# การออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์

# A Design of Position Sensing System of Robot Manipulator

ดำรงค์ เคล้าดี

Damrong Kalawdee

วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

Master of Engineering Thesis in Electrical Engineering

Prince of Songkla University

2537

เลขหมู่ TJ211.35 ด64 2537 ฉ.2

Bib Key 66119

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์

**ผู้เขียน** นายดำรงค์ เคล้าดี

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

---

**คณะกรรมการที่ปรึกษา**

.......................................ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนวย สิทธิเจริญชัย)

.......................................กรรมการ

(ดร.ชูศักดิ์ ลิ่มสกุล)

**คณะกรรมการสอบ**

.......................................ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนวย สิทธิเจริญชัย)

.......................................กรรมการ

(ดร.ชูศักดิ์ ลิ่มสกุล)

.......................................กรรมการ

(อาจารย์มนัส เกื้อกูลกิจการ)

.......................................กรรมการ

(รองศาสตราจารย์บุญเหลือ พงศ์ดารา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

.......................................

( ดร.ไพรัตน์ สงวนไทร )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

**ชื่อวิทยานิพนธ์** การออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์

**ผู้เขียน** นายดำรงค์ เคล้าดี

**สาขาวิชา** วิศวกรรมไฟฟ้า

**ปีการศึกษา** 2536


## บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้กล่าวถึง การออกแบบสร้างระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ โดยใช้โพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง ซึ่งในระบบนี้สามารถรองรับตัวตรวจรู้ตำแหน่งได้สูงสุด 16 ตัว และมีส่วนรับสัญญานที่บอกถึงขอบเขตสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ ในระบบนี้จะมีการนำโพเทนชิออมิเตอร์ไปติดตั้งกับข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ โดยการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ในตำแหน่งต่างๆจะแปรผันกับการเปลี่ยนมุมและระดับแรงดันเอาท์พุทของโพเทนชิออมิเตอร์ด้วย ค่าแรงดันที่ได้จะถูกแปลงเป็นสัญญานดิจิตอล ด้วยตัวแปลงสัญญานอนาลอกเป็นดิจิตอล ซึ่งระบบทั้งหมดถูกควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ และระบบแขนหุ่นยนต์ต้นแบบแบบ 2 ระดับขั้นความเสรีก็ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ดังกล่าว

จากการทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ที่ใช้โพเทนชิออมิเตอร์ของ Bourns รุ่น 3590s-1-501 เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่งได้พิสูจน์แล้วว่ามีความผิดพลาดน้อยกว่า 0.08% FSO และเมื่อได้ทำการติดตั้งกับต้นแบบระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรี พบว่า ในแนวแกน X มีความผิดพลาด 1.9 mm (จากระยะทางเคลื่อนที่ทั้งหมด 335 mm) และแนวแกน Y มีความผิดพลาด 0.6 mm (จากระยะทางเคลื่อนที่ทั้งหมด 270 mm) ซึ่งสาเหตุหลักของความผิดพลาดเกิดจากระบบกลไกของแขนหุ่นยนต์ และการติดตั้งตัวตรวจรู้เป็นหลักอย่างไรก็ตามค่าความผิดพลาดนี้ มีความต่ำเพียงพอที่จะนำไปติดตั้งกับแขนหุ่นยนต์เพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางการเกษตร

**Thesis Title** A Design of Position Sensing System of Robot Manipulator

**Author** Mr. Damrong Kalawdee

**Major Program** Electrical Engineering

**Academic Year** 1993

## Abstract

This thesis describes the design of a position sensing system for a robot manipulator. The system has a maximum of 16 position sensors and limiting sensors. Potentiometers whose output voltage is proportional to the position of a wiper are used as position sensors. They are installed on the robot joints and will be turned in proportion to the movement of the robot arm. The analog output voltage from each of potentiometer is converted into digital form by the A/D converter which is controlled by microcomputer. The system was installed on the laboratory prototype robot manipulator, which has two degrees of freedom.

The performance of the position sensing system for a robot manipulator was measured and proved to have error of less than 0.08% FSO. It was found that the robot manipulator with two degrees of freedom has an error of 1.9 mm. along the X axis (maximum movement = 335 mm) and an error of 0.6 mm along the Y axis (maximum movement = 270 mm). The main error in this system are caused by the mechanics and from the installation of the position sensor. However, the errors are sufficiently small to be acceptable for the use of the robot manipulator in agricultural application.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงคำขอบพระคุณต่อ อาจารย์อำนวย สิทธิเจริญชัย ประธานกรรมการที่ปรึกษา อาจารย์ชูศักดิ์ ลิ่มสกุล ที่ได้ให้คำแนะนำจัดหาเอกสาร, เครื่องมือ และการสนับสนุนด้านต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณ อาจารย์มนัส เกื้อกูลกิจการ และอาจารย์บุญเหลือ พงศ์ดารา ที่ช่วยกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณอาจารย์วีระพันธ์ มุสิกสาร ที่ให้โอกาสและสนับสนุนการศึกษาของผู้เขียนมาอย่างดียิ่ง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และธุรการวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ทุกๆท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอน้อมระลึกถึงพระคุณของบิดาและมารดาที่ให้การส่งเสริม และอุปถัมป์ด้านการศึกษาและในทุกๆด้านมาโดยตลอด จนเป็นผลให้ข้าพเจ้าได้ประสบความสำเร็จในที่สุด

ดำรงค์ เคล้าดี

## สารบาญ

หน้า

บทคัดย่อ .... (3)
Abstract .... (4)
กิตติกรรมประกาศ .... (5)
สารบาญ .... (6)
รายการตาราง .... (8)
รายการภาพประกอบ .... (9)
ตัวย่อและสัญลักษณ์ .... (12)

บทที่

1. บทนำ .... 1
    - ความเบื้องต้น .... 1
    - วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .... 3
    - ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .... 3
    - ขอบเขตของงานวิจัย .... 3
2. ระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ .... 5
    - ตัวตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ .... 5
    - การพิจารณาข้อดีและข้อเสียของระบบตรวจรู้ตำแหน่งแบบต่างๆ .... 7
    - ตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สภาวะภายนอก .... 10
3. รายละเอียดทางด้านฮาร์ดแวร์ .... 13
4. ต้นแบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี .... 31
    - โครงสร้างของแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี .... 31
    - มอเตอร์ขับเคลื่อน .... 32
    - โพเทนชิออมิเตอร์วัดตำแหน่ง .... 33
    - ตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ของระบบ .... 35
    - ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ .... 36
5. โปรแกรมควบคุมระบบงาน .... 39
    - ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการโปรแกรมกับระบบ .... 39
    - โปรแกรมควบคุมระบบตรวจรู้ตำแหน่ง .... 39
    - โปรแกรมควบคุมระบบขับเคลื่อน .... 40

โปรแกรมตัวอย่างเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ ........ 41
6. วิธีการวิจัย ........ 47
การออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ ........ 47
การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์และระบบที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมา ........ 47
คุณลักษณะทางเทคนิค ........ 52
7. ผลการวิจัย ........ 54
ผลการวิจัยการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ ........ 54
ผลการวิจัยผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์ ........ 57
ผลการวิจัยการตรวจสอบความผิดพลาดต่ออุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์ ........ 64
ผลการทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ ........ 64
ผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี ........ 67
8. วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย ........ 72
สรุปผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ ........ 72
การพิจารณาคุณสมบัติของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns ค่าต่างๆกัน ........ 73
ความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิ ........ 75
ความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์ที่เกิดจากการจ่ายแรงดันเป็นเวลานาน ........ 76
ความแม่นยำของตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล ........ 76
ความแม่นยำของส่วนจัดการสัญญาณอนาลอก ........ 76
ความแม่นยำของระบบตรวจรู้ที่ได้ออกแบบและสร้างเป็นต้นแบบขึ้นมา ........ 76
การทดสอบระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี ........ 77
สรุปผลการวิจัย ........ 78
คำเสนอแนะสำหรับการดำเนินงานต่อไป ........ 80
สรุปรายละเอียดของระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี ........ 82
บรรณานุกรม ........ 83
ภาคผนวก ........ 87
ภาคผนวก ก หุ่นยนต์และการนำโพเทนชิออมิเตอร์มาเป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง ........ 87
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดสอบงานวิจัย ........ 112
ภาคผนวก ค วงจรไฟฟ้าของงานวิจัยและอุปกรณ์ ........ 135
ภาคผนวก ง เอกสารข้อมูลอุปกรณ์ไอซี ........ 152
ประวัติผู้เขียน ........ 161

**รายการตาราง**


| ตาราง | | หน้า |
|---|---|---|
| 7.1 | สรุปผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ | 57 |
| 7.2 | สรุปผลของการโหลดและความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์ค่าต่างๆ | 63 |
| 7.3 | สรุปผลการทดสอบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ | 64 |
| 7.4 | แสดงผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี | 67 |
| 7.5 | ผลการทดสอบความเที่ยงของแขนหุ่นยนต์ต้นแบบ | 69 |
| 7.6 | ผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์เมื่อวัดมุมการหมุนของมอเตอร์ในแนวแกน Y | 70 |
| 8.1 | แสดงสรุปผลกระทบของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์ | 74 |
| 8.2 | แสดงสรุปผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อโพเทนชิออมิเตอร์ | 75 |

## รายการภาพประกอบ


**ภาพประกอบ** **หน้า**

2.1 แสดงตัวตรวจรู้เอ็นโคดเดอร์ (a) แบบอินครีเมนตัล (Incremental) และ
(b) แบบสัมบูรณ์ (Absolute) ........................................................................6

2.2 แสดงโพเทนชิออมิเตอร์และเอาท์พุท .................................................................7

2.3 แสดงตำแหน่งการติดตั้งตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์
(a) แบบหมุน (Rotation) และ (b) แบบเลื่อน (Linear) ..............................................10

2.4 แสดงภาคตัดขวางของการติดตั้งระบบตัวตรวจรู้สัมผัส 4 จุดล้อมรอบท่อนแขน .............11

3.1 แสดงแผนภาพแบบบล็อกแนวความคิดของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์...........13

3.2 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของส่วนต่างๆของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์และ
ความสัมพันธ์..........................................................................................14

3.3 แสดงหน่วยเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ (CIU)..............................................................15

3.4 แสดงขั้วต่อสัญญาณ(Connector)ที่ต่อจากหน่วยเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ (CIU) ................16

3.5 แสดงหน่วยแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converting
Unit, ADCU) ..........................................................................................17

3.6 แสดงวงจรแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage)........................................................18

3.7 แสดงการแยกและเปลี่ยนระดับสัญญาน (a) 15 Volt (CMOS) เป็น 5 Volt (TTL)
และ (b) 5 Volt เป็น 15 Volt (CMOS) ............................................................19

3.8 แสดงส่วนขั้วต่อสัญญานอนาลอกด้านเข้า (Analog-In Computer)...............................20

3.9 แสดงส่วนขั้วต่อสัญญานด้านคอมพิวเตอร์ (Computer Connector)..............................20

3.10 แสดงส่วนปรับศูนย์ (Zero Adjustment)............................................................21

3.11 แสดงส่วนปรับอัตราขยาย ...........................................................................22

3.12 แสดงส่วนบัฟเฟอร์แรงดันอ้างอิง ...................................................................23

3.13 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของหน่วยจัดการสัญญานอนาลอก........................................24

3.14 แสดงรูปแผงวงจรหน่วยแปลงสัญญาอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADCU) ซึ่งมีแผงวงจรที่ใช้
ปรับแต่งสัญญานอนาลอก (ADPU) เสียบอยู่........................................................24

3.15 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของการเชื่อมต่อของ LTMU กับคอมพิวเตอร์ และ LTMU กับ
LTMU ด้วยกัน.......................................................................................26

3.16 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของหน่วยมัลติเพลกซ์สัญญานจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่
และตัวตัวรู้สัมผัส......................................................................................48

3.17 แสดงการตรวจสอบตัวตรวจรู้ตัวใดตัวหนึ่งทำงาน ....27
3.18 แสดงวงจรเลือก LTMU และเลือกอ่านข้อมูลตัวตรวจรู้ ....27
3.19 แสดงแผนภาพเวลาของการทำงานของ LTMU 2 ชุด ....28
3.20 แสดงรูปแผงวงจรของหน่วยมัลติเพลกซ์สัญญาณจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตัวรู้สัมผัส LTMU ....29
3.21 แสดงการใช้งานไมโครสวิทช์เป็นตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ ....30
3.22 แสดงการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์และตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่บนแขนหุ่นยนต์ ....30
4.1 แสดงแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรีที่ได้สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบการทำงานของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ ....31
4.2 แสดงเกลียวและน็อตที่ใช้เป็นตัวถ่ายทอดกำลังจากมอเตอร์ ....32
4.3 แสดงการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์โดยใช้เส้นเชือกในการส่งตำแหน่ง ....33
4.4 แสดงการติดตั้งตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่โดยใช้ไมโครสวิทช์ (Micro Switch) ....35
4.5 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ ....36
4.6 แสดงวงจรการขับมอเตอร์และการกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ....37
4.7 แสดงรูปของแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรี ....37
4.8 แสดงระบบตรวจรู้ตำแหน่งและระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรีติดตั้งร่วมกัน38
5.1 แสดงการควบคุมมอเตอร์ ....41
5.2 แสดงผังงานการอ่านข้อมูลจาก A/D ....42
5.3 แสดงผังงานการอ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สัมผัส ....43
5.4 แสดงผังงานการส่งข้อมูลควบคุมมอเตอร์ ....44
5.5 แสดงผังงานการส่งข้อมูลควบคุมกลไกจับยกปากกา ....45
5.6 แสดงผังงานตัวอย่างการควบคุมการเคลื่อนที่เพื่อลากเส้นในแนวแกน X ....46
7.1 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Brand @ 1k ....54
7.2 กราฟพิจารณาความเป็นเชิงเส้นของโพเทนชิออมิเตอร์ Brand @ 1k เมื่อพิจารณาเฉพาะจุดช่วงกลางของการใช้งาน ....55
7.3 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Brand Burns 1k ....55
7.4 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Brand Alps 5k ....56
7.5 กราฟพิจารณาความเป็นเชิงเส้นของโพเทนชิออมิเตอร์ Alps 5k เมื่อพิจารณาเฉพาะจุดช่วงกลางของการใช้งาน ....56
7.6 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Brand Rs 1k ....57
7.7 กราฟแสดงผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 500 Ω ....58

7.8 ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 500 Ω........................58
7.9 กราฟแสดงผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 1k Ω...........59
7.10 ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 1k Ω........................59
7.11 กราฟแสดงผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร Bourns 5k Ω...........60
7.12 ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 5k Ω........................60
7.13 กราฟแสดงผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 10k Ω.........61
7.14 ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 10k Ω........................61
7.15 กราฟแสดงผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 100k Ω.......62
7.16 ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 100k Ω......................62
7.17 กราฟผลกระทบของการโหลดในการใช้โพเทนชิออมิเตอร์ค่าต่างๆ..................................63
7.18 กราฟแสดงผลการทดสอบ A/D Converter ...............................................................65
7.19 กราฟแสดงผลการทดสอบหน่วยจัดการข้อมูลอนาลอกที่อัตราขยายเป็น 1 ......................65
7.20 กราฟแสดงผลการทดสอบหน่วยจัดการสัญญานอนาลอกที่อัตราขยายเป็น 2 ..................66
7.21 กราฟแสดงผลการทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งทั้งระบบ ..............................................66
7.22 กราฟแสดงผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์ในแนวแกน X..................................................68
7.23 กราฟแสดงผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์ในแนวแกน Y ..................................................68
7.24 กราฟแสดงผลการทดสอบหุ่นยนต์ต้นแบบเมื่อวัดจำนวนรอบของมอเตอร์ ......................71

## ตัวย่อและสัญลักษณ์

| | |
|---|---|
| A/D | Analog-to-Digital Converter |
| AC | Alternating Current |
| BCD | Binary Code Decimal |
| DC | Direct Current |
| FF | Flip-Flop |
| LSB | Least Significant Bit |
| MSB | Most Significant Bit |
| Mux. | Multiplexer |
| PCB | Printed Circiut Board |
| Pot. | Potentiometer |

# บทที่ 1

# บทนำ

## ความเบื้องต้น

### 1. ความเป็นมาของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์จัดได้ว่าเป็นเครื่องมือชนิดใหม่ที่เข้ามาสู่วงการต่างๆในการทดแทนแรงงานมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านอุตสาหกรรม, การศึกษา, และอีกมากมายหลายสาขาจึงทำให้การพัฒนาหุ่นยนต์เป็นไปอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบันระบบการทำงานต่างๆถูกแทนที่ด้วยหุ่นยนต์มากขึ้นเรื่อยๆ หุ่นยนต์บางอย่างสามารถทำงานที่มีความละเอียด, แม่นยำสูง ซึ่งการพัฒนาหุ่นยนต์ประเภทนี้จำเป็นที่จะต้องพิจารณาในเรื่อง การออกแบบอุปกรณ์ทางด้านกลไก (Mechanic) และระบบควบคุมให้มีความแน่นอน, แม่นยำสูง ซึ่งมักจะเป็นหุ่นยนต์ทำงานในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ประกอบผลิตภัณฑ์ต่างๆที่มีการกำหนดรูปแบบการปฏิบัติงานไว้ล่วงหน้าแล้วหุ่นยนต์ก็จะปฏิบัติตามรูปแบบที่กำหนดซ้ำๆด้วยความแม่นยำ อย่างไรก็ตามงานบางอย่างไม่ต้องการความแม่นยำมากนักแต่ต้องการความฉลาดในการวิเคราะห์ (Intelligent) และระบบตรวจรู้ (Sensing System) ที่ดีและเหมาะสมทำให้สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและไม่แน่นอนได้ดี เช่น หุ่นยนต์ทางด้านการเกษตร (Agricultural Robot) ที่สามารถเข้าจัดการกับชิ้นงานได้ด้วยการใช้ระบบภาพเป็นตัวตรวจรู้เสริม ซึ่งคล้ายการทำงานของมนุษย์ที่มีความแม่นยำในการทำงานไม่สูงมากนักแต่จะมีความฉลาดในการปรับแต่งให้เข้าสู่สิ่งที่ต้องการและเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ โดยการรับรู้ด้วยสัมผัสต่างๆ

โดยทั่วไปในหุ่นยนต์หนึ่งๆนั้นจะประกอบไปด้วยหลายส่วนด้วยกันเช่น ส่วนกลไกของแขน, ส่วนขับเคลื่อน, ส่วนควบคุม และส่วนตรวจรู้ ซึ่งในการวิจัยนี้จะพิจารณาระบบตรวจรู้ โดยเฉพาะระบบตรวจรู้ตำแหน่ง เนื่องจากเป็นส่วนที่ทำให้การควบคุมของแขนหุ่นยนต์สามารถกระทำได้ในลักษณะของวงรอบปิด (Close Loop Control) ทำให้ระบบควบคุมสามารถรับรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ในขณะปฏิบัติงานได้ ส่งผลถึงความแม่นยำในตำแหน่งปฏิบัติงาน แต่ในบางกรณีการควบคุมแบบวงรอบปิดก็สามารถกระทำได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวตรวจรู้ตำแหน่งโดยตรง เช่น ใช้การจับรูปแบบสัญญาณ (Paulse Width Modulation, PWM หรือ Waveform Detection, Wd) ซึ่งใช้กับระบบขับเคลื่อนที่ใช้มอเตอร์แบบ Variable Reluctance (VR) Stepping Motor

ในปัจจุบันแขนหุ่นยนต์ที่ใช้เพื่อการศึกษามักจะมีราคาค่อนข้างแพง ซึ่งจะเห็นได้จากการที่สถาบันการศึกษาต่างๆหลายแห่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถาบันที่อยู่ต่างจังหวัดไม่ค่อยมีแขนหุ่นยนต์ให้ศึกษาหรือใช้งานกันทั้งๆที่การพัฒนาหุ่นยนต์ได้มีมานานแล้วและมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถหรือสนใจทางด้านนี้ก็มีอยู่มาก ในหลายส่วนก็สนใจที่จะพัฒนาหุ่นยนต์ในลักษณะของการประยุกต์ในงานต่างๆ เช่น การพัฒนาวิธีควบคุมให้เหมาะสม, การประยุกต์เพื่อใช้ในงานด้านการเกษตร, หรือการ

พัฒนาให้มีระบบตรวจรู้ด้วยการมอง เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องมีแขนหุ่นยนต์อยู่แล้วส่วนการที่จะออกแบบสร้างแขนหุ่นยนต์ขึ้นมาเลยนั้น มีค่อนข้างน้อยเนื่องจากหุ่นยนต์ประกอบด้วยหลายส่วนด้วยกัน และการพัฒนาแขนหุ่นยนต์ขึ้นมานั้นจะต้องใช้ความรู้ในหลายๆด้าน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ขึ้นมา เพื่อให้การพัฒนาแขนหุ่นยนต์เป็นไปได้อย่างน้อยก็จะเป็นแนวทางให้ผู้ที่คิดจะพัฒนาแขนหุ่นยนต์ขึ้นมาใช้เองนำเอาไปใช้ประโยชน์ได้บ้าง ส่งผลให้การพัฒนาประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ในด้านอื่นๆสามารถดำเนินไปได้อย่างกว้างขวาง

**2 ความหมายของคำว่าหุ่นยนต์**

เราอาจจะให้คำจำกัดความของคำว่า หุ่นยนต์ (Robot) ว่าเครื่องจักรกลที่มีความฉลาด (Intelligent Machine) ซึ่งมีลักษณะที่สำคัญ 2 ประการ คือ

**2.1 คล่องตัวในการเคลื่อนไหว (Versatility)**

โดยการที่สามารถพาตัวเองไปในพื้นที่ว่างต่างๆภายใต้ขอบเขตที่กำหนดได้ ดังนั้นหุ่นยนต์จึงต้องมีโครงสร้างทางกลที่เคลื่อนไหวได้

**2.2 ปรับตัวเองเข้ากับสภาพแวดล้อม (Self Adaptation to the Environment)**

โดยที่สามารถปรับแต่งตำแหน่งและพฤติกรรมได้ด้วยตนเอง เพื่อที่จะเข้าถึงวัตถุที่จะจัดการได้อย่างถูกต้อง

หรืออีกนัยหนึ่ง หุ่นยนต์ หมายถึงอุปกรณ์ทางกลที่สามารถควบคุมได้ด้วยซอฟแวร์ โดยมีตัวตรวจรู้ (Sensor) หนึ่งอย่างหรือมากกว่านั้นเป็นตัวคอยตรวจสอบ และส่งข้อมูลกลับไปยังโปรแกรมเพื่อให้เคลื่อนที่ไปได้ในพื้นที่ทำงานและเข้าจัดการกับเป้าหมายที่กำหนด ในบางครั้งการให้คำนิยามของหุ่นยนต์อาจแตกต่างกันไป ซึ่งในความเป็นจริงแล้วคำจำกัดความของหุ่นยนต์ก็ยังไม่อาจจะไม่ชี้ชัดลงไปถึงขอบเขตและความสามารถได้อย่างถูกต้องตรงจุด ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากความหลากหลายในรูปแบบรวมทั้งประโยชน์ใช้สอยที่มีการวิจัยและพัฒนาออกมาอย่างกว้างขวางนั่นเอง

**3. โครงสร้างของหุ่นยนต์**

โครงสร้างของหุ่นยนต์ประกอบด้วย ตัว(Body), แขน(Arm), และ ข้อมือ(Wrist) ซึ่งโดยทั่วไปตัวหุ่นยนต์จะยึดติดอยู่กับที่หรือมีล้อเลื่อน โดยมีแขนติดกับตัวและที่ปลายแขนจะเป็นข้อมือการเคลื่อนไหวของแขนกระทำโดย หมุน หรือเลื่อนข้อต่อ (Joint) ที่เรียงอยู่ตลอดแนวแขน ทั้ง 3 ส่วนนี้นิยมเรียกว่า Manipulator

**วัตถุประสงค์ของงานวิจัย**

1. เพื่อทำการศึกษาและออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ (Position Sensing System of Robot Manipulator) และระบบตรวจรู้การจำกัดการเคลื่อนที่ (Limitting Sensing System)
2. ออกแบบส่วนเพิ่มเติมสำรองสำหรับการติดตั้งระบบตรวจรู้การสัมผัส (Touch Sensing System) ของแขนหุ่นยนต์ ได้ในกรณีที่มีความจำเป็นต้องใช้
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลดีผลเสียของโพเทนชิออมิเตอร์ (Potentiometer) แบบต่างๆที่จะนำมาใช้เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์
4. เพื่อศึกษาความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวตรวจรู้ตำแหน่งชนิดโพเทนชิออมิเตอร์
5. สร้างระบบตรวจรู้ของแขนหุ่นยนต์ขึ้นมา ให้สามารถส่งข้อมูลของตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ในแต่ละข้อต่อไปยังคอมพิวเตอร์ระดับ Microcomputer IBM AT หรือเทียบเท่า เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์
6. เพื่อสร้างระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรีต้นแบบขึ้นมา เพื่อติดตั้งระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ที่ได้สร้างไว้

**ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ**

1. สามารถนำระบบตรวจรู้ตำแหน่งที่ได้ออกแบบขึ้นมาไปติดตั้งกับแขนหุ่นยนต์ต่างๆได้เพื่อให้การพัฒนาหุ่นยนต์ในประเทศเป็นไปได้โดยไม่ต้องพึ่งเทคโนโลยีจากต่างประเทศอย่างเดียว
2. นำความรู้ที่ได้ไปช่วยในการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมในอุปกรณ์อื่นๆที่ต้องการระบบตรวจรู้ที่คล้ายคลึงกัน

**ขอบเขตของงานวิจัย**

1. ศึกษาและออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ในรูปแบบต่างๆ ที่มีใช้ในปัจจุบันและเลือกใช้รูปแบบที่เหมาะสม สำหรับการพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อการศึกษา
2. ศึกษาเปรียบเทียบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆที่จะนำมาใช้ทำตัวตรวจรู้ตำแหน่ง
3. สร้างระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ซึ่งประกอบด้วยส่วนตรวจรู้ตำแหน่งไม่เกิน 16 จุด และส่วนรับข้อมูลจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ให้สามารถส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ระดับไมโครคอมพิวเตอร์
4. ศึกษาความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวตรวจรู้ที่ใช้ โพเทนชิออมิเตอร์
5. สร้างส่วนรับข้อมูลสำรองสำหรับการติดตั้งตัวตรวจรู้การสัมผัสให้สามารถนำมาใช้ได้ทันที
6. ออกแบบโปรแกรมทดสอบการทำงานของระบบตรวจรู้ตำแหน่งนี้

7. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมที่สมบูรณ์ให้สามารถใช้ได้โดยทั่วไป

# บทที่ 2

# ระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์

ในระบบควบคุมของแขนหุ่นยนต์สามารถแยกออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆได้คือ ระบบที่ไม่มีการป้อนกลับ หรือระบบหุ่นยนต์แบบวงรอบเปิด (Open Loop Robot System) และระบบที่มีการป้อนกลับหรือระบบหุ่นยนต์แบบวงรอบปิด (Close Loop Robot System) ซึ่งระบบที่ไม่มีการป้อนกลับจะเกิดปัญหาคือ ความแม่นยำในตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของระบบขับเคลื่อนและระบบกลไกเป็นหลัก ในขณะที่ระบบที่มีการป้อนกลับจะให้ข้อมูลของการเคลื่อนที่ของแขนในภาพแบบต่างๆกลับไปยังระบบควบคุม ซึ่งทำให้ความแม่นยำในการเคลื่อนที่มีมากกว่าถ้าอุปกรณ์รอบข้างอื่นๆเหมือนกัน ซึ่งอุปกรณ์ป้อนกลับในที่นี้ก็คือตัวตรวจรู้ (Sensor) ของแขนหุ่นยนต์นั่นเอง

ตัวตรวจรู้ของหุ่นยนต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนใหญ่ๆคือ ตัวตรวจรู้สภาวะภายใน (Internal State Sensor) และตัวตรวจรู้สภาวะภายนอก (External State Sensor) ซึ่งตัวตรวจรู้สภาวะภายในทำหน้าที่คอยตรวจวัดตำแหน่งของท่อนแขนหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนไป นั่นก็คือตัวตรวจรู้ตำแหน่งนั่นเอง ส่วนตัวตรวจรู้สภาวะภายนอก จะทำหน้าที่ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถได้รับรู้ลักษณะภายนอกของพื้นที่ทำงาน ทำให้สามารถทำงานในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงได้

## ตัวตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์

การวัดตำแหน่งหรือการตรวจรู้ตำแหน่งที่ใช้ในหุ่นยนต์ เพื่อที่จะส่งข้อมูลของตำแหน่งไปยังระบบควบคุมหรือคอมพิวเตอร์โดยหลักๆแล้วมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ คือ

### 1. รีสอฟเวอร์ (Resolvers)

เป็นอุปกรณ์อนาลอก ที่เอาท์พุทจะแปรผันโดยตรงกับมุมของการหมุนขององค์ประกอบคงที่ (Fix Element) และองค์ประกอบหมุน (Rotating Element) ในรีสอฟเวอร์แบบพื้นฐานจะประกอบไปด้วยขดลวดเดี่ยวบนโรเตอร์ (Rotor) และขดลวดคู่บนสเตเตอร์ (Stator) ซึ่งขดลวดคู่บนสเตเตอร์จะทำมุมกัน 90 องศา เมื่อโรเตอร์มีสัญญาน *Asin(wt)* เข้าไปจะทำให้เกิดแรงดันขึ้นที่ขดลวดของสเตเตอร์ทั้งสอง

$$Vs1(t) = A\sin(wt)\sin\theta$$

และ

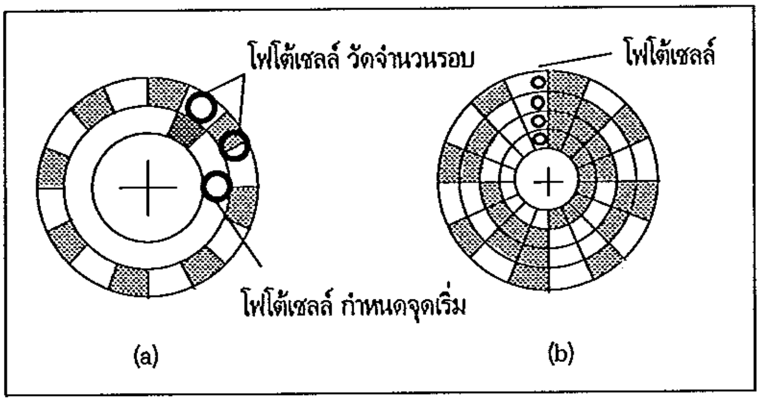
$$Vs2(t) = A\sin(wt)\cos\theta$$

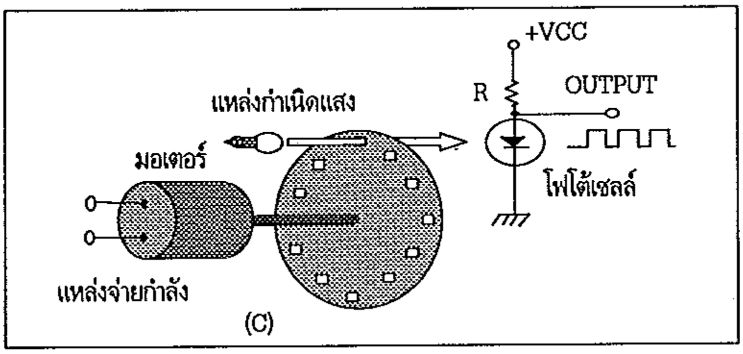
โดยที่ θ เป็นมุมที่โรเตอร์ทำกับสเตเตอร์สัญญาณที่ได้นี้อาจจะนำไปใช้โดยตรง หรือเปลี่ยนเป็นดิจิตอลโดยใช้ ตัวแปลงสัญญาณจากรีสอฟเวอร์เป็นดิจิตอล (Resolving-to-Digital Converter) ปัจจุบันจะไม่ค่อยนิยมใช้รีสอฟเวอร์กันมากนัก

**2. เอนโคดเดอร์ (Encoder)**

เป็นระบบที่ใช้กันมากในปัจจุบันโดยเฉพาะงานที่ต้องติดต่อและควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ หรือระบบดิจิตอล เอนโคดเดอร์แบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือแบบอินครีเมนตัล (Incremental) และแบบสัมบูรณ์ (Absolute)

**2.1 แบบอินครีเมนตัล (Incremental)** คือแบบที่มีแผ่นระหัสกลมไปติดไว้กับแกนของแหล่งจ่ายกำลังหรือแกนหมุนเช่น มอเตอร์(Motor) ซึ่งอาจจะเป็นสเต็ปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor), มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor), อินดักชั่นมอเตอร์ (Induction Motor) และมอเตอร์แบบอื่นๆซึ่งแผ่นนี้จะมีช่องให้แสงผ่านได้ดังนั้นเอาท์พุทที่ได้ก็จะเท่ากับจำนวนรอบของแหล่งจ่ายกำลังคูณจำนวนของช่องใน 1 รอบ ซึ่งความละเอียด (Resolution) ของข้อมูลที่ได้จะเท่ากับจำนวนช่องใน 1 รอบของแผ่นระหัส



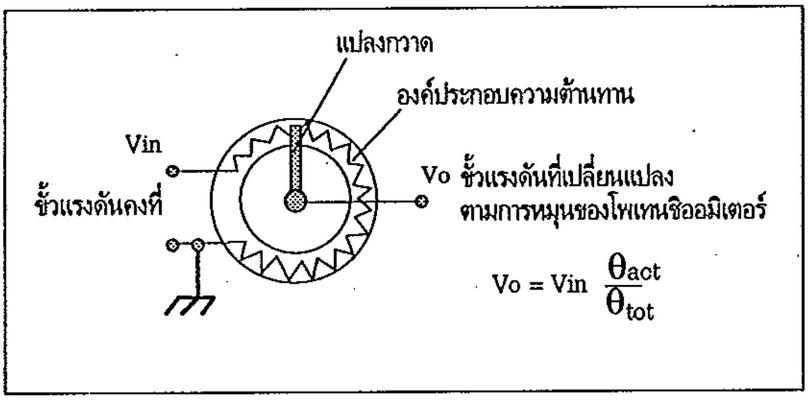




ภาพประกอบ 2.1 แสดงตัวตรวจรู้เอ็นโคดเดอร์ (a) แบบอินครีเมนต้น (b) แบบสัมบูรณ์, และ (c) ตำแหน่ง การติดตั้งกับมอเตอร์

**2.2 แบบสัมบูรณ์ (Absolute)** จะมีลักษณะคล้ายแบบอินครีเมนตัล แต่เพิ่มร่อง (Track) ขึ้นมาและเพิ่มชุดรับส่งทางแสงขึ้นมาเท่าจำนวนร่อง ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นแบบไบนารีจนครบรอบในระบบนี้ข้อมูลที่ได้ออกมาจากตำแหน่งต่างๆจะไม่เหมือนกันนั่นคือจะเพิ่มทีละบิตจนครบรอบแล้วกลับมาเริ่มต้นใหม่ ดังนั้นจึงทำให้ทราบตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งความละเอียด (Resolution) จะมีค่าเท่ากับ $2^n$ โดยที่ n เป็นจำนวนร่องบนแผ่นระหัส

**3. โพเทนชิออมิเตอร์ (Potentiometer, POT)**

เป็นอุปกรณ์ทางด้านอนาลอก ซึ่งแรงดันเอาพุทจะแปรผันโดยตรงกับมุมการหมุนของแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ ดังภาพประกอบ 2.1 ซึ่งโพเทนชิออมิเตอร์โดยทั่วไปมีทั้งแบบเลื่อนแนวตรง (Linear) และแบบหมุน (Rotation) โดยที่ Vo เป็นแรงดันที่ได้จากแปลงตัวนำที่ติดกับแกนหมุน, Vin เป็นแรงดันที่จ่ายให้กับองค์ประกอบความต้านทาน, $\theta_{act}$ เป็นตำแหน่งขณะนั้นของแกนหมุน และ $\theta_{tot}$ เป็นมุมที่มากที่สุดที่แกนหมุนจะเคลื่อนที่ไปได้




ภาพประกอบ 2.2 แสดงโพเทนชิออมิเตอร์และเอาท์พุท

**การพิจารณาข้อดีและข้อเสียของระบบตรวจรู้ตำแหน่งแบบต่างๆ**

ในที่นี้จะทำการพิจารณาการใช้ตัวตรวจรู้แบบเอ็นโคดเดอร์ เนื่องจากมีใช้กันอย่างแพร่หลายมากในตัวตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ในปัจจุบันและพิจารณาแบบโพเทนชิออมิเตอร์ ซึ่งจะเป็นแบบที่ใช้ในการวิจัยนี้ ดังต่อไปนี้

**1. การนำเอนโคดเดอร์มาใช้เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง**

**1.1 ข้อดี**

มีความสะดวกในการออกแบบฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์ ที่ใช้ในการติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ความผิดพลาดเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ สัญญานรบกวนน้อยเนื่องจากเป็นข้อมูลแบบดิจิตอล และความเร็วในการอ่านข้อมูลสูง เนื่องจากสามารถอ่านข้อมูลดิจิตอลได้โดยตรง

**1.2 ข้อเสีย**

คือเอนโคดเดอร์แบบอินครีเมนตัลต้องทำการแปลงจำนวนนับ ให้เป็นตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์อีกทีหนึ่ง ดังนั้นการเริ่มต้นใช้งานจะต้องมีการปรับแต่งกับจุดอ้างอิงทุกครั้งและข้อมูลที่ได้จะไม่สามารถบอกได้โดยตรงว่าข้อมูลที่เปลี่ยนไปเป็นการเคลื่อนที่ในทิศทางใด ต้องอาศัยส่วนอื่นหรือการตรวจรู้เพิ่มเติมมาช่วยเสริม, หรือโดยใช้เอนโคดเดอร์แบบสัมบูรณ์ ซึ่งสามารถบอกเป็นตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ได้โดยตรง แต่เอนโคดเดอร์แบบนี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ทำให้มีความยุ่งยากในการติดตั้งโดยเฉพาะกับระบบที่ต้องการน้ำหนักเบาและขนาดพื้นที่ ที่ใช้ติดตั้งเล็กๆอีกทั้งจำนวนสายสัญญานก็จะมากตามไปด้วย, และความละเอียด (Resolution) ของข้อมูลที่ได้จะถูกจำกัดด้วยจำนวนช่องใน 1 รอบ หรือตามจำนวนร่อง (Track) บนแผ่นระหัส ซึ่งเมื่อต้องการให้มีความละเอียดสูง ๆ จะมีขนาดใหญ่ และจำนวนสายในการส่งข้อมูลก็จะมากตามไปด้วย

โดยปกติจะติดตั้งเอนโคดเดอร์ไว้เพื่อนับจำนวนรอบของแหล่งจ่ายกำลังแบบหมุน เช่น ติดที่แกนของมอเตอร์แต่ในการใช้งานที่มอเตอร์จะจ่ายกำลังผ่านระบบเฟืองเกียร์เพื่อเพิ่มแรงบิด และลดความเร็ว ซึ่งความผิดพลาดจากระบบเฟืองเกียร์จะมีผลต่อข้อมูลที่ได้และในกรณีที่การออกแบบหุ่นยนต์ไม่ได้ทำการออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งเอาไว้ เช่น หุ่นยนต์เพื่อการศึกษา หรือหุ่นยนต์ที่เดิมที่ใช้การควบคุมแบบวงรอบเปิด การปรับปรุงโดยการติดตั้งตัวตรวจรู้จะมีความยุ่งยากมาก โดยเฉพาะถ้าเป็นระบบที่ตัวขับเคลื่อนไม่ใช่แบบหมุน เช่น ระบบไฮดรอลิกซ์, หรือระบบนิวเมติก เป็นต้น เพราะปกติจะทำการติดตั้งเข้ากับแกนที่หมุนได้หรือแกนของมอเตอร์โดยตรงและส่วนสำคัญที่ไม่อาจมองข้ามไปได้คือ ราคาที่สูงมากเมื่อเทียบกับโพเทนชิออมิเตอร์ทำให้มีผลกระทบต่อการพัฒนาหุ่นยนต์อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

**2. การนำโพเทนชิออมิเตอร์มาเป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง**

**2.1 ข้อจำกัด**

- การออกแบบวงจรฮาร์ดแวร์และซอฟแวร์ที่ใช้ติดต่อกับคอมพิวเตอร์ค่อนข้างยุ่งยาก เนื่องจากข้อมูลที่ได้โดยตรงจะเป็นสัญญานอนาลอก ดังนั้นต้องทำการแปลงเป็นดิจิตอลก่อนโดยใช้ตัวแปลงสัญญานอนาลอกเป็นสัญญานดิจิตอล (Analog to Digital Converter, A/D)
- ความเร็วของข้อมูลที่ได้จะถูกจำกัดด้วยความเร็วของ A/D ที่ใช้และความละเอียดก็ถูกจำกัดด้วยจำนวนบิตของ A/D ด้วย
- สัญญานที่ได้ซึ่งมีลักษณะเป็นอนาลอกจะมีปัญหาเรื่องสัญญานรบกวนได้ง่าย

- สภาพเชิงเส้น (Linearity) ของระบบนี้จะถูกจำกัดด้วยคุณภาพขององค์ประกอบความต้านทานของโพเทนชิออมิเตอร์ ซึ่งจะมีความผิดพลาดจากการผลิตได้ รวมทั้งสัญญาณอนาลอกที่ต้องผ่านวงจรทางอนาลอกก่อนเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์จะมีผลต่อความผิดพลาดได้

