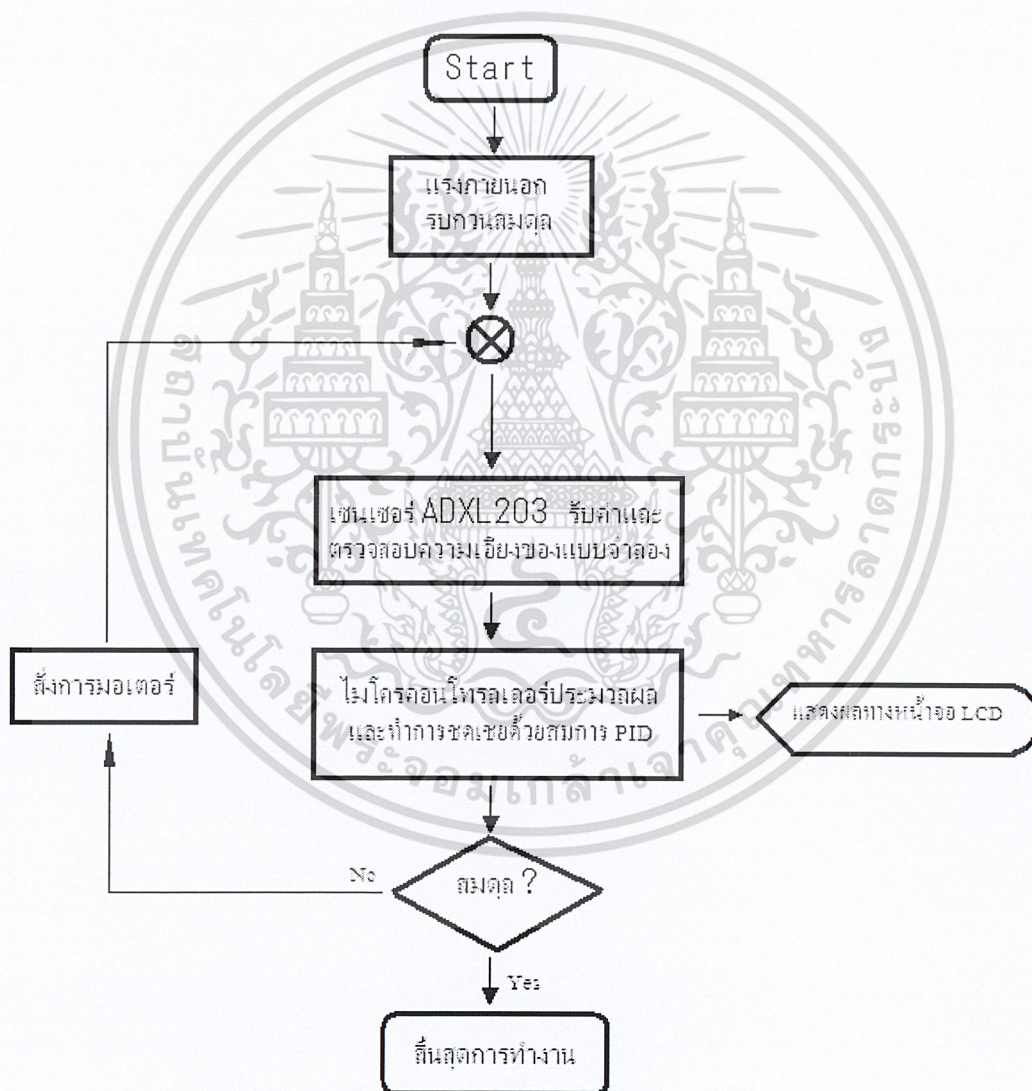


รูปที่ 3.13 แสดงวงจรการเชื่อมต่อกับแผงแสดงผล LCD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์ในการศึกษาเท่านั้น มิใช่ผู้ดูแลเนื้อหาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การออกแบบโปรแกรมการทำงาน

ในโครงการนี้ได้ออกแบบให้โครงการมีหลักการทำงานคือ ให้รับค่าจากเซนเซอร์วัดความเร่ง มาประมวลแปลงค่า A/D จากนั้น นำค่า A/D มาตรวจดูว่า ห่างกับค่า A/D ที่ตำแหน่งสมดุลเท่าไร โดยเรากำหนดให้ผลต่างตัวนั้นคือ Error ถ้า Error มากก็แสดงว่าเอียงมากและจะต้องเร่งให้มอเตอร์นั้นเคลื่อนที่เร็ว ถ้า Error น้อยก็แสดงว่าเอียงน้อย มอเตอร์ก็เคลื่อนที่ช้า แต่ถ้าค่า Error ติดลบย่อมหมายความว่า ตัวแบบจำลองนั้นมีการเอียงไปในอีกทิศทางหนึ่ง ฉะนั้นก็ต้องสั่งให้มอเตอร์หมุนกลับทาง ซึ่งสามารถแสดงแผนภาพการทำงานได้ดังรูป



รูปที่ 3.14 แผนภาพแสดงหลักการทำงานของแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 ส่วนการอ่านค่าจากเซนเซอร์ความเร่ง

การอ่านค่าจากเซนเซอร์วัดความเร่งสามารถทำได้โดยใช้หน่วยแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอลบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ความละเอียด 10 บิต โดยเมื่อเซนเซอร์วัดความเร่งได้เท่ากับ 0 จี สัญญาณเอาต์พุตจะมาเป็น 2.5 V เมื่อแปลงค่าโดยใช้หน่วยแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอลจะมีค่าเท่ากับ 512 หน่วย เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงนำค่า 512 หน่วยไปลบออกจากค่าที่อ่านได้ เพื่อให้ความเร่งที่ 0 จี มีค่าเป็น 0 หน่วย โดยค่าแรงดันจะเปลี่ยนแปลงเป็นค่าบวกหรือลบขึ้นอยู่กับทิศของความเร่ง เราทำการเรียกค่านี้เป็นตัวแปรในโปรแกรมว่า “Err” มาจากคำว่า Error

### 3.3.2 ส่วนการควบคุมสมดุลแบบจำลอง

เป็นส่วนที่ประมวลผลหาสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชั่นที่ใช้กับมอเตอร์ เพื่อรักษาสมดุลของแบบจำลอง โดยการนำค่าอินพุตคือ Err มาคูณกับค่าอัตราขยาย Kp Ki Kd ดังนี้

$$\text{sum} = (\text{Kp} * \text{PTerm}) + (\text{Ki} * \text{ITerm}) + (\text{Kd} * \text{Dterm})$$