**2.2 ข้อดี**

- ตัวตรวจรู้แบบที่ใช้โพเทนชิออมิเตอร์ข้อมูลที่ได้ จะเป็นการบอกว่าตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์อยู่ที่ใดเป็นตำแหน่งของมุม (Angular Position) ของแขนหุ่นยนต์จริงๆจึงง่ายในการทราบตำแหน่งโดยรวมของแขนหุ่นยนต์และในขณะเริ่มเปิดเครื่องก็ไม่ต้องปรับกับจุดอ้างอิงก่อน
- ตัวตรวจรู้แบบที่ใช้โพเทนชิออมิเตอร์ข้อมูลที่ได้จะสามารถบอกถึงทิศทางการเคลื่อนที่ได้ โดยพิจารณาจากการเพิ่มหรือลดของค่าที่อ่านได้โดยตรง
- ตัวตรวจรู้แบบที่ใช้โพเทนชิออมิเตอร์แบบนี้มีขนาดค่อนข้างเล็กและน้ำหนักเบา ดังนั้นจึงมีความสะดวกในการติดตั้งบนหุ่นยนต์ขนาดเล็กและมีพื้นที่ในการติดตั้งน้อย
- โดยทั่วไปแล้วโพเทนชิออมิเตอร์จะมีราคาที่ไม่สูงมากนัก และสามารถหาซื้อได้ง่ายในท้องตลาด ดังนั้นจึงทำให้มีความสะดวกในการทำการวิจัยและศึกษาในเรื่องนี้เป็นอย่างมาก

**3. แนวทางการแก้ข้อจำกัดของโพเทนชิออมิเตอร์ที่ใช้ในการวิจัยนี้**

การนำโพเทนชิออมิเตอร์มาใช้ในระบบตรวจรู้ตำแหน่งแม้ว่าจะมีข้อจำกัดดังกล่าวมาแล้ว แต่ก็สามารถแก้ไขให้ลดน้อยลงได้ด้วยเทคนิคต่างๆซึ่งจะใช้ในการวิจัยนี้ อีกทั้งยังสามารถแก้ปัญหาที่เป็นข้อจำกัดบางประการในระบบเอนโคดเดอร์ด้วย ซึ่งแนวทางการปรับแก้ข้อจำกัดเดิมของการนำโพเทนชิออมิเตอร์มาเป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่งพอสรุปได้ดังนี้

- สัญญาณรบกวนที่จะเกิดขึ้นในข้อมูลอนาลอก สามารถป้องกันด้วยเทคนิคการออกแบบระบบสายส่งที่เหมาะสม และทำให้ลดได้โดยการใช้วงจรกรองความถี่เนื่องจากข้อมูลที่ได้มีลักษณะเป็นแบบสัญญาณกระแสตรงที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณตามมุมของโพเทนชิออมิเตอร์ นั่นคือจะเป็นสัญญาณความถี่ต่ำ และสัญญาณรบกวนมักเป็นสัญญาณในช่วงความถี่สูง
- ความเร็วของสัญญาณที่ได้ก็สามารถเพิ่มโดยการเลือกใช้ A/D ที่มีความเร็วสูง และความละเอียดก็สามารถเพิ่มโดยเลือกใช้ A/D ที่มีจำนวนบิตมากๆ
- ในงานวิจัยนี้จะทำการออกแบบการติดตั้งตัวตรวจรู้ ไว้ที่ตำแหน่งข้อต่อของแขนหุ่นยนต์โดยตรง ดังนั้นในกรณีที่การขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์กระทำโดยผ่านระบบเฟืองเกียร์ใดๆ ความผิดพลาดในระบบเฟืองส่งกำลังที่ส่งต่อกันจะไม่มีผลต่อความผิดพลาดของตำแหน่งโดยตรง จึงทำให้การออกแบบระบบจ่ายกำลังและระบบเกียร์ไม่จำเป็นต้องให้มีความแม่นยำมากนัก ซึ่งทำลดปัญหาลงไปได้มาก
- และจากการที่การติดตั้งตัวตรวจรู้แบบที่ใช้โพเทนชิออมิเตอร์ เพื่อวัดมุมการเคลื่อนที่ของท่อนแขนโดยตรงทำให้การติดตั้งตัวตรวจรู้กระทำได้เหมือนๆกันในหุ่นยนต์แบบต่างๆกัน หรือที่ใช้ระบบขับเคลื่อนใดๆที่ไม่ได้ทำการออกแบบการติดตั้งระบบตรวจรู้มาก่อน

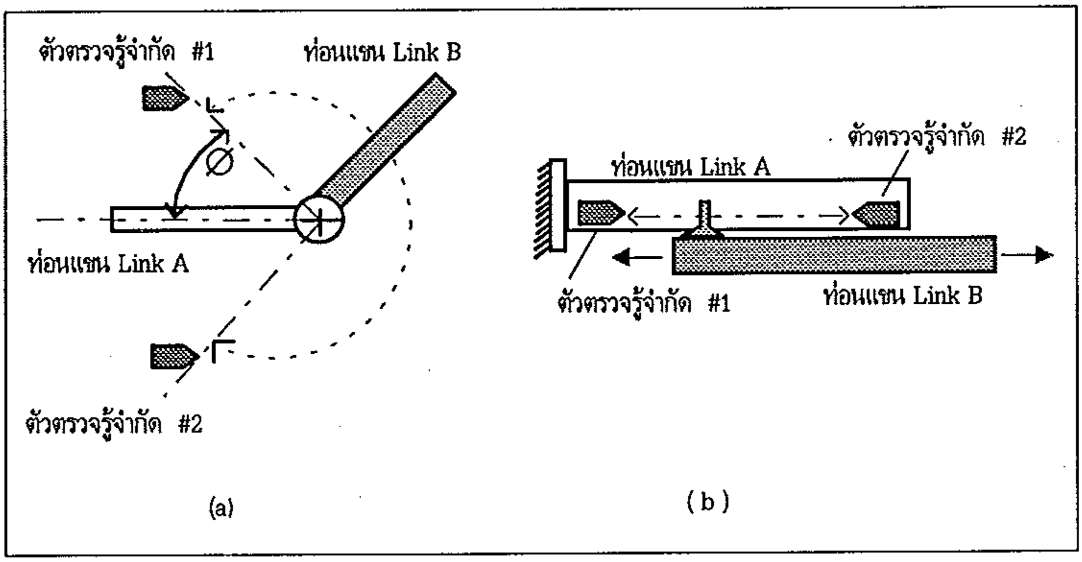
- ปัญหาที่สำคัญคือ ความยุ่งยากในการออกแบบฮาร์ดแวร์ที่ใช้ติดต่อและซอฟแวร์ที่ใช้สั่งงานและอ่านข้อมูล ก็สามารถลดลงได้โดยการใช้ข้อมูลจากการวิจัยนี้ ทำให้การพัฒนาสามารถทำได้ง่ายขึ้น

**ตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สภาวะภายนอก**

ตัวตรวจรู้สภาวะภายนอก (External State Sensor) จะทำหน้าที่ช่วยให้หุ่นยนต์ได้รับรู้ลักษณะภายนอกของพื้นที่ทำงานได้ทำให้สามารถทำงานในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงได้โดยใช้ ทางภาพ (Vision Sensor), แรงและทอร์ก (Force and Torque Sensor), หรือสัมผัส (Touch Sensor) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะออกแบบให้สามารถติดตั้งตัวตรวจรู้สัมผัสได้ด้วย โดยติดตั้งเพิ่มเติมตามความต้องการ

**1. ตัวตรวจรู้การจำกัดการเคลื่อนที่ (Limitting Sensor)**

ใช้เป็นตัวกำหนดขอบเขตสูงสุดที่แขนหุ่นยนต์นั้นจะเคลื่อนที่ไปได้ในทิศทางการเคลื่อนที่ เมื่อเทียบกับจุดอ้างอิงหนึ่ง ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นอีกท่อนแขนหนึ่งที่อยู่ติดกันในกรณีที่เป็นข้อต่อแบบหมุน ตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่จะเป็นตัวจำกัดมุมของการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ และในกรณีที่เป็นข้อต่อแบบเลื่อนในแนวตรง ตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่จะเป็นตัวจำกัดระยะทางที่แขนจะเลื่อนไปได้ ดังภาพประกอบ 2.1




ภาพประกอบ 2.3 แสดงตำแหน่งการติดตั้งตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์
(a) แบบหมุน(Rotation) , (b) แบบเลื่อนในแนวตรง (Linear)

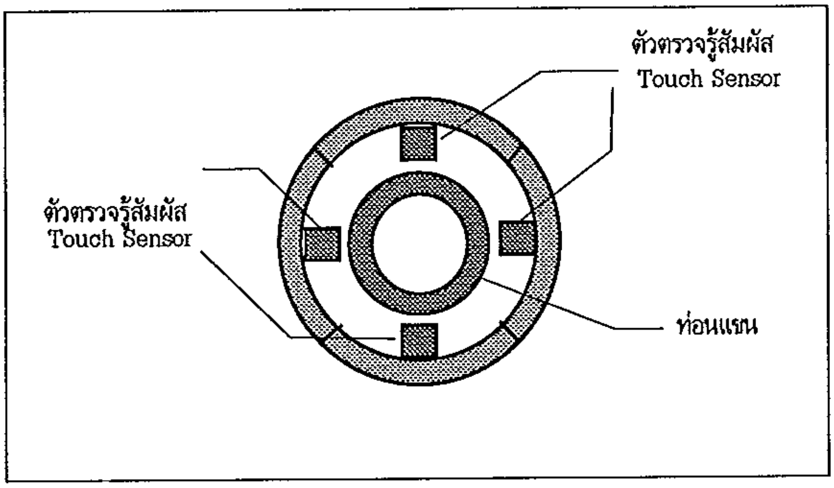
ในบางกรณีอาจจะมีการใช้ตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่เป็นตัวบ่งบอกจุดเริ่มต้นของแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้การทำงานของหุ่นยนต์ได้เริ่มต้นจากจุดอ้างอิงเดิมเสมอ ซึ่งอาจจะนำไปใช้ในระบบตรวจรู้ตำแหน่งที่เป็นเอนโคดเดอร์แบบอินครีเมนต์ัล ซึ่งเป็นระบบที่รู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์โดยอ้างอิงตำแหน่งก่อนหน้าโดย

เมื่อเปิดเครื่องใหม่จะไม่รู้ตำแหน่งที่แท้จริงในตำแหน่งนั้นของแขนหุ่นยนต์เลย ต้องเทียบกับจุดอ้างอิงที่กำหนดก่อนเสมอ

พิจารณาข้อต่อแบบหมุนดังในภาพประกอบ 2.1(a) ซึ่งจากภาพตัวตรวจรู้จำกัด #1 จะเป็นตัวกำหนดค่ามุมน้อยที่สุด (Ømin) ของการหมุนของท่อนแขน B เมื่อเทียบกับท่อนแขน A และ ตัวตรวจรู้จำกัด #2 จะเป็นตัวกำหนดค่ามุมมากที่สุด (Ømax) ของการหมุนกวาดของท่อนแขน B เมื่อเทียบกับท่อนแขน A ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการเคลื่อนที่มากเกินไปอาจจะทำให้ระบบกลไกของแขนหุ่นยนต์เสียหายได้ เนื่องจากไปกระแทกกับอุปกรณ์รอบข้างที่อยู่นอกขอบเขตทำงาน หรือเกิดการกระทบกับส่วนอื่นของแขนหุ่นยนต์

**2. ตัวตรวจรู้สัมผัส (Touching Sensor)**

ในบางระบบของหุ่นยนต์ที่การทำงานของแขนของหุ่นยนต์อยู่ในพื้นที่ ที่สภาพแวดล้อมมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา เช่น หุ่นยนต์ตรวจสอบ (Inspection Robot) หรือหุ่นยนต์ที่ทำงานในสนามที่มีสภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอนในขณะที่แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป อาจจะปะทะกับสิ่งกีดขวางในทิศทางการเคลื่อนที่ได้ ซึ่งระบบตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่อาจจะยังมิได้ทำงานเนื่องจากยังไม่ถึงขอบเขตที่กำหนด ก็จะทำให้แขนหุ่นยนต์หรือสิ่งกีดขวางนั้นเสียหายได้ ดังนั้นตัวตรวจรู้สัมผัสจึงเป็นเสมือนเปลือกนอกของแขนกลที่คอยรับสัมผัสเมื่อแขนกลนั้นๆชนสิ่งกีดขวาง แต่ระบบนี้อาจจะไม่จำเป็นถ้าแขนหุ่นยนต์นั้นทำงานตามหน้าที่ ที่แน่นอนในพื้นที่และสิ่งรอบข้างที่ไม่เปลี่ยนแปลง ภาพประกอบ 2.2 แสดงการติดตั้งตัวตรวจรู้สัมผัสล้อมรอบแขน




ภาพประกอบ 2.4 แสดงภาคตัดขวางของการติดตั้งระบบตัวตรวจรู้สัมผัส 4 จุดล้อมรอบท่อนแขน

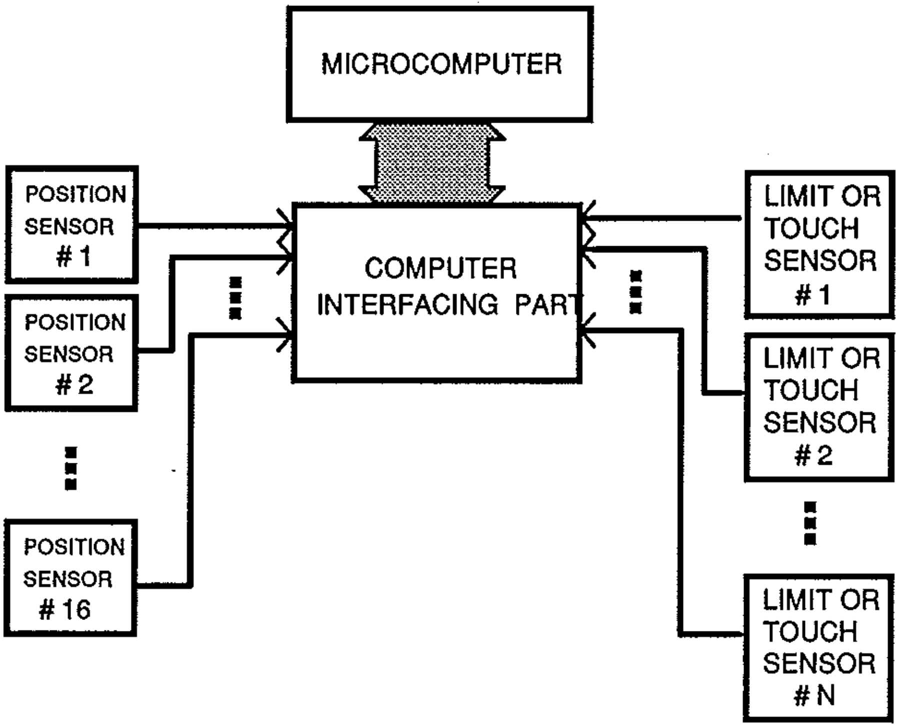
จากภาพเป็นการแสดงภาคตัดขวางซึ่งท่อนแขนจริงๆจะอยู่แกนในโดยมีกรอบ 4 ชิ้น อยู่ล้อมท่อนแขน และมีตัวตรวจรู้ติดระหว่างกลางของทั้งสองส่วน ในการทำงานเมื่อกรอบรอบแขนชิ้นใดกระทบกับวัตถุ ก็จะทำให้ตัวตรวจรู้ทำงานซึ่งจะส่งข้อมูลไปยังระบบคอมพิวเตอร์ได้รับรู้

ระบบตรวจรู้สัมผัสของแขนหุ่นยนต์มี 2 แบบคือ แบบไบนารี (Binary) และแบบอนาลอก (Analog) ซึ่งแบบไบนารีคือแบบที่ข้อมูลที่ส่งมาบอกให้ทราบว่ามีการสัมผัสหรือไม่ ในขณะที่แบบอนาลอกจะบอกให้ทราบถึงขนาดของแรงที่มากระทบด้วย โดยปกติจะนิยมนำไปติดไว้ที่บริเวณมือของหุ่นยนต์เพื่อให้สามารถรู้น้ำหนักของการจับวัตถุ ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบไว้เพื่อรองรับระบบตรวจรู้สัมผัสแบบไบนารีซึ่งต้องการข้อมูลแบบสวิทช์เปิด/ปิด เท่านั้น

# บทที่ 3

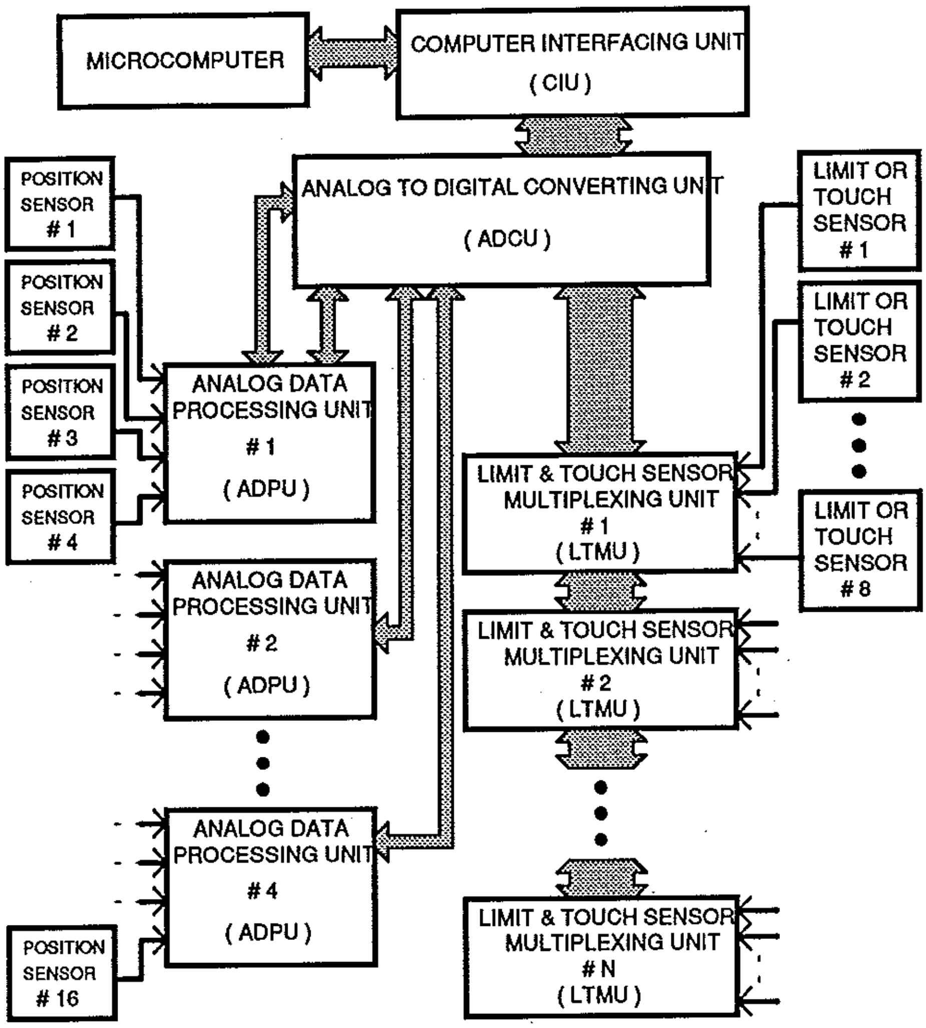
## รายละเอียดด้านฮาร์ดแวร์

ในโครงงานนี้จะใช้ระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ วัดตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ในขณะปฏิบัติงานโดยที่จะทำการติดตั้งตัวรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ไว้บริเวณข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งปกติจะมีมากกว่า 1 ชุด ข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งกลับไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อบอกตำแหน่งและสภาวะของแขนในขณะนั้นๆและข้อมูลแต่ละจุดของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สัมผัสจะถูกส่งกลับไปยังคอมพิวเตอร์ในลักษณะของการมัลติเพลกซ์เพื่อลดจำนวนของสายและเพิ่มความสะดวกในการติดตั้ง ในขณะที่ข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจรู้ตำแหน่งจะถูกนำเข้ามามัลติเพลกซ์ และทำการแปลงข้อมูลจากอนาลอกเป็นดิจิตอล โดยมีลักษณะดังแผนภาพแบบบล็อกในภาพประกอบ 3.1




ภาพประกอบ 3.1 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของแนวความคิดระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบวงจร และพัฒนาระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ขึ้นมามีลักษณะดังแผนภาพแบบบล็อกในภาพประกอบ 3.2 และ ภาพประกอบ 3.3




ภาพประกอบ 3.2 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของส่วนต่างๆของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์และความสัมพันธ์

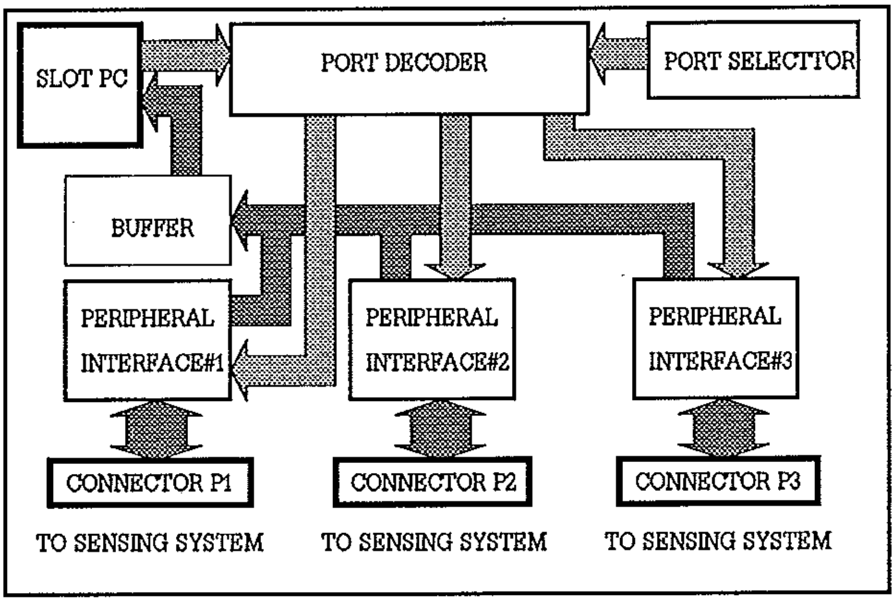
จากแผนภาพแบบบล็อกในภาพประกอบ 3.2 ได้แยกส่วนต่างๆของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ออกเป็น 7 ส่วน ดังไปนี้ คือ

1. **หน่วยเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ (Computer Interfacing Unit ,CIU)**
2. **หน่วยแปลงสัญญานอนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converting Unit, ADCU)**
3. **หน่วยจัดการข้อมูลอนาลอก (Analog Data Processing Unit,ADPU)**
4. **หน่วยมัลติเพล็กสัญญานจำกัดการเคลื่อนที่และสัมผัส (Limiting And Touching Sensor Multiplexing Unit, LTMU)**
5. **หน่วยตรวจรู้ตำแหน่ง (Position Sensor Unit, PSU)**
6. **หน่วยตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ (Limiting Sensor Unit, LSU)**

**7. หน่วยตรวจรู้สัมผัส (Touching Sensor Unit, TSU)**

**1. หน่วยเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ (Computer Interfacing Unit ,CIU)**

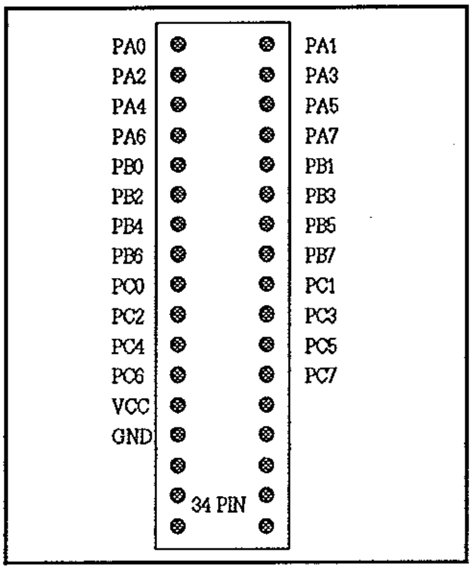
ในที่นี้ส่วนของหน่วยเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์นี้ จะทำหน้าที่เป็นตัวถอดรหัสตำแหน่งของพอร์ต (Port Decoder) ที่ได้จากการระบุแอดเดรสในการสั่งงานจากคอมพิวเตอร์ไปควบคุมหรืออ่านข้อมูลจากส่วนอื่นๆ ในระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งระบบถอดรหัสตำแหน่งของพอร์ตจะออกแบบให้อยู่บนแผ่นวงจรพิมพ์ที่เสียบอยู่บนช่องเสียบขยายของคอมพิวเตอร์ โดยที่ส่วนนี้จะประกอบด้วยอุปกรณ์ทางลอจิกสำหรับถอดระหัส, บัฟเฟอร์(Buffer) หรือแลชเชอร์ (Latcher) และตัวเชื่อมโยงอุปกรณ์รอบข้าง (Peripheral Interface) เป็นหลัก ดังนั้นการจะติดต่อกับส่วนอื่นๆของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์จึงทำได้โดยการต่อสายสัญญานออกจากส่วนนี้ ทำให้สะดวกในการปรับแต่งในส่วนอื่นๆที่สามารถกระทำได้จากภายนอกเครื่องคอมพิวเตอร์ ข้อมูลโดยละเอียดของส่วน CIU มีลักษณะดังแผนภาพแบบบล็อกดังภาพประกอบ 3.3




ภาพประกอบ 3.3 แสดงหน่วยเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์ (CIU)

ส่วน Slot PC ในที่นี้ เป็นขั้วสัญญานขนาด 62 ขา ซึ่งเป็นแผงวงจรพิมพ์ (PCB) 2 หน้าไว้สำหรับเสียบลงบนช่องขยายของคอมพิวเตอร์ ส่วน Decoder ประกอบด้วย ไอซี TTL เบอร์ 74LS139, 74LS245 คอยแปลระหัสควบคุมจากคอมพิวเตอร์ ร่วมด้วยส่วน Port Selector ซึ่งประกอบด้วยไอซี เบอร์ 74LS688 และ DIP Switch เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเลือกได้ว่าต้องการเขียนให้ส่งข้อมูลทางพอร์ตใด ซึ่งรายละเอียดในการเลือกในส่วนของ Buffer นี้จะเป็นไอซีเบอร์ 74F245 เพื่อรับ และแลชข้อมูลจากตัวเชื่อมโยงอุปกรณ์รอบข้าง ซึ่งในที่นี้ใช้ไอซีเบอร์ 8255 ซึ่งสัญญานนี้จะถูกส่งต่อไปยังส่วน Connector ซึ่งเป็นตัวที่จะติดต่อไปยังส่วนอื่นใน

ระบบตรวจรู้ที่พัฒนานี้โดยที่ลักษณะของ Connector จะมีลักษณะดังภาพประกอบ 3.4 ซึ่งเป็นขั้วสัญญาน ขนาด 34 ขา โดยมีแหล่งจ่ายกำลัง (Vcc,Gnd) ให้ใช้ในภาคถัดไปด้วย Connector นี้นอกจากจะใช้ส่งและรับข้อมูลติดต่อกับระบบตรวจรู้แล้ว ยังใช้เป็นทางผ่านของการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงในภาคขับของระบบขับเคลื่อนด้วย สำหรับวงจรไฟฟ้าโดยละเอียดของหน่วยเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์นี้จะอยู่ในภาคผนวก




ภาพประกอบ 3.4 แสดงขั้วต่อ (Connector) ที่ต่อจากส่วนเชื่อมโยงคอมพิวเตอร์

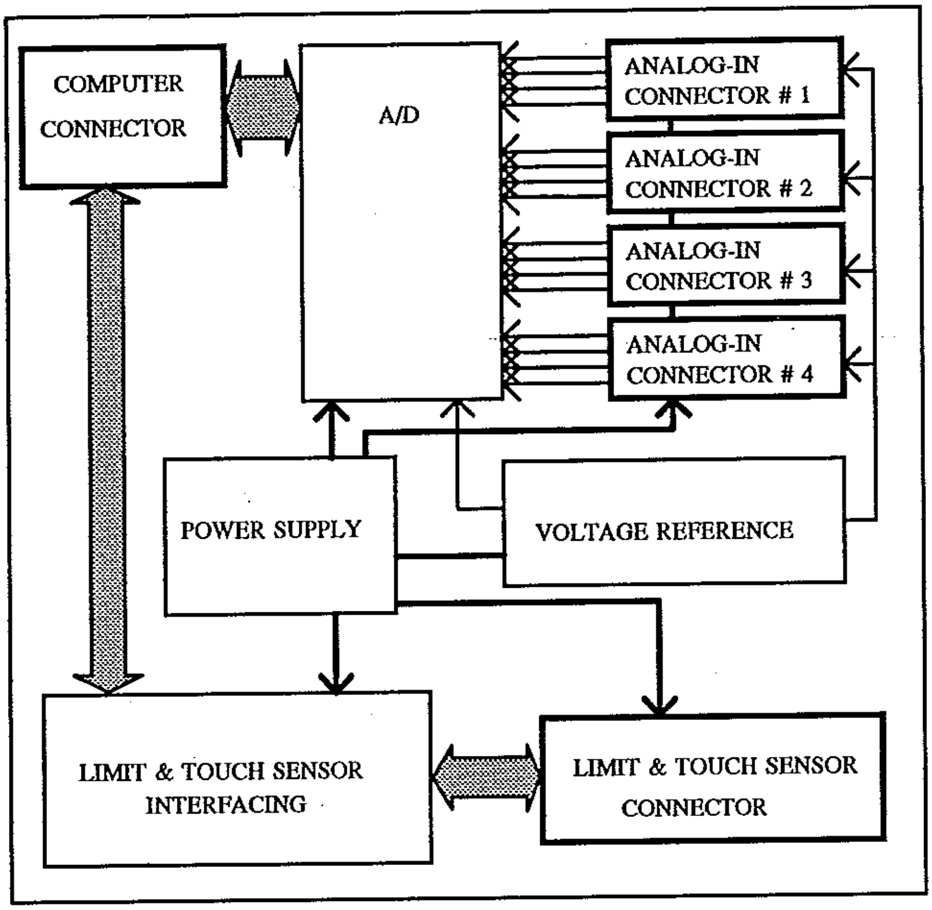
**2. หน่วยแปลงสัญญานอนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converting Unit, ADCU)**

ในส่วนของ ADCU คือส่วนที่จัดเป็นหัวใจของระบบตรวจรู้นี้ เป็นส่วนที่แปลงข้อมูลอนาลอกที่ได้จากตัวตรวจรู้ และเก็บข้อมูลดิจิตอลส่งผ่าน CIU ไปยังระบบคอมพิวเตอร์ อีกทั้งยังเป็นส่วนเชื่อมโยงระหว่างระบบตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และสัมผัสของแขนหุ่นยนต์อีกด้วย ซึ่งมีลักษณะดังภาพประกอบ (3.5)

สามารถแยกออกเป็นส่วนย่อยๆ ได้ดังนี้

**2.1 ส่วนแปลงสัญญานอนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog To Digital Converter, A/D)**

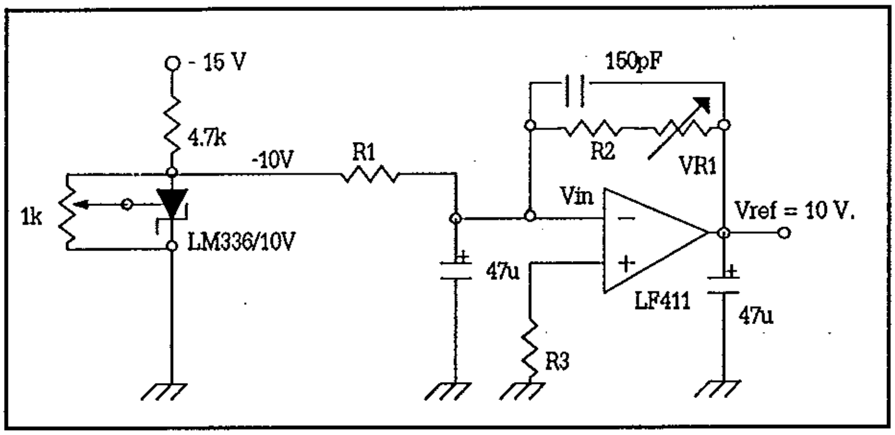
ส่วนย่อยนี้จัดว่าเป็นส่วนหลักของ ADCU และเป็นหัวใจของทั้งระบบเนื่องจากเป็นตัวที่ใช้แปลงสัญญานจากตัวตรวจรู้ตำแหน่ง ซึ่งเป็นสัญญานอนาลอกให้เป็นสัญญานดิจิตอลที่สามารถรับรู้และประมวลผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ได้ ในที่นี้ได้ใช้ไอซีเบอร์ SDM862 ของบริษัท Burr Brown เนื่องจากสามารถมัลติเพลกซ์อินพุทที่เป็นสัญญานอนาลอกได้ 16 ช่องสัญญาน เข้ามาแปลงเป็นสัญญานดิจิตอลขนาด 12 bit และมีความเร็วในการแปลงสัญญานสูง คือ 3300 ข้อมูลต่อวินาที โดยการทำงานทุกส่วนจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งส่งผ่านมาทาง CIU ในการออกแบบได้กำหนดให้สัญญานอนาลอกอินพุทอยู่ในระดับแรงดัน 0-10 volt และ ทำการแปลงเป็นข้อมูลทางดิจิตอลได้ เป็น 000h - FFFh (12 bit)




ภาพประกอบ 3.5 แสดงหน่วยแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (Analog to Digital Converting Unit, ADCU)

**2.2 ส่วนแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage)**

เป็นส่วนที่ใช้สำหรับสร้างแรงดันอ้างอิงเพื่อจ่ายให้กับตัวตรวจรู้ตำแหน่ง ที่เป็นโพเทนชิออมิเตอร์ ดังนั้นในส่วนแรงดันอ้างอิงจะถูกออกแบบให้ใช้ไอซีเบอร์ LM336/10V ซึ่งจัดเป็นไอซีที่ใช้ทำแรงดันอ้างอิงที่มีความเที่ยงสูงแล้วมาทำการปรับระดับสัญญาณโดยใช้ไอซีเบอร์ LF411 ซึ่งเป็นไอซีออปแอมป์ประเภทที่คุณสมบัติจะเปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อมต่ำมาก อีกทั้งยังทำให้สามารถจ่ายกระแสได้มากยิ่งขึ้นด้วย ซึ่งทั้งนี้เพื่อให้ได้แรงดันอ้างอิงที่จะป้อนให้กับตัวตรวจรู้ตำแหน่งที่มีความคงที่ตลอดการใช้งานมีลักษณะ ดังภาพประกอบ (3.6) ซึ่งในที่นี้ได้มีการเพิ่มเติมอุปกรณ์ที่จะทำให้แรงดันคงที่ยิ่งขึ้นและลดสัญญาณรบกวนจากความถี่สูงลงไปด้วย และมีการต่อตัวเก็บประจุค่า 150pF เพื่อให้เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low Pass Filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวนด้วย




ภาพประกอบ 3.6 แสดงวงจรแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage)

จากภาพประกอบ 3.6 ออปแอมป์เบอร์ LF411 เป็นออปแอมป์ชนิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมต่ำ (Low drift Opamp) ได้ถูกนำมาต่อเป็นวงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) จากภาพจะได้ว่า Vin จะมีค่าเท่ากับ -10 Volt จากสมการเอาทพุท์ของวงจรขยายแบบกลับเฟส จะมีค่าเป็น

$$Vref = Vo = -\frac{(VR+R2)}{R1} x\ Vin = 10\ V.$$

อัตราขยายที่ต้องการ คือ (-1)

ดังนั้นในที่นี้ ใช้ R1 = 50k, R2 = 49k และ VR = 5k

ซึ่งอัตราขยายที่ได้จะมีค่าใกล้เคียง -1 เท่า ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงใช้การปรับค่าตัวต้านทานเปลี่ยนค่าได้ (VR) เพื่อให้ได้ค่า Vref ใกล้เคียง 10 Volt มากที่สุด

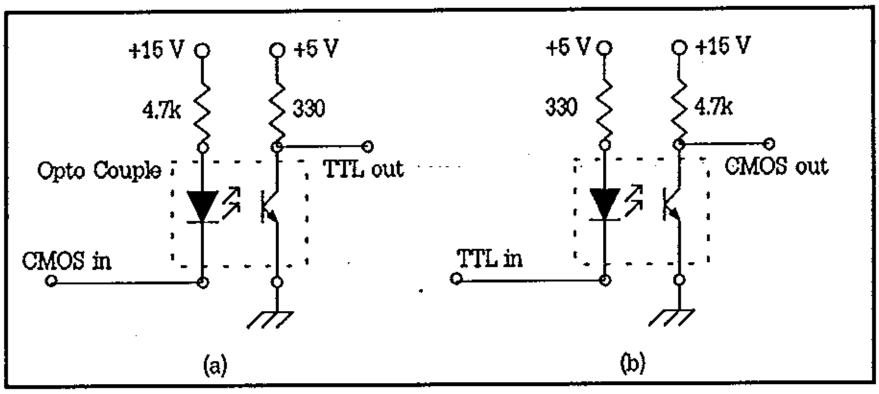
**2.3 ส่วนเชื่อมโยงสัญญานจำกัดการเคลื่อนที่และสัญญานสัมผัส (Limitting and Touching Sensor Interfacing)**

เป็นส่วนที่ส่งและรับข้อมูลจากระบบตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และระบบตรวจรู้สัมผัส ในที่นี้ทำหน้าที่แยกออกเป็น 3 อย่าง คือ

- รับสัญญานกระตุ้นเมื่อตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ หรือตัวตรวจรู้สัมผัสตัวใดตัวหนึ่งได้รับการกระตุ้น (มีสภาวะ ON)

- ส่งสัญญานควบคุมจากคอมพิวเตอร์ไปยังส่วน LTMU เพื่อใช้ในการเลือกสัญญานจากตัวตรวจรู้ต่างๆที่ต่ออยู่กับ LTMU ในลักษณะของการมัลติเพลกซ์ทำให้สามารถแยกแยะตำแหน่งของตัวตรวจรู้ที่ถูกกระตุ้นได้

- รับสัญญาณที่แสดงสถานะของตัวตรวจรู้ต่างๆที่ต่ออยู่กับ LTMU เพื่อส่งไปยังคอมพิวเตอร์ให้ทำการวิเคราะห์ต่อไป




ภาพประกอบ 3.7 แสดงการแยกและเปลี่ยนระดับสัญญาณจาก (a) 15 Volt (CMOS) เป็น 5 Volt (TTL) และ (b) 5 volt (TTL) เป็น 15 Volt (CMOS)

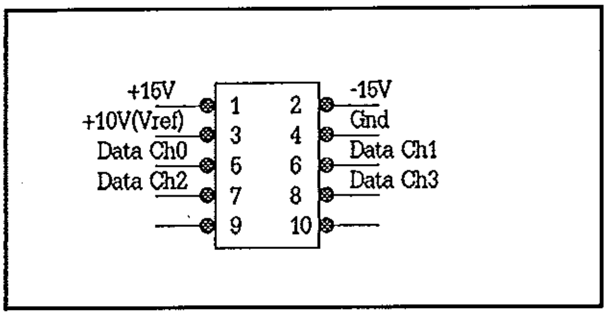
หลักการโดยรวมคือ ปกติคอมพิวเตอร์จะถูกสั่งให้อ่านข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจรู้ตำแหน่งอยู่ตลอดเวลาและอาจจะมีการควบคุมภาคขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์หรือการวิเคราะห์ต่างๆไปด้วย ในขณะที่แขนหุ่นยนต์ถูกใช้งาน แต่เมื่อมีการกระตุ้นจากการที่ตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่หรือจากตรวจรู้สัมผัสที่พบว่ามีการกระทบสิ่งกีดขวางซึ่งก็คือ การทำให้มีสภาวะทำงาน (ON) จะทำให้มีสัญญาณกระตุ้นส่งกลับไปยังคอมพิวเตอร์ซึ่งจะทำให้ระบบคอมพิวเตอร์ข้ามไปตรวจสอบตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สัมผัสอีกครั้งว่าตัวตรวจรู้ตัวใดทำงานโดยการควบคุม และผลของข้อมูลจะผ่านทางส่วนของส่วนเชื่อมโยงสัญญาณจำกัดการเคลื่อนที่นี้ โดยจะเป็นการแยกสัญญาณ (Isolate) โดยใช้ตัวเชื่อมทางแสง (Opto Couple) ก่อนที่จะส่งและรับสัญญาณจาก LTMU ผ่านทางขั้วต่อสัญญาณเข้ามาและจะเปลี่ยนสัญญาณ TTL ขนาด 5 Volt เป็นสัญญาณ CMOS ขนาด 15 Volt เพื่อส่งไปควบคุมและสั่งงาน LTMU ซึ่งเป็นวงจร CMOS และใช้เปลี่ยนสัญญาณ 15 Volt (CMOS) เป็น 5 Volt (TTL) จากข้อมูลที่อ่านจาก LTMU มีลักษณะวงจรดังภาพประกอบ 3.7

**2.4 ขั้วต่อสัญญาณอนาลอก (Analog-In Connector)**

เป็นส่วนที่ใช้เชื่อมต่อกับ ADPU ซึ่งรับข้อมูลมาจากตัวตรวจรู้ตำแหน่งโดยที่ 1 จุดของขั้วต่อสัญญาณนี้ จะรับอนาลอกอินพุทได้ 4 ช่องสัญญาณ นั่นคือรับข้อมูลจากตัวตรวจรู้ตำแหน่งได้ 4 ตัวส่งไปยังตัว A/D เพื่อทำการแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล และบนแผ่นวงจรพิมพ์ที่ออกแบบไว้สำหรับ ADCU นี้จะมีขั้วต่อสัญญาณอนาลอกทั้งหมด 4 ชุดทำให้รับอินพุทได้ทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณด้วยกันซึ่งเป็นขั้วต่อสัญญาณขนาด 10 ขา โดยมีส่วนของแรงดันอ้างอิงและแหล่งจ่ายกำลัง +15,-15 Volt ด้วยดังภาพประกอบ 3.8