โดย sum คือค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชั่น สำหรับควบคุมความเร็วมอเตอร์ มีทั้งค่าเป็นบวก และ ค่าเป็นลบ ซึ่งหมายถึงทิศทางการหมุนของมอเตอร์

### 3.3.3 ส่วนการควบคุมความเร็วและทิศทางของมอเตอร์

การควบคุมมอเตอร์ในโครงการนี้ เราได้ทำการใช้หน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชั่นบนไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้หน่วยสร้างสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชั่นจำนวนหนึ่งชุดสำหรับควบคุมมอเตอร์ คือ PWM1 โดยโปรแกรมให้สร้างสัญญาณพัลส์วิทมอดูเลชั่นความถี่ 6 กิโลเฮิรท์ซ จากนั้นจึงสั่งให้ค่าความกว้างพัลส์หรือคิวตี้ไซเคิลออกมาที่ค่าต่างๆกัน เพื่อควบคุมความเร็ว

สำหรับทิศทางการหมุนของมอเตอร์นั้น ขึ้นอยู่กับค่าของ Err ว่าเป็นบวกหรือเป็นลบ หากเป็นบวกก็ให้โลจิกที่ขา และขา เป็นค่า 1,0 ตามลำดับ ในกรณีที่ เป็นลบก็ให้มีค่าโลจิกที่นิเสธกัน เพื่อให้มอเตอร์ทำการหมุนไปในทิศทางตรงกันข้าม

### 3.3.4 ส่วนการแสดงผลบนหน้าจอแอลซีดี

ในโครงการนี้ต้องการแสดงผลค่าเอาต์พุตต่างๆเพื่อความง่ายในการวิเคราะห์การทำงานจึงทำให้มีการนำเอาจอแอลซีดีมาใช้แสดงผล โดยโปรแกรมนี้นี้จะนำเอาค่า Err และค่า Duty ที่จะนำเอาไปใช้งานนั้น มาแสดงผลผ่านทางจอ LCD ชนิด ของบริษัท

### 3.3.5 การออกแบบตัวชดเชยสำหรับระบบควบคุมชนิด PID

จากการที่เราได้ทราบในทฤษฎีของการชดเชยระบบแล้วในบทที่ 2 ทำให้เราทราบว่า ในโครงการระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุลนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องใช้ตัวชดเชยระบบทั้ง 3 ชนิดที่กล่าวมา เนื่องจากระบบนี้ จะต้องทำให้ค่าของเซ็นเซอร์เข้าสู่ค่าที่ตั้งไว้ (สมดุล) แต่ในขณะที่เดียวกันก็ต้องระวังไม่ให้มอเตอร์นั้นหมุนเร็วจนเกินไป (Overshootมากเกินไป) ฉะนั้น จึงตัดสินใจที่จะเลือกใช้เป็นระบบควบคุมชนิด PID เพื่อให้ชดเชยกับค่าความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นกับผลตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของระบบดังกล่าว โดยตัวควบคุมชนิด PID นี้จะทำการชดเชยเป็นสมการในโปรแกรมจาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งได้กล่าวรายละเอียดไว้ในหัวข้อย่อย 3.3.2 ก่อนหน้านี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

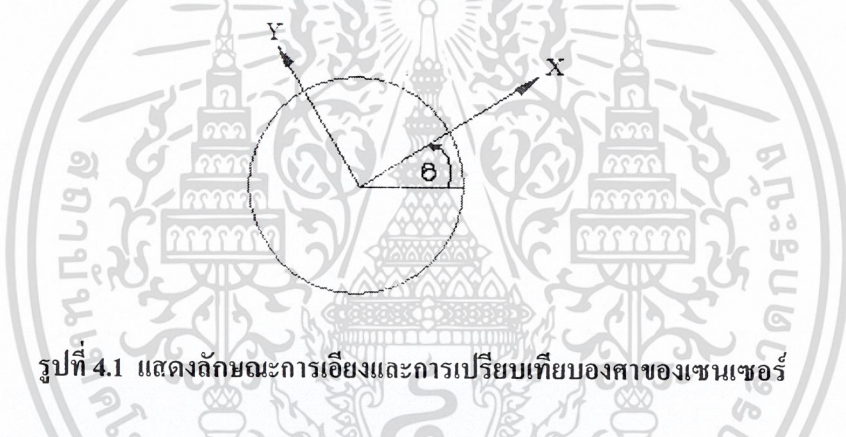
## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลอง ซึ่งจะนำเสนอถึงค่าวิถีไซเคิลที่เปลี่ยนแปลงไปตามการคำนวณของไมโครคอนโทรลเลอร์ และผลการแสดงทางหน้าจอของ LCD ที่ให้ค่าออกมาเปลี่ยนแปลงแปรตามองศาที่เอียงของหุ่นยนต์ ตลอดจนผลการทดลองวัดค่าโวลต์ที่ให้ออกมาของเซนเซอร์

#### 4.1 ผลการทดลองค่าของเอาต์พุตที่ออกมาจากเซนเซอร์

เมื่อทำการวัดค่าแรงดันที่ออกมาจากเซนเซอร์วัดความเร่งชนิด ADXL203 พบว่า ผลแรงดันที่ออกมาแปรตามลักษณะการเอียงดังรูปที่ 4.1 และมีผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงลักษณะการเอียงและการเปรียบเทียบองศาของเซนเซอร์

ทั้งนี้เราสามารถเขียนผลการทดลองมาแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่า ช่วงแรงดันเอาต์พุตที่ส่งออกมาจากเซนเซอร์วัดความเร่งในแต่ละแกนนั้น มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 1.5V – 3.5V ทั้งคู่ ทั้งนี้เมื่อเซนเซอร์ไม่มีความเร่งใดๆ ไปกระทำ แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกก็จะมีค่าอยู่ที่ช่วงประมาณ 2.5V โดยเราสามารถสังเกตได้จากตารางที่ 4.1 ว่า เมื่อเซนเซอร์วัดค่าความเร่งได้เท่ากับ  $g$  เซนเซอร์จะให้แรงดันเอาต์พุตออกมาเป็น 3.5V แต่ถ้าเซนเซอร์วัดค่าความเร่งได้เท่ากับ  $-g$  เซนเซอร์ก็จะให้แรงดันออกมาเพียง 1.5V

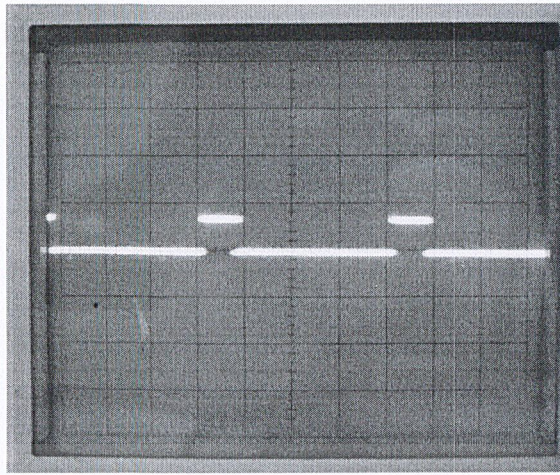
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลแรงดันเอาต์พุตจากเซ็นเซอร์วัดความเร่ง

| องศาของ $\theta$ | เอาต์พุตจาก X (Volt) | เอาต์พุตจาก Y (Volt) |
|------------------|----------------------|----------------------|
| 0                | 2.52                 | 1.50                 |
| 30               | 3.00                 | 1.67                 |
| 60               | 3.29                 | 2.03                 |
| 90               | 3.55                 | 2.54                 |
| 120              | 3.30                 | 2.97                 |
| 150              | 3.00                 | 3.31                 |
| 180              | 2.52                 | 3.55                 |
| 210              | 2.10                 | 3.29                 |
| 240              | 1.75                 | 3.00                 |
| 270              | 1.55                 | 2.54                 |
| 300              | 1.70                 | 2.02                 |
| 330              | 2.09                 | 1.67                 |
| 360              | 2.56                 | 1.50                 |

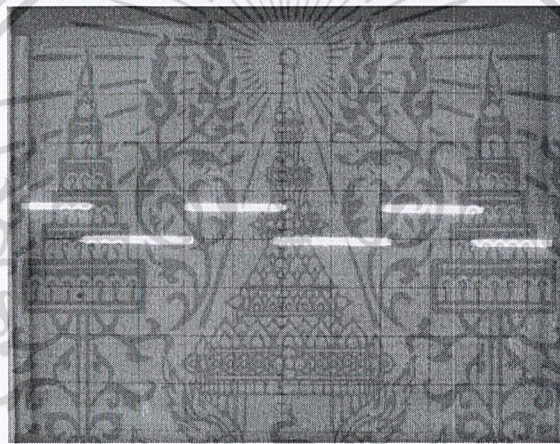
ทั้งนี้ในการเลือกใช้งาน เราสามารถเลือกที่จะใช้เซ็นเซอร์ในแกนใดก็ได้ให้เหมาะสมกับการออกแบบโรงงานของเรา ในที่นี้เลือกใช้เซ็นเซอร์แกน X เพื่อให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ที่ว่าเมื่อเริ่มต้นให้ค่าเอาต์พุตอยู่ที่กึ่งกลางคือ 2.5V นั่นเอง

#### 4.2 ผลการทดลองวัดค่าความถี่ที่เกิดขึ้นที่เปลี่ยนแปลงไปตามองศาการเอียงของแบบจำลอง

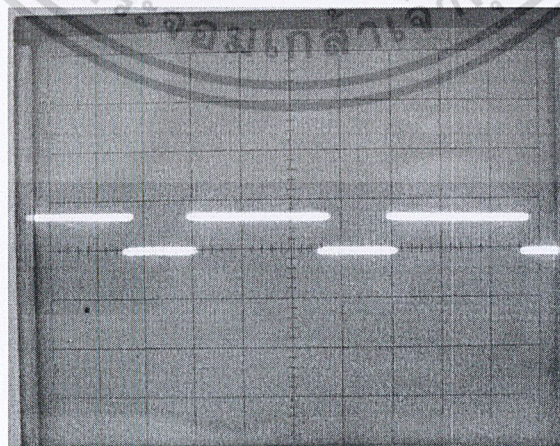
จากการที่ได้สั่งการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธีการปรับช่วงเลาการทำงานของสัญญาณ PWM ตามหัวข้อที่ 2.3.2 เมื่อได้ทำการตรวจวัดค่าความกว้างของช่วงสัญญาณสูง (Duty Cycle) ด้วยสโคปและออสซิลอสโคปแล้วก็จะได้ผลการทดลองออกมาดังรูป 4.2 , 4.3 , 4.4 ดังรูป



รูปที่ 4.2 แสดงค่า Duty Cycle ที่ประมาณ 25%



รูปที่ 4.3 แสดงค่า Duty Cycle ที่ประมาณ 50%



รูปที่ 4.4 แสดงค่า Duty Cycle ที่ประมาณ 75%

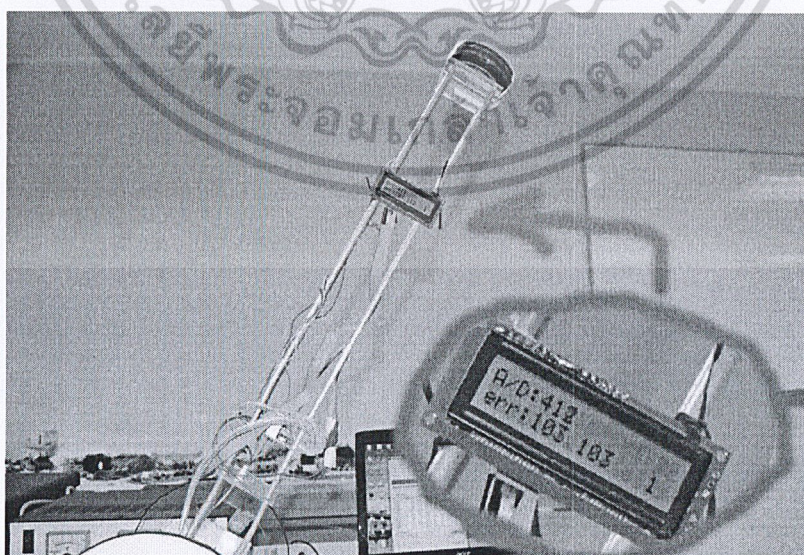
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการทดลองการแสดงผลผ่านทางหน้าจอ LCD