ฝ่ายหอสมุด
คุณหญิงหลง อรรถกระวีสุนทร





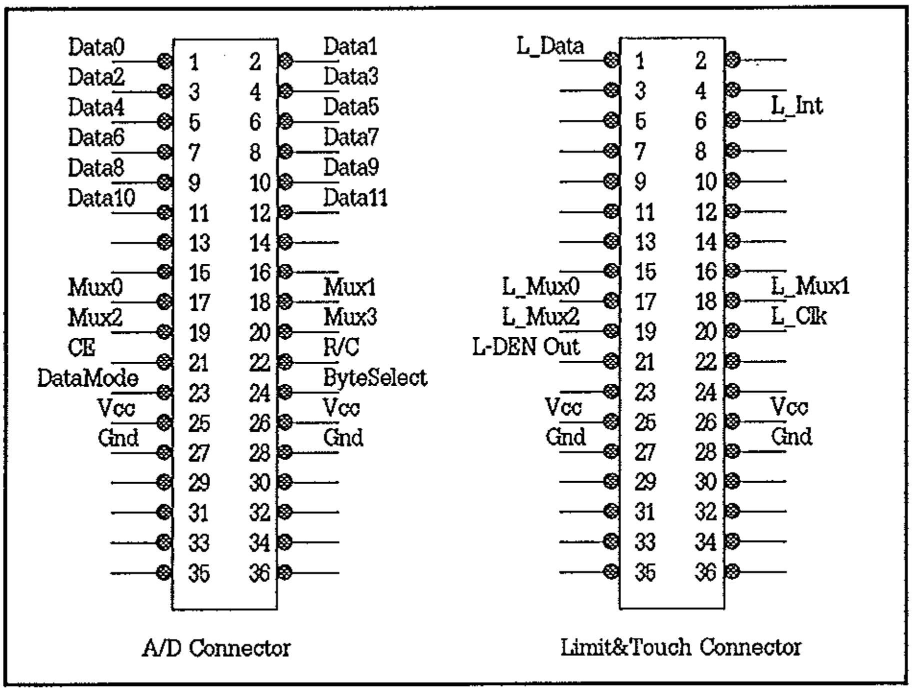

ภาพประกอบ 3.8 แสดงส่วนขั้วต่อสัญญาณอนาลอกด้านเข้า (Analog-In Connector)

**2.5 ขั้วต่อสัญญาณกับคอมพิวเตอร์ (Computer Connector)**

เป็นส่วนที่จะต่อสายสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งข้อมูลที่เข้าและออกจากคอมพิวเตอร์เมื่อผ่านส่วน CIU แล้วจะผ่านทางขั้วต่อสัญญาณนี้ทั้งหมดอันประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือ

- ข้อมูลทางด้านดิจิตอลจาก A/D ซึ่งเป็นข้อมูลจากตัวตรวจรู้ตำแหน่งที่ได้รับการแปลงมา
- ข้อมูลจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สัมผัส
- สัญญาณควบคุมและสั่งงานจากคอมพิวเตอร์ไปยังส่วนต่างๆของระบบตรวจรู้
- แหล่งจ่ายกำลังจากของคอมพิวเตอร์เพื่อจ่ายให้กับวงจรทางด้านดิจิตอลซึ่งมีขนาด +5 volt

ดังแสดงในภาพประกอบ 3.9




ภาพประกอบ 3.9 แสดงขั้วต่อสัญญาณด้านคอมพิวเตอร์ (Computer Connector)

**2.6 แหล่งจ่ายกำลังไฟ (Power Supply)**

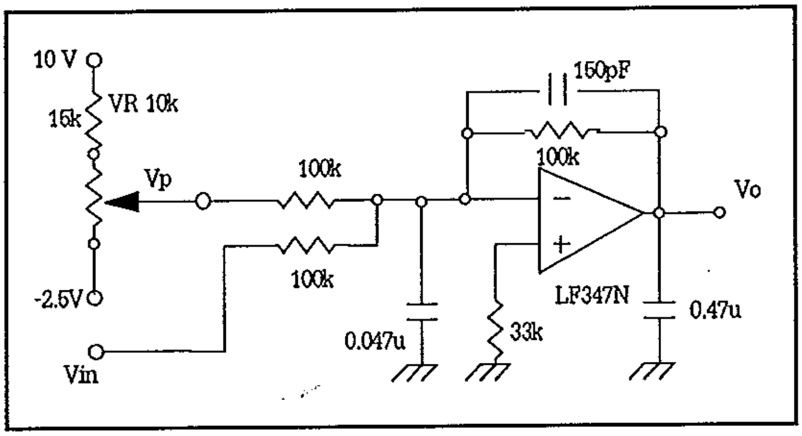
ในการจ่ายแรงดันไฟให้กับอุปกรณ์ต่างๆโดยเฉพาะ A/D เนื่องจากจำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด +15 volt และ -15 volt ซึ่งไม่สามารถดึงมาจากภาคจ่ายไฟของคอมพิวเตอร์ได้ ดังนั้นในส่วนนี้จึงใช้หม้อแปลงไฟที่แปลงไฟ AC ขนาด 220 volt เป็น 15-0-15 volt แล้วใช้ไอซีเบอร์ 7815 และ 7915 ปรับให้ได้ไฟตรงขนาด +15 volt และ -15 volt เพื่อจ่ายให้กับวงจรต่างๆ

**3. หน่วยจัดการสัญญาณอนาลอก (Analog Data Processing Unit, ADPU)**

ในส่วนของ ADPU นี้จัดเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างตัวตรวจรู้กับ A/D ซึ่งจะมีหน้าที่ปรับแต่งสัญญาณให้เหมาะสมก่อนส่งเข้าสู่ A/D และส่งไปยังโพเทนชิออมิเตอร์หน้าที่โดยหลักแบ่งออกได้ 4 ส่วน คือ

**3.1 ส่วนปรับศูนย์ (Zero (Offset) Adjustment)**

มีหน้าที่ปรับค่าสัญญาณจากตัวตรวจรู้ตำแหน่งให้เป็นศูนย์ เมื่อแกนของตัวตรวจรู้อยู่ในตำแหน่งที่ควรจะส่งสัญญาณค่าศูนย์ออกมา ซึ่งโดยปกติตามหลักการและการออกแบบเมื่อตัวตรวจรู้ถูกหมุนไปยังตำแหน่งที่เป็นจุดต่ำสุดสัญญาณซึ่งเป็นอนาลอกที่ภาคอินพุทของ A/D ควรจะเป็นศูนย์ แต่ในทางปฏิบัติแล้วค่าเหล่านี้จะไม่เป็นศูนย์ อันอาจจะเนื่องมาจากแรงดันออฟเซ็ต (Offset Voltage) ของออปแอมป์ที่ใช้หรือการปรับตั้งตำแหน่งของตัวตรวจรู้ตำแหน่งไม่สามารถทำให้เป็นศูนย์ได้เนื่องจากข้อจำกัดของกลไก




ภาพประกอบ 3.10 แสดงส่วนปรับศูนย์ (Zero Adjustment)

ดังนั้นในที่นี้จึงใช้ลักษณะของวงจรรวมสัญญาณ (Summing Amplifier) ที่มีการบวกค่าแรงดันเข้ากับสัญญาณที่มาจากตัวตรวจรู้ตำแหน่งเพื่อ กด หรือ ยก สัญญาณนี้ ให้เป็น ศูนย์ หรือมีค่าตามต้องการ

จากภาพสัญญาณจากโพเทนชิออมิเตอร์ จะถูกต่อมายังบอร์ดนี้ได้เป็น Vin และที่ ตำแหน่ง Vp จะสามารถปรับค่าแรงดันได้ระหว่าง -2.5 Volt ถึง +7.5 Volt โดยที่ วงจรนี้จะมีอัตราขยายเป็น 1 และสัญญาณขาออกจะมีค่าเป็น

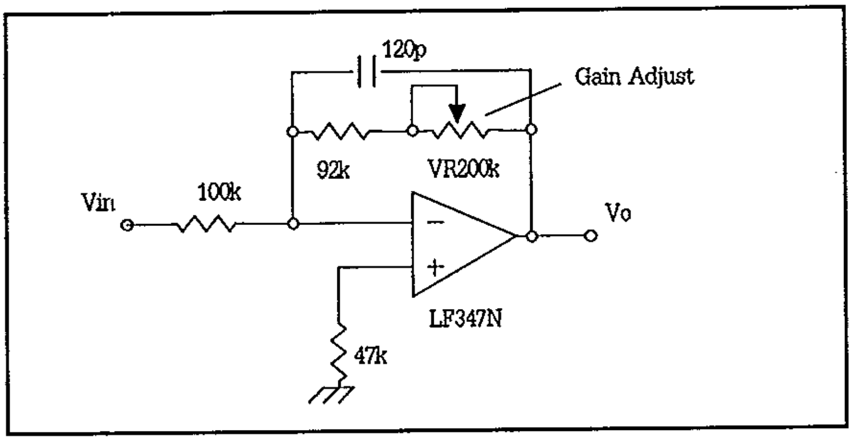
$$Vo1 = -(Vin+Vp)$$

นั่นคือ Vin จะถูกยกหรือลดระดับแรงดันได้ในช่วง -2.5 ถึง +7.5 Volt ซึ่งในส่วนนี้ค่าแรงดัน +10V ได้มาจากส่วนแรงดันอ้างอิงและแรงดัน -2.5 V ได้มาจากการใช้ ไอซี LM336/2.5V

เนื่องจากส่วนนี้เป็นส่วนที่รับสัญญาณที่มาจากโพเทนชิออมิเตอร์ ดังนั้นเพื่อลดปัญหาสัญญาณรบกวนในสายส่งจึงมีการใช้คาปาซิเตอร์บายพาสความถี่สูงร่วมกับการต่อวงจรในลักษณะ วงจรวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านซึ่งทำให้ได้สัญญาณที่เรียบยิ่งขึ้น

**3.2 ส่วนปรับอัตราขยาย (Gain Adjustment)**

ปรับอัตราขยายสัญญาณให้มีระดับแรงดันสูงสุดตามต้องการ ซึ่งในที่นี้สัญญาณสามารถขยายได้สูงสุด 3 เท่า เพื่อความสะดวกในการติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งเนื่องจากในบางกรณี กลไกที่ออกแบบสำหรับติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์นั้นไม่สามารถให้ค่าแรงดันได้สูงสุด (ในที่นี้คือแรงดันอ้างอิง 10 โวลท์) แม้จะเคลื่อนที่แขนหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งสูงสุดแล้วก็ตาม ดังนั้นเพื่อให้การวัดมีความแม่นยำมากที่สุดจึงต้องปรับอัตราขยายให้ได้ตำแหน่งสูงสุดของการเคลื่อนที่มีค่าแรงดันเท่ากับแรงดันอ้างอิง หรือในบางกรณีที่การเคลื่อนที่ของหลายข้อต่อมีช่วง (Range) ของการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน เราก็จะใช้การปรับอัตราขยายให้ง่ายต่อการคำนวนด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไปซึ่งส่วนปรับอัตราขยายมีลักษณะดังภาพประกอบ 3.11




ภาพประกอบ 3.11 แสดงส่วนปรับอัตราขยาย (Gain Adjustment)

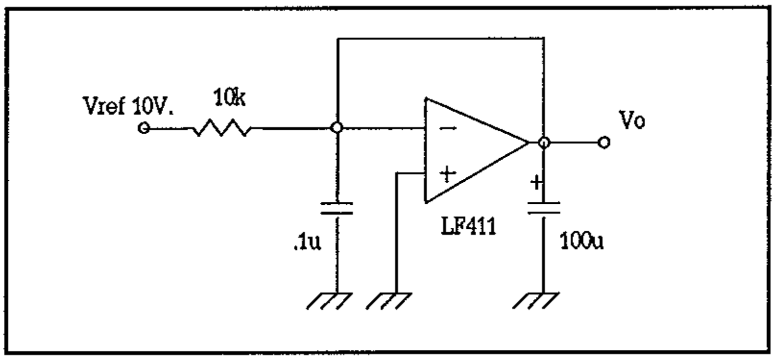
จากภาพ Vin เป็นสัญญาณที่ออกมาจากส่วนปรับศูนย์ ซึ่งสัญญาณที่ออกมาจะ กลับเฟสกับสัญญาณจากโพเทนชิออมิเตอร์ ดังนั้นในส่วนนี้จึงเป็นวงจรขยายแบบกลับเฟสอีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้สัญญาณ

ในที่สุดที่ออกจากภาคนี้มีเฟสตรงกับโพเทนชิออมิเตอร์ ซึ่งสามารถปรับอัตราขยายแรงดันจากอินพุทได้โดยมีอัตราขยายโดยประมาณอยู่ในระหว่าง 0.92 ถึง 2.92 เท่า (กลับเฟส)

**3.3 ส่วนบัฟเฟอร์แรงดันอ้างอิง (Voltage Reference Buffer)**

เป็นส่วนที่ใช้ส่งแรงดันอ้างอิงออกไปโดยยังโพเทนชิออมิเตอร์ ซึ่งการใช้งานของตัวตรวจรู้ตำแหน่ง จะใช้โพเทนชิออมิเตอร์ต่อในลักษณะของตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) นั่นคือที่ขาหนึ่งของโพเทนชิออมิเตอร์จะต่อลง Ground และอีกขาหนึ่งจะต่อด้วยแรงดันอ้างอิง ซึ่งในที่นี้จะใช้แรงดันขนาด 10 volt จากไอซีเบอร์ LF411 ที่สร้างไว้ที่ส่วน ADCU และแรงดันอ้างอิงนี้จะต้องส่งไปสู่ตัวตรวจรู้ตำแหน่งทุกตัว โดยมากที่สุดก็คือ 16 ตัว ดังนั้นเพื่อที่จะลดภาระของออปแอมป์ที่ใช้ในการส่งแรงดันอ้างอิงไปสู่ตัวตรวจรู้ตำแหน่งจึงออกแบบให้บน ADPU มีส่วนที่เป็นบัฟเฟอร์ซึ่งก็เท่ากับว่าออปแอมป์ 1 ตัว จะทำหน้าที่ส่งแรงดันอ้างอิงให้กับตัวตรวจรู้ตำแหน่ง 4 ตัวเท่านั้นเป็นอย่างมาก

จากภาพลักษณะของวงจรเป็นบัฟเฟอร์โดยใช้ออปแอมป์ ซึ่งมีอิมพิแดนซ์ด้านเข้าที่สูงมากและมีอิมพิแดนซ์ด้านออกที่ต่ำมากลดปัญหาเรื่องการโหลดกระแสลงได้



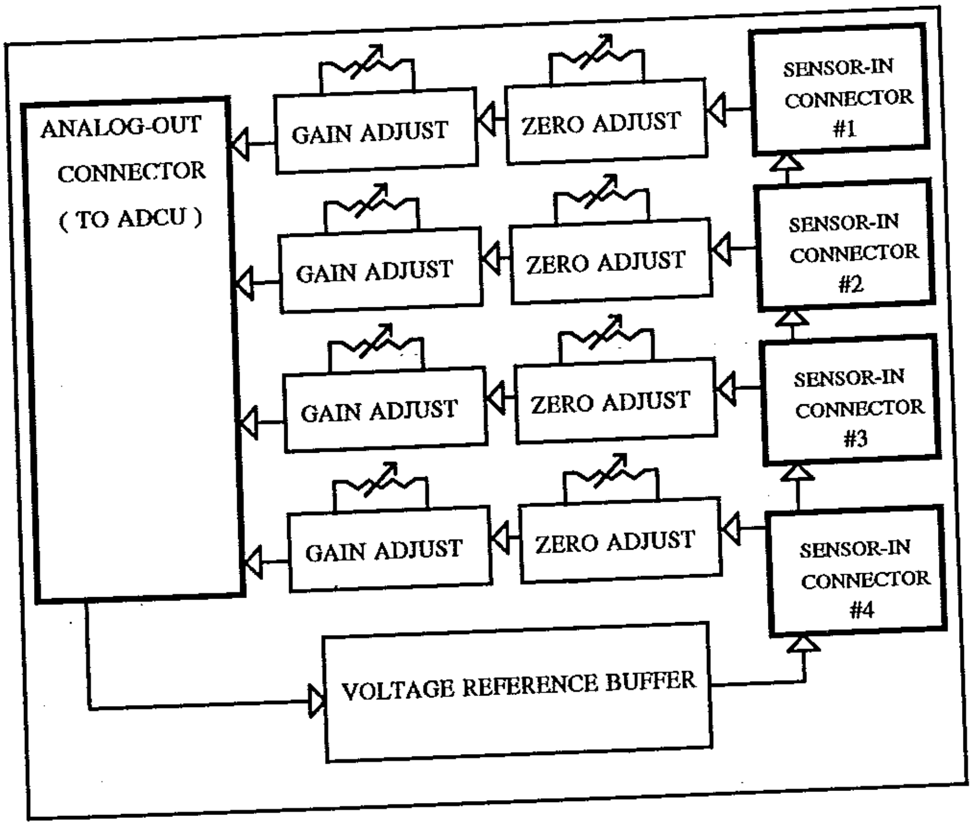

ภาพประกอบ 3.12 แสดงส่วนบัฟเฟอร์แรงดันอ้างอิง (Voltage Reference Buffer)

**3.4 ส่วนขั้วต่อสัญญาณอนาลอกด้านออก (Analog-Out Connector)**

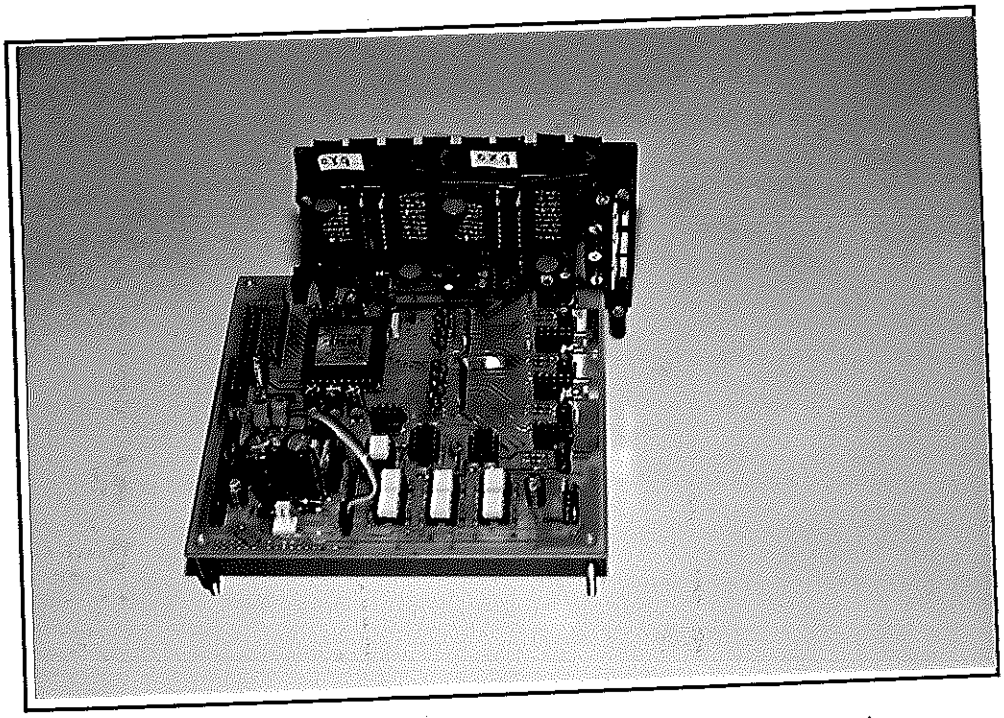
เป็นส่วนที่ใช้ส่งข้อมูลจาก ADPU ที่ได้รับการปรับแต่งแล้วไปยัง ADCU โดยผ่านทางส่วนขั้วต่อสัญญาณอนาลอกด้านเข้า (Analog-In Connector)ของ ADCU และรับข้อมูล แรงดันอ้างอิง และแหล่งจ่ายกำลังไฟจาก ADCU (มีตำแหน่งขาเหมือนกัน)

**3.5 ส่วนขั้วต่อสัญญาณจากตัวตรวจรู้ด้านเข้า (Sensor-In Connector)**

เป็นส่วนที่ใช้รับข้อมูลจากตัวตรวจรู้ตำแหน่งโดยตรง และยังใช้ส่งแรงดันอ้างอิงไปยังตัวตรวจรู้ตำแหน่งด้วย มีลักษณะเป็นขั้วต่อสัญญาณแบบ 3 ขา ประกอบดวยขา กราวด์ (Gnd), สัญญาณ (Signal), และแรงดันอ้างอิง 10 Volt ซึ่งวงจรของส่วน ADPU แสดงในภาคผนวกซึ่งใน 1 แผงวงจรของ ADPU จะประกอบด้วยส่วนที่ต่อไปยังตัวตรวจรู้ตำแหน่ง 4 ตัว




ภาพประกอบ 3.13 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของหน่วยจัดการสัญญาณอนาลอก



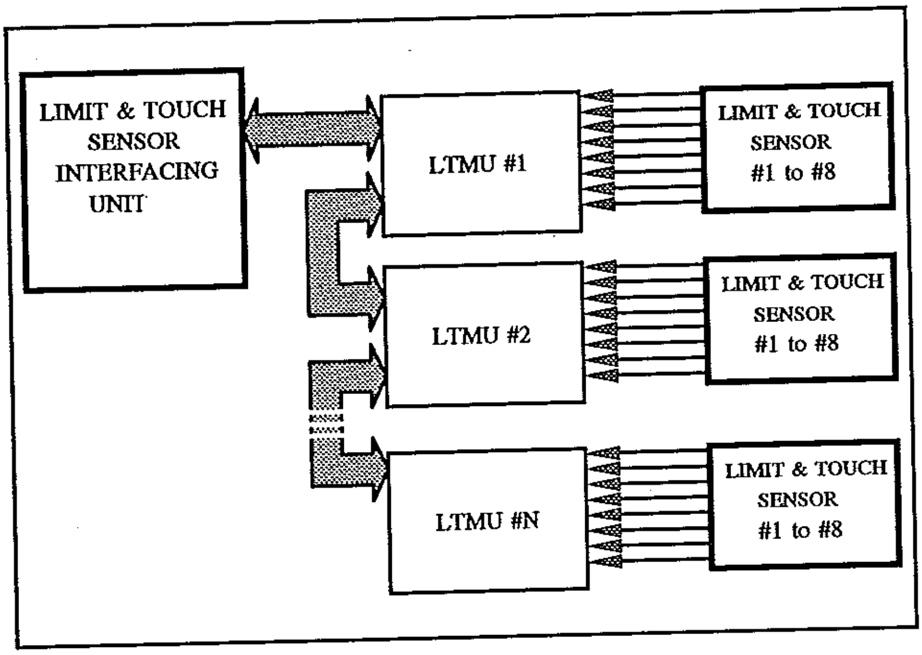
ภาพประกอบ 3.14 แสดงแผงวงจรในส่วนแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADCU) ซึ่งมีแผงวงจรที่ใช้ปรับแต่งสัญญาณอนาลอก (ADPU) เสียบอยู่

ในภาพประกอบ 3.13 แสดงส่วนประกอบต่างๆบนหน่วยจัดการสัญญานอนาลอก ซึ่งในแต่ละหน่วยนี้จะมีส่วนรับข้อมูลเข้ามาปรับแต่งอยู่ 4 ชุดที่เหมือนกัน สำหรับรายละเอียดของวงจรทั้งหมดจะแสดงไว้ในภาคผนวก

4. **หน่วยมัลติเพล็กสัญญานจำกัดการเคลื่อนที่และสัมผัส (Limiting And Touching Sensor Multiplexing Unit, LTMU)**

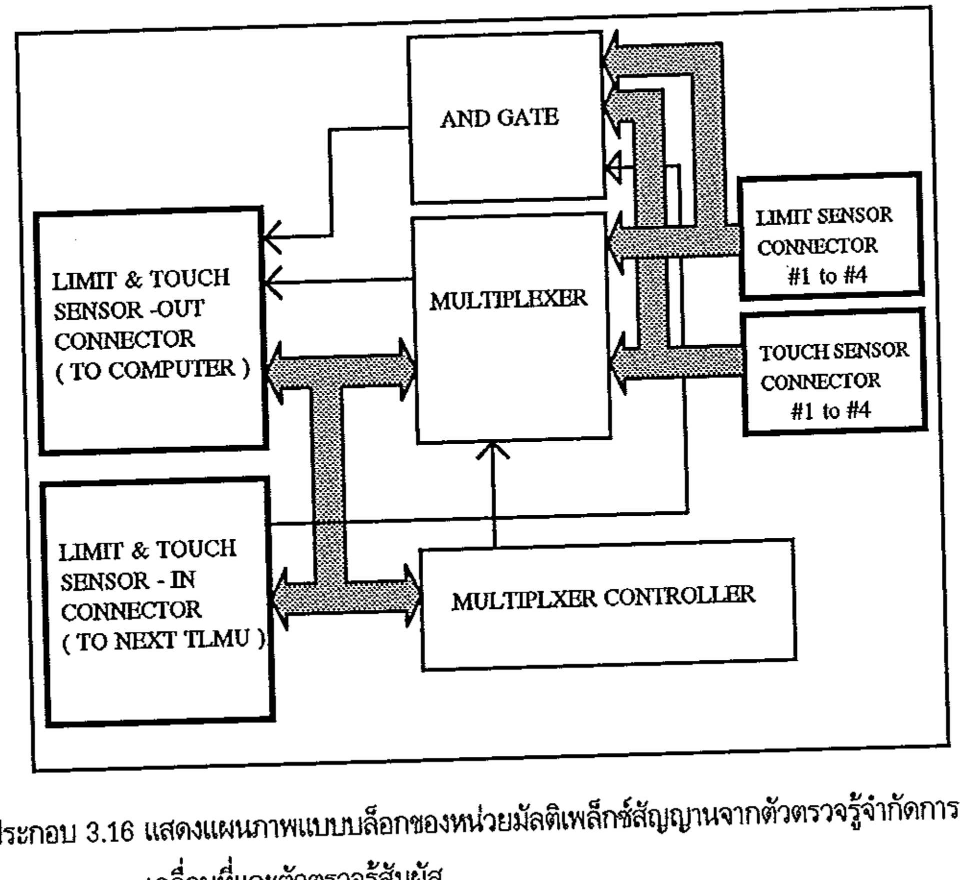
เป็นส่วนที่ใช้รับข้อมูลจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สัมผัส ซึ่งในการออกแบบระบบนี้ได้ออกแบบให้ 1 แผงของ LTMU นี้มีสายสัญญานจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ 4 ตัว และตัวตรวจรู้สัมผัส 4 ตัว แล้วจะทำการมัลติเพลกซ์สัญญานที่เข้ามาทั้งหมดส่งไปยังคอมพิวเตอร์อีกทีหนึ่ง โดยที่ LTMU ถัดไปสามารถต่อได้โดยตรงกับ LTMU ตัวถัดมาโดยไม่ต้องต่อไปยัง ADCU โดยตรงและไม่ต้องเพิ่มจำนวนสายส่งแต่อย่างใดซึ่งลักษณะของการเชื่อมต่อของ LTMU กับคอมพิวเตอร์ และ LTMU กับ LTMU ด้วยกัน ดังแผนภาพแบบบล็อก ในภาพประกอบ 3.15

จากแผนภาพแบบบล็อกในภาพประกอบ 3.15 คอมพิวเตอร์จะส่งการควบคุมและแหล่งจ่ายไฟไปยัง LTMU ซึ่งสัญญานควบคุมจะประกอบไปด้วยสัญญานที่ควบคุมการมัลติเพลกซ์ของตัวมัลติเพลกซ์ เพื่อจะเลือกอ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้และเพื่อเลือกว่าจะทำการอ่านข้อมูลจาก LTMU ใด ในการส่งสัญญานจาก LTMU มายังคอมพิวเตอร์ก็จะประกอบด้วยสัญญานที่เป็นข้อมูลของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ หรือตัวตรวจรู้สัมผัส




ภาพประกอบ 3.15 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของการเชื่อมต่อของ LTMU กับคอมพิวเตอร์ และ LTMU กับ LTMU ด้วยกัน

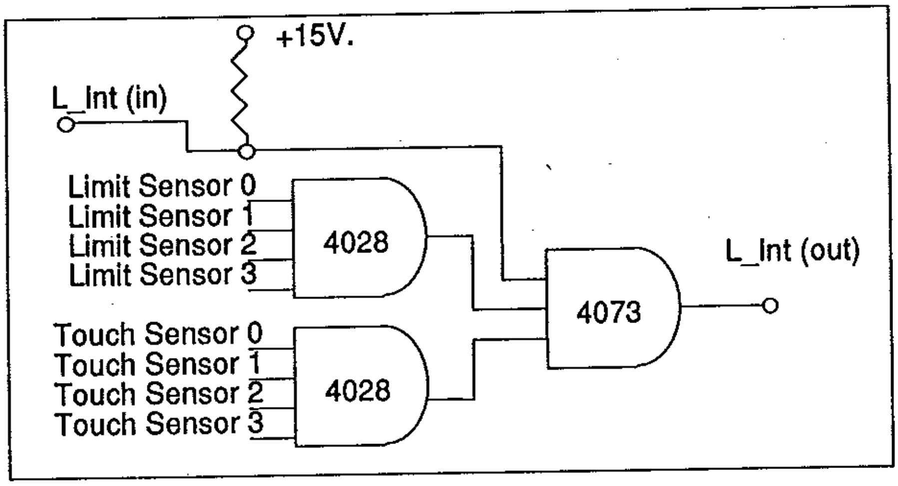
และสัญญาณกระตุ้น ซึ่งลักษณะการทำงานของตัว LTMU ตามแผนภาพแบบบล็อกในภาพประกอบ 3.16 นั่นคือ เมื่อตัวตรวจรู้ตัวใดตัวหนึ่งทำงาน (แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เลยขอบเขตที่กำหนดหรือชนกับสิ่งกีดขวาง) จะทำให้ที่เอาท์พุทของแอนเกต (AND-Gate) มีสภาวะเป็น 'HI' จากเดิมซึ่งเป็น 'LO' อยู่ สัญญาณนี้จะถูกตรวจสอบอยู่ตลอดเวลา โดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้การทำงานของคอมพิวเตอร์ถูกขัดจังหวะและโปรแกรมคอมพิวตอร์จะถูกออกแบบให้กระโดดไปทำงาน เพื่อทำการตรวจสอบว่าตัวตรวจรู้ตัวใดทำให้เกิดการกระตุ้นนี้โดยการส่งสัญญาณมาอนุญาตให้ LTMU ทำงาน (Enable) และปิดการส่งข้อมูลของ LTMU ตัวอื่นๆ (Disable) แล้วจึงส่งสัญญาณมาควบคุมตัวมัลติเพลกซ์ เพื่อให้เลือกอ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้ทีละตัวส่งไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์ก็จะรับรู้ว่าเป็นตัวตรวจรู้ตัวไหนและเมื่อทำการตรวจสอบจนหมดทุกตัวตรวจรู้บน LTMU นี้แล้วสัญญาณควบคุมอีกส่วนหนึ่งก็จะส่งมาควบคุมให้ปิดการส่งข้อมูลจาก LTMU นี้และให้ทำการเลือกการมัลติเพลกซ์ข้อมูลจาก LTMU ตัวที่อยู่ถัดไปอีกในลักษณะของการเลื่อน (Shift) การอนุญาตให้การตัวมัลติเพลกซ์ใน LTMU ตัวที่อยู่ถัดไปไปเรื่อยๆจนหมด และในเวลาใดเวลาหนึ่งจะมีตัวมัลติเพลกซ์ใน LTMU ตัวใดตัวหนึ่งเพียงตัวเดียวเท่านั้นที่ถูกให้ทำงาน (Enable)




ภาพประกอบ 3.16 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของหน่วยมัลติเพล็กซ์สัญญาณจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สัมผัส

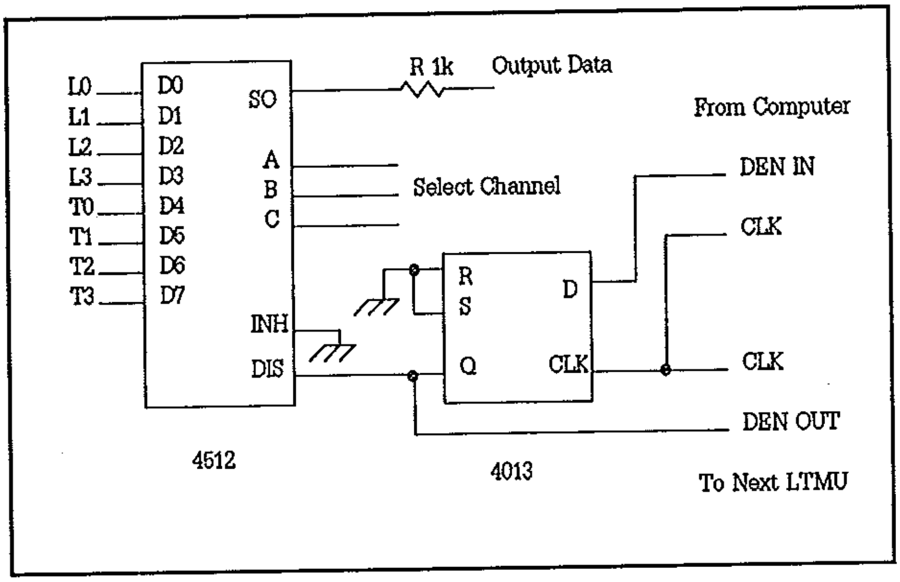
หลักการกระตุ้นของการที่มีตัวตรวจรู้ตัวใดตัวหนึ่งทำงานขึ้นมาอาศัยหลักการ ดังภาพประกอบ 3.17 จากภาพในสภาวะที่ปกติสัญญาณจากตัวตรวจรู้ทั้งหมดจะเป็น Hi รวมทั้ง L_Int(in) ด้วย ดังนั้นในตอนนี้

L_Int(Out) จะเป็น Hi ด้วยและถ้ามีตัวตรวจรู้ตัวใดตัวหนึ่งทำงานขึ้นมาจะทำให้ L_Int(Out) เป็น Lo ซึ่งถ้า LTMU นี้เป็นบอร์ดที่อยู่ต่อจากระบบคอมพิวเตอร์ L_Int(out) ก็จะต่อไปยังคอมพิวเตอร์โดยผ่านทาง ADCU แต่ถ้าไม่ใช่ L_Int(Out) ก็จะเป็นสัญญาน L_Int (in) ของ LTMU ถัดไป แล้วในที่สุดก็จะส่งผลให้ระบบ คอมพิวเตอร์ทราบในที่สุดเช่นกัน




ภาพประกอบ 3.17 แสดงการตรวจสอบว่ามีตัวตรวจรู้ตัวใดตัวหนึ่งทำงานหรือไม่

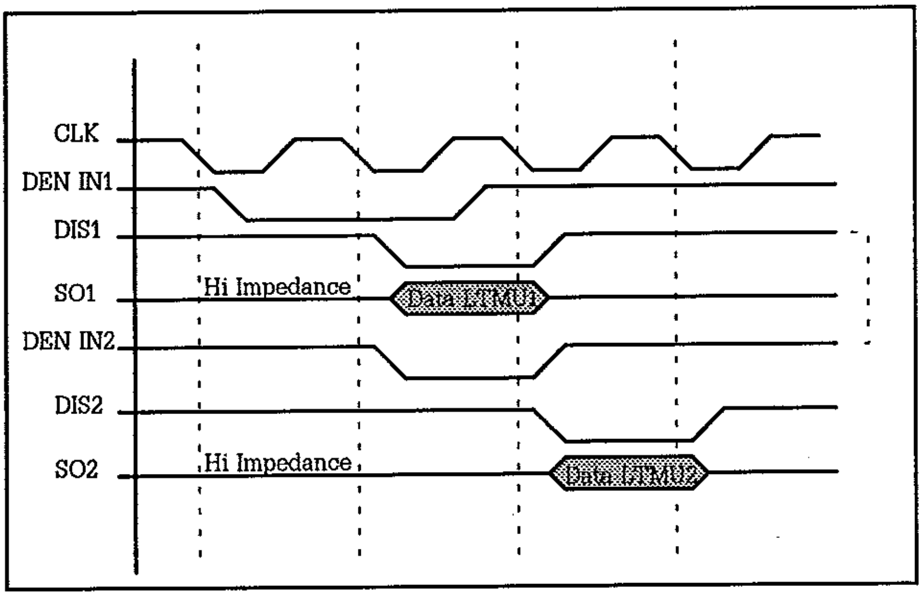
ซึ่งเมื่อมีการกระตุ้นเช่นนี้เกิดขึ้นและระบบคอมพิเตอร์รับทราบแล้ว คอมพิวเตอร์จะหยุดการทำงานอื่นๆ แล้วเริ่มตรวจสอบว่าเป็นตัวตรวจรู้ตัวใดที่ทำงานซึ่งส่วนที่เลือกว่าจะให้ LTMU ตัวใดทำงานและเลือกที่จะอ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้ตัวใดใน LTMU นั้นมีลักษณะดังภาพ 3.18




ภาพประกอบ 3.18 แสดงวงจร เลือก LTMU และเลือกอ่านข้อมูลตัวตรวจรู้

จากภาพประกอบ 3.18 ตัวมัลติเพล็กซ์ไอซีเบอร์ 4512 จะทำงานหรือไม่ก็ขึ้นอยู่กับขา DIS ถ้าเป็น Hi ขา SO (เอาท์พุทของตัวมัลติเพล็กซ์) จะเป็นอิมพิแดนซ์ค่าสูง (High Impedance) แต่ถ้าขา DIS เป็น Lo ก็จะอนุญาตให้มีทำงานโดยที่ขา A, B และ C จะทำหน้าที่เลือกว่าจะให้สัญญานที่ต่อกับขา D0 - D7 สัญญาน ใดถูกส่งออกทางขา SO ในที่นี้ขา DIS จะถูกต่อกับ RS FLIP FLOP ซึ่งจะถูกควบคุมจาก DEN IN และ CLK อีกทีหนึ่ง ซึ่งหลักการทำงานคือ เริ่มแรกจะมีการสั่งงานจากโปรแกรมให้ขา DEN IN เป็น Hi แล้วส่งสัญญาน CLK เข้ามา 1 Clock ในลักษณะเปลี่ยนจาก Hi เป็น Lo (Negative Going Edge) จะทำให้ที่ขา Q ของ Flipflop เป็น Hi เหมือนขา DEN IN ในตอนนี้ MUX (4512) จะไม่ทำงานในขณะเดียวกันขา DEN OUT ก็จะเป็น Hi ด้วย ต่อมาเปลี่ยน สัญญาน DEN IN ให้เป็น Lo แล้วส่งสัญญาน CLK จาก Hi เป็น Lo เข้ามาอีก ในตอนนี้จะทำให้ ขา Q กลายเป็น Lo ซึ่งโปรแกรมก็จะทำการอ่านข้อมูลจาก MUX ตั้งแต่ D0-D7 จนหมดในช่วงนี้ LTMU ที่อยู่ถัดออกไป (ห่างออกจากคอมพิวเตอร์) จะได้รับการสั่งงานพร้อมกัน โดยที่สัญญาน CLK เป็นสัญญาณเดียวกันแต่สัญญาน DEN IN จะได้รับมาจาก DEN OUT (Q) ซึ่งเป็นของวงจรแรกนี้ ดังนั้นในช่วงที่ DEN IN ของ LTMU ที่ถัด มานี้เป็น Lo ขา Q ในวงจรนี้จะยังไม่เป็น Lo เพราะ CLK ได้พ้นช่วง Negative Going Edge ไปแล้วต้องรอใน Clock ต่อไปจึงจะทำให้ขา Q หรือขา DIS ในวงจร LTMU ที่ถัดมานี้เป็น Lo ได้

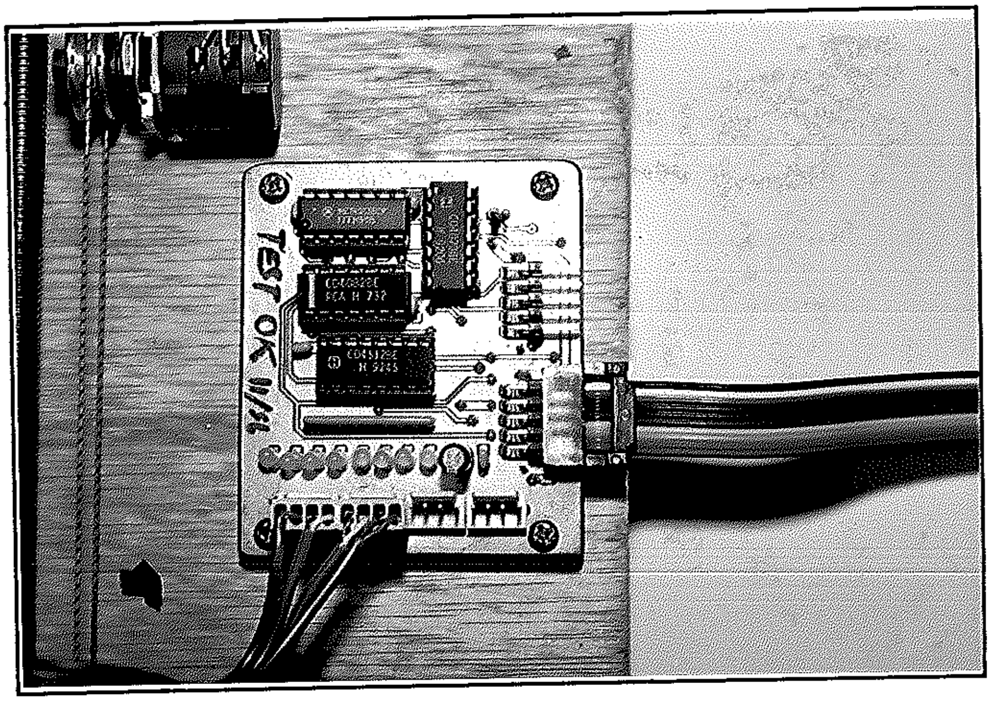
ดังนั้นในการใช้งานก็จะมีการส่งสัญญาน CLK มาเรื่อยๆเพื่อเลือก LTMU ตามลำดับจนหมด ซึ่งเราสามารถพิจารณาการทำงานได้จากแผนภาพเวลา (Timing Diagram) ดังในภาพประกอบ 3.19




ภาพประกอบ 3.19 แสดงแผนภาพเวลา (Timing Diagram)ของการทำงานของ LTMU 2 ชุด

วงจรของ LTMU ทุกแผงจะมีลักษณะเหมือนกันซึ่งจะใช้ LTMU กี่แผงก็ขึ้นอยู่กับจำนวนของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่หรือตัวตรวจรู้สัมผัสที่จะใช้ และในกรณีที่ไม่ใช้ตัวตรวจรู้สัมผัสเราก็จะได้ว่าใน 1

แผงของ LTMU จะใช้กับตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ได้ 8 ตัว ภาพวงจรของหน่วยมัลติเพล็กสัญญานจำกัดการเคลื่อนที่และสัมผัสของงานวิจัยนี้อย่างละเอียดจะแสดงในภาคผนวก