ในโครงการนี้ ได้มีการเขียนโปรแกรมสั่งการให้แสดงผลค่า A/D ที่รับมาได้จากเซนเซอร์ เพื่อให้ง่ายต่อการตรวจเช็คค่า และตั้งค่าให้กับตัวชดเชย PID ทั้งนี้ยังได้แสดงผลเพิ่มเติมในส่วน ของค่า Err ในอีกบรรทัดอีกด้วย ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองได้ดังรูปที่ 4.6 , 4.7 , 4.8



รูปที่ 4.5 แสดงหน้าจอแอลซีดีเมื่อแบบจำลองอยู่ที่ตำแหน่งสมดุล



รูปที่ 4.6 แสดงหน้าจอแอลซีดีเมื่อแบบจำลองเอนตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# บทวิจารณ์และสรุป

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุล เมื่อกำหนดค่าคงตัวของตัวชดเชย PID แล้ว ตัวแบบจำลองมีการทรงตัวที่ดีขึ้น และสามารถทรงตัวอยู่ได้ในช่วงความถี่ของเสาหนึ่ง หากว่าแบบจำลองเกิดการแกว่งที่มากเกินไปกว่าองศาหนึ่งจะทำให้มอเตอร์มีความเร็วรอบตามไปไม่ทัน และแกว่งมากไปทำให้ไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้

### 5.2 ปัญหาที่พบและอุปสรรค

1. มอเตอร์มีความเร็วรอบที่ช้าเกินไปทำให้ขอบเขตช่วงการทรงตัวนั้นค่อนข้างแคบ
2. เซนเซอร์ที่ใช้เน้นใช้เพียงชนิดเดียวคือเซนเซอร์วัดความเร่ง ดังนั้นในจังหวะที่มอเตอร์หมุนและก้านเพนดูลัมมันพยายามเหวี่ยงเข้าสู่สมดุล จังหวะนั้นจะเกิดความเร่งที่เซนเซอร์ก็รับรู้ค่าขึ้นมาทำให้เซนเซอร์อ่านค่าความถี่ของเพนดูลัมผิดพลาดไป
3. ในการออกแบบตัวชดเชยระบบชนิด PID นั้นยังใช้เพียงการคำนวณ โดยคร่าว และขาดการคำนวณที่แม่นยำทำให้ไม่สามารถออกแบบตัวชดเชยที่ทำให้ระบบมีค่าเสถียรที่สุดได้
4. ในตอนออกแบบทางกลครั้งแรกนั้น ออกแบบให้ใช้คัปปี้ง (ตัวเชื่อมขั้วมอเตอร์กับเฟืองเข้าด้วยกัน) ซึ่งในการเคลื่อนที่ของหุ่นนั้นมีการเปลี่ยนทิศทางการหมุนของมอเตอร์แบบกะทันหันอยู่บ่อยครั้ง ทำให้เกิดการสั่นสะเทือน และสกรูที่ยึดคัปปี้งก็จะคลายตัวออกทำให้ล้อแบบจำลองนั้นเกิดช่องว่างระหว่างฟันเฟือง (Backlash) มาก

### 5.3 แนวทางแก้ไขและปรับปรุง

1. เปลี่ยนมอเตอร์ให้มีความเร็วรอบที่สูงขึ้น และอาจจะออกแบบใหม่ให้ใช้แรงดันไฟที่สูงขึ้นเพื่อให้แรงบิด (Torque) ไม่กำลังตกลง อีกทั้งยังทำให้ขอบเขตการทรงตัวกว้างขึ้นด้วย
2. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาช่วยในการวัดค่าความถี่ของก้านแบบจำลองร่วมกับเซนเซอร์วัดความเร่งที่มีอยู่ เพื่อหักล้างข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นตามปัญหาที่กล่าวไป
3. ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่จะนำมาใช้ในการคำนวณนั้น จะต้องทำอย่างละเอียดที่สุดเท่าที่จะทำได้ อีกทั้งยังต้องศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมให้ชำนานเกี่ยวกับตัวชดเชย PID อีกด้วย
4. ได้ทำการแก้ไขแล้ว โดยการหาเฟืองที่ขนาดพอดีกับขั้วมอเตอร์มาใช้ เพื่อไม่ต้องใช้คัปปี้ง

#### 5.4 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา

ในการสร้างและออกแบบระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุลนี้ ปัจจัยสำคัญในการให้แบบจำลองนั้นสามารถตรงตัวอยู่ด้วยจะต้องอาศัยหลายๆปัจจัยประกอบกัน โดยสิ่งที่เราจะต้องพิจารณาเป็นหลักสำคัญนั้นคือ หลักการและการออกแบบระบบการทำงานของแบบจำลอง ซึ่งควรศึกษาให้ดีเกี่ยวกับข้อดีและข้อเสียของหลักการทำงานแต่ละชนิด ว่ามีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไปอย่างไร

ในโครงการนี้ระบบสามารถตรงตัวอยู่ได้แค่เพียงขอบเขตแคบๆขอบเขตหนึ่ง กล่าวคือ ความสามารถในการเอียงมีน้อย ซึ่งพบว่าสาเหตุหนึ่งมาจากหลักการทำงานของระบบที่ออกแบบมายังมีข้อผิดพลาดอยู่ เช่น จะเกิดความเร่งในขณะที่แบบจำลองพยายามปรับสมดุล , แบบจำลองมีความเร็วรอบของมอเตอร์ที่น้อยเกินไป เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นว่า การออกแบบหลักการงานนั้น เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้ระบบขับเคลื่อนรักษาสมดุลนี้ยังไม่สามารถตรงตัวได้ดีเท่าที่ควร