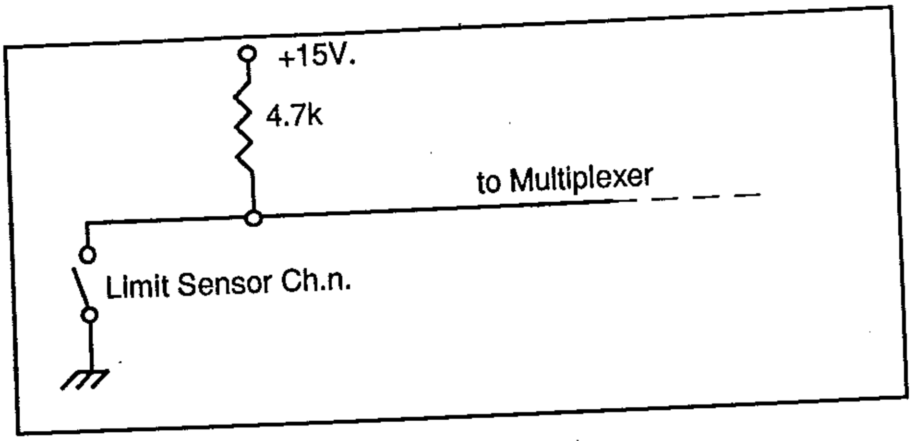

ภาพประกอบ 3.20 แสดงแผงวงจรของส่วนที่ใช้มัลติเพล็กซ์สัญญานกำหนดขอบเขตและสัญญานตรวจรู้การสัมผัสของส่วน LTMU

**5. หน่วยตรวจรู้ตำแหน่ง (Position Sensor Unit, PSU)**

ในที่นี้หมายถึงตัวตรวจรู้ตำแหน่ง ซึ่งจะเป็นตัวที่คอยตรวจสอบตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ที่จะศึกษาหรือใช้งานว่าอยู่ในตำแหน่งใด ซึ่งในการออกแบบจะใช้โพเทนชิออมิเตอร์นำมาต่อในลักษณะของตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป

**6. หน่วยตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ (Limiting Sensor Unit, LSU)**

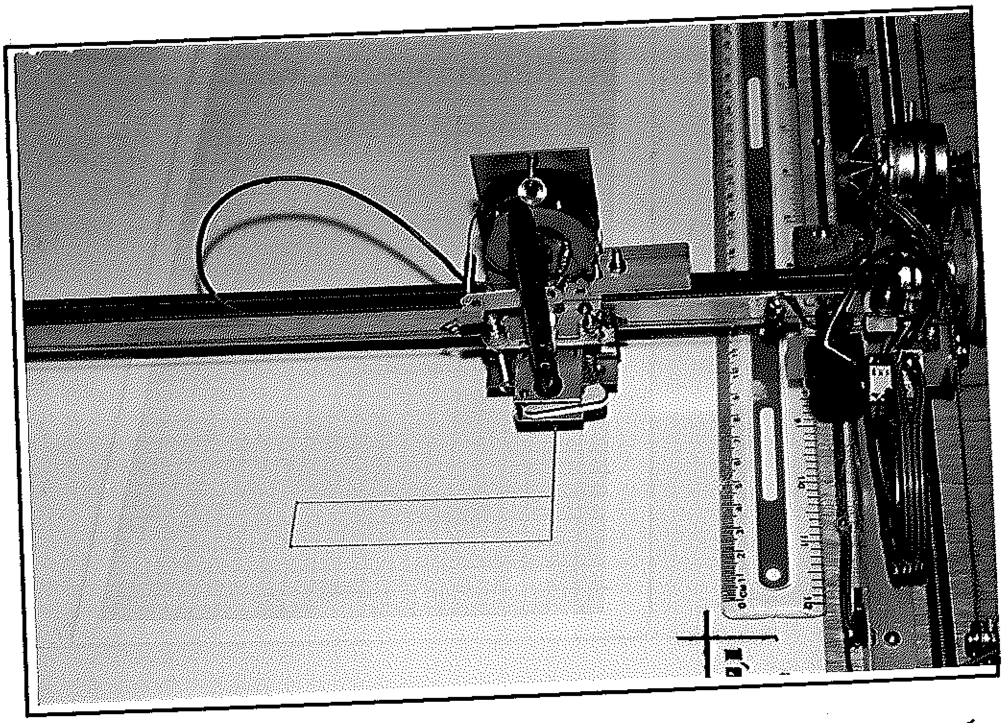
ในที่นี้ใช้เป็นสวิทซ์เล็กๆที่เรียกว่าไมโครสวิทซ์ (Micro Switch) คอยดักจับการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ เมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนมาถึงส่วนนี้ โดยมีการต่อกับวงจรที่อยู่บน LTMU ซึ่งเมื่อมีการ ON ของสวิทซ์ก็จะส่งสัญญานให้คอมพิวเตอร์รับทราบและจัดการตามขั้นตอนต่อไป โดยในส่วนของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่นี้สัญญานจะถูกส่งเข้าสู่อินพุทของ ไอซีบอร์ 4512 ซึ่งเป็นดิจิตอลมัลติเพลกซ์ขนาด 8 อินพุท โดยในสภาวะปกติจะมีสถานะเป็น Hi ในทุกช่องสัญญาน แต่เมื่อสวิทซ์ตัวใดตัวหนึ่งทำงานจะทำให้สัญญานในช่วงสัญญานนั้นถูกต่อลงกราวน์ซึ่งทำให้มีสถานะเป็น Lo ดังภาพประกอบ 3.21




ภาพประกอบ 3.21 แสดงการใช้งานไมโครสวิทช์เป็นตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่

7. **หน่วยตัวตรวจรู้สัมผัส (Touching Sensor Unit, TSU)**

ในส่วนนี้มีลักษณะเหมือนกับตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ แต่จะต่างกันที่ภาพแบบและตำแหน่งการติดตั้งตัวตรวจรู้เท่านั้น ซึ่งในการทำการวิจัยนี้ไม่ได้ติดตั้งตัวตรวจรู้สัมผัสนี้ เพียงแค่ออกแบบวงจรส่วนอื่นๆให้สามารถเพิ่มขยายส่วนนี้ได้เท่านั้น



ภาพประกอบ 3.22 แสดงการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์และไมโครสวิทช์ในต้นแบบระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรี

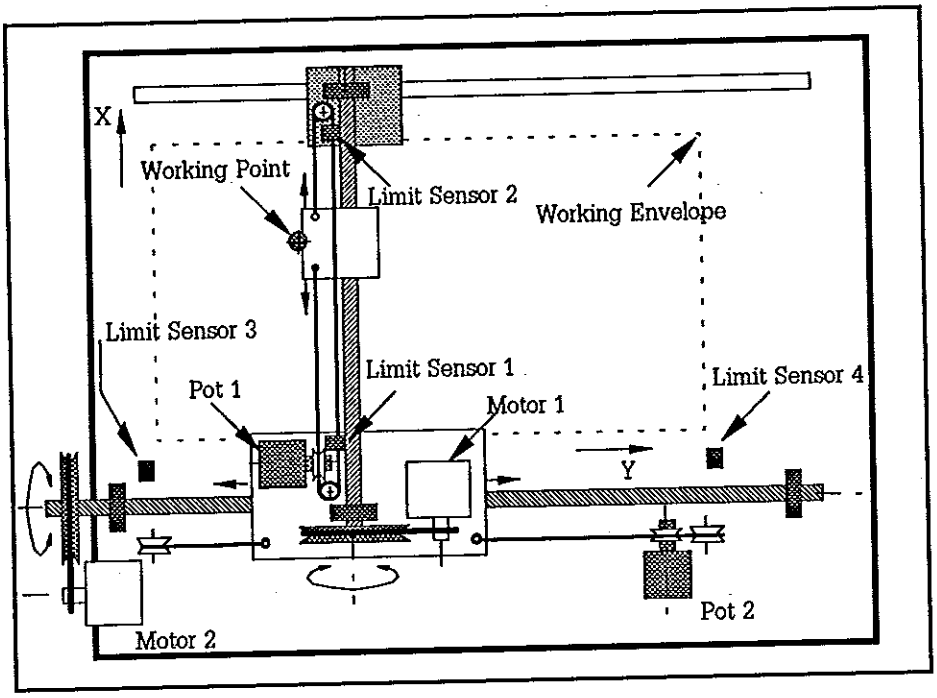
## บทที่ 4

## ระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรีต้นแบบ

ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างระบบแขนหุ่นยนต์ต้นแบบ เพื่อใช้ทดสอบการทำงานของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ที่ใช้โพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้ ซึ่งในที่นี้ได้ออกแบบสร้างเป็นแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี (Robot Manipulator which has 2 Degrees of Freedom) ซึ่งรูปแบบและวิธีสร้างอย่างละเอียดจะไม่ขอกล่าวในที่นี้ โดยจะอธิบายเฉพาะโครงสร้างหลักๆและวงจรที่ใช้ในระบบขับเคลื่อนเท่านั้น

### โครงสร้างของแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี

แขนเคลื่อนที่นี้จะมีลักษณะที่จุดทำงานสามารถเคลื่อนที่ไปได้ในระนาบ 2 มิติ คือ แนวแกน X และ Y โดยจะมีมอเตอร์กระแสตรง ขนาด 6 Volt เป็นตัวจ่ายกำลัง เพื่อให้ทราบตำแหน่งของการเคลื่อนที่




ภาพประกอบ 4.1 แสดงแขนเคลื่อนที่แนวระนาบ 2 มิติที่ได้สร้างขึ้นมาเพื่อทดสอบการทำงานของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์นี้

ในแต่ละแกนจะถูกเชื่อมโยงการเคลื่อนที่ไปยังโพเทนชิออมิเตอร์ ทำให้สามารถทราบถึงตำแหน่งของการเคลื่อนที่ได้จากเอาท์พุทที่ออกจากโพเทนชิออมิเตอร์ที่ถูกทำให้มุมเปลี่ยนไป ดังในภาพประกอบ 4.1 ซึ่งแสดงภาพโครงสร้างของตัวแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรี โดยส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

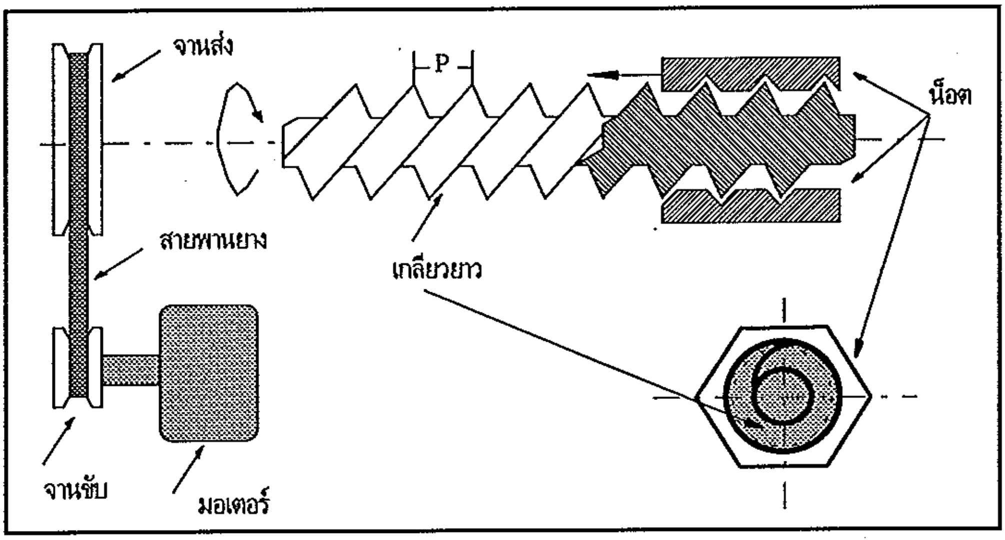
**มอเตอร์ขับเคลื่อน**

ในที่นี้ใช้มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor) ขนาด 6 โวลท์ โดยจะทำหน้าที่ขับสายพานเชื่อมโยงกับจานหมุนที่ยึดติดกับเกลียวยาวการทำงานคือ เมื่อเกลียวนี้หมุนจะทำให้น็อตที่ติดตั้งไว้ที่เกลียวเคลื่อนที่ไปมาตามแนวความยาวโดยจะได้ระยะทาง คือ

$$S = (\theta/2\pi)P \quad \text{.......... (4.1)}$$

เมื่อ S : ระยะทางที่น็อตเคลื่อนที่ไปได้ตามแนวเกลียวเมื่อเกลียวหมุนไปเป็นมุม θ องศา

P : ระยะห่างระหว่างสันเกลียวถึงสันเกลียว (Pitch)




ภาพประกอบ 4.2 แสดงเกลียวและน็อตที่ใช้เป็นตัวถ่ายทอดกำลังจากมอเตอร์

จากระบบการขับเคลื่อนแบบนี้จะเห็นได้ว่า ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการถ่ายทอดตำแหน่งของการเคลื่อนที่จากมุมการหมุนของมอเตอร์สามารถเกิดได้จากหลายสาเหตุ คือ เกิดจากความยืดหยุ่นของยางที่ใช้เป็นสายพานถ่ายทอดกำลัง ซึ่งมีความยืดหยุ่นค่อนข้างสูง, ในกรณีของการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่จะเกิดช่องว่างอยู่ระยะหนึ่ง ที่เกิดจากการที่ช่องว่างของน็อตมากกว่าความหนาของเฟืองเกลียว ซึ่งเรียกว่าเป็นแบ็คเล็ช (Backlash) จะทำให้เกิดความผิดพลาดในส่วนนี้ได้ ดังนั้นถ้าใช้ระบบการวัดตำแหน่งที่วัดการหมุนของมอเตอร์จะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้มาก และการแก้ไขเพื่อที่จะลดความผิดพลาดเหล่านี้ลงก็จะมี

ความยุ่งยากซับซ้อน ดังนั้นจากแนวความคิดของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์จะใช้วิธีการวัดที่จุดตำแหน่งของการเคลื่อนที่จึงทำให้ความผิดพลาดดังกล่าวไม่มีผลต่อระบบวัดนี้

โดยที่ความผิดพลาดเมื่อวัดตำแหน่งของแขนที่มุมของมอเตอร์มีค่าเป็น

$$Et = Em + Es \quad \text{(4.2)}$$

Et : ความผิดพลาดของทั้งระบบ

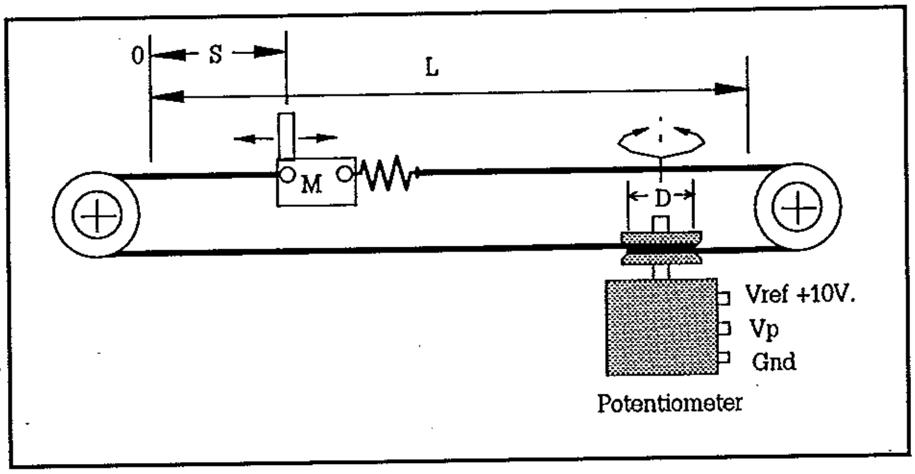
Em : ความผิดพลาดที่เกิดจากกลไกขับเคลื่อน

Es : ความผิดพลาดในระบบตรวจรู้ตำแหน่ง

ซึ่ง Em จะเป็นความผิดพลาดที่เกิดจากหลายส่วนคือ ความไม่แน่นอนของจานขับ, การยืดหดตัวได้อย่างมากของสายพานยาง, ความไม่แน่นอนของจานส่ง และการเกิดแบคเลชในเฟืองเกลียว

**โพเทนซิออมิเตอร์วัดตำแหน่ง**

ในระบบนี้มีการนำโพเทนซิออมิเตอร์แบบหมุนได้ 10 รอบของ Bourns ขนาด 1k Ohm ซึ่งพบว่าเหมาะสมที่สุดจากการทดสอบโพเทนซิออมิเตอร์แบบต่างๆโดยมคุณลักษณะ คือมีความเป็นเชิงเส้นที่ดี, ความต้านทาน 1k นี้มีค่าต่ำพอที่ทำให้ผลผิดพลาดจากการโหลดมีค่าต่ำมากและความต้านทานขนาดนี้ทดสอบแล้วว่าไม่ต่ำมากจนทำให้เกิดความร้อนจากกระแสไหลในตัวโพเทนซิออมิเตอร์ และแรงดันอ้างอิงตกจากการดึงกระแสจากวงจรสร้างแรงดันอ้างอิงขนาด 10 โวลท์ดังที่กล่าวมาแล้ว




ภาพประกอบ 4.3 แสดงการติดตั้งโพเทนซิออมิเตอร์โดยใช้เส้นเชือกในการส่งผ่านตำแหน่ง

การนำโพเทนซิออมิเตอร์มาติดตั้งในที่นี้จะใช้เชือกที่ออกแบบมาสำหรับใช้กับรอกขนาดเล็ก โดยมีลักษณะการติดตั้งดังภาพประกอบ 4.3

จากภาพเมื่อวัตถุ M ถูกทำให้เคลื่อนที่จะทำการดึงเส้นเชือกให้เคลื่อนที่ไปด้วย ในที่สุดก็จะทำให้โพเทนชิออมิเตอร์หมุนไปแปรตามทิศทางและและระยะทางที่วัถุ M เคลื่อนที่ ในที่นี้เราสามารถคำนวนหาระยะทางเส้นผ่าศูนย์กลางของรอก P ที่ติดบนแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ได้จาก

$$D = L / 10\pi$$

โดยที่ D : เส้นผ่าศูนย์กลางของรอก P บนโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนได้ 10 รอบ

L : ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ได้มากที่สุด

เช่น ถ้าวัตถุเคลื่อนที่ได้ในช่วง 40 cm จะได้ว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของรอก P มีค่า เท่ากับ 1.273 cm นั่นก็หมายความว่าเราไม่สามารถให้ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรอก P น้อยกว่าค่าดังกล่าวได้เพราะจะทำให้เกินขอบเขตที่โพเทนชิออมิเตอร์จะหมุนได้ ซึ่งจะเป็นผลเสียต่อค่าที่วัดและอาจเกิดความเสียหายต่อโพเทนชิออมิเตอร์ได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงจะใช้ขนาด D ที่มากกว่านี้โดยจะส่งผลให้โพเทนชิออมิเตอร์เคลื่อนที่ได้เต็มที่ไม่ถึง 10 รอบ แต่ถ้ากำหนดให้ D มีค่ามากเกินไป ก็จะทำให้ความละเอียดที่ได้ลดลงไปเนื่องจากใช้ช่วงของโพเทนชิออมิเตอร์ที่แคบเกินไป

อย่างไรก็ตาม เราสามารถคำนวนหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเอาท์พุทจากโพเทนชิออมิเตอร์ต่อระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ โดยถ้าสมมุติให้การส่งผ่านตำแหน่งจากการเคลื่อนที่ของวัตถุไปยังการหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์เป็นไปอย่างสมบูรณ์ และไม่มีการยืดหดในตัวเชือกจะได้ว่า

$$Vp = (S/L)Vref$$

โดยที่ Vp : แรงดันจากโพเทนชิออมิเตอร์

S : ระยะทางที่วัตถุ M เคลื่อนที่ไป

L : ระยะทางทั้งหมดที่วัตถุ M เคลื่อนที่ไปได้

หรือ $$Vp = (S/(\omega D))Vref$$

โดยที่ $\omega$ : มุมสูงสุดที่โพเทนชิออมิเตอร์จะหมุนไปได้

ในทางปฏิบัติค่าที่ได้จะไม่ตรงกับที่คำนวนเนื่องจากเหตุผลหลายอย่างคือ การที่จะทำให้ได้ค่า D ที่ต้องการนั้นเป็นเรื่องที่ยุ่งยากและการที่เส้นเชือกมีความหนา จะทำให้เส้นผ่าศูนย์กลางของแกนรอกที่ติดกับโพเทนชิออมิเตอร์ที่จะต้องใช้ในการคำนวนเพิ่มขึ้นไปด้วย ดังนั้นจึงใช้วิธีการปรับอัตราขยายของสัญญานแทนทำให้สดวกในการใช้งานขึ้น

ความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นในข้อมูลที่ได้รับมีค่าเป็น

$$E't = E'm + E's \qquad (4.3)$$

E't : ความผิดพลาดที่ได้จากทั้งหมด

E'm : ความผิดพลาดจากกลไกส่งตำแหน่งการเคลื่อนที่ให้โพเทนชิออมิเตอร์

E's : ความผิดพลาดในระบบตรวจรู้ตำแหน่ง

ซึ่งจะเห็นได้ว่า Em เป็นความไม่แน่นอนของรอกบนโพเทนชิออมิเตอร์ และความยืดหดได้ของเส้นเชือกเท่านั้น

จะเห็นได้ว่าถ้าใช้ระบบตรวจรู้เดียวกัน และกลไกที่ต่อมาจากมอเตอร์ไปยังตัวตรวจรู้ และกลไกที่ต่อจากจุดหมุนไปยังตัวตรวจรู้เป็นแบบเดียวกันเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 4.2 และ 4.3 จะพบว่า

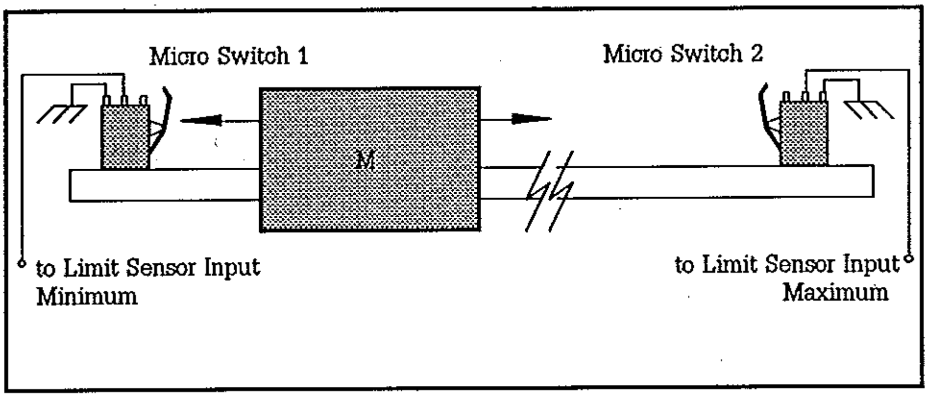
$$Es = E't$$

นั่นคือ (Opto Couple) เพื่อแยกภาคภายนอกออกจากภาคที่ต้องติดต่อกับคอมพิวเตอร์ หลักการวัด ตำแหน่งที่จุดหมุนอยู่เท่ากับ Em หรือ

$$Et = E't + Em \qquad (4.4)$$

**ตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ของระบบ**

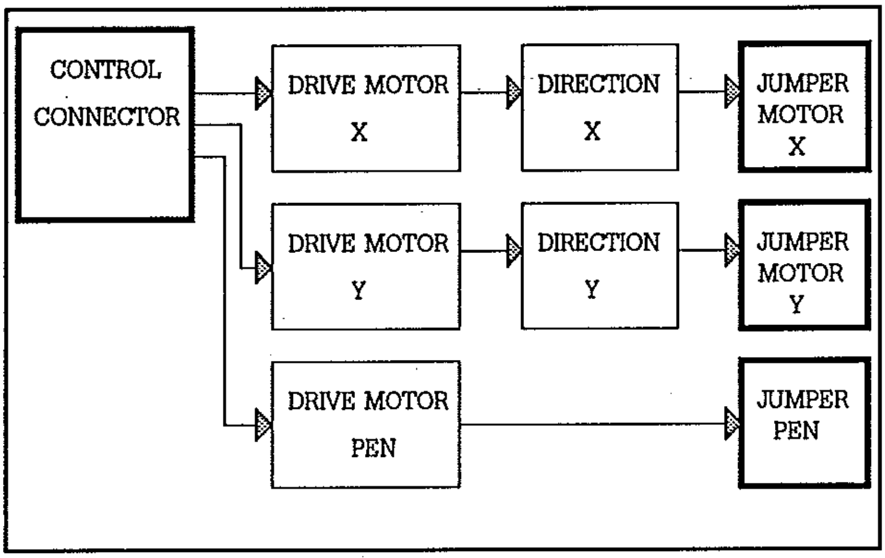
ในที่นี้ได้มีการออกแบบ และติดตั้งตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ไว้ที่จุดสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน ซึ่งได้ใช้ไมโครสวิทช์เป็นตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่โดยใช้ทั้งสิ้น 4 ตัว ณ.ที่จุดต่ำสุด (Minimum) และจุดสูงสุด (Maximum) ของการเคลื่อนที่ของแกน X และแกน Y ดังภาพประกอบ 4.4 วัตถุ M สามารถเคลื่อนที่ได้ 2 แนว ซึ่งทำให้ต้องใช้ไมโครสวิทช์ 2 ตัวติดตั้งเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของวัตถุ M ในจุดที่เป็นขอบเขตสิ้นสุดทั้งสองซึ่งตำแหน่งนี้เมื่อพิจารณาทั้ง 2 มิติของการเคลื่อนที่ X และ Y จะพบว่าจะเป็นส่วนที่กำหนดพื้นที่ทำงานของระบบนี้




ภาพประกอบ 4.4 แสดงการติดตั้งตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่โดยใช้ไมโครสวิทช์ (Micro Switch)

**ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์**

ในที่นี้จะใช้คอมพิวเตอร์ เปิด-ปิด และกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์โดยมีลักษณะดังแผนภาพแบบบล็อกในภาพประกอบ 4.5



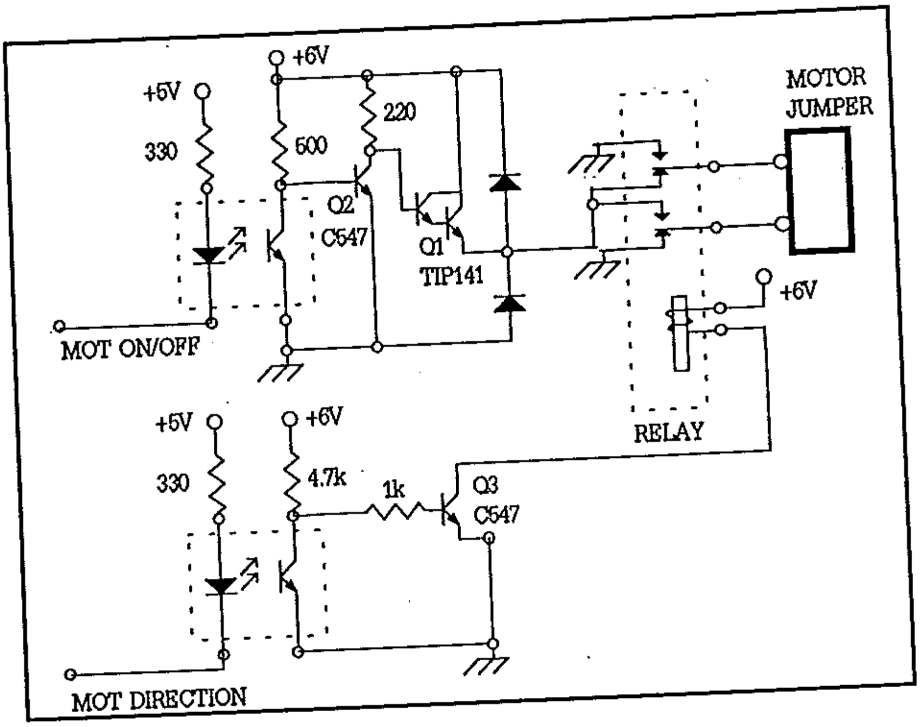

ภาพประกอบ 4.5 แสดงแผนภาพแบบบล็อกของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์

จากภาพประกอบ 4.5 ส่วนขั้วต่อสัญญาณควบคุม (Control Connector) จะเป็นส่วนที่ต่อมาจากหน่วยเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ (CIU) ซึ่งจะนำพอร์ตที่ 3 มาใช้โดยต้องการทั้งสิ้น 5 บิต คือ

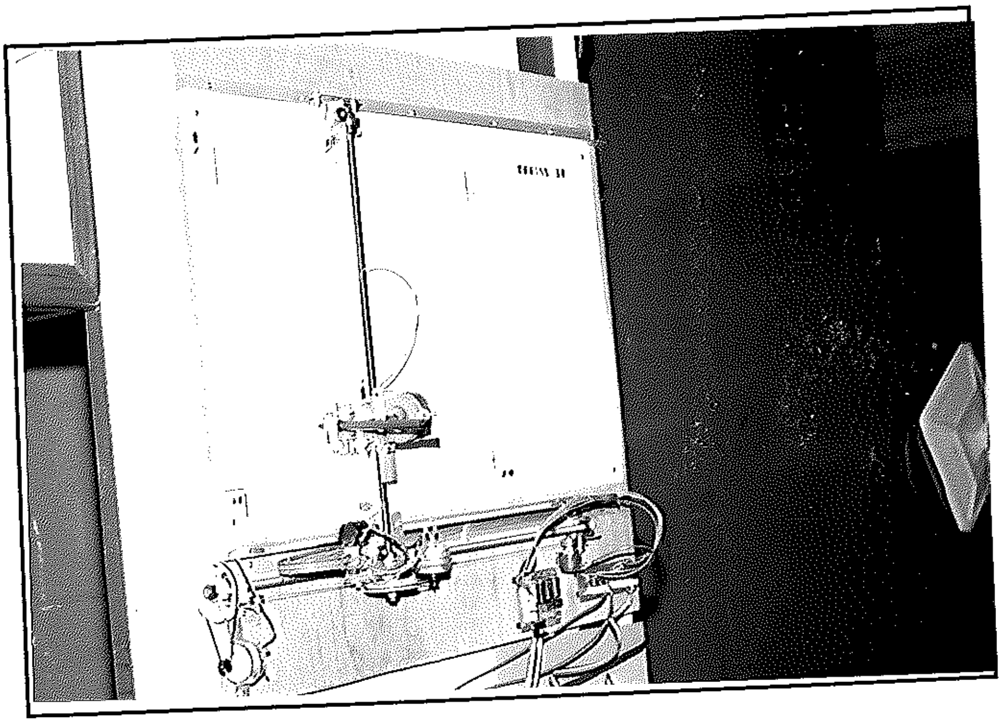
- ควบคุมการ เปิด-ปิด Motor X,
- ควบคุมกำหนดทิศทางการหมุนของ Motor X
- ควบคุม เปิด-ปิด Motor Y
- ควบคุมกำหนดทิศทางการหมุนของ Motor Y
- ควบคุมการสั่งจุดทำงาน ขึ้น-ลง

ซึ่งในส่วนของวงจรควบคุมมอเตอร์ทั้งสองมีลักษณะเหมือนกันดังภาพประกอบ 4.6 ในที่นี้จะมีตัวเชื่อมต่อทางแสง (Opto Couple) เพื่อแยกภาคภายนอกออกจากภาคที่ต้องติดต่อกับคอมพิวเตอร์ หลักการทำงาน คือการควบคุมการเปิดและปิดมอเตอร์จะกระทำโดยการสั่งงานด้วยสัญญาณ TTL เข้าสู่จุด MOT ON/OFF โดยมีทรานซิสเตอร์เบอร์ TIP141 เป็นตัวขับ สำหรับทรานซิสเตอร์เบอร์ BC547 นั้นมีไว้เพื่อกลับ (Inverse) สัญญาณจากตัวเชื่อมต่อทางแสง เพื่อให้ในสภาวะที่ MOT ON/OFF ลอยไว้หรือไม่มีสัญญาณเข้าสู่ขานี้มอเตอร์จะได้อยู่ในสภาวะหยุด การกลับทิศทางการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงสามารถทำได้โดยการกลับขั้วของการจ่ายไฟให้กับมอเตอร์ที่ต่อมาจากภาคขับ ซึ่งจะใช้รีเรย์เป็นตัวจัดการโดยจะรับสัญญาณ

ควบคุมจากขา MOT DIRECTION ที่รับสัญญาน TTL เข้ามา ดังนั้นในการสั่งงานมอเตอร์จึงใช้การสั่งงาน 2 อย่าง คือ สั่งเปิด-ปิดมอเตอร์ และสั่งกำหนดทิศทางของมอเตอร์

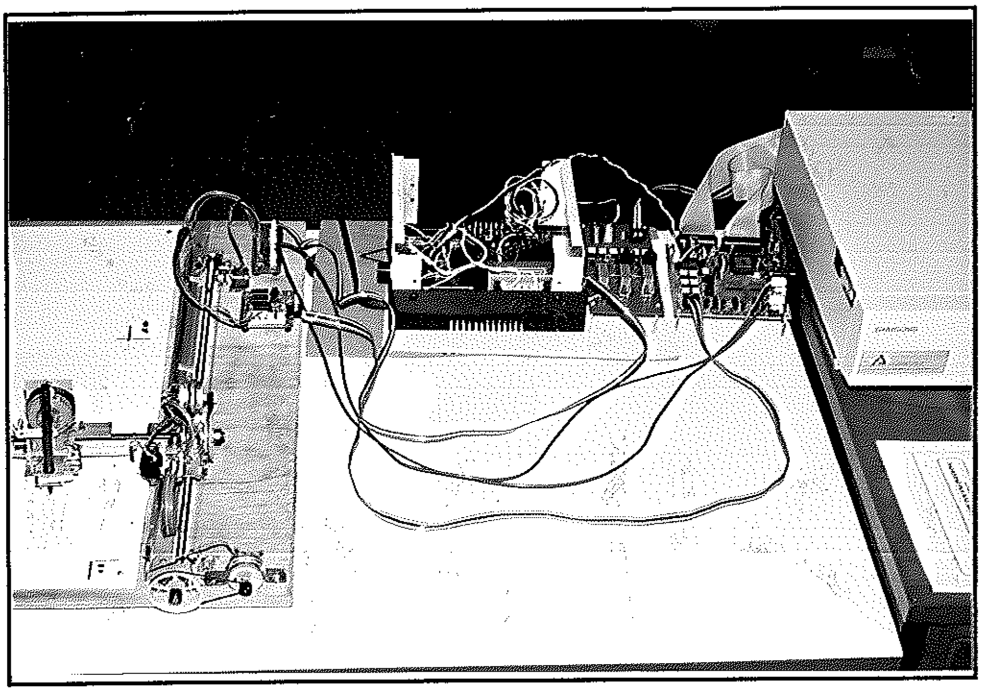



ภาพประกอบ 4.6 แสดงวงจรการขับมอเตอร์และการกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์



ภาพประกอบ 4.7 แสดงระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี

ในที่นี้จะมีอีกส่วนที่เคลื่อนไหวได้ในระบบขับเคลื่อนนี้คือ ส่วนยกและกดปากกาซึ่งถือเป็นจุดทำงาน (Work Point) ของระบบโดยมีการสั่งงานเพียงแค่ เปิด (กด) หรือ ปิด (ยก) ส่วนจับปากกาเท่านั้น



ภาพประกอบ 4.8 แสดงระบบตรวจรู้ตำแหน่งและระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรีติดตั้งร่วมกัน

# บทที่ 5

# โปรแกรมควบคุมระบบงาน

ในการทำงานของระบบที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์นี้ จะต้องมีส่วนที่เป็นส่วนควบคุมเพื่อให้การทำงานและอ่านข้อมูลสามารถกระทำได้ซึ่งเรียกว่า ซอฟแวร์ (Sofware) หรือโปรแกรมควบคุมระบบ (System Program) ซึ่งในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับการออกแบบโปรแกรม และการนำไปใช้งานตามวัตถุประสงค์

## ภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการโปรแกรมกับระบบ

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การสั่งงานจากเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว เราสามารถใช้ภาษาระดับสูง (High Level Language) เช่น ภาษาปาสคาล (Pascal) ซี (C Language) หรืออื่นๆได้เนื่องจากมีความสะดวกและรวดเร็วในการพัฒนากว่าการใช้ภาษาแอสเซ็มบลี้ (Assembly) มาก อีกทั้งการใช้ภาษาระดับสูงยังสะดวกในการทำความเข้าใจและนำไปใช้ในที่อื่นได้ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงใช้ภาษาปาสคาลซึ่งจัดเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีความง่ายดายรวดเร็วในการพัฒนาภาษาหนึ่ง

ในระบบนี้เราสามารถแบ่งแยกโปรแกรมควบคุมออกได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนควบคุมระบบตรวจรู้ตำแหน่ง ซึ่งจัดเป็นส่วนหลักของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์นี้และส่วนควบคุมระบบขับเคลื่อน ซึ่งเป็นส่วนเพิ่มเติมในการทดสอบระบบตรวจรู้

## โปรแกรมควบคุมระบบตรวจรู้ตำแหน่ง

โปรแกรมควบคุมระบบตรวจรูตำแหน่งนี้จัดเป็นส่วนหลักของระบบ ซึ่งในการใช้งานจะมีการกำหนดให้มีการสั่ง และอ่านข้อมูลจากส่วนนี้เป็นไปตามขั้นตอนโดยเราสามารถแยกออกได้เป็นงานย่อย 3 งานดังนี้

1. **อ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้ตำแหน่ง**

   มีหน้าที่หลักๆคือ

   - สั่งระบบมัลติเพล็กเพื่อเลือกช่องสัญญานของตัวตรวจรู้ที่จะอ่านข้อมูล
   - สั่งให้ตัวแปลงสัญญานจากอนาลอกเป็นดิจิตอลเริ่มแปลงสัญญานจนได้รับข้อมูลเป็นดิจิตอลออกมา
   - นำข้อมูลที่ได้ไปจัดเก็บเพื่อทำในกระบวนการต่อไป

ซึ่งการทำงานคือ เมื่อต้องการทราบค่าของตำแหน่งในขณะนั้นของแขนหุ่นยนต์จะต้องมีการระบุตำแหน่งของโพเทนชิออมิเตอร์ที่ต้องการทราบ (Channel) แล้วจึงทำการอ่านข้อมูลจากช่องสัญญานนั้นเข้ามาแปลงเป็นสัญญานดิจิตอลก่อนนำไปใช้งาน

**2. อ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่**

มีหน้าที่หลักในหารทำงานคือ

- เลือกหน่วยมัลติเพล็กซ์สัญญานที่ต้องการ
- เลือกช่องสัญญานที่ต้องการในหน่วยมัลติเพล็กซ์สัญญานนั้น
- ทำการอ่านข้อมูลของตัวรู้ในช่องสัญญานต่างๆ

ซึ่งในส่วนของโปรแกรมนี้ จะมีการตรวจสอบอยู่ตลอดเวลาว่ามีการทำงานของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ตัวใดตัวหนึ่งหรือไม่ ซึ่งในกรณีที่มีจุดของตัวตรวจรู้อยู่หลายจุดก็ต้องมีการเลือกตำแหน่งของแต่ละจุดนั้น ในที่นี้จะเป็นการเลือกอ่านเรียงลำดับกันไปโดยอ่านทุกช่องสัญญานเพื่อกันความผิดพลาด

สำหรับข้อมูลของตัวตรวจรู้สัมผัสนั้นจะอ่านเหมือนกับตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ โดยเมื่อได้ข้อมูลของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ ก็จะได้ข้อมูลของตัวตรวจรู้สัมผัสไปด้วย

**3 งานจัดการข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจรู้**

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่จัดการกับข้อมูลเมื่อได้ข้อมูลมาจากการอ่านแล้ว ซึ่งสำหรับข้อมูลของตำแหน่งถ้าใช้เพื่อควบคุมให้การเคลื่อนที่ตรงตามที่ต้องการ ก็จะใช้การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ต้องการกับค่าที่อ่านได้ แล้วปรับการเคลื่อนที่ให้เข้าสู่จุดนั้น

สำหรับข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ เมื่อพบว่าตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ตัวใดตัวหนึ่งทำงาน ก็จะหยุดการทำงานของระบบในส่วนอื่นลงโดยเฉพาะระบบขับเคลื่อนและจะอนุญาตให้การเคลื่อนที่สามารถทำได้ในทิศทางที่หยุดการทำงานของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ที่ทำงานนั้น (เคลื่อนที่ถอยหลัง)

**โปรแกรมควบคุมระบบขับเคลื่อน**

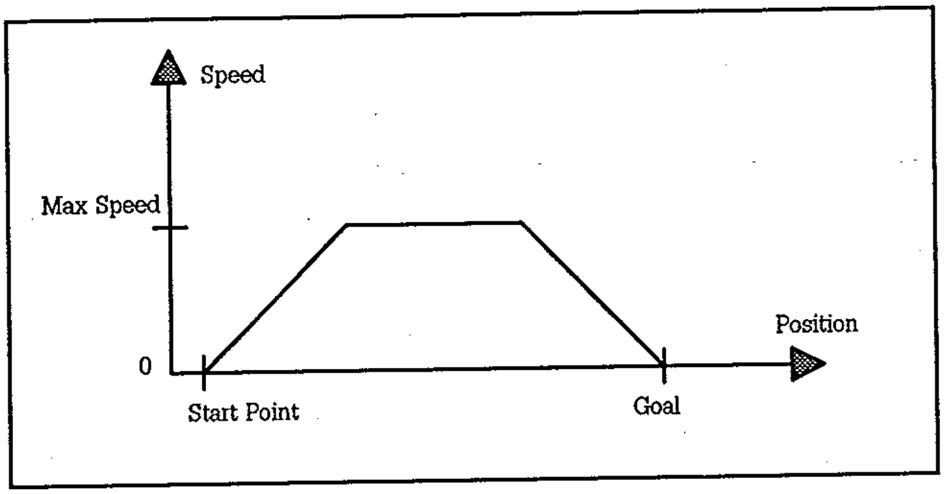
สามารถแยกออกเป็น 3 ส่วนคือ

**1. ควบคุมความเร็วของมอเตอร์**

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่สั่งให้มอเตอร์ทำงานหรือหยุดทำงานซึ่งสามารถกำหนดให้มอเตอร์มีความเร็วในการทำงานได้หลายระดับด้วยกัน โดยใช้หลักการแบ่งช่วงเปิดและปิดมอเตอร์ในช่วงที่ไม่เท่ากันถ้าเปิดมอเตอร์นานและปิดมอเตอร์ไม่นานมอเตอร์ก็จะเคลื่อนที่ไปยังจุดหมายได้เร็ว และในทางกลับกันถ้าเปิดมอเตอร์ในช่วงเวลาสั้นๆ และเปิดมอเตอร์ให้นานขึ้นก็จะทำให้มอเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าเดิม

สำหรับการควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เพื่อให้ถึงเป้าหมายนั้น จะใช้ลักษณะการควบคุมแบบปฏิภาค (Proportional Control) ซึ่งจะพิจารณาข้อมูลที่เป็นข้อมูลที่แตกต่างระหว่างจุดปัจจุบันที่อ่านได้กับ

จุดเป้าหมาย ซึ่งเมื่อเริ่มต้นเคลื่อนที่ความเร็วจะค่อยเพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดและเมื่อเข้าใกล้เป้าหมายความเร็วจะลดลงดังภาพประกอบ 5.1




ภาพประกอบ 5.1 แสดงการควบคุมมอเตอร์

**2. ความคุมทิศทางของมอเตอร์**

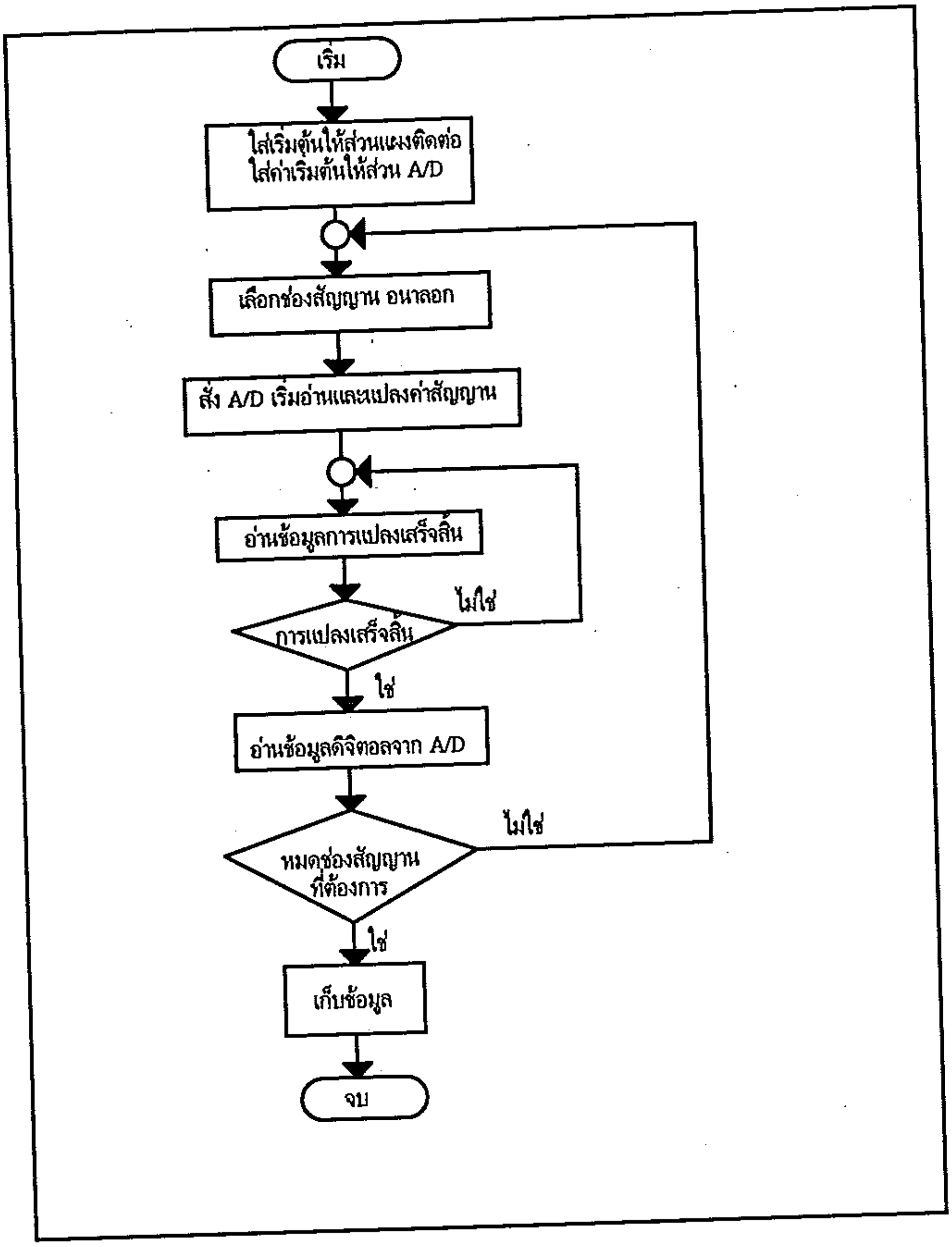
ในที่นี้ใช้กำหนดว่าจะให้มอเตอร์หมุนในทิศทางใด (ทวนเข็มหรือตามเข็มนาฬิกา) ซึ่งจะส่งผลถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของแขนที่มอเตอร์นั้นๆขับอยู่

**3. ควบคุมการยกหรือกดส่วนจับปากกา**

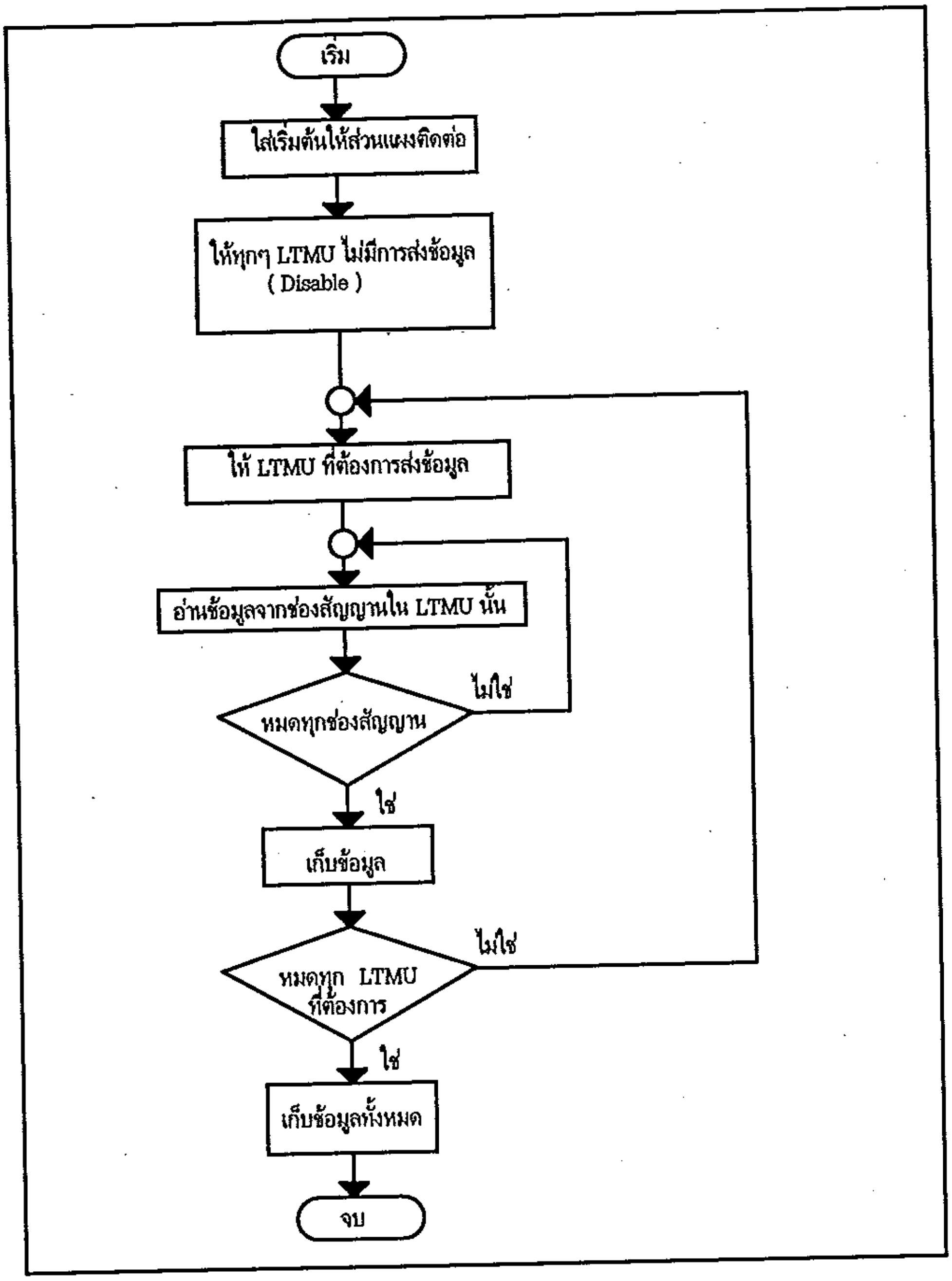
ส่วนจับปากกาถูกออกแบบมาเพื่อให้เห็นการทำงานของระบบได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยการสั่งงานในลักษณะของการเปิดหรี ปิดตัวขับเคลื่อนของส่วนนี้

**โปรแกรมตัวอย่างเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ**

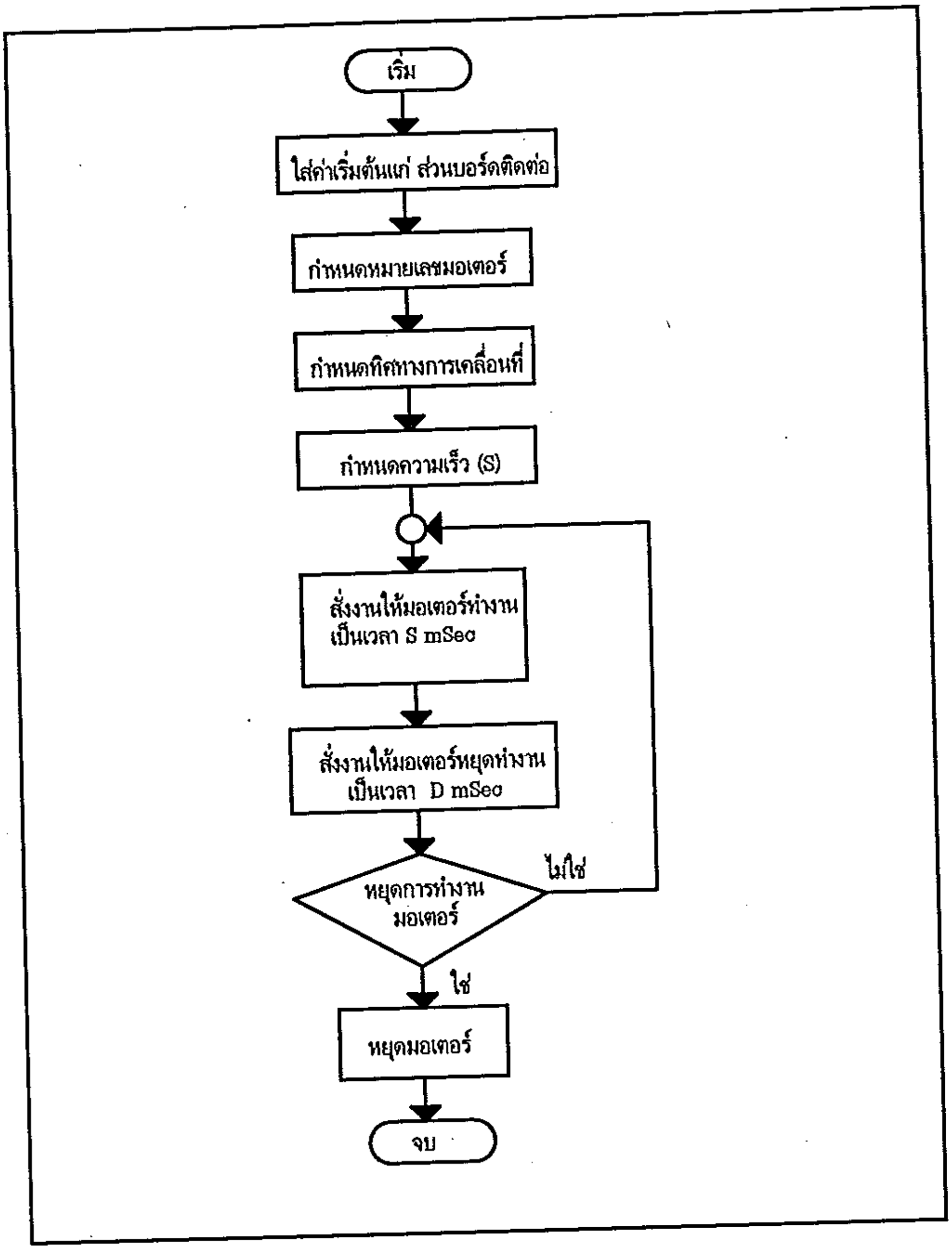
ในที่นี้ได้มีการออกแบบตัวอย่างเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบนี้ โดยได้มีการใช้งานให้ทุกส่วนของระบบทำงานร่วมกันคือ มีการสั่งงานให้มอเตอร์หมุนเพื่อเคลื่อนแขนจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งทั้งในขณะที่มีการกดปากกาลงและยกปากกาขึ้น พร้อมทั้งอ่านข้อมูลจากตำแหน่งที่ได้จาก A/D เปรียบเทียบตำแหน่งที่ต้องการ และในระหว่างการเคลื่อนที่ก็จะมีการตรวจสอบว่ามีการกระตุ้นมาจากหน่วยตรวจสอบตัวตรวจรู้สัมผัสและตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่หรือไม่ เพื่อจะทำการหยุดมอเตอร์และจัดการต่อไป



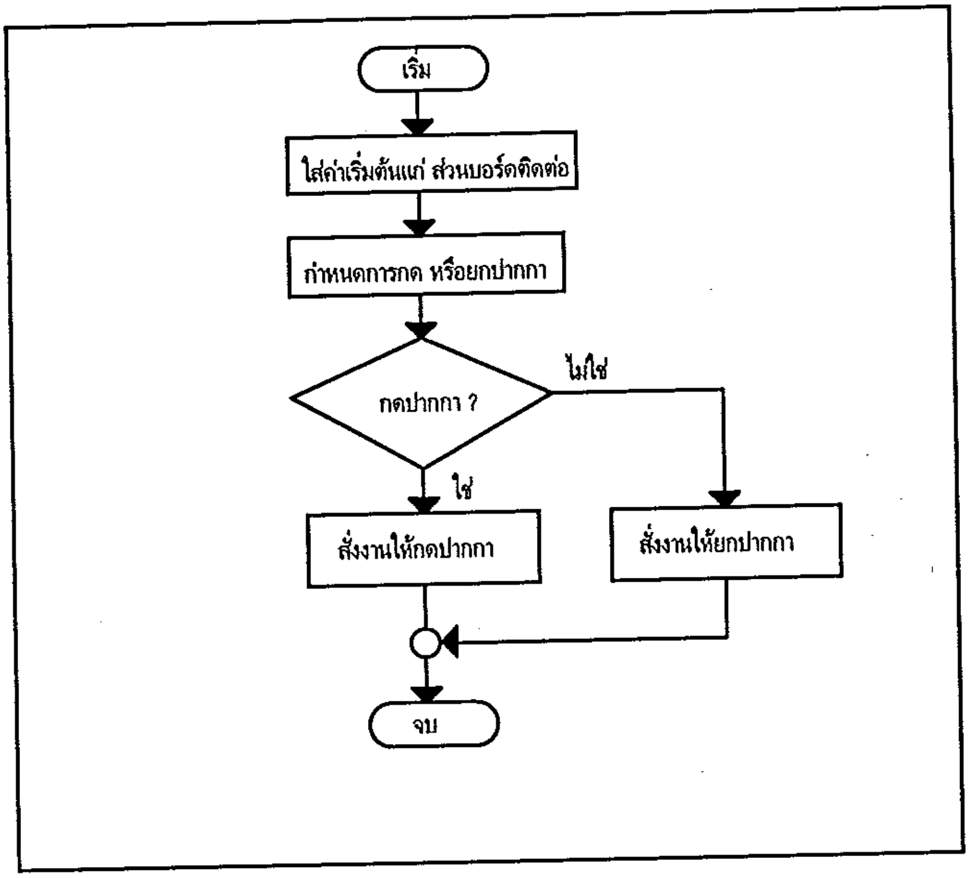

ภาพประกอบ 5.2 แสดงผังงานการอ่านข้อมูลจาก A/D



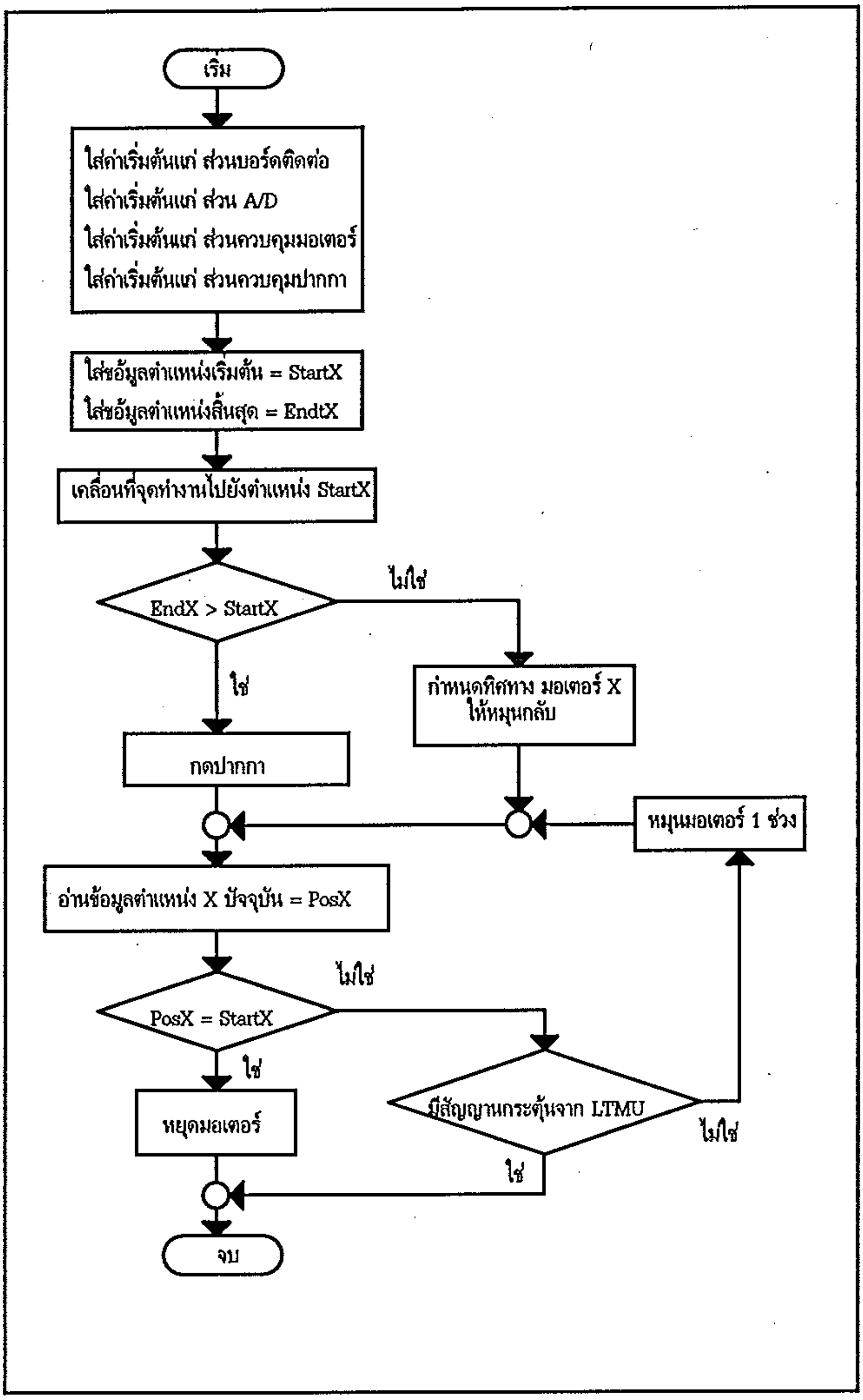

ภาพประกอบ 5.3 แสดงผังงานการอ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สัมผัส




ภาพประกอบ 5.4 แสดงผังงานการส่งข้อมูลควบคุมมอเตอร์




ภาพประกอบ 5.5 แสดงผังงานการส่งข้อมูลควบคุมกลไกจับยกปากกา




ภาพประกอบ 5.6 แสดงผังงานตัวอย่างการควบคุมการเคลื่อนที่เพื่อลากเส้นในแนวแกน X

# บทที่ 6

# วิธีการวิจัย

ในที่นี้สามารถแบ่งการวิจัยออกเป็น 2 แบบด้วยกันคือ การออกแบบและสร้างระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์และแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรี กับการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์และทดสอบระบบที่สร้างขึ้นมา

## การออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์

ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ โดยได้พิจารณาจุดที่ทำให้ข้อมูลมีความผิดพลาดลดลงและความสดวกในการใช้งานโดยแบ่งการออกแบบเป็นดังนี้

1. **การลดสัญญานรบกวน**

การออกแบบให้ส่วนต่างๆที่เป็นวงจรจัดการสัญญานอนาลอกมีสัญญานรบกวนน้อยที่สุด ซึ่งได้มีการออกแบบวงจรกรองและเลือกใช้อุปกรณ์ไอซีที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปต่ำ

2. **เลือกใช้ตัวโพเทนชิออมิเตอร์ที่เหมาะสม**

โดยเลือกในค่าความต้านทานและตัวต้านทานที่ไม่เกิดผลกระทบต่อข้อมูลที่ได้ เช่น ผลกระทบจากการโหลดหรือการดึงกระแสจากวงจรจ่ายรงดันอ้างอิงมากเกินไป

3. **ออกแบบตำแหน่งติดตั้งตัวตรวจรู้**

โดยออกแบบตำแหน่งในการติดตั้งตัวตรวจรู้ที่มีผลกระทบจากความผิดพลาดในส่วนอื่นน้อยที่สุด เช่น การติดตั้งตัวตรวจรู้ในตำแหน่งข้อต่อของแขนหุ่นยนต์

## การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์และระบบที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมา

1. **อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย**

ในการวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งใช้โพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้โดยได้ใช้อุปกรณ์ต่างๆเข้าร่วมในการวิจัยดังนี้

1.1 Multimeter : Digital Multimeter Gold Star Dm-8243

1.2 Angle Plate Concise 18 mm

1.3 Oscilloscope

1.4 Thermometer

1.5 DC Power Supply ±15 Volts, 5 Volt

1.6 Personal Computer 386sx 16 MHz

1.7 Digital Experiment Set DL-1A

1.8 Hot Air Blower

1.9 Vernier Caliper Whale 0-150 mm

**2. วิธีการดำเนินการ**

ในการทำการวิจัยเรื่องการออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์นี้เนื้อหา โดยหลักของการวิจัยคือการออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์โดยใช้โพเทนซิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้ ซึ่งเพื่อให้ผลการวิจัยเป็นไปตามเป้าหมาย ดังนั้นจึงแบ่งการทำการวิจัยออกเป็นส่วนต่างๆดังนี้

**2.1 การทดสอบโพเทนซิออมิเตอร์**

เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วในท้องตลาดมีโพเทนซิออมิเตอร์อยู่มากมายหลายแบบ และหลายระดับราคา อีกทั้งในโพเทนซิออมิเตอร์แบบเดียวกันก็ยังมีค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน อันจะมีผลต่อระบบได้ ซึ่งเมื่อต้องการนำโพเทนซิออมิเตอร์มาใช้เป็นตัวตรวจรู้การได้ข้อมูลชั้นต้นของโพเทนซิออมิเตอร์ตัวนั้นๆ จะทำให้การเลือกใช้โพเทนซิออมิเตอร์เป็นไปด้วยความเหมาะสมมากที่สุด ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบวิธีทดสอบโพเทนซิออมิเตอร์ในแง่ต่างๆกันคือ

**2.1.1 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของโพเทนซิออมิเตอร์หลายๆชนิด**

ในการทำการวิจัยนี้ได้มีการสุ่มตัวอย่างโพเทนซิออมิเตอร์ที่มีในท้องตลาด ซึ่งหาได้ง่าย จำนวน 4 แบบด้วยกัน คือ

2.1.1.1 Multiturn (10 Turn) wirewound Potentiometer

Model : 3590s

Type: Circular Multiturn

Brand : Bourns

2.1.1.2 Singleturn Conductive Plastic Element Servo Potentimeter

Model : 173-552

Type : Circular

Brand : RS

2.1.1.3 Singleturn Resistive Element Potentiometer

Type : Circular

Brand : @

2.1.1.4 Slide Resistive Element Potentiometer

Type : Slide

Brand : Alps

วิธีทดสอบคือ โพเทนชิออมิเตอร์แบบเลื่อนในแนวตรงจะทำการวัดความต้านเอาท์พุทของโพเทนชิออมิเตอร์ (ขาที่ต่อกับแปลงตัวนำกับขาใดขาหนึ่งซึ่งในที่นี้จะใช้ขา ที่ให้ค่าความต้านทานต่ำสุดเมื่อเลื่อนขาแปลงมาในตำแหน่งต่ำสุด) โดยจะทำการเลื่อนโพเทนชิออมิเตอร์ให้ออกจากเริ่มต้น (ระยะทางเป็น 0) เป็นระยะทางค่าต่างๆ โดยใช้เวอร์เนียแคลิปเปอร์เป็นตัววัดระยะทางแล้วบันทึกค่าความต้านทานในตำแหน่งต่างๆนั้นเพื่อหาความผิดพลาดต่อไป

สำหรับโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนกวาดนั้น จะมีการออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดมุมที่แกนหมุนเคลื่อนที่ไป โดยใช้แผ่นอาศามายึดติดกับตัวถังของโพเทนชิออมิเตอร์ แล้วให้แกนหมุนหมุนไปในตำแหน่งต่างๆที่กำหนดและทำการวัดค่าความต้านทานที่ได้ในมุมองศานั้นๆ ข้อมูลที่ได้จะนำมาพิจารณาเช่นเดียวกับกรณีของโพเทนชิออมิเตอร์แบบเลื่อน

**2.1.2 การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบเดียวกันที่มีค่าความต้านทานที่แตกต่างกัน**

ในการทดลองโพเทนชิออมิเตอร์ในตอนนี้ จะทำการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนได้ 10 รอบซึ่งทำการทดสอบในข้อที่ 2.1.1 แล้วพบว่ามีความเหมาะสมที่สุดในกลุ่มตัวอย่างทั้งหมดโดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ

**2.1.2.1 การทดสอบหาค่าความแม่น (Accuracy) ของโพเทนชิออมิเตอร์**

ซึ่งการทดลองนี้เพื่อหาว่าในแต่ละตำแหน่งของโพเทนชิออมิเตอร์มีสภาพเชิงเส้นและความผิดพลาดเป็นอย่างไรซึ่งวิธีทดสอบได้กระทำเหมือนหัวข้อที่ 2.1.1 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเพียงแต่ได้ใช้โพเทนชิออมิเตอร์แบบเดียวกันทั้งหมดที่ได้เลือกไว้แล้ว และเลือกค่าความต้านทานที่แตกต่างกันมาทดสอบ

**2.1.2.2 การหาผลของการโหลด (Loading Effect) ของโพเทนชิออมิเตอร์ค่าต่างๆ**

จากการที่ภาคที่จะนำมาต่อกับโพเทนชิออมิเตอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ มีค่าอิมพิเดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) ค่าหนึ่ง ซึ่งจะมีผลต่อความต้านทานเอาท์พุทที่ผิดไปจากเดิมอันจะทำให้การวิเคราะห์ตำแหน่งผิดพลาดไปได้ ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้นำโพเทนชิออมิเตอร์ต่อเข้ากับระบบที่จะใช้งานจริงๆซึ่งมีค่าความต้านทานด้านเข้าเท่ากับ 100k Ohm โดยให้ขาข้างหนึ่งของโพเทนชิออมิเตอร์ต่อกับกราวด์ และอีกด้านต่อกับแรงดันอ้างอิง 10 โวลท์ แล้วทำการวัดแรงดันเอาท์พุทของโพเทนชิออมิเตอร์ซึ่งในทางทฤษฎีแล้วแรงดันที่จุดนี้จะแปรตามความต้านทานเป็นเชิงเส้น แต่เมื่ออิมพิแดนซ์ด้านเข้าของภาคที่มาต่อกับโพเทนชิออมิเตอร์มีค่าที่ไม่เป็นอนันต์ก็ จะส่งผลให้แรงดันที่ได้ผิดไปจากทฤษฎี แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้ไปทำการหาค่าความผิดพลาดจากของการโหลดต่อไป

**2.1.2.3 การทดสอบเพื่อหาความผิดพลาดจากการสูญเสียความร้อนของโพเทนชิออมิเตอร์ (Heat Dissipating)**

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการที่จะหลีกเลี่ยงปัญหา เรื่องผลของการโหลดนั้นสามารถทำได้โดยการใช้โพเทนชิออมิเตอร์ที่มีค่าต่ำๆ แต่ก็จะทำให้เกิดผลเสียคือ การที่เกิดความร้อนเนื่อง

จากกระแสที่ไหลผ่านโพเทนชิออมิเตอร์มากเกินไป จนอาจจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นในตัวโพเทนชิออมิเตอร์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนไปได้ โดยในการทดลองนี้จะใช้การจ่ายแรงดันอ้างอิงกับโพเทนชิออมิเตอร์ โดยหมุนแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลาง จากนั้นจึงทำการวัดแรงดันเอาท์พุตโดยปล่อยเวลาทิ้งไว้ นานๆพิจารณาความแตกต่างของค่าความต้านทานที่ได้

**2.1.2.4 การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆเพื่อหาความผิดพลาดจากการที่เปลี่ยนอุณภูมิ**

ในที่นี้การทดสอบนี้ เพื่อหาผลเมื่ออุณหภูมิรอบข้างของโพเทนชิออมิเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง (เพิ่มขึ้น) จะทำให้ความต้านทานที่ได้เปลี่ยนไปมากน้อยเพียงใด ซึ่งจะทำการทดสอบโดยสุ่มโพเทนชิออมิเตอร์ในหลายๆแบบ วิธีการทดสอบคือ นำโพเทนชิออมิเตอร์นั้นมาเลื่อนให้แกนหมุนอยู่ที่ตำแหน่งบริเวณกึ่งกลางแล้วนำไปใส่ไว้ในกล่องเล็กๆที่มีเทอร์โมมิเตอร์อยู่เพื่อวัดอุณหภูมิ โดยต่อขาเอาท์พุทกับโอห์มมิเตอร์ จากนั้นทำการเป่าลมร้อนเพื่อให้อุณหภูมิรอบข้างของโพเทนชิออมิเตอร์สูงขึ้นแล้วทำการบันทึกค่าของอุณหภูมิและความต้านทานที่วัดได้ เพื่อศึกษาคุณสมบัติของโพเทนชิออมิเตอร์ต่ออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง

## 2.2 การทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์

ในการวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างส่วนที่จัดการกับสัญญาน ซึ่งแบ่งออกได้เป็นหลายส่วนด้วยกันคือ

### 2.2.1 การทดสอบส่วนแปลงสัญญานจากอนาลอกเป็นดิจิตอล (A/D)

ในส่วนนี้ได้มีการทดสอบการทำงานของระบบ A/D ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ใช้ไอซีเบอร์ SDM862 ที่มีตัวมัลติเพล็กซ์อยู่ในตัวโดยสามารถมัลติเพล็กซ์ได้ 16 ช่องสัญญานอนาลอก และสัญญานอนาลอกจะถูกแปลงเป็นดิจิตอลขนาด 12 บิต ซึ่งการทดสอบแบ่งแยกออกเป็น 2 แบบคือ

**2.2.1.1 การทดสอบการทำงานขั้นพื้นฐานของทุกส่วน**

วิธีการทดสอบ โดยการเขียนโปรแกรมติดต่อสั่งงานจากคอมพิวเตอร์ไปยังส่วน A/D และอ่านข้อมูลจาก A/D มายังคอมพิวเตอร์ ซึ่งได้มีการทดลองใส่ค่าแรงดันอนาลอกเข้าไปในช่องสัญญานต่างๆทั้ง 16 ช่องสัญญานและทำการเลือกอ่านเพื่อแปลงข้อมูลทีละสัญญาน

**2.2.1.2 การทดสอบเพื่อวัดค่าความผิดพลาดของ A/D**

ในการทดลองนี้ได้มีการทดลองใส่ค่าแรงดันที่ค่าต่างๆกันไปเพื่อให้ A/D แปลงค่าเป็นดิจิตอล แล้วจึงทำการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่อ่านได้กับค่าที่ได้จากการคำนวน (Ideal Value) ทำการวิเคราะห์เพื่อหาความผิดพลาดของระบบการเปลี่ยนสัญญานอนาลอกเป็นดิจิตอลนี้

### 2.2.2 ทดสอบส่วนจัดการสัญญานอนาลอก (ADPU)

ในการวิจัยนี้ ได้มีการออกแบบให้สัญญานส่วนที่ออกจากโพเทนชิออมิเตอร์จะมีการปรับแต่ง โดยมีการปรับค่าให้เป็นศูนย์และมีการปรับอัตราขยายของสัญญานก่อนที่จะส่งสัญญานเข้าสู่ตัว A/D ซึ่ง

ได้ทำการทดสอบโดยการใส่แรงดันค่าต่างๆให้กับอินพุทของภาคนี้ แล้วทำการวัดแรงดันที่เอาท์พุทโดยทำการทดสอบที่การปรับอัตราขยายที่แตกต่างกันไป แล้วนำค่าที่ได้นี้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวนเพื่อหาความผิดพลาดจากระบบ

**2.2.3 การทดสอบส่วนจัดการข้อมูลจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่และตัวตรวจรู้สัมผัส**

การทดสอบในส่วนนี้ได้ทำการทดสอบ เพื่อศึกษาการทำงานของระบบว่ามีความถูกต้องตามเงื่อนไขของการออกแบบหรือไม่ โดยการเขียนโปรแกรมสั่งงานและรับข้อมูลจากส่วนนี้ในสภาวะที่มีการกระตุ้นและไม่มีการกระตุ้นจากตัวตรวจรู้ในช่องสัญญานต่างๆ

**2.2.4 การทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์โดยมีโพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้**

ซึ่งระบบทั้งหมดในที่นี้คือ การนำเอาโพเทนชิออมิเตอร์ต่อเข้ากับแรงดันอ้างอิง และส่งข้อมูลผ่านส่วนจัดการข้อมูลทางอนาลอก และส่งไปยังตัวแปลงสัญญานจากอนาลอกเป็นดิจิตอลโดยทั้งระบบใช้การเขียนโปรแกรมสั่งงานจากคอมพิวเตอร์และส่งข้อมูลไปเก็บยังคอมพิวเตอร์ วิธีทดลองคือการหมุนโพเทนชิออมิเตอร์ไปที่ตำแหน่งมุมที่ต่างๆกัน แล้วบันทึกค่าดิจิตอลที่ได้ข้อมูลที่ได้จะทำการหาความผิดพลาดของทั้งระบบซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดสอบในส่วนนี้จัดเป็นข้อมูลที่สำคัญ เพราะถือเป็นคุณลักษณะของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ที่ได้ออกแบบก็ว่าได้เป็นข้อจำกัดที่ ทำให้การนำไปใช้งานจริงสามารถประเมินผลที่ควรจะออกมาได้ในขั้นต้น

**2.3. การทดสอบระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรี**

ในขั้นตอนสุดท้ายของการทดสอบได้มีการสร้างเป็นแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรีต้นแบบขึ้นมา เพื่อทดสอบหาผลทางปฏิบัติเมื่อนำโพเทนชิออมิเตอร์ไปติดตั้งเป็นระบบตรวจรู้ตำแหน่งในการทำงานจริงๆในที่นี้ได้ออกแบบการทดสอบเพื่อหาความผิดพลาดของทั้งระบบ แบ่งการทดสอบออกเป็นหลายแบบ คือ

**2.3.1 การทดสอบความแม่นในการทำงานของระบบแขน**

โดยการให้แขนในแนวแกน X และ แกน Y เคลื่อนที่ไปเป็นระยะทางเท่าๆกันในที่นี้ใช้ทุกๆค่า 200 จากการอ่านได้จากคอมพิวเตอร์ ซึ่งแปลงมาจากระบบตรวจรู้แล้วทำการหาความผิดพลาดของระบบ

**2.3.2 การทดสอบความเที่ยง (Precision) ในการทำงานของระบบแขน**

หลักการคือการทดสอบว่าเมื่อมีการสั่งให้เขียนทับที่จุดเดิมหลายครั้ง ส่วนของแขนจะสามารถเขียนได้ตรงในจุดเดิมหรือไม่ วิธีทดสอบคือ การสั่งให้แขนลากเส้นเป็นช่วงๆไปเรื่อยๆจนเกือบสุดขอบเขตความยาวของการเคลื่อนที่แล้วกลับมาเริ่มต้นเขียนที่เดิมใหม่ซ้ำๆแล้วพิจารณาระยะที่เบี่ยงเบนไป

### 2.3.3 การทดสอบระยะแบคเลสในการทำงานของระบบแขนหุ่นยนต์

หลักการคือ การทดสอบว่าเมื่อมีการสั่งให้เขียนทับที่จุดเดิมโดยให้มีการเคลื่อนที่ย้อนทางกันส่วนของแขนจะสามารถเขียนได้แม่นยำในจุดเดิมเท่าไร วิธีทดสอบคือการสั่งให้แขนลากเส้น 3 เส้นขนานกันโดยให้เขียนที่จุด 500,1000 และ 1500 โดยเขียนไปและกลับรวมทั้งสิ้น 6 รอบ ซึ่งจะพบว่าเส้นกลางจะมีทิศทางการเข้ามาที่ตำแหน่งนี้จากทั้ง 2 ด้านทำให้เกิดความผิดพลาดจากแบคเลสได้ แล้วทำการวัดระยะผิดพลาดของเส้นกลางจากการวาดหลายๆครั้งนั้น

### 2.3.4 การทดสอบความผิดพลาดจากระบบขับเคลื่อน

หลักการคือ เพื่อหาค่าความผิดพลาดจากระบบขับเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์ต้นแบบ วิธีทดสอบคือ การหมุนมอเตอร์ไปเป็นจำนวนทุกๆ 50 รอบแล้ววัดระยะทางที่ได้ หาค่าความแม่นของระบบและทำการหมุนมอเตอร์ไปและกลับซ้ำๆกัน 3 จุดที่ห่างกัน 50 รอบ เพื่อหาระยะแบคเลสของจุดกลาง

## คุณลักษณะทางเทคนิค

ในการทดสอบระบบต่างๆที่ได้พิจารณานั้น เราสามารถระบุรายละเอียดของการทดสอบรวมทั้งผลลัพท์ของการทดสอบออกเป็นลักษณะที่สำคัญคือ

**1. ความแม่น (Accuracy)**

การหาความแม่นเป็นการหาคุณสมบัติของสิ่งที่จะศึกษาหรือทำการวัด เพื่อให้ทราบถึงความเป็นไปได้ที่ระบบจะมีความถูกต้องเมื่อนำไปใช้งาน ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อพูดถึงความแม่นอาจจะหมายถึงความผิดพลาดที่จะเป็นไปได้ (Inaccuracy) มากกว่า โดยในที่นี้เราสามารถหาความแม่นของระบบได้จาก

Fractional Absolute Error (%FAE) = $\frac{|m-tv|}{fsd}$ x100 %

หรือ Full Scale Output (FSO) = $\pm\frac{|m-tv|}{fsd}$ x100 %

โดยที่ m = ค่าที่ได้จากการวัด (Measurand )

tv = ค่าจริง (True Value )

fsd = ค่าเต็มสเกล ( Full Scale Deflection )

ซึ่งในที่นี้ |m-tv| ก็คือค่าความผิดพลาด (Error) ของค่าที่วัดได้จากค่าจริงนั่นเอง ในทางปฏิบัติเมื่อมีการวัดค่าหลายๆค่า เราสามารถหาค่าความแม่นได้จากค่าความผิดพลาดสูงสุด (Maximum Error)

FSO = $\pm\frac{|m-tv|}{fsd}_{max}$ x100 %

โดยที่ | m-tv |max ค่าที่ m และ tv แตกต่างกันมากที่สุด (Maximum Error) ซึ่ง ในการวิจัยนี้จะใช้การหาความแม่นตามที่กล่าวมาเป็นหลักในการเปรียบเทียบและพิจารณา

**2. สภาพเชิงเส้น (Linearity)**

เป็นการหาว่า คุณสมบัติของระบบที่กำลังพิจารณามีการเปลี่ยนแปลงที่เป็นความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นหรือไม่ ซึ่งมีวิธีการคำนวนหาหลายวิธี แต่ในที่นี้จะใช้วิธีกำหนดจุดปลายของค่าที่วัดได้เป็นจุดอ้างอิงแล้วสร้างสมการเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่าง 2 จุดนั้น เพราะฉนั้นในอินพุทเดียวกันเอาท์พุทที่ได้จากการคำนวนจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งความผิดพลาดที่ได้ก็อาจคิดค่า Fractional Absolute Error หรือ ค่า Full Scale Output ก็ได้

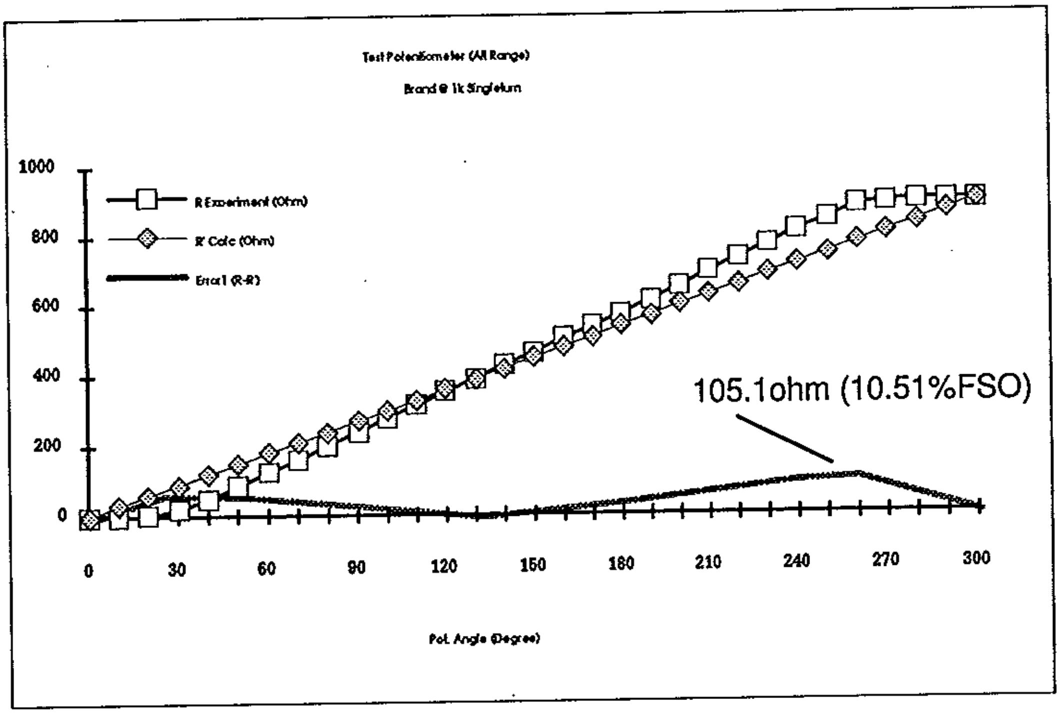
# บทที่ 7

# ผลการวิจัย

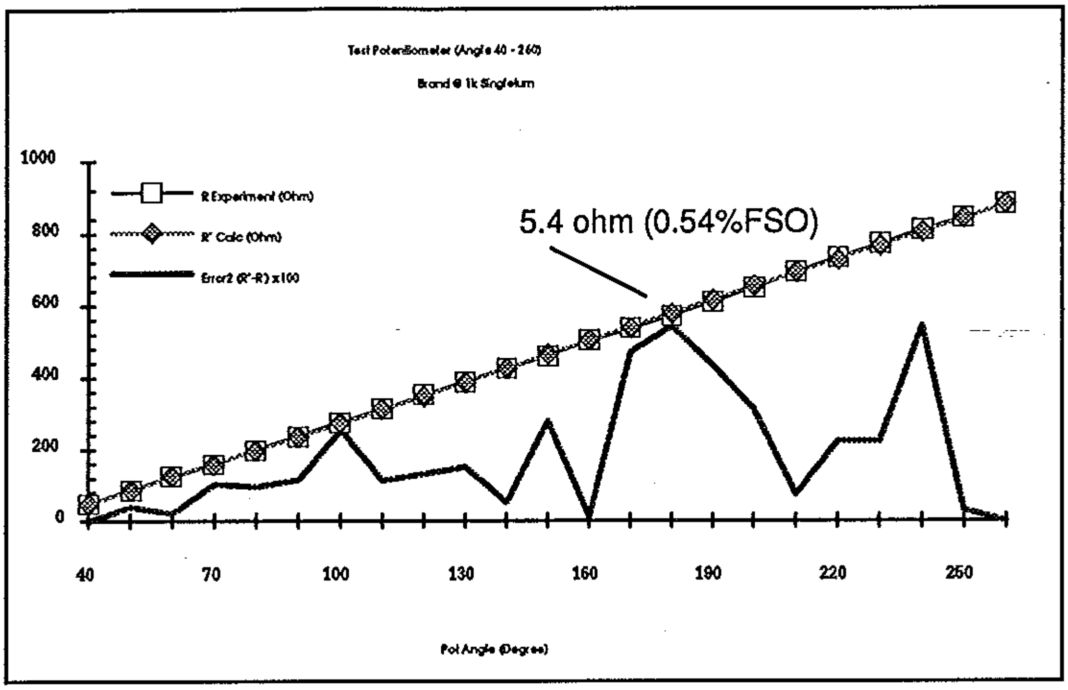
## ผลการวิจัยการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ

ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ มีผลการทดสอบแยกตามชนิดและยี่ห้อการค้าตามที่ได้กล่าวมาแล้วดังต่อไปนี้

### 1. การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ @ B1k

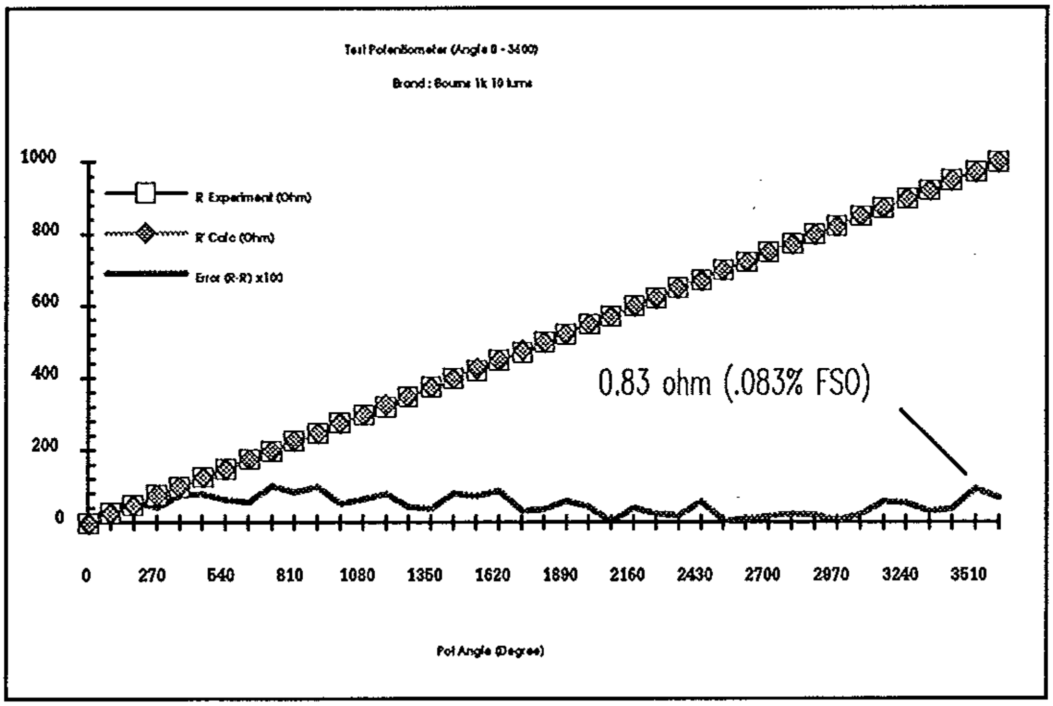



ภาพประกอบ 7.1 กราฟแสดงผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Brand @ 1k เมื่อพิจารณาทุกมุมที่สามารถเคลื่อนที่ได้



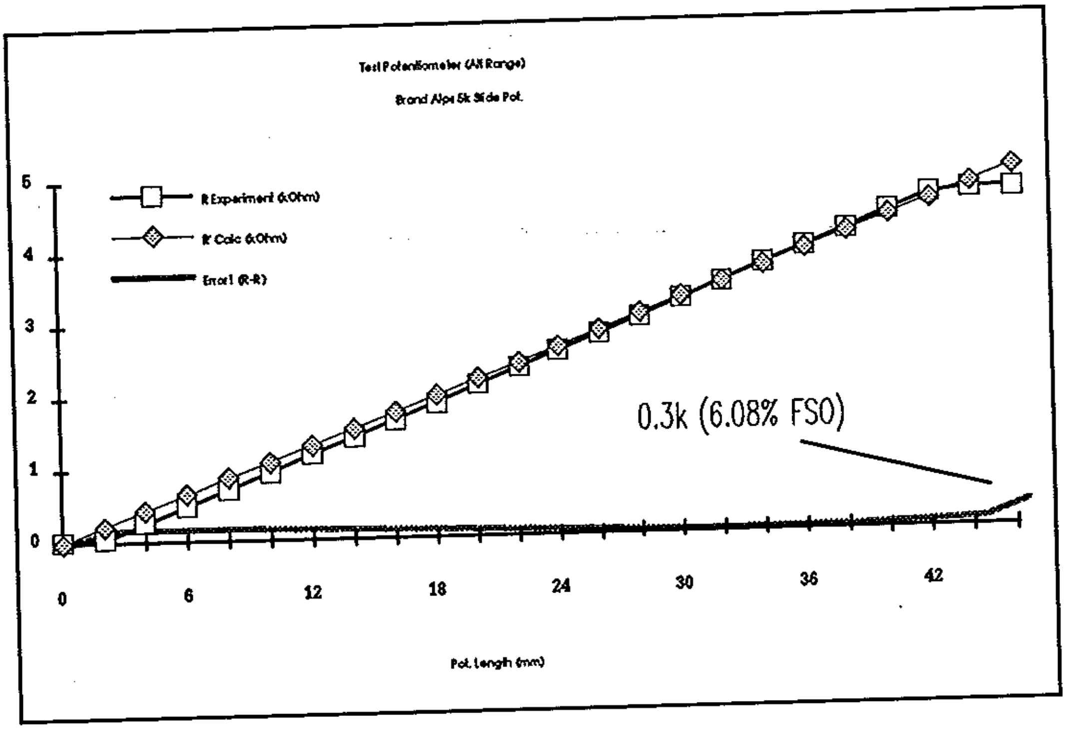

ภาพประกอบ 7.2 กราฟพิจารณาความเป็นเชิงเส้นของโพเทนชิออมิเตอร์ Brand @ 1k เมื่อพิจารณาเฉพาะจุดช่วงกลางของการใช้งาน

## 2. การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 3590s-1-102

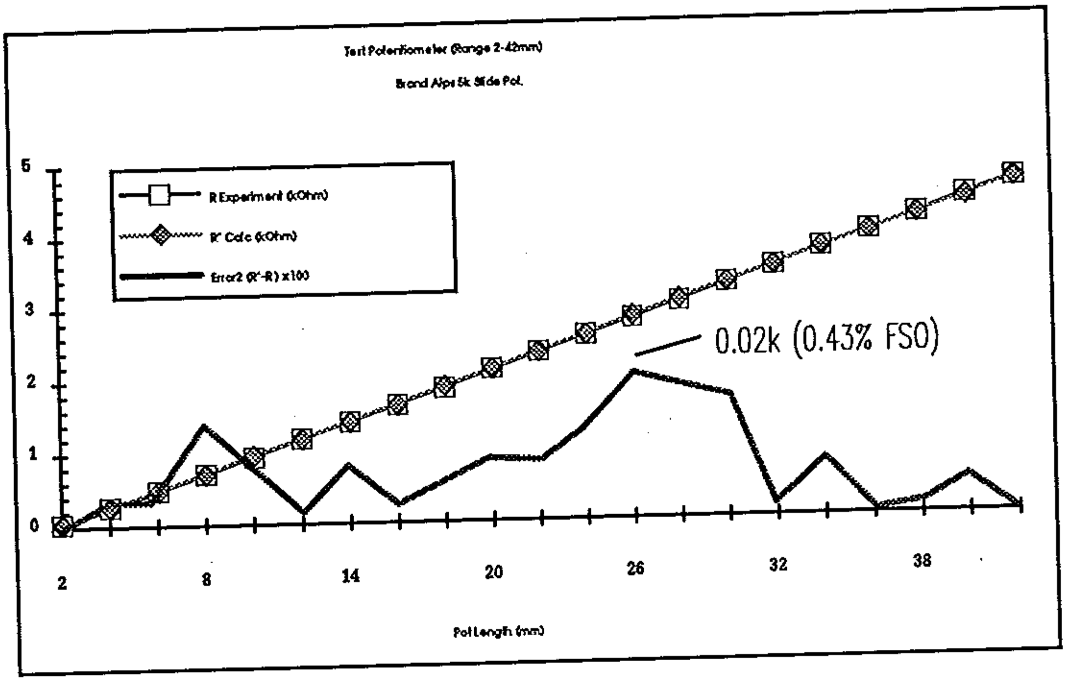



ภาพประกอบ 7.3 กราฟแสดงผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Brand Burns 1k

3. **การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Alps 5k Ohm**

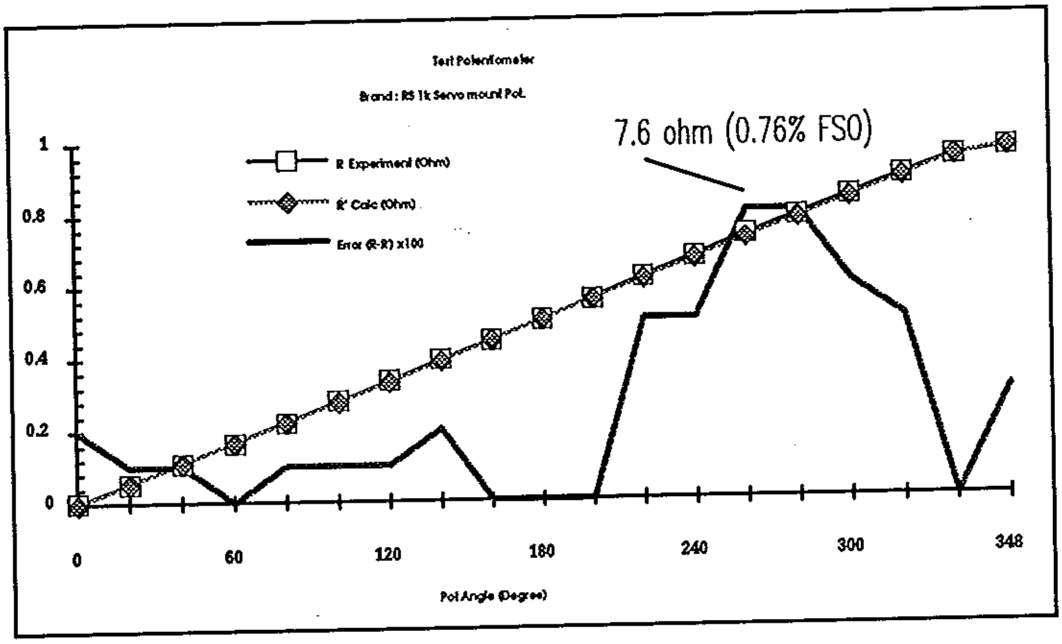



ภาพประกอบ 7.4 กราฟผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Alps 5k เมื่อพิจารณาทุกระยะที่เคลื่อนที่ได้




ภาพประกอบ 7.5 กราฟพิจารณาความเป็นเชิงเส้นของโพเทนชิออมิเตอร์ Alps 5k เมื่อพิจารณาเฉพาะจุดช่วงกลางของการใช้งาน

**4. การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ RS 1k**




ภาพประกอบ 7.6 กราฟแสดงผลการทดสอบนของโพเทนชิออมิเตอร์ Brand Rs 1k

**5. สรุปผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ**

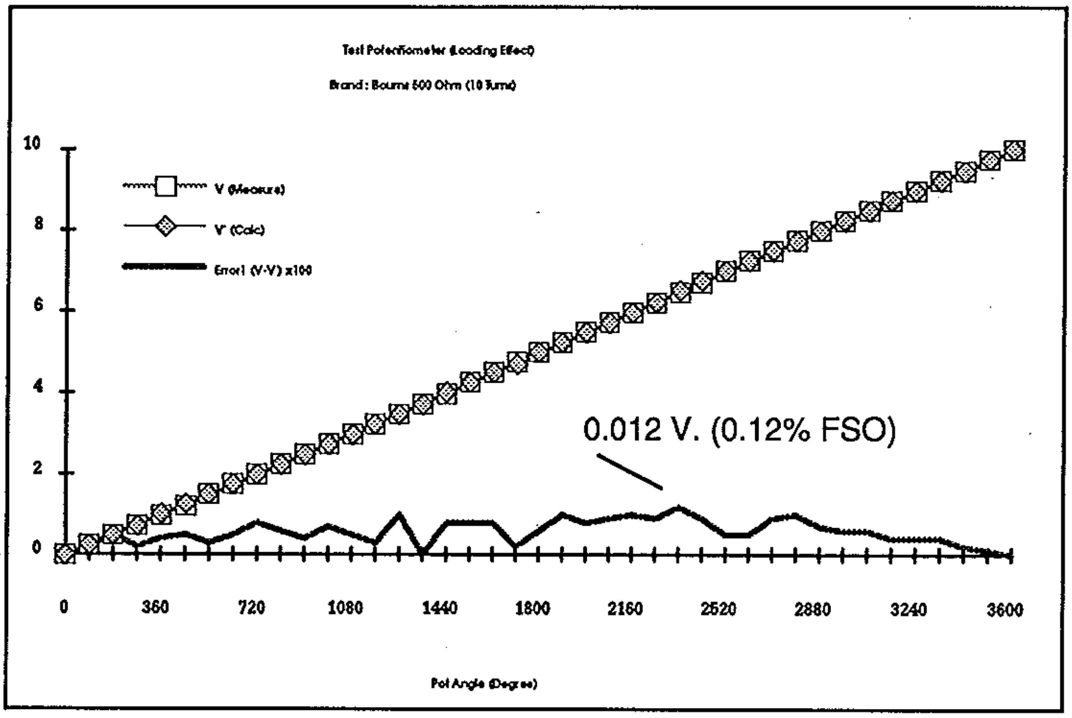
ตาราง 7.1 สรุปผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ

| | **@ B1k** | | **Alps 5k** | | **RS 1k** | **Bourns 1k** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | (0-300°) | (40-260°) | (0-45mm) | (2-42mm) | (0-360°) | (0-3600°) |
| Accuracy (%FSO) | 10.51 % | 0.54 % | 6.08 % | 0.43 % | 0.76 % | 0.083 % |

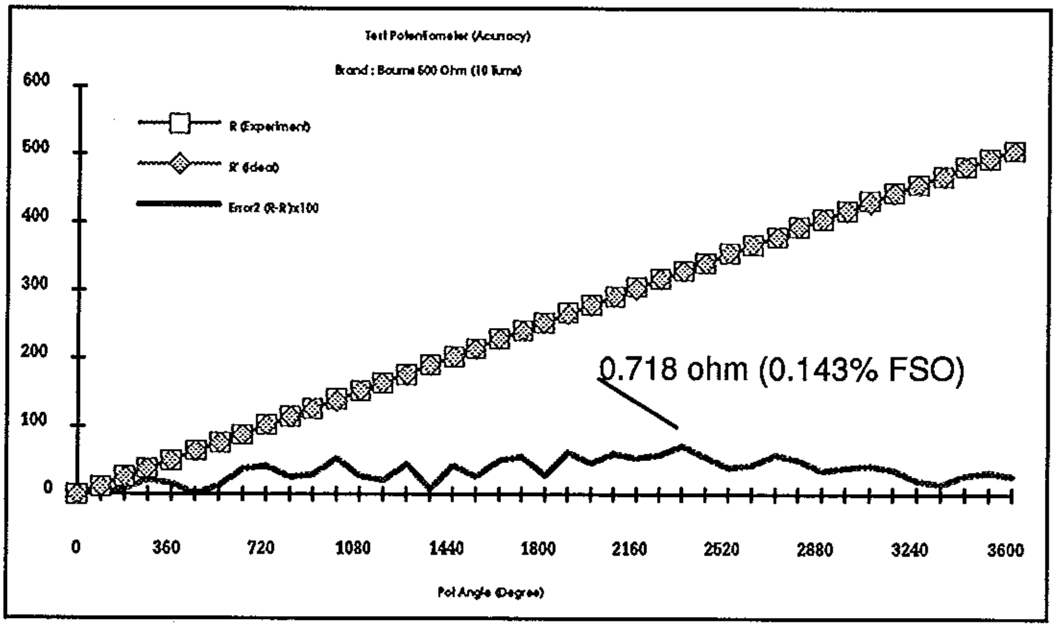
**ผลการวิจัยผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์**

ผลจากการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns ซึ่งพบว่ามีความผิดพลาดน้อยที่สุดในกลุ่มทดสอบ โดยหาค่าความผิดพลาดจากผลของการโหลดจากการต่อกับวงจรที่ใช้ทดลองซึ่งมีความต้านทานด้านเข้า 100k$\Omega$ และความแม่นยำของแต่ละโพเทนชิออมิเตอร์ดังได้กล่าวมาแล้วเป็นดังนี้ :

**1. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns ขนาด 500 Ohm**

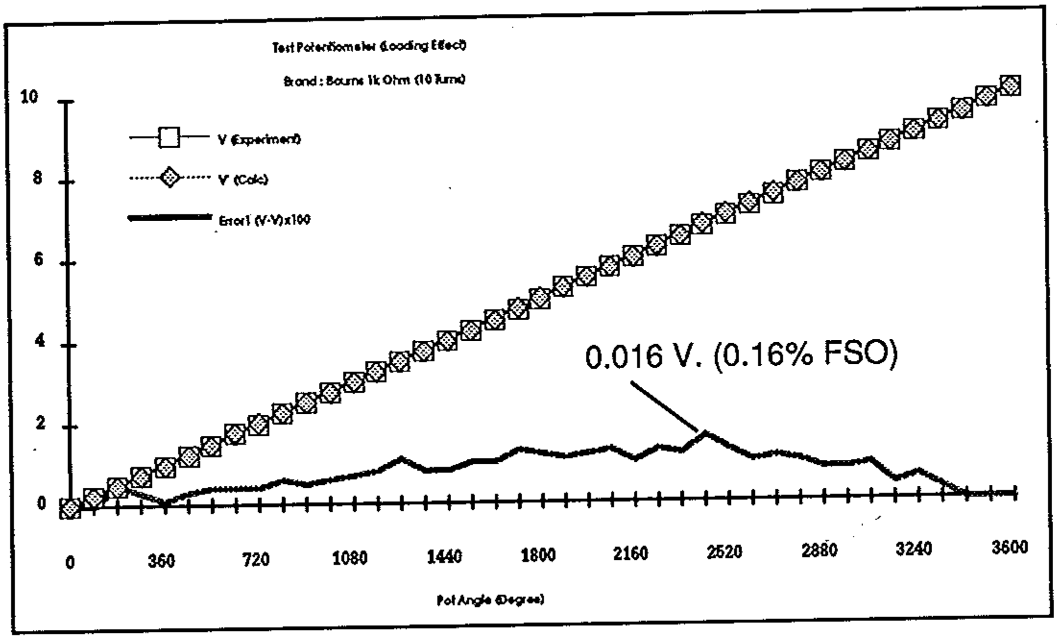



ภาพประกอบ 7.7 ผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 500 Ω

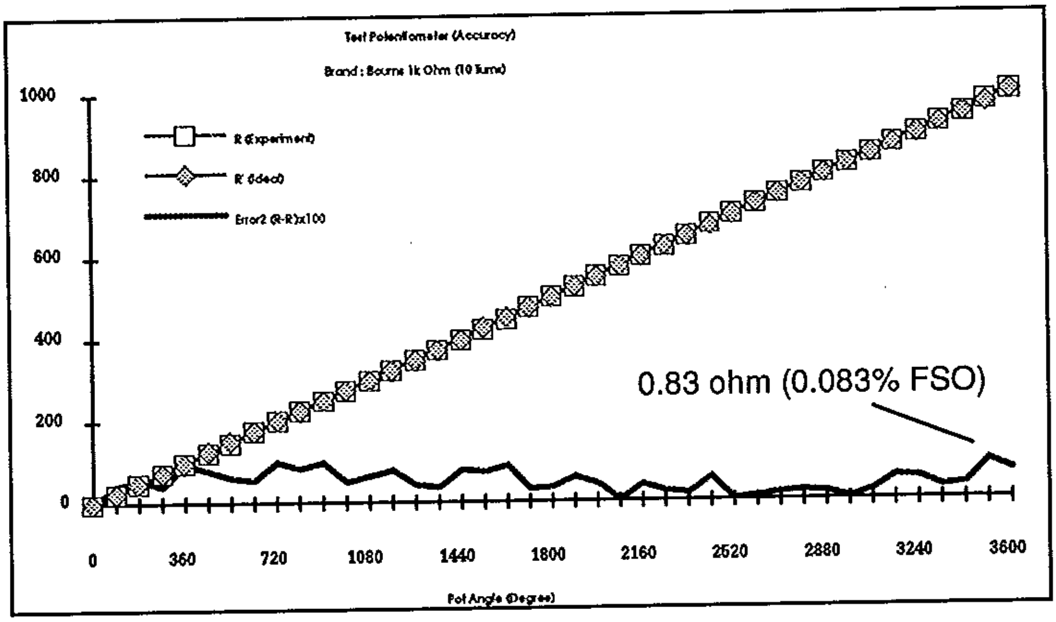



ภาพประกอบ 7.8 ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 500 Ω

**2. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ขนาด 1k Ω**

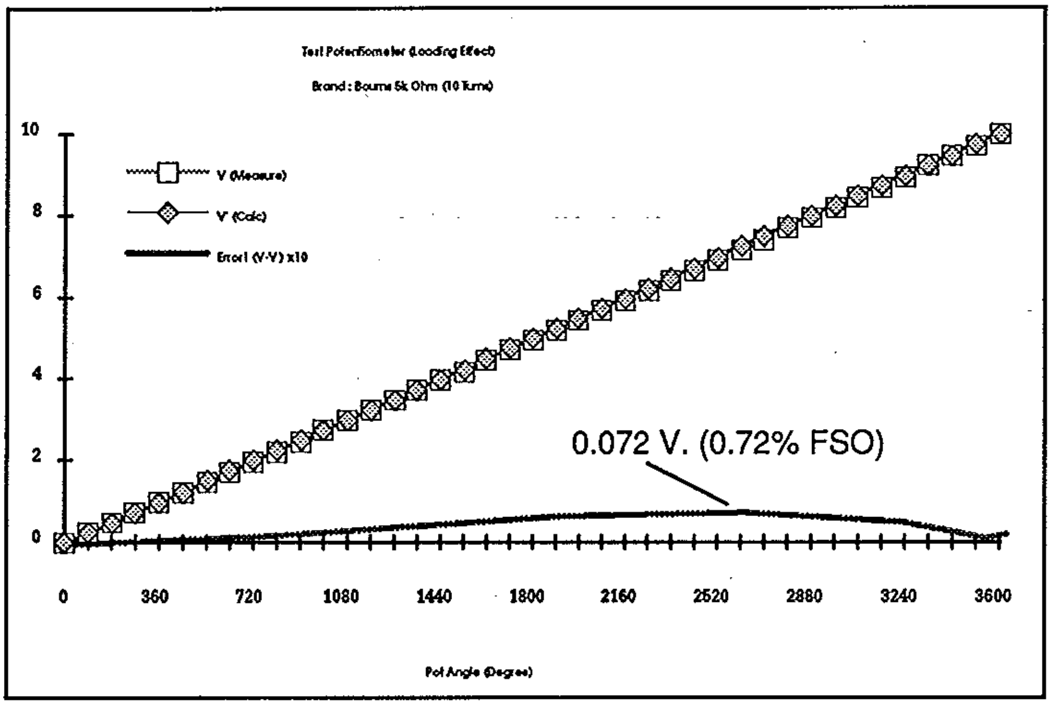



ภาพประกอบ 7.9 ผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 1k Ω

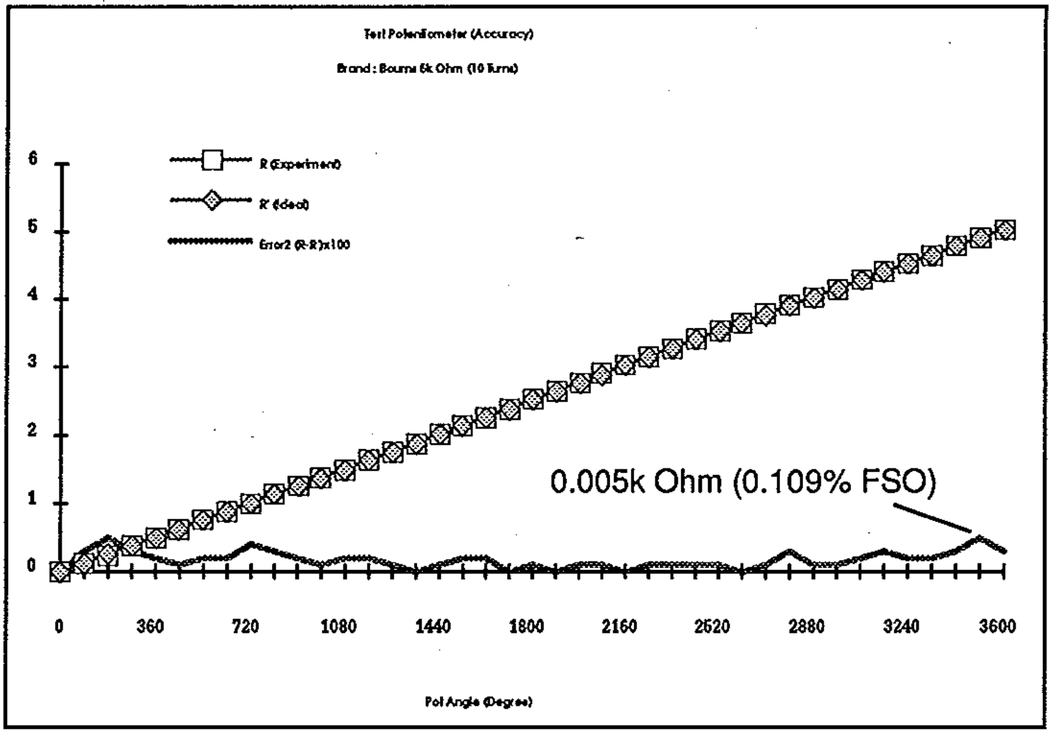



ภาพประกอบ 7.10ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 1k Ω

**3. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ขนาด 5k Ohm**

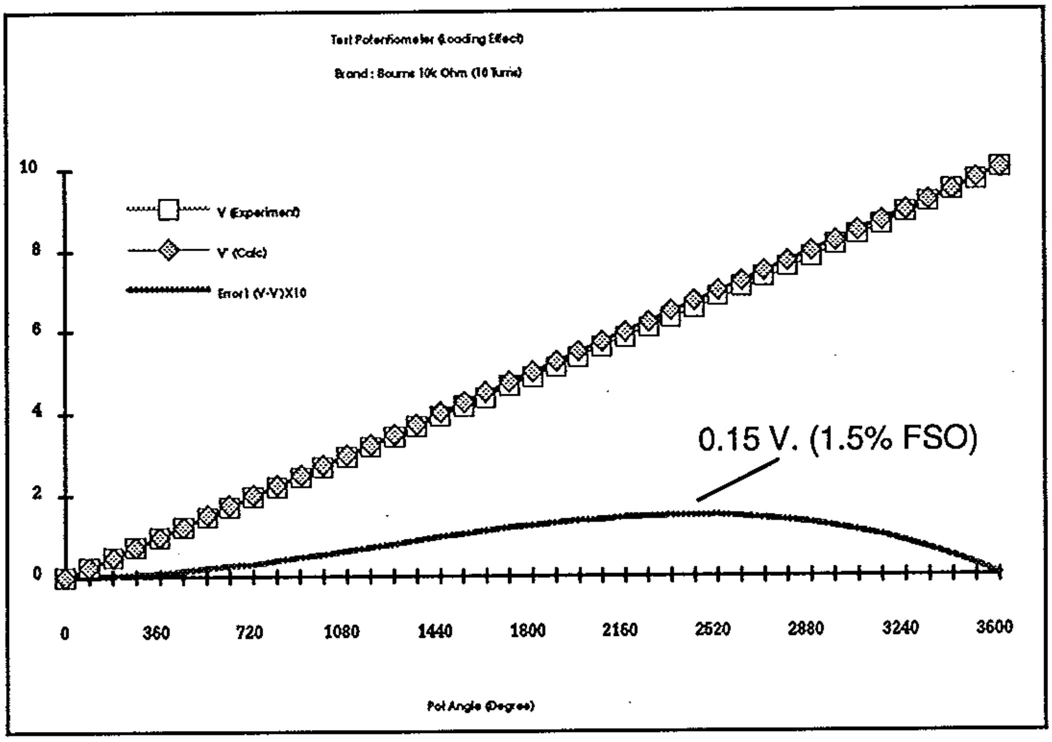



ภาพประกอบ 7.11 ผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 5k $\Omega$

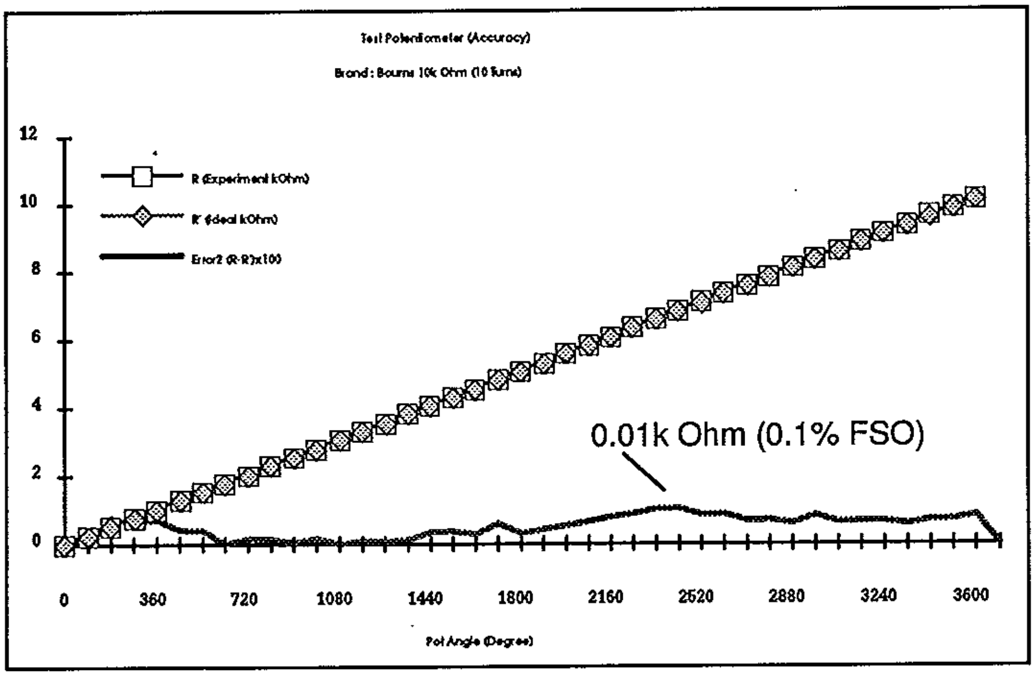



ภาพประกอบ 7.12 ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 5k $\Omega$

**4. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ขนาด 10k Ohm**

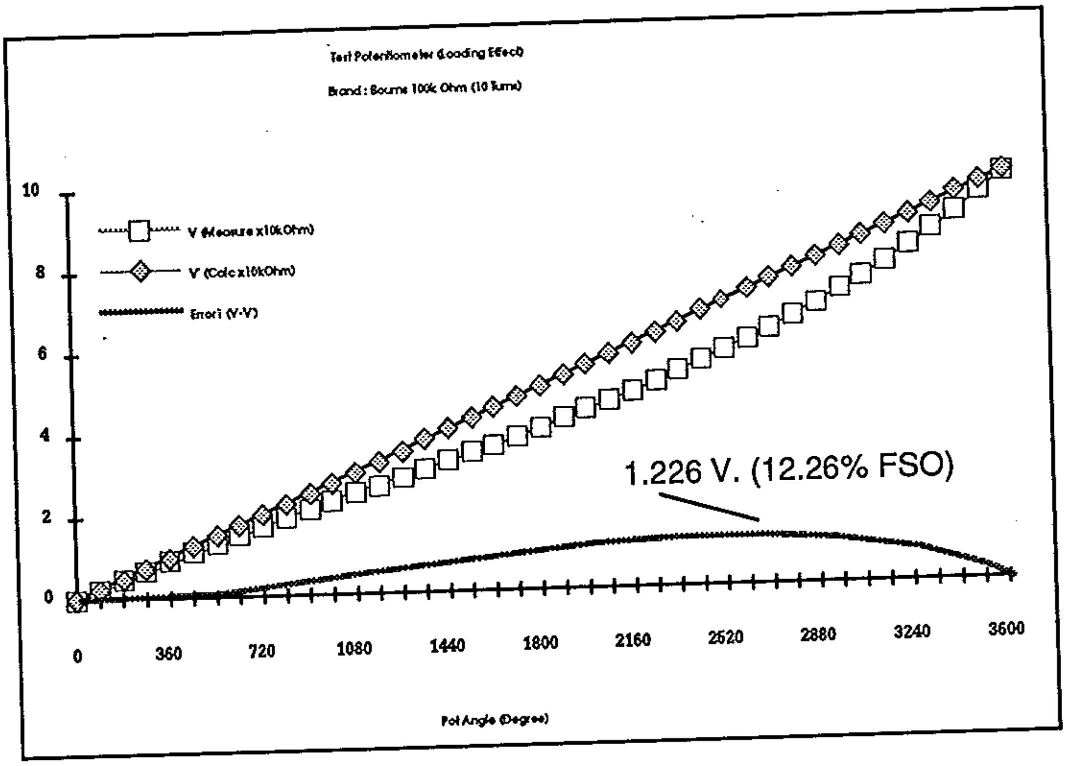



ภาพประกอบ 7.13 ผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 10k Ω

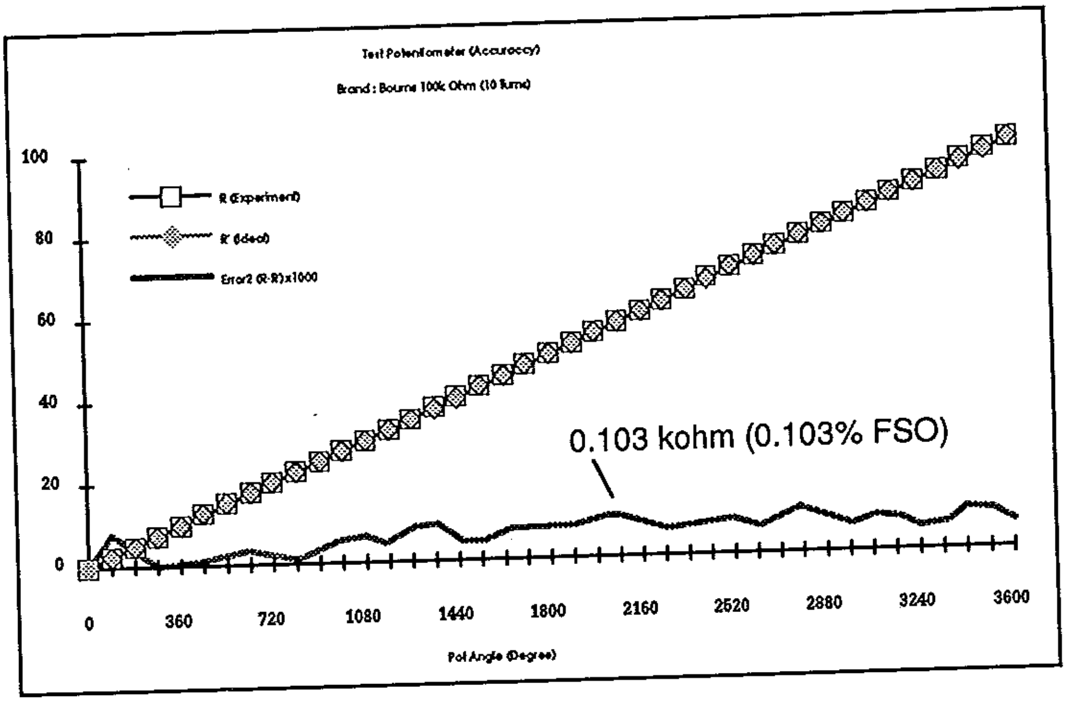



ภาพประกอบ 7.14 ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 10k Ω

## 5. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 100k Ohm




ภาพประกอบ 7.15 ผลการทดสอบผลของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 100k Ω

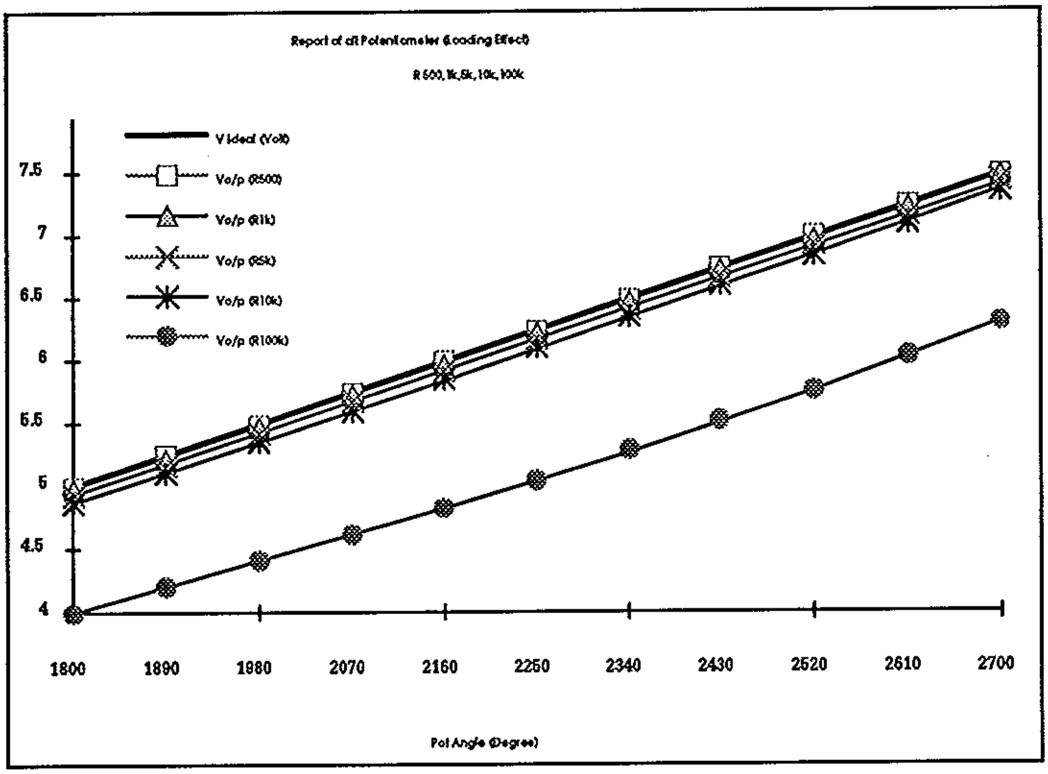



ภาพประกอบ 7.16 ผลการทดสอบความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 100k Ω

## 7. สรุปผลการทดลองเปรียบเทียบผลของการโหลดทุกค่าความต้านทานที่ทดสอบ

ตาราง 7.2 สรุปผลของการโหลดและความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์ค่าต่างๆ

| Potentiometer | R500 | R1k | R5k | R10k | R100k |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Loading Effect*** | | | | | |
| Error (%FSO) | ± 0.125 | ± 0.160 | ± .723 | ± 1.500 | ± 12.26 |
| ***Accuracy*** | | | | | |
| %FSO | ± 0.14 | ± 0.08 | ± 0.11 | ± 0.10 | ± 0.10 |