## เอกสารอ้างอิง

ประจัน พลังสันติกุล. All About CCS C. กรุงเทพมหานคร : บริษัท แอปซอพท์เทคโนโลยี จำกัด. 2551.  
กฤตณัฐ เกิดสว่าง พรจติ ทรวงแก้ว และ กุริเดช จันทะโก. 2551. “ระบบควบคุมหุ่นยนต์อิน  
เวิร์ทเพนคูล์ม.” ปรินญานินพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบัน  
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.  
สุชาติ จันทร์จรมานิตย์. “ระบบควบคุม.” [online]. Available : [http://suchart.rmutl.ac.th/04-220-308/CT\\_L06.pdf](http://suchart.rmutl.ac.th/04-220-308/CT_L06.pdf). 2553.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# ภาคผนวก ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โค้ดที่ใช้ในโครงการ

```

#include<16F877A.h>
#define ADC=10
#define HS,NOWDT,NOPROTECT,NOLVP
#define use_delay(clock=2000000)
#define use_portb_lcd
#include <LCD.c>
#define SETPOINT 516

void PI();
unsigned int int_count = 0, dir = 0x00;

int i;
int16 x[10];

int16 error,feedback,Pterm,Iterm,Dterm,sum,error_old,Iterm_old;

//correction = kp * error + kd * (error - prevError) + kI * (sum of errors)
//PID controller constants
int kp = 100; // position multiplier (gain)
int ki = 15; // Intergral multiplier (gain)
int kd = 20; // Intergral multiplier (gain)

#INT_TIMER0
void clock_sir()
{
    // static char flag;
    disable_interrupts(INT_TIMER0);
    // if(int_count++>5)
    {
        PI();
        // if(flag==0)
        {
            // output_high(PIN_C0);
            // flag=1;
        }
        // else if(flag==1)
        {
            // output_low(PIN_C0);
            // flag=0;
        }
        //int_count=0;
    }
    enable_interrupts(INT_TIMER0);
}

void main()
{