ภาพประกอบ 7.17 แสดงการเปรียบเทียบผลกระทบของการโหลดในการใช้โพเทนชิออมิเตอร์ค่าต่างๆกัน

ผลการวิจัยนี้ข้อมูลหลักที่ต้องการทราบคือ การเกิดผลกระทบของการโหลดที่จะเกิดจากการที่มีการต่อโพเทนชิออมิเตอร์กับภาคถัดไปหรือระบบวัดที่มีค่าอิมพิแดนซ์ด้านเข้าไม่เป็นอนันต์ ในที่นี้จากการออกแบบวงจรพบว่าภาคถัดไปที่ติดต่อกับโพเทนชิออมิเตอร์มีค่าอิมพิแดนซ์ด้านเข้าโดยประมาณ 100 k โอห์ม ซึ่งค่านี้ได้จากทฤษฎีของการใช้ออปแอมป์เป็นวงจรขยายแบบกลับเฟสในภาคปรับศูนย์ ซึ่งมีค่าประมาณ 100k$\Omega$

**ผลการวิจัยการตรวจสอบความผิดพลาดต่ออุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์**

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในวิธีทดสอบซึ่งผลที่ออกมานั้นทำให้สามารถทราบได้ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิรอบข้างของโพเทนชิออมอเตอร์(เพิ่มอุณหภูมิ) จะทำให้ค่าความต้านทานของโพเทนชิออมิเตอร์แต่ละแบบมีการเปลียนแปลงไปอย่างไร ซึ่งผลการทดลองแยกตามชนิดของโพเทนชิออมิเตอร์ที่ใช้ตรวจสอบได้ดังนี้ :

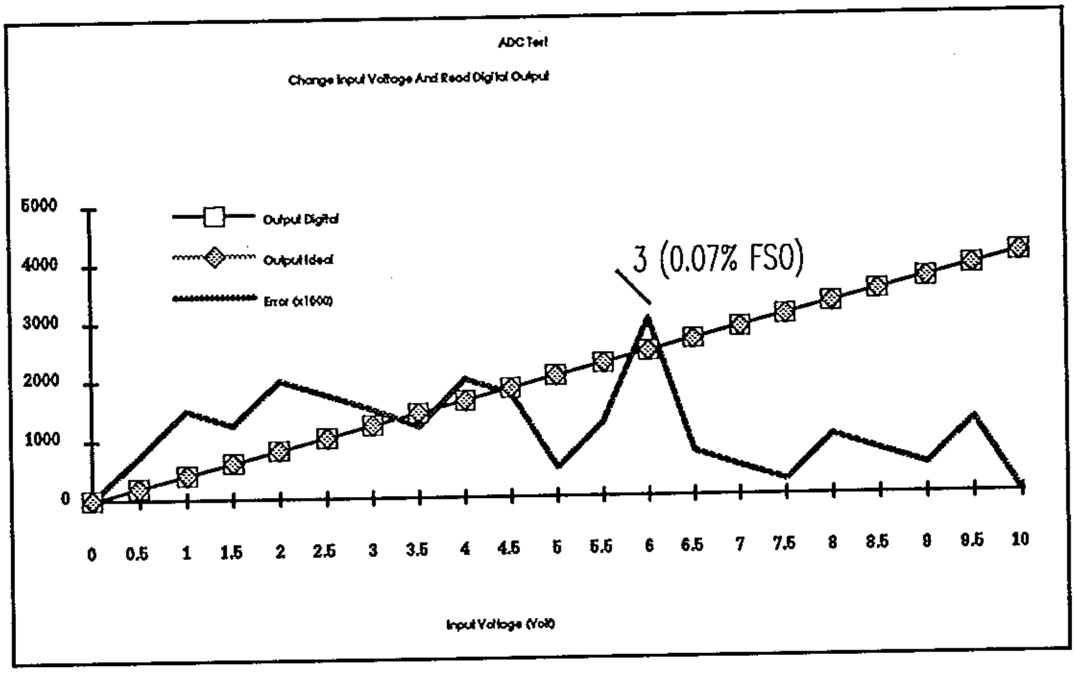
ตาราง 7.3 สรุปผลการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ

| | @ | RS | Alps | <- - - - - Bourns | | | - - - - - - - - > |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1k | 1k | 5k | 500 | 1k | 10k | 100k |
| Max Error ( $\Omega$) | -12.80 | 1.40 | -0.05k | 0.50 | 0.40 | 0.003k | 0.030k |
| Max Error ( % ) | 2.54% | 0.28% | 2.01% | 0.20% | 0.08% | 0.060% | 0.060% |
| Temp. Coef( $\Omega/^{\circ}C$) | -0.32 | 0.037 | -1.32 | 0.013 | 0.011 | 0.079 | 0.79 |

**ผลการทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์**

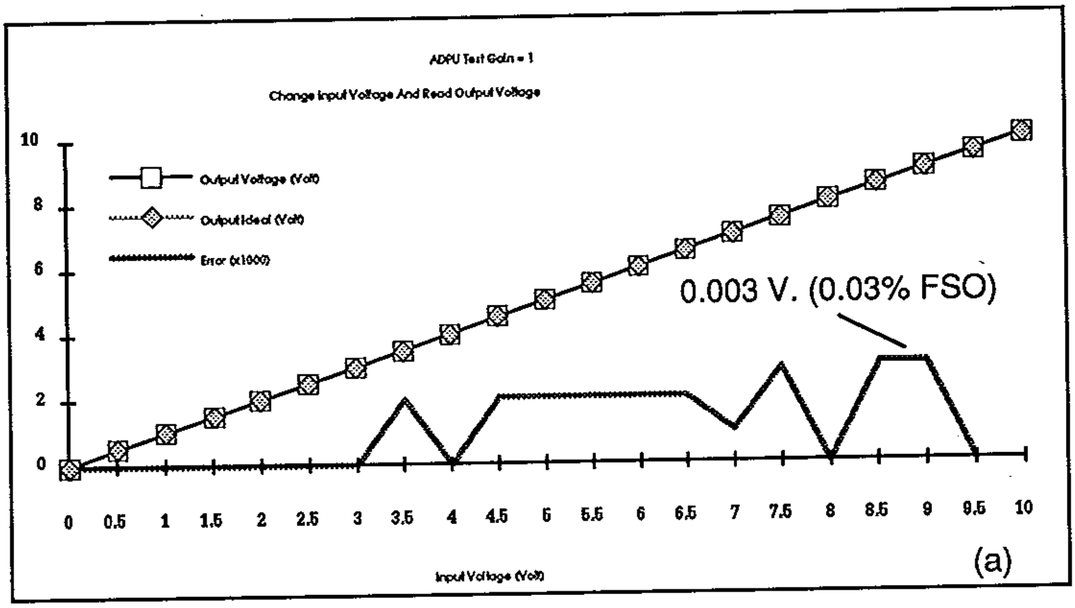
ในที่นี้จะเป็นผลการทดสอบส่วนต่างๆของระบบที่ได้ออกแบบสร้างขึ้นมา เป็นการหาความผิดพลาดในแต่ละส่วนและการทำงานโดยรวมของระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์มีผลการทดสอบดังนี้

**1. ผลการทดสอบตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล**

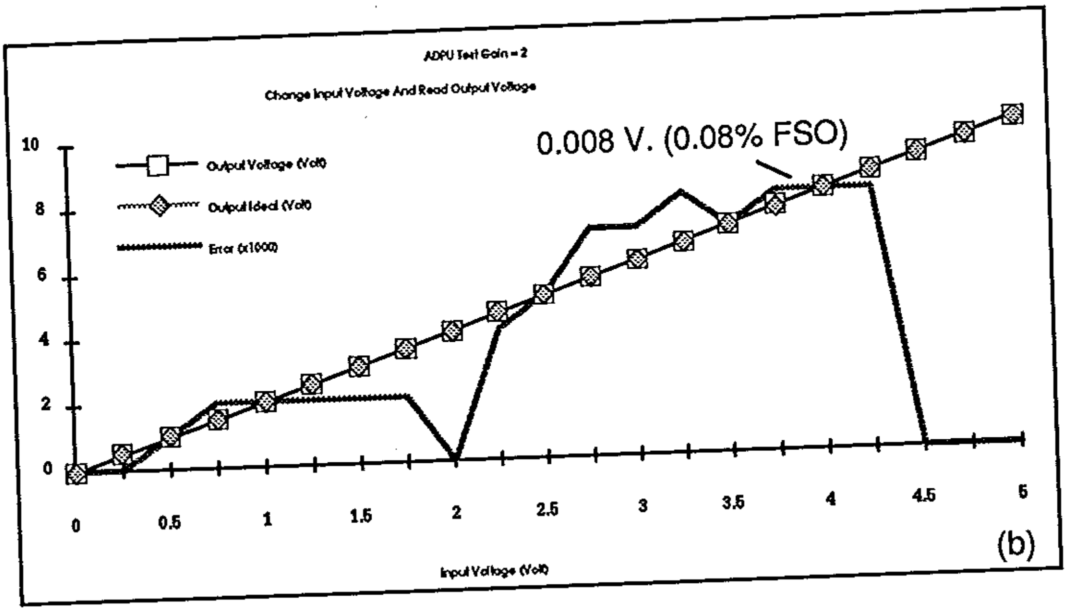



ภาพประกอบ 7.18 แสดงผลการทดสอบตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล

**2. ผลการทดสอบหน่วยจัดการข้อมูลอนาลอก**

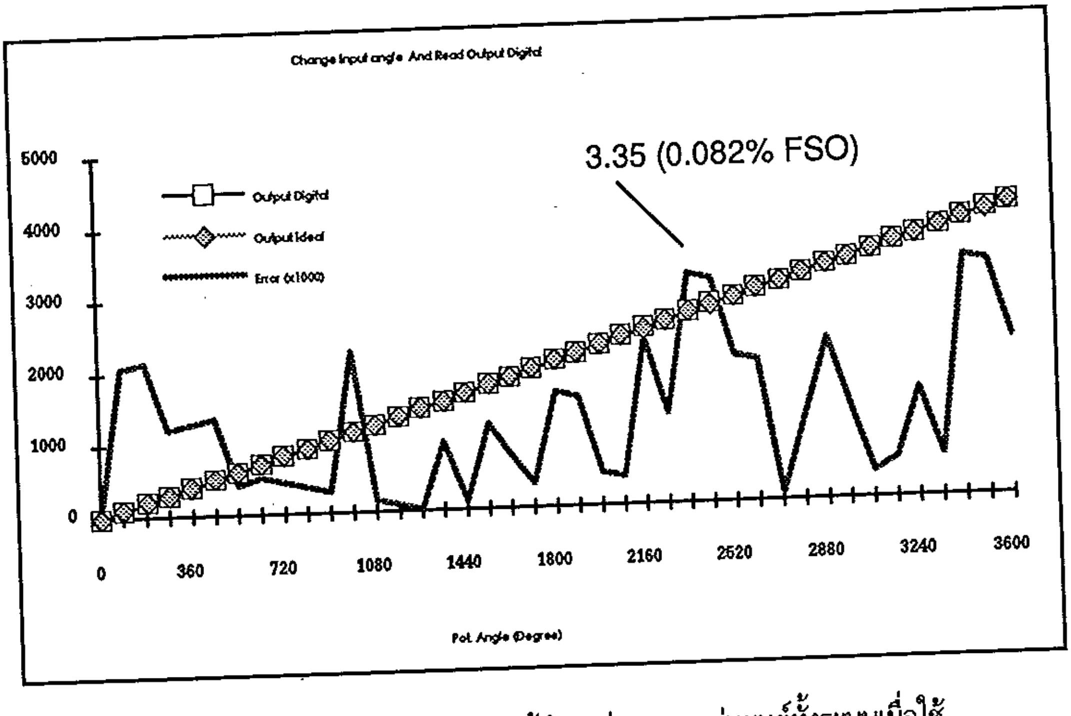



ภาพประกอบ 7.19 แสดงผลการทดสอบหน่วยจัดการข้อมูลอนาลอกที่อัตราขยายเป็น 1




ภาพประกอบ 7.20 แสดงผลการทดสอบหน่วยจัดการข้อมูลอนาลอกที่อัตราขยายเป็น 2

**3. ผลการทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ทั้งระบบเมื่อใช้โพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้**




ภาพประกอบ 7.21 แสดงผลการทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ทั้งระบบเมื่อใช้โพเทนชิออมิเตอร์ เป็นตัวตรวจรู้

**4. ผลการทดสอบค่าแรงดันที่ได้เมื่อต่อโพเทนชิออมิเตอร์กับแรงดันอ้างอิงเป็นเวลานาน**

4. **ผลการทดสอบค่าแรงดันที่ได้เมื่อต่อโพเทนชิออมิเตอร์กับแรงดันอ้างอิงเป็นเวลานาน**

ผลปรากฏว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานใดๆ

**ผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรีทั้งแนว**

1. **การทดสอบหาความแม่น (Accuracy)**

ตาราง 7.4 แสดงผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี

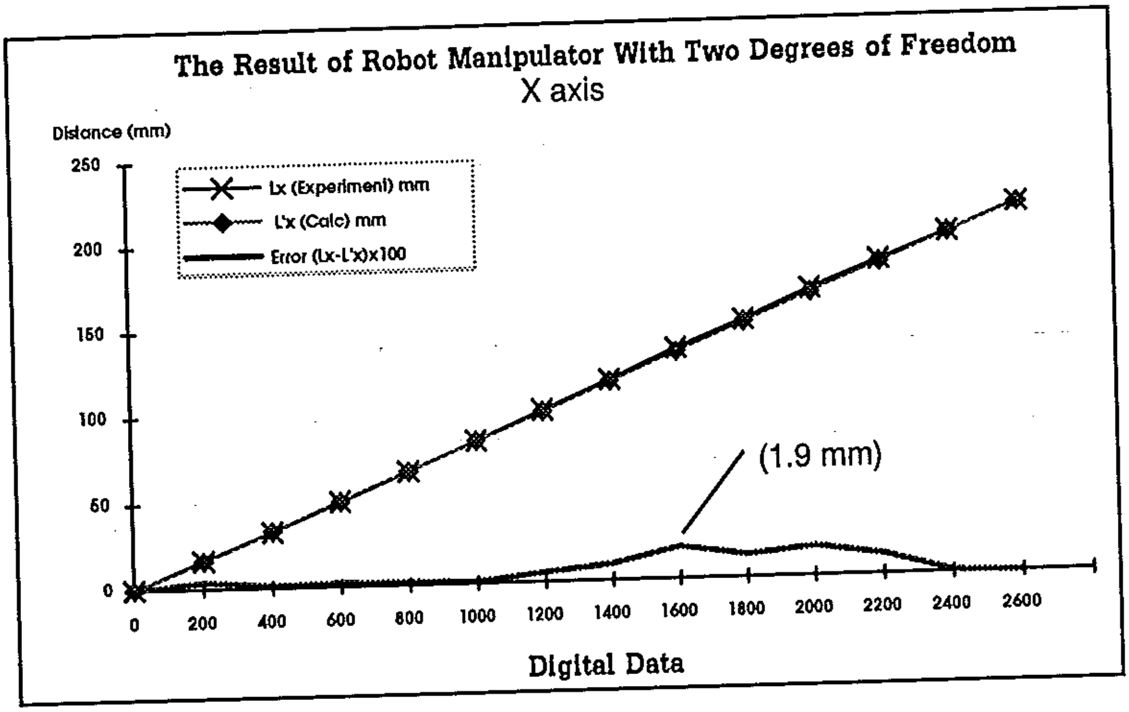
| D | D' | Lx (mm) | L'x (mm) | Ex (mm) | Ly (mm) | L'y (mm) | Ex (mm) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 400 | 0 | 0.0 | 0.00 | 0.00 | 0.0 | 0.00 | 0.00 |
| 600 | 200 | 17.0 | 16.58 | 0.42 | 16.5 | 16.35 | 0.15 |
| 800 | 400 | 33.0 | 33.15 | -0.15 | 33.0 | 32.69 | 0.31 |
| 1000 | 600 | 49.5 | 49.73 | -0.23 | 49.0 | 49.04 | -0.04 |
| 1200 | 800 | 66.5 | 66.31 | 0.19 | 65.5 | 65.38 | 0.12 |
| 1400 | 1000 | 83.0 | 82.88 | 0.12 | 82.0 | 81.73 | 0.27 |
| 1600 | 1200 | 100.0 | 99.46 | 0.54 | 98.5 | 98.08 | 0.42 |
| 1800 | 1400 | 117.0 | 116.04 | 0.96 | 115.0 | 114.42 | **0.58** |
| 2000 | 1600 | 134.5 | 132.62 | **1.88** | 131.0 | 130.77 | 0.23 |
| 2200 | 1800 | 150.5 | 149.19 | 1.31 | 147.0 | 147.12 | -0.12 |
| 2400 | 2000 | 167.5 | 165.77 | 1.73 | 163.5 | 163.46 | 0.04 |
| 2600 | 2200 | 183.5 | 182.35 | 1.15 | 180.0 | 179.81 | 0.19 |
| 2800 | 2400 | 199.0 | 198.92 | 0.08 | 196.5 | 196.15 | 0.35 |
| 3000 | 2600 | 215.5 | 215.50 | 0.00 | 212.5 | 212.50 | 0.00 |

D : digital data D' : digital data (relative with 400)

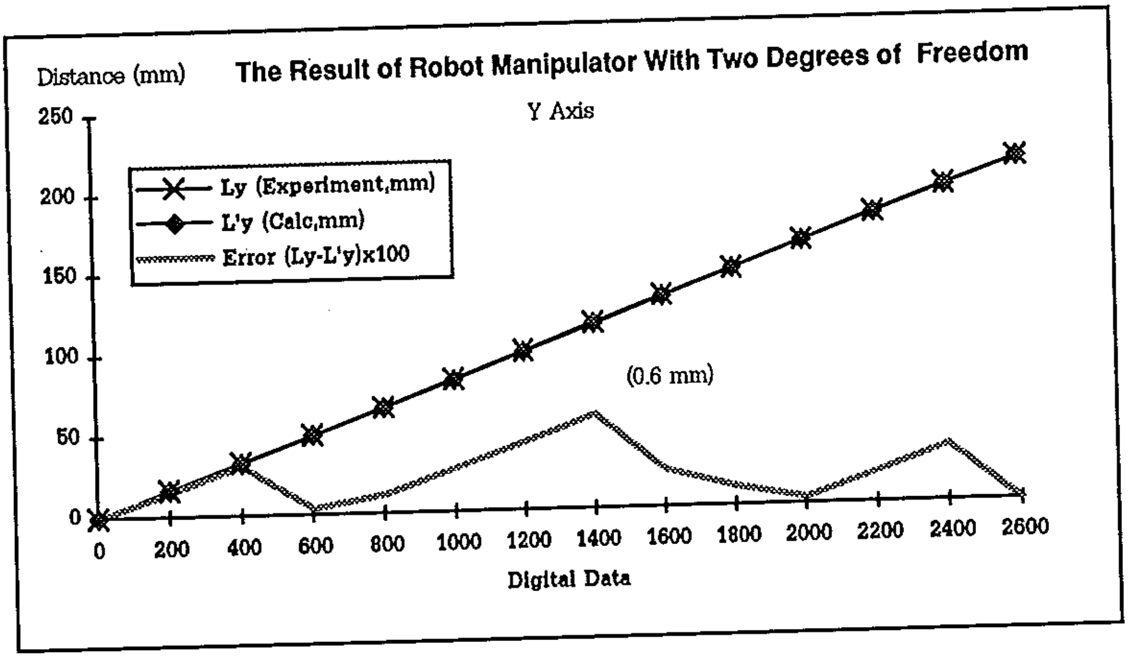
Lx : data from experiment of X-axis Ly : data from experiment of Y-axis

L'x : data from calculation of X-axis L'y : data from calculation of Y-axis

Maximum Error X-axis = 1.9 mm Maximum Error Y-axis = 0.6 mm




ภาพประกอบ 7.22 แสดงความแม่นของหุ่นยนต์ต้นแบบในแนวแกน X




ภาพประกอบ 7.23 แสดงความแม่นของหุ่นยนต์ต้นแบบในแนวแกน Y

## 2. ผลการทดสอบหาความเที่ยง (Precision)

ตาราง 7.5 ผลการทดสอบความเที่ยงของแขนหุ่นยนต์ต้นแบบ

| Test | Lx (mm) | Ly (mm) |
|---|---|---|
| 1 | 134.00 | 130.75 |
| 2 | 133.90 | 130.70 |
| 3 | 134.00 | 130.70 |
| 4 | 134.00 | 130.70 |
| 5 | 134.00 | 130.70 |
| 6 | 133.90 | 130.70 |
| 7 | 134.00 | 130.75 |
| 8 | 133.80 | 130.70 |
| 9 | 133.80 | 130.70 |
| 10 | 133.90 | 130.70 |
| 11 | 132.80 | 130.70 |
| 12 | 132.80 | 130.70 |
| 13 | 132.80 | 130.70 |
| 14 | 132.80 | 130.70 |
| 15 | 132.70 | 130.70 |
| 16 | 132.50 | 130.70 |

Average Lx = 133.48 Average Ly = 130.71

Max Data Lx = 134.00 Max Data Ly = 130.75

Min Data Lx= 132.50 Min Data Ly = 130.70

Range of Error X axis = ±0.75 Range of Error Y axis = ± 0.03

$$* \text{ Range of Error} = \frac{(Emax-Eav)+(Eav-Emin)}{2}$$

**3. ผลการทดสอบหาระยะแบคเลส**

ระยะแบคเลสในแนวแกน X = 1.80 mm

ระยะแบคเลสในแนวแกน Y = 0.50 mm

**4. ผลการทดสอบหาความผิดพลาดในระบบขับเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์**

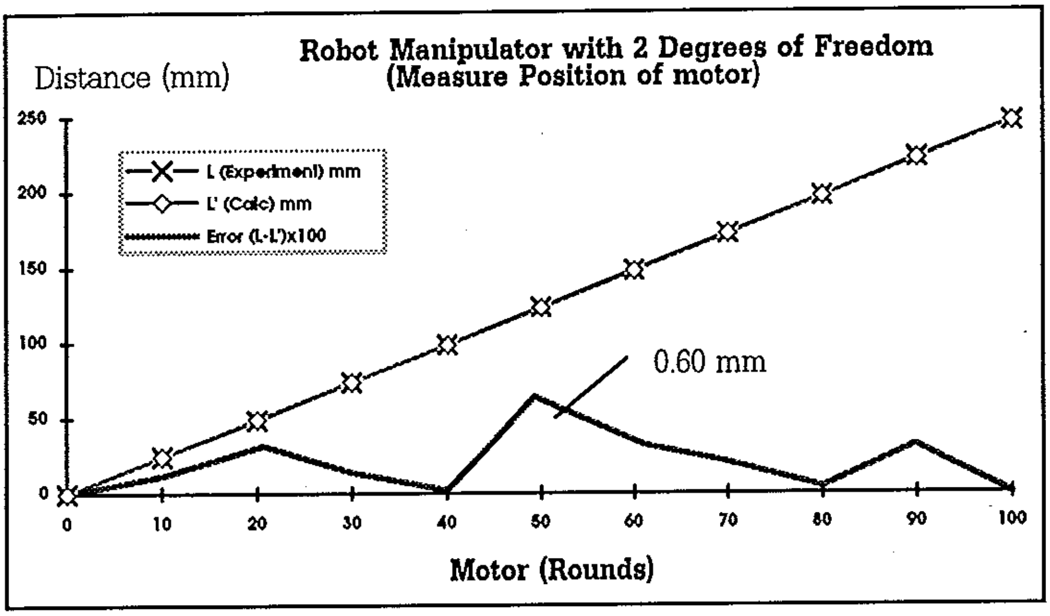
**4.1 ผลการทดสอบเพื่อหาความแม่น**

ตาราง 7.6 ผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์เมื่อวัดมุมการหมุนของมอเตอร์ในแนวแกน Y

| Angle | Ly | L'y | Error(Ly-L'y) |
|---|---|---|---|
| 0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 10 | 24.50 | 24.62 | 0.12 |
| 20 | 48.90 | 49.24 | 0.34 |
| 30 | 74.00 | 73.86 | 0.14 |
| 40 | 98.50 | 98.47 | 0.03 |
| 50 | 123.60 | 123.00 | 0.60 |
| 60 | 147.90 | 147.72 | 0.38 |
| 70 | 172.50 | 172.40 | 0.22 |
| 80 | 197.00 | 196.96 | 0.04 |
| 90 | 221.90 | 221.58 | 0.32 |
| 100 | 246.20 | 246.20 | 0.00 |

Ly : data from experiment  L'y : data from calculation

Maximum Error = 0.60 mm




ภาพประกอบ 7.24 แสดงผลการทดสอบหุ่นยนต์ต้นแบบเมื่อวัดจำนวนรอบของมอเตอร์

**4.2 ผลการทดสอบหาระยะแบคเลส**

ผลการทดสอบระยะแบคเลสของแขนหุ่นยนต์ = 0.70 mm

# บทที่ 8

# วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

ในการทำการวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลัก คือ การทำการออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ซึ่งในที่นี้ได้ใช้โพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้ แล้วทำการทดสอบในแบบต่างๆเพื่อหาคุณลักษณะทางเทคนิคของส่วนต่างๆที่ได้ทำการศึกษา

## สรุปผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ

การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้ว เพื่อหาความเหมาะสมในการใช้งานสามารถสรุปได้ดังนี้

1. **โพเทนชิออมิเตอร์ แบบ @ B1k**

ซึ่งเป็นแบบหมุนกวาด สามารถหมุนได้สูงสุด 300 องศา จากการทดสอบในทุกช่วงของการหมุนพบว่า มีความผิดพลาด 10.51 %FSO ซึ่งจัดว่าเป็นความผิดพลาดที่สูงมากพอสมควรจากการพิจารณาพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการหมุน (มุมน้อยๆ 0-30 องศา) และช่วงปลายของการหมุน (270-300 องศา) จะมีความผิดพลาดค่อนข้างสูง ในขณะที่ช่วงกลางๆจะมองเห็นมีสภาพเชิงเส้น (Linearity) ที่สูงกว่าจึงทำการพิจารณาในช่วง (40-260 องศา) และก็พบว่าความผิดพลาดจากการเป็นเชิงเส้นจะมีค่าเป็น 0.54 %FSO ซึ่งมีค่าต่ำลงมากดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโพเทนชิออมิเตอร์แบบนี้ มีความเหมาะสมในการใช้งานที่ต้องการตัวตรวจรู้ตำแหน่งที่มีขนาดเล็กๆ และไม่ต้องการความแม่นมากนักและการใช้งานควารเลือกใช้ในช่วงกลางๆของการหมุน (40-360 องศา) ก็จะมีสภาพเชิงเส้นที่ดีกว่า

2. **โพเทนชิออมิเตอร์ แบบ Alps 5k**

ซึ่งเป็นแบบเลื่อนในแนวตรงที่สามารถเลื่อนไปมาได้สูงสุดเป็นระยะทาง 45 mm จาก การทดสอบเมื่อทำการวัดจากทุกช่วงของการเคลื่อนที่ พบว่ามีความผิดพลาด 6.08 %FSO ซึ่งจัดว่าเป็นความผิดพลาดที่สูงมากพอสมควร และเมื่อทำการพิจารณาในช่วงกลางๆของการใช้งาน (2-42 mm) จะพบว่ามีสภาพเชิงเส้นดีขึ้นมากโดยที่ความผิดพลาดจะมีค่าเป็น 0.43 %FSO ซึ่งมีค่าต่ำลงมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าโพเทนชิออมิเตอร์แบบนี้ มีความเหมาะสมในการใช้งานกับระบบที่ออกแบบไว้สำหรับติดตั้งตัวตรวจรู้แบบเลื่อนในแนวตรงในระยะทางสั้นๆและไม่ต้องการความแม่นมากนัก การใช้งานควรเลือกใช้ในช่วงกลางๆของการเคลื่อนที่ก็จะมีสภาพเชิงเส้นที่ดีขึ้นมาก

3. **โพเทนชิออมิเตอร์แบบ RS 1k Servo Mount**

ซึ่งเป็นแบบหมุนกวาดสามารถหมุนได้ไม่มีการจำกัดการหมุน โดยที่มุมการใช้งานจริงๆจะอยู่ในช่วง 0-350 องศา โดยที่ในช่วง 350-360 องศาจะได้เอาท์พุทที่วงจรเปิดออกมา จากการทดสอบพบว่ามีความผิดพลาด 0.76 %FSO ซึ่งจัดว่ามีค่าต่ำพอสมควร เมื่อพิจารณาข้อดีของโพเทนชิออมิเตอร์แบบนี้ คือการที่สามารถหมุนแกนหมุน (Wiper) ไปได้เรื่อยๆ โดยไม่มีจำกัดทำให้เหมาะกับการติดตั้งกับระบบที่ต้องการตัวตรวจรู้แบบนี้ ซึ่งจะทำให้สามารถเพิ่มความละเอียดของการตรวจรู้ได้อีก เช่น เมื่อหมุนหนึ่งรอบถ้าใช้ A/D ขนาด 8 บิต จะทำให้ได้ความละเอียดขนาด 256 ระดับชั้น ดังนั้นถ้าออกแบบให้ตลอดการเคลื่อนที่หมุนได้ 10 รอบ ก็สามารถทำให้มีความละเอียดมากกว่าเดิมได้เป็น 10 เท่า โดยใช้ A/D ขนาด 8 บิต อย่างเดิม แต่ข้อเสียที่เห็นชัดเจนคือยังมีความแม่นที่ไม่ดีนัก อีกทั้งที่จุดรอยต่อของรอบ (360 องศา) จะเป็นจุดที่อ่านข้อมูลไม่ได้ และมีราคาค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแบบอื่นๆที่กล่าวมา

4. **โพเทนชิออมิเตอร์ แบบ Bourns 1k Wirewound (10 turn)**

ซึ่งเป็นแบบหมุนกวาดสามารถหมุนได้ 3600 องศา หรือ 10 รอบ จากผลการทดสอบพบว่ามีความผิดพลาด 0.083 %FSO ซึ่งมีค่าต่ำมากที่สุดในแบบต่างๆที่ทดสอบมาจึงเหมาะสมกับระบบที่ออกแบบการติดตั้งตัวตรวจรู้ให้มีการเคลื่อนที่ได้ในมุมที่มากหรือหลายรอบและให้ความแม่นที่ดีในราคาที่ไม่สูงมากนัก

จากการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ในหลายๆแบบที่กล่าวมาในการวิจัยนี้ จึงได้พิจารณานำเอาโพเทนชิออเตอร์แบบ Bourns มาใช้เป็นตัวตรวจรู้ในต้นแบบของระบบตรวจรู้ที่ได้ออกแบบมาจากเหตุผลที่ได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ทำการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ของ Bourns ค่าต่างๆกันเพื่อหาผลกระทบที่จะมีขึ้นจากส่วนต่างๆในระบบ

**การพิจารณาคุณสมบัติของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns ค่าต่างๆกัน**

ในที่นี้ได้ทำการทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติของโพเทนชิออมิเตอร์ และผลกระทบจากการนำไปใช้ต่อในวงจรระบบตรวจรู้ซึ่งโพเทนชิออมิเตอร์ที่เลือกใช้ จะมีค่าต่างๆ คือ ค่า 500Ω, 1kΩ, 5kΩ, 10kΩ, 100kΩ ดังนี้

1. **การพิจารณาความแม่นของโพเทนชิออมิเตอร์ที่ค่าต่างๆ**

จากการทดสอบพบว่าค่าความผิดพลาดของทุกความต้านทาน จะมีค่าใกล้เคียงกันคือมีค่าโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.083% - 0.143%FSO ซึ่งก็สรุปได้ว่า สามารถเลือกใช้โพเทนชิออมิเตอร์ค่าใดก็ได้ในช่วง 500-100k Ω ที่ได้ทำการทดสอบ

2. **การพิจารณาผลกระทบของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์ค่าต่างๆ**

จากการออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจรู้ จะถูกส่งผ่านส่วน ADPU ซึ่งส่วนแรกจะเป็นภาคปรับศูนย์ ในการออกแบบได้ใช้วงจรขยายแบบกลับเฟสที่ใช้ออปแอมป์ซึ่งมีค่า

อิมพิแดนซ์ด้านเข้าอยู่ประมาณ 100 kΩ ตามทฤษฎี ดังนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อหาผลกระทบของการโหลด ได้ผลการทดสอบสรุปได้ดังนี้

ตาราง 8.1 แสดงสรุปผลกระทบของการโหลด

| R | 500 | 1k | 5k | 10k | 100k |
|---|---|---|---|---|---|
| Error (FSO) | 0.125% | 0.16% | 0.723% | 1.50% | 12.26% |

ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ค่าความต้านทาน 500Ω และ 1kΩ นั้นจะมีความผิดพลาดเนื่องจากผลของการโหลดค่อนข้างต่ำ และจากทฤษฎีค่าความต้านทานที่ต่ำกว่านี้ก็จะมีผลกระทบต่ำด้วย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าที่ความต้านทานที่เท่ากับและต่ำกว่า 1kΩ สามารถนำมาใช้เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่งในระบบที่ออกแบบนี้ได้และที่ 5kΩ ก็สามารถนำเอามาใช้ได้โดยมีความผิดพลาดบ้างเล็กน้อยแต่ค่าความต้านทานที่สูงกว่านี้ถ้าต้องการนำมาใช้ก็ต้องมีการชดเชยค่าความผิดพลาดก่อนที่จะมีการนำค่าตำแหน่งไปใช้ในระบบควบคุมด้วย หรือใช้วิธีเพิ่มค่าอิมพิแดนซ์ด้านเข้าของระบบที่จะมาต่อกับโพเทนชิออมิเตอร์ แต่การเพิ่มค่าอิมพิแดนซ์ด้านเข้าที่มากเกินไป ก็จะทำให้เกิดปัญหาของสัญญาณรบกวนได้ โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาที่เป็นกระแสไหลผ่านค่าความต้านทานนี้ ยิ่งมีความต้านทานมากเท่าไรก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคล่อมสูงมากเท่านั้น

ในการทำการทดลองนี้เราสามารถคำนวนเพื่อหาค่า อิมพิแดนซ์ด้านเข้า (Input Impedance) ของส่วน SDPU ที่ใช้ได้โดยพิจารณาจากผลที่ได้จากการทดลองที่วัดได้เพื่อหาผลกระทบของการโหลด

**3. จากการคำนวนอิมพิแดนซ์ด้านเข้าของส่วน ADPU**

ส่วน ADPU เป็นส่วนที่ติดต่อกับโพเทนชิออมิเตอร์ซึ่งเป็นตัวตรวจรู้ของระบบเราสามารถคำนวนหาค่าอิมพิแดนซ์ด้านเข้าได้ดังนี้

จากการทดสอบใช้

R = 100kΩ

Vref = 10V.

พิจารณาที่ Maximum Error

R1 = 69.91 kΩ

Vo = 5.765 V.

จาก R // Ri และ Ri : อิมพิแดนซ์ด้านเข้าของภาคถัดไป

$$Vo = \frac{(R1//Ri)}{(R\max - R1 + R1//Ri)} x Vref \quad Volt$$

$\therefore$ Ri = (RmaxR1- R1R1) / ((R1Vref/Vo) - Rmax) kΩ

= (100x69.91- 69.91x69.91) / ((69.91x10)/5.765 - 100)

= 98.92 kΩ

ดังนั้นสรุปได้ว่าอิมพิแดนซ์ด้านเข้าของส่วน ADPU จะมีค่าโดยประมาณ 98.92 kΩ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับทางทฤษฎีที่มีค่า 100kΩ

**<u>ความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิแวดล้อม</u>**

ใช้ขั้นตอนนี้ได้ทำการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ เพื่อหาความผิดพลาดเมื่อได้ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) ซึ่งในที่นี้เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเรื่อยๆก็พบว่า ค่าความต้านทานที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าที่เปลี่ยนไปเพื่อหาความผิดพลาดคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่อุณหภูมิตั้งแต่ประมาณ 30-70 °C มีผลดังตารางดังนี้

ตาราง 8.2 แสดงสรุปผลกระทบของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นต่อ โพเทนชิออมิเตอร์

| | @ | RS | Alps | \|< - - - - - - - Bourns | | | - - - - - - >\| |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Temp | 1k | 1k | 5k | 500 | 1k | 10k | 100k |
| 29-32 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 40 | 0.68% | 0.0% | 0.28% | 0.08% | 0.02% | 0.02% | 0.02% |
| 50 | 1.25% | 0.06% | 0.64% | 0.12% | 0.06% | 0.04% | 0.02% |
| 60 | 1.98% | 0.14% | 1.17% | 0.16% | 0.06% | 0.04% | 0.04% |
| 70 | 2.54% | 0.28% | 2.01% | 0.20% | 0.08% | 0.06% | 0.06% |

การทดสอบในตอนนี้ ทำเพื่อให้เห็นว่าอุณหภูมิจะมีผลทำให้ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งจุดที่จะต้องพิจารณาคือ โพเทนชิออมิเตอร์ของ Bourns จะมีความผิดพลาดน้อยที่สุดในกลุ่มทดสอบ และโดยทั่วไปถ้าใช้งานในระดับอุณหภูมิห้อง ซึ่งไม่เกิน 30°C ก็จะพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำ และที่ความต้านทานค่าน้อยๆจะมีความผิดพลาดมากกว่าที่ความต้านทานค่าสูงบ้างเล็กน้อย แต่เมื่อเทียบกับตัวต้านทานชนิดอื่นๆแล้วยังพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานต่ออุณหภูมิน้อยกว่า

**ความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์ที่เกิดจากการจ่ายแรงดันเป็นเวลานาน**

โดยทั่วไปเมื่อจ่ายแรงดันอ้างอิง (10.0 Volt) เข้าสู่ความต้านทานจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวความต้านทานนั้น ซึ่งจะทำให้เกิดความร้อนขึ้นได้โดยจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับขนาดของกระแสที่ไหลผ่านตัวต้านทานนั้น ดังนั้นจึงได้ทดสอบโดยใช้โพเทนชิออมิเตอร์ค่า 500 โอห์ม ซึ่งเป็นขนาดที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมากที่สุดในกลุ่มทดสอบเนื่องจากมีค่าความต้านทานต่ำสุด โดยทดสอบที่อุณหภูมิห้อง 29°C เป็นเวลาครึ่งชั่วโมง ซึ่งผลก็ปรากฏว่าไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานแต่อย่างไรในการวัดด้วยมัลติมิเตอร์ที่ระบุ ซึ่งในที่นี้จึงไม่ได้ทำการทดสอบที่ค่าความต้านทานที่มากกว่านี้อีก

**ความแม่นของตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล**

จากการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงค่า อินพุทจาก 0-10 Volt และวัดค่าดิจิตอลเอาท์พุทซึ่งทำให้ได้ค่าความแม่นเป็น 0.07 %FSO ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน เช่น เป็นความผิดพลาดของตัว ADC เอง หรืออาจจะมีผลกระทบจากการที่เป็นความผิดพลาดจากโวลท์มิเตอร์ ส่วนหนึ่งด้วยแต่อย่างไรก็ตามค่าความผิดพลาดที่ปรากฏถึงแม้ว่าจะมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ แต่การนำไปใช้งานจริงสำหรับระบบนี้ก็ต้องคำนึงถึงความผิดพลาดในส่วนนี้ด้วย

**ความแม่นของส่วนจัดการสัญญานอนาลอก**

ซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่ อัตราขยายเป็น 1 จะมีความแม่นคิดเป็น 0.03 %FSO ในขณะที่อัตราขยายเป็น 2 จะมีความแม่นคิดเป็น 0.08 %FSO ซึ่งมีความผิดพลาดสูงกว่า จึงทำให้เห็นได้ว่าความผิดพลาดจะเกิดขึ้นได้ถ้ามีการเพิ่มอัตราขยายขึ้นไป

**ความแม่นของระบบตรวจรู้ที่ได้ออกแบบและสร้างเป็นต้นแบบขึ้นมา**

ในการทดสอบนี้เลือกใช้โพเทนชิออมิเตอร์ Bourns ค่า 500 โอห์ม ต่อกับระบบในส่วนต่างๆเพื่อบันทึกค่าทางดิจิตอลที่อ่านโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และป้อนแรงดันอ้างอิง 10.00 Volt เข้ากับตัวตรวจรู้ที่เป็นโพเทนชิออมิเตอร์ ผลจากการเปลี่ยนมุมต่างๆกันของโพเทนชิออมิเตอร์ต่อค่าดิจิตอลที่ออกมาได้เป็น 0.08 %FSO

จากผลการทดลองทำให้สรุปได้ว่า การนำระบบตรวจรู้ตำแหน่งที่ได้ออกแบบนี้ไปใช้งานจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นอยู่ในขอบเขตดังกล่าวมาแล้ว ซึ่งในการใช้งานจริงอาจจะมีความผิดพลาดมากกว่านี้ได้จากการที่กลไกที่ออกแบบติดตั้งตัวตรวจรู้มีความผิดพลาดด้วย

**การทดสอบระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรี**

จากการทดสอบในส่วนต่างๆก็สรุปได้ว่า ระบบแขนหุ่นยนต์ที่ได้ออกแบบและสร้างมานั้นเหมาะที่จะใช้โพเทนซิออมิเตอร์ขนาด 1k$\Omega$ มาเป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่งทั้งนี้เนื่องจากมีค่าที่ไม่สูงมากนักทำให้ไม่มีปัญหาเรื่องผลกระทบของการโหลด และไม่ไปดึงกระแสจากส่วนแรงดันอ้างอิงมากจนเกิดผลกระทบที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดเพิ่มขึ้นมา

เมื่อได้ทำการติดตั้งตัวตรวจรู้เข้ากับระบบแขนเคลื่อนที่แล้วจึงได้ทำการทดสอบ โดยแบ่งการทดสอบออกได้เป็น 2 แบบ คือ

**1. การทดสอบในเชิงคุณภาพ**

พบว่าเมื่อสั่งให้แขนเคลื่อนที่ในทิศทางและตำแหน่งที่แตกต่างกันจุดทำงาน (Work Point) ซึ่งในที่นี้ใช้ปลายปากกา ก็สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต่างกันสัมพันธ์กับการสั่งงานจากโปรแกรม ในขอบเขตพื้นที่ทำงาน (Working Envelope) ซึ่งเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า