```

```

enable_interrupts(GLOBAL);
enable_interrupts(INT_TIMER0);
setup_timer_0(RTCC_INTERNAL|RTCC_DIV_128); //128
set_timer0(0);
setup_port_a(ALL_ANALOG);
setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32);
setup_timer_2(T2_DIV_BY_16,255,1);
set_timer2(0);
setup_ccp1(CCP_PWM); //setup CCP Module
set_adc_channel(5);
set_pwm1_duty(0);
set_tris_c(0x00);

lcd_init();

while(TRUE)
{
lcd_command(0x80);
printf(lcd_putc"A/D:%lu ",feedback);

//lcd_command(0xC0);
lcd_gotoxy(1,2);
printf(lcd_putc"err:%lu ",error );

//lcd_command(0xC0);
lcd_gotoxy(9,2);
printf(lcd_putc"%lu ",sum );

delay_ms(200);
}
}

void PI()
{
for(i=0; i<10; i++)
{
x[i] = read_adc();
feedback = (x[0]+x[1]+x[2]+x[3]+x[4]+x[5]+x[6]+x[7]+x[8]+x[9])/10;
x[i+1] = x[i];
}

if(feedback > SETPOINT)
{
error = feedback - SETPOINT;
dir = 0x08;
}
else if(feedback < SETPOINT)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    error = SETPOINT - feedback;
    dir = 0x04;
}
else
{
    error = 0;
    dir = 0x00;
}

Pterm = error;
Iterm = ((error + error_old)*0.00325) + Iterm_old;
Dterm = (error - error_old)/(0.0065); //error - error_old;
sum = kp*Pterm + ki*Iterm + kd*Dterm;
Iterm_old = Iterm;
error_old = error;
if(sum > 1023)
{
    sum = 1023;
}
set_pwm1_duty((unsigned int)sum);
output_d(dir);
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### FEATURES

- High performance, single/dual axis accelerometer on a single IC chip
- 5 mm  $\times$  5 mm  $\times$  2 mm LCC package
- 1 mg resolution at 60 Hz
- Low power: 700  $\mu$ A at  $V_s = 5 V$  (typical)
- High zero g bias stability
- High sensitivity accuracy
- 40°C to +125°C temperature range
- X and Y axes aligned to within 0.1° (typical)
- BW adjustment with a single capacitor
- Single-supply operation
- 3500 g shock survival

### APPLICATIONS

- Vehicle Dynamic Control (VDC)/Electronic Stability Program (ESP) systems
- Electronic chassis control
- Electronic braking
- Platform stabilization/leveling
- Navigation
- Alarms and motion detectors.
- High accuracy, 2-axis tilt sensing

### GENERAL DESCRIPTION

The ADXL103/ADXL203 are high precision, low power, complete single and dual axis accelerometers with signal conditioned voltage outputs, all on a single monolithic IC. The ADXL103/ADXL203 measures acceleration with a full-scale range of  $\pm 1.7 g$ . The ADXL103/ADXL203 can measure both dynamic acceleration (e.g., vibration) and static acceleration (e.g., gravity).

The typical noise floor is 110  $\mu$ g/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , allowing signals below 1 mg (0.06° of inclination) to be resolved in tilt sensing applications using narrow bandwidths (<60 Hz).

The user selects the bandwidth of the accelerometer using capacitors  $C_x$  and  $C_y$  at the  $X_{\text{OUT}}$  and  $Y_{\text{OUT}}$  pins. Bandwidths of 0.5 Hz to 2.5 kHz may be selected to suit the application.

The ADXL103 and ADXL203 are available in 5 mm  $\times$  5 mm  $\times$  2 mm, 8-pad hermetic LCC packages.

### FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

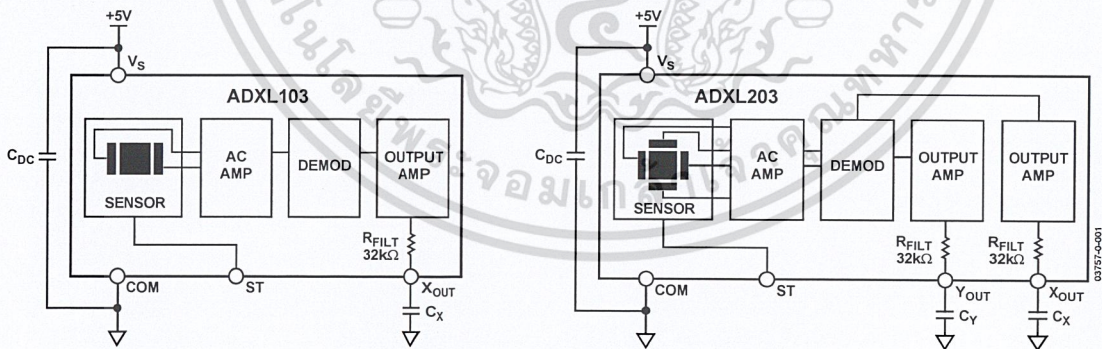


Figure 1. ADXL103/ADXL203 Functional Block Diagram

### Rev. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 www.analog.com  
Fax: 781.326.8703 © 2004 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**PUSH-PULL FOUR CHANNEL DRIVER WITH DIODES**

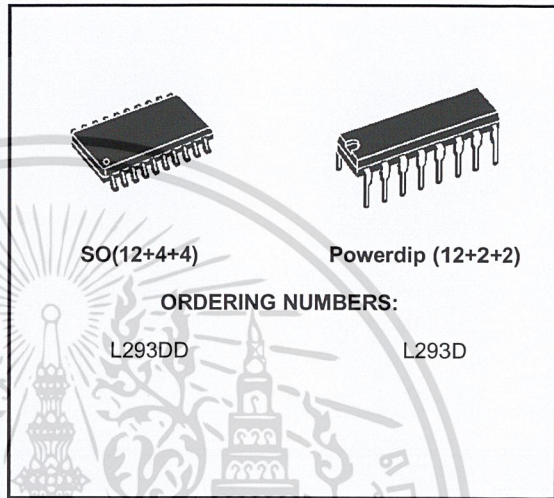
- 600mA OUTPUT CURRENT CAPABILITY PER CHANNEL
- 1.2A PEAK OUTPUT CURRENT (non repetitive) PER CHANNEL
- ENABLE FACILITY
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)
- INTERNAL CLAMP DIODES

**DESCRIPTION**

The Device is a monolithic integrated high voltage, high current four channel driver designed to accept standard DTL or TTL logic levels and drive inductive loads (such as relays solenoids, DC and stepping motors) and switching power transistors.

To simplify use as two bridges each pair of channels is equipped with an enable input. A separate supply input is provided for the logic, allowing operation at a lower voltage and internal clamp diodes are included.

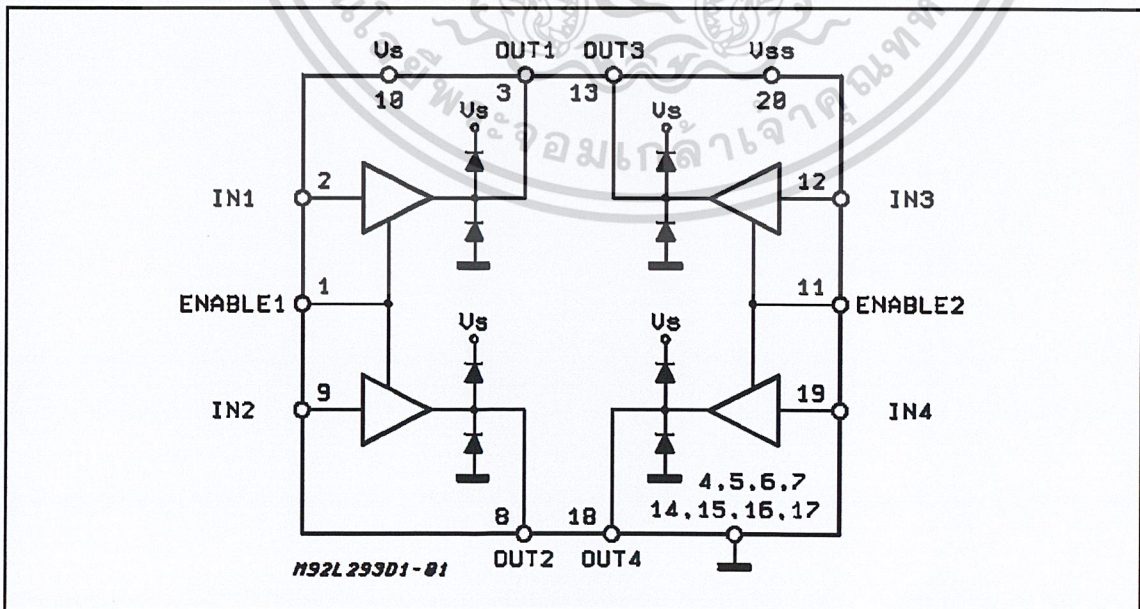
This device is suitable for use in switching applications at frequencies up to 5 kHz.



The L293D is assembled in a 16 lead plastic package which has 4 center pins connected together and used for heatsinking

The L293DD is assembled in a 20 lead surface mount which has 8 center pins connected together and used for heatsinking.

**BLOCK DIAGRAM**





MICROCHIP

# PIC16F87X

## 28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollers

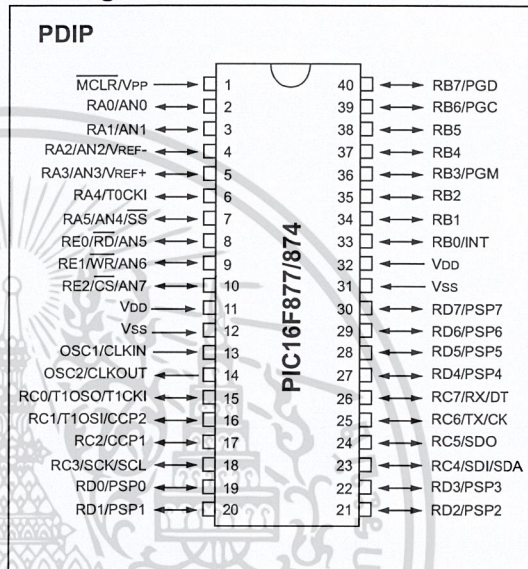
### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873
- PIC16F876
- PIC16F874
- PIC16F877

### Microcontroller Core Features:

- High performance RISC CPU
- Only 35 single word instructions to learn
- All single cycle instructions except for program branches which are two cycle
- Operating speed: DC - 20 MHz clock input  
DC - 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of FLASH Program Memory,  
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM)  
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to the PIC16C73B/74B/76/77
- Interrupt capability (up to 14 sources)
- Eight level deep hardware stack
- Direct, indirect and relative addressing modes
- Power-on Reset (POR)
- Power-up Timer (PWRT) and  
Oscillator Start-up Timer (OST)
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC  
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving SLEEP mode
- Selectable oscillator options
- Low power, high speed CMOS FLASH/EEPROM  
technology
- Fully static design
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP) via two  
pins
- Single 5V In-Circuit Serial Programming capability
- In-Circuit Debugging via two pins
- Processor read/write access to program memory
- Wide operating voltage range: 2.0V to 5.5V
- High Sink/Source Current: 25 mA
- Commercial, Industrial and Extended temperature  
ranges
- Low-power consumption:
  - < 0.6 mA typical @ 3V, 4 MHz
  - 20 µA typical @ 3V, 32 kHz
  - < 1 µA typical standby current

### Pin Diagram



### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,  
can be incremented during SLEEP via external  
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period  
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- 10-bit multi-channel Analog-to-Digital converter
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™ (Master  
mode) and I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver  
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address  
detection
- Parallel Slave Port (PSP) 8-bits wide, with  
external RD, WR and CS controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for  
Brown-out Reset (BOR)

### THREE TERMINAL POSITIVE VOLTAGE REGULATORS

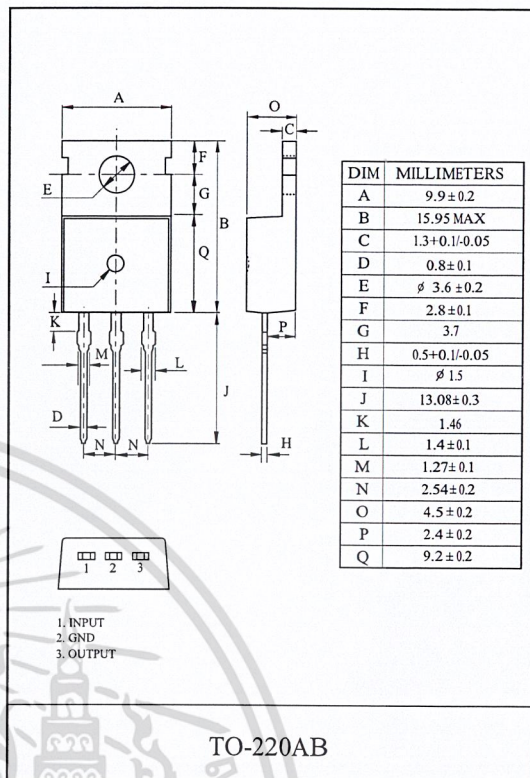
5V, 6V, 7V, 8V, 9V, 10V, 12V, 15V, 18V, 20V, 24V.

#### FEATURES

- Internal Thermal Overload Protection.
- Internal Short Circuit Current Limiting.
- Output Current up to 1.5A.
- Satisfies IEC-65 Specification. (International Electronical Commission).
- Package is TO-220AB

#### LINE-UP

| ITEM      | OUTPUT VOLTAGE (Typ.) | UNIT |
|-----------|-----------------------|------|
| KIA7805AP | 5                     | V    |
| KIA7806AP | 6                     |      |
| KIA7807AP | 7                     |      |
| KIA7808AP | 8                     |      |
| KIA7809AP | 9                     |      |
| KIA7810AP | 10                    |      |
| KIA7812AP | 12                    |      |
| KIA7815AP | 15                    |      |
| KIA7818AP | 18                    |      |
| KIA7820AP | 20                    |      |
| KIA7824AP | 24                    |      |



#### MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C)

| CHARACTERISTIC                          |                   | SYMBOL              | RATING    | UNIT |
|---|-------------------|---------------------|-----------|------|
| Input Voltage                           | KIA7805 ~ KIA7815 | V <sub>IN</sub>     | 35        | V    |
|   | KIA7818 ~ KIA7824 |                     | 40        |      |
|   |                   |                     |           |      |
| Power Dissipation-1 (No Heatsink)       | AP                | P <sub>D2</sub>     | 1.9       | W    |
| Power Dissipation-2 (Infinite Heatsink) | AP                | P <sub>D2</sub>     | 30        |      |
| Operating Junction Temperature          |                   | T <sub>j</sub>      | -40 ~ 150 | °C   |
| Storage Temperature                     |                   | T <sub>stg</sub>    | -55 ~ 150 | °C   |
| Maximum Junction Temperature            |                   | T <sub>j(max)</sub> | 150       | °C   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## 1. General description

SC162A, a dot-matrix character LCD module, design for displaying 2 line 16 row characters. Character font is 5X7 dots with cursor. The SC162A provides two types of interfaces to MPU: 4-bit and 8-bit interfaces. SC162A can includes EL or LED backlight for custom design. The custom can design for color of EL or LED backlight, viewing angle and LCD type.

## 2. Maximum absolute limit

| Characteristics       | Symbol | Ratings                 | Remark                 |
|-----------------------|--------|-------------------------|------------------------|
| Operating Voltage     | VDD    | -0.3V to +7.0V          |                        |
| Driver Supply Voltage | VLCD   | VDD - 12V to VDD + 0.3V |                        |
| Input Voltage Range   | VIN    | -0.3V to VDD + 0.3V     |                        |
| Operating Temperature | TA1    | -10°C to+60°C           | Normal temperature LCM |
|                       | Ta2    | -20°C to+60°C           | Wide temperature LCM   |
| Storage Temperature   | TSTO   | -25°C to+70°C           |                        |

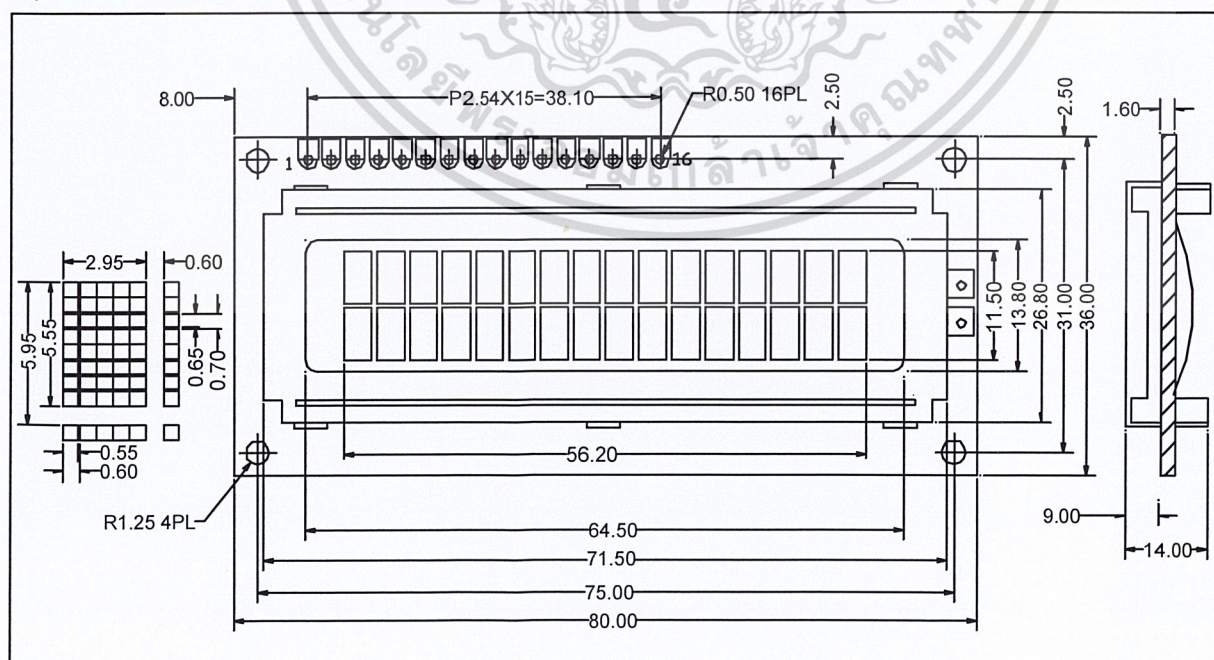
Note: Stresses beyond those given in the Absolute Maximum Rating table may cause operational errors or damage to the device.

## 3. Mechanical characteristics

### a) Physical data

| ITEM                 | Standard value    | Unit | Remark |
|----------------------|-------------------|------|--------|
| Number of characters | 16×2              |      |        |
| Module size          | 80.0× 36.0× 14.0  | mm   |        |
| Viewing area         | 64.50× 13.80      | mm   |        |
| Active area          | 56.2× 11.50       | mm   |        |
| Character size       | 5.55× 2.95        | mm   |        |
| Character pith       | 5.95× 3.55        | mm   |        |
| Approx. weight       |                   | g    |        |
| Drive method         | 1/5bias 1/16 duty |      |        |

### b) External dimensions





## 4. Electrical characteristics

### a) DC characteristics

#### a.1) DC CHARACTERISTICS (TA = 25 °C, VDD = 2.7 to 4.5V)

| Characteristics     | Symbol           | Limit   |      |        | Unit | Test Condition                        |
|---------------------|------------------|---------|------|--------|------|---------------------------------------|
|                     |                  | Min.    | Typ. | Max.   |      |                                       |
| Input High Voltage  | V <sub>ih</sub>  | 0.7VDD  | -    | VDD    | V    |                                       |
| Input Low Voltage   | V <sub>il</sub>  | -0.3    |      | 0.55   | V    |                                       |
| Input High Current  | I <sub>ih</sub>  | -1.0    |      | 1.0    | uA   | VDD = 3.0V                            |
| Input Low Current   | I <sub>il</sub>  | -5.0    | -15  | -30    | uA   |                                       |
| Output High Voltage | V <sub>oh</sub>  | 0.75VDD | -    | -      | V    | I <sub>OH</sub> = - 0.1mA Pins: DB7-0 |
| Output Low Voltage  | V <sub>ol</sub>  | -       | -    | 0.2VDD | v    | I <sub>OL</sub> = 0.1mA Pins: DB7-0   |
| LCD Voltage         | V <sub>lcd</sub> | 3       | 4.5v | 13     | V    |                                       |
| Operating Current   | I <sub>dd</sub>  |         | 1.0  |        | mA   |                                       |

Note: VDD = 3V

#### a.2) DC CHARACTERISTICS (TA = 25°C, VDD = 4.5 to 5.5V)

| Characteristics     | Symbol           | Limit |      |      | Unit | Test Condition                        |
|---------------------|------------------|-------|------|------|------|---------------------------------------|
|                     |                  | Min.  | Typ. | Max. |      |                                       |
| Input High Voltage  | V <sub>ih</sub>  | 2.2   |      | VDD  | V    |                                       |
| Input Low Voltage   | V <sub>il</sub>  | -0.3  |      | 0.6  | V    |                                       |
| Input High Current  | I <sub>ih</sub>  | -2.0  |      | 2.0  | uA   | VDD = 5.0V                            |
| Input Low Current   | I <sub>il</sub>  | -20   | -50  | -100 | uA   |                                       |
| Output High Voltage | V <sub>oh</sub>  | 2.4   | -    | VDD  | V    | I <sub>OH</sub> = - 0.1mA Pins: DB7-0 |
| Output Low Voltage  | V <sub>ol</sub>  | -     | -    | 0.4  | V    | I <sub>OL</sub> = 0.1mA Pins: DB7-0   |
| LCD Voltage         | V <sub>lcd</sub> | 3     | 4.5  | 13   | V    |                                       |
| Operating Current   | I <sub>dd</sub>  |       | 1.0  |      | mA   |                                       |

Note: VDD = 5V

### b) AC characteristics

#### b.1) AC CHARACTERISTICS (TA = 25°C, VDD = 2.7 to 4.5V)

Write Mode (Writing data from MPU to LCD module)

| Characteristics    | Symbol                         | Limit |      |      | Unit | Test Condition   |
|--------------------|--------------------------------|-------|------|------|------|------------------|
|                    |                                | Min.  | Typ. | Max. |      |                  |
| E Cycle Time       | t <sub>c</sub>                 | 1000  |      |      | ns   | PinE             |
| E Pulse Width      | t <sub>pw</sub>                | 450   | -    | -    | ns   | PinE             |
| E Rise/Fall Time   | t <sub>R</sub> ,t <sub>F</sub> | -     | -    | 25   | ns   | PinE             |
| Address Setup Time | t <sub>sp-i</sub>              | 60    |      |      | ns   | Pins: RS, R/W, E |
| Address Hold Time  | t <sub>HD1</sub>               | 20    |      |      | ns   | Pins: RS, R/W, E |
| Data Setup Time    | t <sub>sp2</sub>               | 195   |      |      | ns   | Pins: DB7-0      |
| Data Hold Time     | t <sub>HD2</sub>               | 10    | -    | -    | ns   | Pins: DB7-0      |