**2. การทดลองเพื่อหาคุณลักษณะทางเทคนิคต่างๆ**

การทดสอบในแนวแกน X จะมีความผิดพลาดเป็น 1.9 mm จากการเคลื่อนที่ได้สูงสุด 335 mm และแนวแกน Y จะมีความผิดพลาด 0.6 mm จากการเคลื่อนที่ได้สูงสุด 270 mm ดังที่ได้กล่าวมาแล้วพบว่าค่าความผิดพลาดในตำแหน่งจะมีผลมาจากความผิดพลาดของระบบตรวจรู้ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว บวกกับความผิดพลาดที่เกิดจากกลไกและวิธีติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งซึ่งมีค่าสูงมาก

การทดสอบเพื่อหาความเที่ยงพบว่าในแนวแกน X จะมีช่วงความผิดพลาดอยู่ ±0.75 mm ส่วนในแนวแกน Y จะมีช่วงความผิดพลาด ±0.03 mm

การทดสอบหาระยะแบคเลสพบว่าในแนวแกน X จะมีความผิดพลาด 1.8 mm ซึ่งสูงกว่าในแนวแกน Y ที่มีความผิดพลาด 0.5 mm

ซึ่งเมื่อพิจารณาจะพบว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในทั้งสองแกนจะมีค่าที่แตกต่างกันมาก ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากกลไกที่ติดตั้งตัวตรวจรู้ในที่นี้ไม่เหมือนกัน แต่อย่างไรก็ตามก็ทำให้เห็นได้ว่าในที่นี้ถ้าติดตั้งอย่างเหมาะสมแล้วจะมีความผิดพลาดที่ต่ำมากทีเดียวโดยดูได้จากแกน Y ความผิดพลาดหลักโดยรวมนี้จะมาจากความผิดพลาดจากกลไกของระบบแขนหุ่นยนต์และรูปแบบของการติดตั้งตัวตรวจรู้ เช่น การที่เชือกส่งกำลังมีความยืด, เพลารับตำแหน่งมีการลื่นไหลได้ทำให้เชือกเคลื่อนที่แต่เพลาไม่เคลื่อนที่, ร่องของเพลาไม่กลมและไม่เรียบทำให้รัศมีไม่แน่นอนและการที่เชือกมีการปีนกันในร่องเพลาในบางครั้งทำให้รัศมีเพิ่มขึ้นได้ หรือแม้แต่ความหลวมคลอนของกลไกก็ส่งผลต่อความผิดพลาดได้ทั้งสิ้น

3. **การทดสอบเพื่อหาความผิดพลาดของระบบขับเคลื่อน**

ในการทดสอบนี้ผลที่ออกมาถือว่าการวัดรอบของมอร์เตอร์แม่นยำและการทดสอบกระทำในแนวแกน Y เท่านั้น ซึ่งผลการทดสอบพบว่าความผิดพลาดในตำแหน่งจะเท่ากับ 0.6 mm ในขณะที่ระยะแบคเลสจะเป็น 0.7 mm ซึ่งจะเห็นได้ว่าระยะแบคเลสจะสูงพอสมควร

**สรุปผลการวิจัย**

จากการทำการทดสอบพบว่าในระบบตรวจรู้ที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาสร้างขึ้นมา พบว่า ผลจากการทดสอบทำให้ได้เป็นแนวความคิดซึ่งเป็นจุดที่จะต้องพิจารณาและเป็นผลสรุปของการศึกษาดังนี้

1. **การเปรียบเทียบความผิดพลาดของระบบกลไกขับเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์และความผิดพลาดเมื่อนำระบบตรวจรู้ตำแหน่งมาติดตั้ง**

จากผลการทดลองพิจารณาเปรียบเทียบในแนวแกน Y ที่ได้ทำการทดสอบพบว่า ในกรณีของความแม่นนั้นผลที่ได้จากระบบที่มีตัวตรวจรู้ตำแหน่งจะมีค่าความผิดพลาด 0.6 mm ในขณะที่ระบบขับเคลื่อนมีเท่ากันคือ 0.6 mm แต่ค่าที่เท่ากันนี้จะทำให้สามารถพิจารณาได้ว่าถ้าการวัดที่จุดขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ถูกติดตั้งด้วยกลไกของระบบตรวจรู้แบบเดียวกัน ค่าความผิดพลาดจะเป็นค่าความผิดพลาดในกลไกทั้งสองรวมกันซึ่งจะมีค่าเป็น 1.2 mm ซึ่งสูงกว่าการวัดที่จุดหมุนของแขนหุ่นยนต์อย่างมากและระยะแบคเลสของระบบขับเคลื่อนจะสูงกว่าระบบตรวจรู้ตำแหน่ง ซึ่งในทำนองเดียวกันถ้าติดตั้งตัวตรวจรู้แบบเดียวกันก็จะยิ่งมีความผิดพลาดมากขึ้นไปอีก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระบบตรวจรู้ตำแหน่งแบบนี้จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวัดตำแหน่งขึ้นได้โดยลดผลกระทบจากความผิดพลาดทางด้านกลไกลงไปได้

2. **ข้อดีที่รับจากระบบตรวจรู้ตำแหน่งที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมา**

จากการศึกษาและแนวทางการออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์เราสามารถแยกผลลัพท์ที่ได้จากการทดสอบออกเป็นส่วนๆได้ดังนี้

2.1 **เทคนิคการใช้วงจรกรองในระบบที่เกี่ยวข้องกับสัญญาณอนาลอกต่างๆ**

ด้วยการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF) เป็นผลทำให้สามารถลดสัญญาณลบกวนลงได้มากทั้งนี้เนื่องจากระบบสายส่งข้อมูลและที่ตำแหน่งของการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์ จะมีสัญญาณรบกวนซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามไฟฟ้าจากมอเตอร์และภายนอกที่จะมีผลต่อสัญญาณค่าต่ำๆ ซึ่งพบว่าสัญญาณเหล่านี้จะอยู่ในช่วงความถี่สูงมากในขณะที่ข้อมูลที่ต้องการมีความถี่ไม่สูงนัก

2.2 **การออกแบบสายส่งเพื่อป้องกันปัญหาของสัญญาณรบกวนในสายส่ง**

ในระบบนี้ได้เจาะจงที่จะใช้สายสัญญาณเป็นแบบสายชีลด์ (Shield) โดยที่สายชีลด์จะเป็นสายไฟที่มีสายสัญญาณอยู่ที่แกนกลางและมีสายกราวด์หุ้มโดยรอบแล้วจึงหุ้มฉนวนอีกชั้น สาเหตุก็เนื่องมาจากการที่สัญญาณรบกวนที่อาจจะเกิดขึ้นในสายส่งอันเนื่องมาจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็ก จะมีผลต่อ

ขนาดของสัญญาณที่ได้และในทางปฏิบัติสายส่งที่ใช้จะมีระยะทางที่ยาว จากตำแหน่งของโพเทนชิออมิเตอร์มายังวงจรในส่วนอื่นเมื่อใช้สายชนิดนี้แล้ว ปัญหาของสัญญาณรบกวนการเหนี่ยวนำบนสายสัญญาณจะลดลงไปได้มาก

**2.3 การสร้างส่วนปรับแต่งสัญญาณก่อนนำไปแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล**

ส่วนที่ว่านี้คือส่วนที่ปรับศูนย์และปรับอัตราขยายของสัญญาณนั่นเอง ข้อดีที่เห็นได้ชัดคือความสะดวกในการติดตั้งเนื่องจากการที่ตัวตรวจรู้ตำแหน่งในแขนหุ่นยนต์หนึ่งๆนั้น จะหลายตัวในขณะที่ใช้ตัว A/D เพียงแค่ตัวเดียวแล้วมัลติเพล็กซ์สัญญาณเอา ดังนั้นในแต่ละจุดที่จะติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งจะมีเงื่อนไขในการติดตั้งที่ไม่เหมือนกันทำให้ส่งผลกระทบต่อค่าที่ได้ ด้วยการออกแบบให้มีการปรับแต่งค่าเหล่านี้ได้ก็จะลดปัญหาและข้อบังคับในการติดตั้งตัวตรวจรู้ลงได้อย่างมาก

**2.4 อุปกรณ์ที่เป็นส่วนสร้างแรงดันอ้างอิง**

ส่วนนี้ก็จัดว่าเป็นส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งนั่นคือ ถ้าเราออกแบบให้ส่วนอื่นมีความแม่นยำมากแต่วงจรอ้างอิงมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาก็จะส่งผลให้ความผิดพลาดโดยรวมผิดไปได้มาก ดังนั้นในการวิจัยนี้ จึงแนะนำให้ใช้ไอซีสำหรับสร้างแรงดันอ้างอิงและไอซีออปแอมป์ที่มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภายนอกน้อยมาก (Low Drift) ซึ่งทำให้ความเที่ยง (Precision) ของระบบที่ได้ดีขึ้นและไม่ส่งผลต่อข้อมูลโดยรวม

**2.5 การเลือกตำแหน่งการติดตั้งตัวตรวจรู้**

จากการที่ระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ใช้การติดตั้งตำแหน่งตัวตรวจรู้ให้เป็นตำแหน่งที่เป็นจุดเคลื่อนไหวหรือตรงข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ โดยไม่ใช้การวัดที่การหมุนของมอเตอร์ส่งสัญญาณทำให้สามารถลดปัญหาเรื่องความผิดพลาดจากระบบส่งกำลังไปได้มาก ซึ่งในการวิจัยนี้ทำให้ไม่ต้องออกแบบกลไกขับเคลื่อนให้มีความแม่นยำมากนักก็สามารถได้ตำแหน่งที่แม่นตรงขึ้นมา ซึ่งในกลไกขับเคลื่อนแบบเดียวกันถ้าใช้การวัดที่จุดการหมุนของมอเตอร์จะพบว่ามีความผิดพลาดสูงมาก

**3. สรุปสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์นี้**

อย่างไรก็ตามผลการทดสอบก็พบว่ายังคงมีความผิดพลาดเกิดขึ้นซึ่งสามรถสรุปได้ดังนี้

**3.1 ความผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจรู้**

ในส่วนนี้ผลกระทบหลักก็มาจากความแม่นของตัวตรวจรู้โดยตรง ซึ่งต้องทำการเลือกให้เหมาะสมแต่ละแบบของแขนหุ่นยนต์ไป

อย่างไรก็ตามความผิดพลาดเนื่องจากการที่อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปที่มีผลต่อโพเทนชิออมิเตอร์ จะไม่ส่งผลมากนักแม้อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นมากเมื่อเทียบกับความผิดพลาดจากส่วนอื่น แต่ถ้าต้องการผลกระทบที่น้อยที่สุดก็ควรที่จะนำมาใช้งานที่ช่วง อุณหภูมิ 28-40°C (จากผลการทดสอบ)

**3.2 ความผิดพลาดในส่วนวงจรปรับแต่งสัญญาน**

ในส่วนนี้ก็จะส่งผลกระทบเพิ่มเติมต่อผลลัพท์ที่ได้ซึ่งมีตั้งแต่ ภาคขยายสัญญาน, ภาคปรับแต่งสัญญาน,ภาคแปลงสัญญานจากอนาลอกเป็นดิจิตอล รวมทั้งภาคจ่ายแรงดันอ้างอิงด้วย

**3.3 ความผิดพลาดจากระบบกลไกระบบขับเคลื่อน**

ซึ่งจัดเป็นความผิดพลาดหลักเลยก็ว่าได้ เนื่องจากเป็นจุดที่ทำให้ค่าความแม่นลดลงไปได้มาก เริ่มตั้งแต่การเกิดแบคเลส ที่อาจจะมีผลมาจากการให้ตัวได้ของเชือกดึงแกนโพเทนชิออมิเตอร์ร่องของรอกที่ไม่มีความสม่ำเสมอ หรือแม้แต่การหลวมคลอนของชิ้นส่วนต่าง ในที่สุดแล้วการจะได้มาซึ่งความถูกต้องมากน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับความระมัดระวังในการออกแบบชิ้นส่วนกลไกและความจำเป็นในการทำงานนั้นๆ ไป

อย่างไรก็ตามดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าหุ่นยนต์มีหลายประเภท บางแบบต้องการความแม่นในตำแหน่งที่สูง แต่ในขณะเดียวกันยังมีหุ่นยนต์อีกหลายแบบที่ไม่ต้องการความแม่นที่สูงมากนัก อย่างเช่น หุ่นยนต์ทางการเกษตร (Agricultural Robot) ซึ่งที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากชิ้นงานที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ประเภทนี้มีขนาดที่ไม่แน่นอน และมักจะมีขนาดใหญ่ซึ่งจะยอมรับความผิดพลาดได้ค่อนข้างสูง อีกทั้งในหุ่นยนต์ประเภทนี้ยังมีระบบตรวจรู้อย่างอื่นมาช่วยประกอบในการทำงานอีกด้วย เช่น การมองเห็น (Vision) เช่นเดียวกับการทำงานของแขนของมนุษย์ที่มีความแม่นค่อนข้างต่ำแต่ใช้การรับรู้อย่างอื่นเข้าช่วย

**คำเสนอแนะสำหรับการดำเนินงานต่อไป**

ในงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งจุดประสงค์หลักของระบบนี้จะเป็นการนำไปใช้ติดตั้งกับแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งที่ท่อนแขนนั้นเคลื่อนที่ไป และโดยคุณลักษณะของวงจรที่ได้ออกแบบนี้จะมีความผิดพลาด และข้อจำกัดซึ่งมีสาเหตุมาจากหลายส่วน ดังนั้นเพื่อให้การพัฒนาหรือนำไปใช้งานของระบบนี้ได้ผลดีและมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น สามารถกระทำได้โดย

- เลือกใช้โพเทนชิออมิเตอร์ที่มีค่าไม่สูงมากนัก เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดจากผลกระทบจากการโหลด (Loading Effect) และไม่ใช้ค่าที่ต่ำมากจนเกินไป เพราะจะทำให้เกิดผลของความร้อนเนื่องจากเกิดกระแสไหลผ่านความต้านทานมากเกินไป จนมีผลให้ความต้านทานเปลี่ยนไปได้ และไปดึงกระแสจากวงจรที่จ่ายแรงดันอ้างอิงมากเกินไป
- ส่วนจัดการสัญญานอนาลอกเลือกใช้ออปแอมป์ในวงจรขยายที่มีคุณภาพสูงนั่นคือ มีอัตราการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างต่อสภาพแวดล้อมต่ำและมีอัตราขยายในทุกช่วงของแรงดันที่คงที่ รวมทั้งเลือกใช้วัสดุที่มาประกอบ เช่น ความต้านทาน, ตัวเก็บประจุ ที่มีเปอร์เซ็นความผิดพลาดต่ำด้วย
- ภาคแรงดันอ้างอิงเลือกใช้ที่มีความแน่นอนของระดับแรงดันที่สูง (การเปลี่ยนแปลงของแรงต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนไปต่ำ) กรณีของความแม่นในที่นี้มีความสำคัญรองลงมาเนื่อง จากการที่สามารถปรับอัตราขยายแรงดันของสัญญานได้ในส่วนจัดการสัญญานอนาลอก

- สามารถทำให้ได้ความละเอียดของสัญญานสูงขึ้นอีกได้จากการเลือกใช้ A/D ที่มีค่าความละเอียดสูงๆ หรือมีจำนวนบิทมากๆนั่นเอง แต่ทั้งนี้จะต้องให้ส่วนอื่นๆมีความผิดพลาดต่ำลงไปด้วย ทำให้ไม่เป็นผลกระทบต่อความผิดพลาดโดยรวม

- ระบบกลไกที่ใช้ติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งนี้ จะต้องออกแบบและสร้างให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุดเพราะจากการทดสอบและสร้างขึ้นมาส่วนของกลไก จะเป็นส่วนที่มีความยุ่งยากมากในการสร้างเพื่อให้มีความผิดพลาดต่ำ และมักจะเป็นส่วนที่ทำให้ระบบการวัดโดยรวมขาดความแม่นได้มาก

- ในส่วนของการออกแบบซอฟแวร์ เพื่อใช้ในการอ่านข้อมูลจาก A/D ก็ควรศึกษาการเขียนโปรแกรมในส่วนอ่านข้อมูลที่ทำให้เสียเวลาน้อยที่สุด เช่น การใช้ค่าคงที่แทนการส่งผ่านข้อมูลหลายๆขั้น การตัดการสั่งงานบางอย่างที่ไม่จำเป็นออกไป และการเลือกใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วในการคำนวนสูงขึ้นไปและในที่สุดถ้าเป็นไปได้ก็ใช้ภาษาแอสเซมบลี (Assembly) ในการเขียนโมดูลนี้ ซึ่งเราสามารถพิจารณาและคำนวนค่าความผิดพลาดได้ โดยการคำนวนจากความเร็วของการเคลื่อนที่ของตัวตรวจรู้ (การหมุนแกนตัวตรวจรู้) เทียบกับระยะเวลาในการได้ข้อมูลออกมา

โดยที่ถ้าให้ S เป็นความเร็วของค่าแรงดันที่ได้จากโพเทนชิออมิเตอร์ มีหน่วยเป็น V/sec และระยะเวลาในการได้ขอ้มูลมานับตั้งแต่เริ่มสั่งจนมีข้อมูลมาเก็บไว้เป็น Tc มีหน่วยเป็น Sec ความผิดพลาด Er มีหน่วยเป็น Volt

Er = STc Volt ....................................................(8.1)

เช่น จากการทดลองในแนวแกน X ของแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี ที่ได้สร้างขึ้นมามีความเร็วในการเคลื่อนที่ 5.5 mm/Sec โดยสามารถเคลื่อนได้ 335 mm ทำให้เกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงจาก 0-10 Volt เพราะฉะนั้น จะทำให้เกิดแรงดันเปลี่ยนแปลงเท่ากับ

S = (10/335)x5.5 Volt/Sec

และจากการทดสอบพบว่าในเวลา 55.42 Sec สามารถสั่งโปรแกรมให้อ่านข้อมูลได้ 50000 ครั้ง เพราะฉะนั้นระยะเวลาในการแปลงแต่ข้อมูลเป็น

Tc = 55.42/50000 Sec

นั่นคือค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการแปลงข้อมูลจะมีค่าดังนี้

จาก (8.1)

Er = ((10/335)x5.5)x(55.42/50000)

= 0.00018 Volt

หรือคิดเป็น % FSO (Full scale = 10 Volt)

= (0.00018/10)x100 %

= 0.0018 %

ซึ่งในที่นี้ถึงแม้ว่าจะมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับความผิดพลาดจากส่วนอื่น แต่ถ้าเราให้แขนมีการเคลื่อนที่เร็วขึ้น ก็จะทำให้เพิ่มความผิดพลาดขึ้นไปอีก

แต่อย่างไรก็ตาม ในโปรแกรมนี้ได้มีการเขียนโปรแกรมอย่างง่ายที่ใช้ในการอ่านข้อมูลจากตัวตรวจรู้ ซึ่งทำให้เสียเวลาในการคำนวนมากทั้งนี้เพื่อต้องการให้โปรแกรมง่ายต่อการศึกษาและเห็นว่าต้นแบบระบบขับเคลื่อนมีความเร็วไม่สูงมากนัก

**สรุปรายละเอียดของระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี**

**Specification**

**Technical Data for Two Dimensions Moving Arms**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Degree of Freedom | | | ***2*** |
| Position Variation | AxisX | mm | ***1.9*** |
| | AxisY | mm | ***0.8*** |
| Working Area | AxisX | mm | ***335*** |
| | AxisY | mm | ***270*** |
| Velocity | AxisX | mm/sec | ***5.5*** |
| | AxisY | mm/sec | ***6.1*** |

**Technical Data for Control and Sensing System**

| | |
|---|---|
| Computer | ***IBM AT Compatible (386sx-16)*** |
| Programming Language | ***Turbo Pascal (V. 7.0)*** |
| Posibility of Sensor | |
| Digital Input | ***16 bit (Each of Extension Board)*** |
| *Analog Input | ***16 input*** |
| Analog to Digital Converter Specification | |
| A/D | ***SDM862*** |
| Digital Readout | ***12 bit*** |
| Aquisition Rate | ***33kHz*** |

* 2 analog inputs are used as position sensors.

## บรรณานุกรม

ยืน ภู่วรวรรณ, ชัยยงค์ วงศ์ชัยสุวัฒน์ และ ไพศาลสงวนหมู่. 2531. เทคโนโลยีไมโครคอมพิวเตอร์ 16 บิต. กรุงเทพ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

วริทธิ์ อึ๊งภากรณ์. 2534. พจนานุกรม ศัพท์คอมพิวเตอร์. กรุงเทพ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.

วุฒิชัย กปิลกาญจน์. 2534. เฟือง. กรุงเทพ : ฟิสิกส์ เซ็นเตอร์.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, สมาคม. 2520. ศัพท์เทคนิควิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์. กรุงเทพ : วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

Ando, S. and Goto, T. 1983. "Current Status and Future of Intelligent Industrial Robots", In IEEE Trans. Ind. Electron. 3 (August. 1983), 291-299.

Anton F. P. van Puttern, 1988. "Electronic Measurement System", UK. Prentice Hall International.

Asano, K., *et al.* 1983. "Multijoint Inspection Robot", In IEEE Trans. Ind. Electron. 3 (August. 1983), 277-281.

Blankenship, J. 1985. Apple II/IIe Robotic Arm Projects. New Jersey Prentice-hall.

Brandolini, A. and Gamdelli, A. 1992. "Testing Methodology for Analog-to-Digital Converters", IEEE Trans. Instrum. Meas. 5 (October. 1992), 595-603.

Coiffet, P. 1983. Robot Technology : Modeling and Control. London : Prentice-Hall.

Coiffet, P. 1983. Robot Technology : Interaction with Environment. London : Prentice-Hall.

Craig, J. J. 1989. Introduction to Robotics : Machanics and Control Second Edition. U.S.A. : Addison-Weslay Publishing Company.

Dally, J. W. and Andridley, W. F. 1965. Experiment Stress analysis. Japan : McGraw-hill International.

Dando, S. and Goto, T. 1983. "Current Status and Future of Intelligent Industrial Robot", IEEE Trans. Ind. Electron. 3 (August. 1983) 291-299.

Deoberlin, E. O. 1975. Measurment System. Japan : McGraw-Hill.

Francis, R. D. 1971. "The Electrical Instrument Computer Inrterface", IEEE Trans. Ind. Gen. Appl. 1 (January. 1971) 595-603.

Fu, K. S. ; Gonzales, R. C. and Lee, C. S. G. 1987. Robotics : Control, Sensing, Vision, and Intelligent. Singapore : McGraw-Hill.

Groover, M. P., *et al. 1988.* Industrial Robotics : Technology, Programing, And Applications. Singapore : McGraw-Hill International.

Hongko, T. *et al., 1987.* "An Automatic Guidance System of a Self-Controlled Vehicle", IEEE Trans. Ind. Electron. 1 (Febuary. 1987) 5-10.

Jiang, J. P. *et al.,* 1990. "Optimal Feedback Control of Direct-Current Motor", IEEE Trans. Ind. Electron., 4 (August. 1990) 269-274.

Karem, Y. 1987. Robotics for Engineerings. Singapore : McGraw-Hill International.

Klipec, B. E., 1967. "Reducing Electrical Noise in Instrument Circuit", IEEE Trans. Ind. Gen. Appl., 2 (March. 1967), 90-96.

Mochizuki, J. *et al.*, 1987. "Workpieces Handling Robot with Virsaul and Force Sensors", IEEE Trans. Ind. Electron., 1 (Febuary. 1987) 1-4.

Panda, S. K. and Amaratunga, G. 1991. "Comparison of Two Techniques for Closed-Loop Drive of VR Step Motors Without Direct Rotor Position Sensing", IEEE Trans. Ind. Electron., 2 (April. 1991) 95-101.

Schilling, R. J. 1990. Fundamentals of Robotics : Analysis & Control. New Jersey : Prentice Hall.

Su, C. Y. ; Leung T. P. and Stepanenko, Y. 1993. "Real-Time Implementation of Regressor-Based Sliding Mode Control Algorithm for Robotic Manipulators", IEEE Trans. Ind. Electron., 1 (February. 1993), 71-79.

Sydder, W. E. 1991. "Circuit Board Inspection Using Range Camera", IEEE Trans. Ind. Electron., 2 (April. 1991), 142-149.

________. 1983. "Microcomputer Base Path Control", In Robotic Age In The Beginning. New Jersey : Hayden Book Company.

________. 1983. "Using Optical Shaft Encoders", In Robotic Age In The Beginning. New Jersey : Hayden Book Company.

Utkin, V. I. 1993. "Sliding Mode Control Principle and Application to Electric Drives", IEEE Trans. Ind. Electron., 1 (Febuary. 1993), 23-35.

Yagishita, S. and Kanda, M. 1983. "Arc Welding Robot Systems for Large Constructions", IEEE Trans. Ind. Electron., 3 (August. 1983), 269-276.

# ภาคผนวก ก

## หุ่นยนต์และการนำโพเทนชิออมิเตอร์มาเป็นตรวจรู้ตำแหน่ง

# หุ่นยนต์พื้นฐาน

## 1. หุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรม (INDUSTRIAL ROBOT)

ประวัติศาสตร์ของระบบอุตสาหกรรมอัตโนมัติ (Industrial Automation) ได้เปลี่ยนแปลงไปสู่ความนิยมอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากการใช้เทคนิคระบบอัตโนมัติทำให้ได้ผลผลิตออกมาอย่างมีประสิทธิภาพสูง, รวดเร็ว, แน่นอน และ ประหยัด การใช้หุ่นยนต์ทางอุตสาหกรรม (Industrial Robot) ควบคู่ไปกับระบบคอมพิวเตอร์ช่วยการออกแบบ (CAD) และระบบคอมพิวเตอร์ช่วยการผลิต (CAM) ก็ได้เริ่มถูกนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 ซึ่งทำให้มีการพัฒนาไปสู่อีกรูปแบบหนึ่งของวงการอุตสาหกรรมอัตโนมัติและทำให้เกิดอีกแขนงวิชาหนึ่ง นั่นคือ วิชาที่ว่าด้วยเรื่องเกี่ยวกับหุ่นยนต์

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้นำมาใช้ในปัจจุบันมากขึ้นเพื่อเปลี่ยนแปลงอุตสาหกรรมสมัยใหม่ซึ่ง *หุ่นยนต์ไม่ได้ทำงานเหมือนอย่างมนุษย์กระทำแต่หุ่นยนต์กระทำงานของมนุษย์* หุ่นยนต์ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมในหลายรูปแบบ เช่น การจัดการวัตถุ (Material Handling), การพ่นสี (Painting), การเชื่อม (Welding), การตรวจสอบ (Inspection) และการประกอบผลิตภัณฑ์(Assembling) โดยทั่วไปแล้วหุ่นยนต์ทางอุตสาหกรรมก็เหมือนกับระบบอุตสาหกรรมอัตโนมัติสมัยใหม่โดยทั่วๆไปที่มีคอมพิวเตอร์เป็นหน่วยประมวลผลกลางทำหน้าที่คอยควบคุมให้ระบบต่างๆทำงานอย่างอัตโนมัติ ซึ่งในปัจจุบันคอมพิวเตอร์จัดเป็นหัวใจสำคัญของระบบอุตสาหกรรมอัตโนมัติ ที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนระบบเส้นทางการผลิตและควบคุมสั่งการอุปกรณ์ที่ช่วยในการผลิต เช่น เครื่องมือเครื่องจักรต่างๆ, เครื่องเชื่อม, เครื่องตรวจสอบ, เครื่องตัด แบบใช้ลำแสงเลเซอร์เป็นต้น

และได้มีการทำนายไว้ว่าในปลายคริตศตวรรษที่ 20 การทำงานทุกๆส่วนของระบบโรงงานอุตสาหกรรมในอนาคตเริ่มจากการออกแบบผลิตภัณฑ์จนถึงกระบวนการผลิต,การประกอบ,และการตรวจสอบคุณภาพ จะถูกจัดการและควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ทั้งสิ้น การปฏิบัติงานจะถูกกระทำโดยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและระบบปัญญาประดิษฐ์ซึ่งคาดว่าจะทำให้ได้ผลิตผลเร็วขึ้นบนเส้นทางการผลิตที่สั้นลงกว่าเดิม

## 2. หุ่นยนต์ที่ไม่ใช้ในงานอุตสาหกรรม (NON-INDUSTRIAL ROBOT)

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นแบบหนึ่งของหุ่นยนต์ที่มีการค้นคว้าวิจัยขึ้นมาจากหลายแบบของหุ่นยนต์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วหุ่นยนต์ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในงานหลายๆด้านเช่น ในวิทยาการทางด้านอวกาศยานโคลัมเบียร์ (Space shuttle) ซึ่งถูกพัฒนาและใช้ในระหว่างปี ค.ศ. 1981 - 1982 มีการใช้แขนหุ่นยนต์ยาว 50 ฟุต เป็นแขนทางกลที่สามารถควบคุมโดยนักบินอวกาศที่อยู่ภายในยานทำงานโดยมีกล้องโทรทัศน์ช่วยในการมอง เพื่อให้ปลายแขนไปยังจุดที่ต้องการที่สามารถรับน้ำหนักได้ถึง 353 ปอนด์ ลักษณะเช่นนี้จัดเป็นแบบหนึ่งของแขนกลที่ควบคุมจากระยะไกล (Remote-Controlled Manipulator) ทำให้ความสามารถในการทำงานของมนุษย์ในอวกาศเพิ่มขึ้นอย่างมากมาย

**ตาราง A1 แสดงตัวอย่างของหุ่นยนต์**

| ชื่อหุ่นยนต์ | แกน | ชนิด | ประเภทงาน |
|---|---|---|---|
| Planar | 3 | Articulated | Generic |
| Adapt One | 4 | SCARA | Industrial |
| Rhino XR-3 | 6 | Articulated | Education |
| Intelledex | 6 | Articulated | Industrial |

นอกจากนี้ยังมีการใช้หุ่นยนต์ ทางด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์และการพยาบาล เช่น การให้คนใช้ที่ช่วยตัวเองได้ไม่เต็มที่ สามารถควบคุมและสั่งการระบบอำนวยความสะดวกและงานที่ไม่ต้องใช้ผู้ชำนาญการ โดยเฉพาะต่างๆได้โดยการใช้คันโยกบังคับ (Joy Stick) หรือการสั่งการโดยคำพูด

ในปัจจุบันหุ่นยนต์ที่ถูกสร้างขึ้นมาได้ถูกนำไปใช้ในงานหลายๆอย่างมาแล้วดังใน ตาราง A1 แสดงให้เห็นถึงหุ่นยนต์แบบต่างๆที่มีอยู่และใช้งานจริงในปัจจุบัน

โดยที่ Planar เป็นหุ่นยนต์ข้อต่อแบบ 3 แกน นับได้ว่าเป็นหุ่นยนต์ที่พื้นฐานที่สุดในทั้ง 4 แบบที่กล่าวมาทั้งหมด Adapt One เป็นหุ่นยนต์ 4 แกน ที่ใช้ในงานประกอบผลิตภัณฑ์ที่มีความเร็วสูง ซึ่งมีรูปแบบการเคลื่อนไหวแบบ SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), Rhino XR-3 เป็นหุ่นยนต์แบบ 6 แกนขนาดเล็กใช้เพื่อการศึกษา และ Intelledex เป็นหุ่นยนต์ 6 แกนขนาดใหญ่ใช้สำหรับการเกษตร

**3. ระบบขับเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์**

แหล่งจ่ายกำลังเพื่อขับเคลื่อนหรือหมุนข้อต่อของหุ่นยนต์โดยทั่วไปที่ใช้กันอยู่มี 3 ระบบ คือ

**3.1 การขับเคลื่อนด้วยไฮดรอลิก (Hydraulic Drive)**

มักจะใช้ในหุ่นยนต์ขนาดใหญ่ที่ใช้กำลังมากๆและมีความเร็วในการทำงานสูง หุ่นยนต์ชนิดนี้ทำงานได้โดยการปั๊มน้ำมันเพื่อส่งกำลังให้แขนกลเคลื่อนที่ได้

**3..2 การขับเคลื่อนด้วยนิวแมติก (Pnuematic Drive)**

มีลักษณะการทำงานคล้ายไฮดรอลิกแต่ใช้ระบบแรงดันลมแทนที่จะใช้น้ำมันในการขับเคลื่อน โดยทั่วไประบบนี้ไม่ค่อยนิยมใช้กันมากนัก และจะมีใช้ปกติกับหุ่นยนต์ขนาดเล็กๆที่มีจำนวนระดับชั้นความเสรี (Degree of Freedom) น้อยๆ 2-3 ระดับชั้นความเสรีเป็นส่วนใหญ่

**3.3 การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า (Electric Drive)**

แขนกลในปัจจุบันส่วนใหญ่นิยมใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าซึ่งส่วนใหญ่มักจะใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อน เช่น เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (DC Servomotor), สเตปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor) เป็นต้น ซึ่งระบบนี้จะมีความแม่นยำสูงและการทำงานแบบซ้ำๆรูปแบบจะทำได้ดีแต่ถ้าเป็นงานขนาดใหญ่ที่ต้องการกำลังมากๆ ก็ยังคงใช้ระบบไฮดรอลิกอยู่

**4 แบบของการเคลื่อนไหวของข้อต่อ(Joint) ของแขนหุ่นยนต์**

การศึกษาการเคลื่อนไหวของข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ทำให้ทราบถึงรูปแบบการติดตั้งตัวตรวจรู้ที่เหมาะสมได้ ซึ่งแบบของการเคลื่อนไหวของข้อต่อ (Joint) ของแขนหุ่นยนต์ โดยพื้นฐานมีดังนี้

**4.1 การเคลื่อนที่เลื่อนในแนวตรง (Linear Motion Joint)**

หมายถึง ข้อต่อที่ท่อนแขน 2 ท่อน เคลื่อนที่เลื่อนไปมาในแนวเส้นตรง

**4.2 การเคลื่อนที่หมุนพับ (Rotational Motion Joint)**

หมายถึง ข้อต่อที่ท่อนแขน 2 ท่อน มีการหมุนพับเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกห่างจากกัน

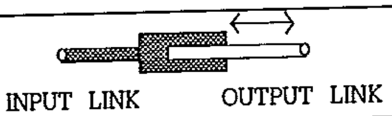
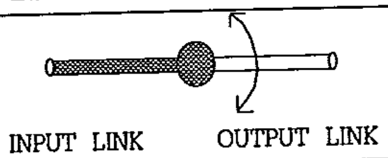
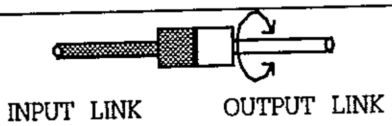
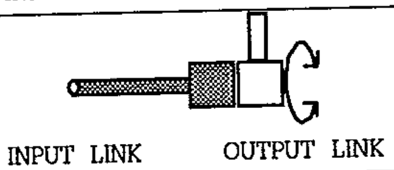
**4.3 การเคลื่อนที่หมุนบิด (Twisting Motion Joint)**

หมายถึง ข้อต่อที่แขนหนึ่งมีการหมุนบิดรอบตัวเองโดยมีอีกท่อนแขนหนึ่งเป็นหลัก

**4.4 การเคลื่อนที่หมุนเหวี่ยง (Revolution Motion Joint)**

หมายถึง ข้อต่อที่แขนมีการหมุน ในลักษณะที่ตั้งฉากกับข้อต่ออีกท่อนหนึ่ง

**ตาราง A2 ชนิดของข้อต่อของหุ่นยนต์ (TYPE OF ROBOT JOINT)**

| ชนิด | สัญญลักษณ์ | ภาพประกอบ |
|---|---|---|
| LINEAR<br>การเลื่อนแนวตรง | L |  |
| ROTATION<br>การหมุนพับ | R |  |
| TWISTING<br>การหมุนบิด | T |  |
| REVOLUTION<br>การหมุนเหวี่ยง | V |  |

โดยทั่วไปแล้วเราสามารถแยกออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆก็ได้ คือการเลื่อนและการหมุนพับ ซึ่งเราจะให้การหมุนบิดและหมุนเหวี่ยงเป็นแบบย่อยของการหมุนพับ ดังนั้นในที่นี้จะใช้คำว่าข้อต่อแบบหมุนแทนข้อต่อแบบหมุนชนิดต่างๆ ซึ่งลักษณะของข้อต่อแบบต่างๆดังตาราง A2

ในปัจจุบันการสร้างหุ่นยนต์สมัยใหม่เพื่อใช้งานอาจมีรูปแบบที่แตกต่างกันออกไปตามลักษณะของงานที่จะกระทำ และในแขนหุ่นยนต์เดียวกันก็อาจจะมีข้อต่อหลายๆแบบรวมกันก็ได้ทั้งนี้ก็เพื่อให้เหมาะสมกับงานแต่ละแบบ

**5. ชนิดของหุ่นยนต์ที่อยู่บนพื้นฐานของ 3 แกน**

ในที่นี้จะกล่าวถึงหุ่นยนต์พื้นฐานรวมทั้งพิจารณาขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ โดยทั่วๆไปจะพิจารณาหุ่นยนต์ที่ประกอบด้วยท่อนแขน 3 ท่อน ซึ่งจัดว่าเป็นพื้นฐานของหุ่นยนต์ในรูปแบบอื่นๆโดยที่สามารถแยกได้ 6 แบบดังตาราง A3

**ตาราง A3 ส่วนประกอบของแกนแบบต่างๆในหุ่นยนต์แต่ละแบบ**

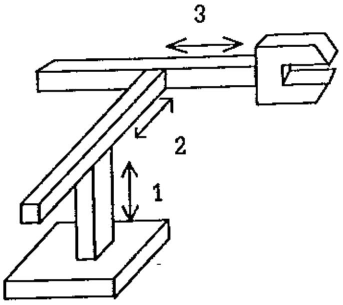
| หุ่นยนต์ | แกน I | แกน II | แกน III | รวมข้อต่อหมุน |
|---|---|---|---|---|
| ***Cartesian*** | L | L | L | 0 |
| ***Cylindrical*** | T | L | L | 1 |
| ***Spherical*** | V | R | L | 2 |
| ***SCARA*** | T | R | L | 2 |
| ***Articulated*** | T | R | R | 3 |

**5.1 *Cartesian Robot***

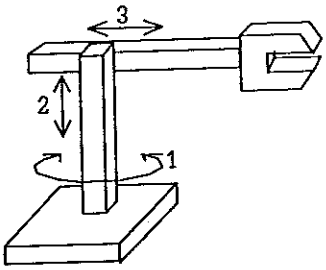
คือลักษณะที่มีการเคลื่อนของท่อนแขนทั้ง 3 ท่อน เลื่อนเป็นแนวเส้นตรงดังภาพประกอบ A1

ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์แบบนี้ ู ี ปล - ○ ,

นแขนจะเคลื่อนที่ ไปได้




ภาพประกอบ A1 แสดง Cartesian Robot




ภาพประกอบ A2 แสดง Cylindrical Robot

**5.2 Cylindrical Robot**

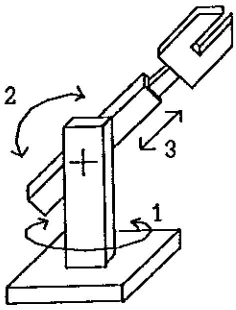
มีลักษณะโดยที่ท่อนแขนที่ 1 จะหมุนบิดกับฐานส่วนท่อนแขนที่ 2 และ 3 จะเลื่อนเข้าออกเป็นแนวเส้นตรงดังภาพประกอบ 2

ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์แบบนี้จะเป็นรูปทรงกระบอกแนวตั้งรอบๆ ฐาน

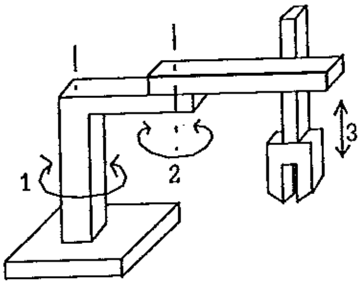
**5.3 Sphereical Robot**

มีลักษณะโดยที่ท่อนแขนที่ 1 จะหมุนบิดกับฐาน, ท่อนแขนที่ 2 จะหมุนกวาดกับท่อนแขนที่ 1 และท่อนแขนที่ 3 จะเลื่อนเข้าออกเป็นแนวเส้นตรงกับท่อนแขนที่ 2 มีลักษณะดังภาพประกอบ A3

ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดนี้จะเป็นพื้นที่ระหว่างทรงกลม 2 ลูกรอบๆ ฐาน




ภาพประกอบ A3 แสดง Spherical Robot




ภาพประกอบ A4 แสดง SCARA Robot

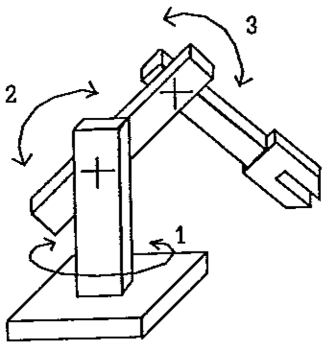
**5.4 SCARA Robot**

ย่อมาจาก Selective Compliance Assembly Robot Arm มีลักษณะโดยที่ท่อนแขนที่ 1 มีลักษณะเป็นรูปตัวแอล (L) หมุนเหวี่ยงไปรอบๆ ฐาน ท่อนแขนที่ 2 ก็จะมีการหมุนพับกวาดขนานกับพื้นดิน โดยที่จุดหมุนจะอยู่ที่ปลายท่อนแขนที่ 1 และท่อนแขนที่ 3 จะเคลื่อนที่ไปมาตั้งฉากกับท่อนแขนที่ 2 หรือเป็นแนวดิ่งกับพื้นดิน ดังภาพประกอบ A4

ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ชนิดนี้ค่อนข้างจะซับซ้อนขึ้นอยู่กับข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ของท่อนแขน 2 ท่อนแรก

**5.5 Artriculate Robot**

มีลักษณะโดยที่ท่อนแขนที่ 1 จะตั้งฉากกับพื้นดิน และ หมุนบิดกับฐานท่อนแขนที่ 2 จะหมุนพับกับท่อนแขนที่ 1 และ ท่อนแขนที่ 3 จะหมุนพับ กับท่อนแขนที่ 2 ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแขนของมนุษย์มากที่สุด ซึ่งในบางครั้งอาจ เรียกว่า Revolution Robot ดังภาพประกอบ A5




**ภาพประกอบ A5 แสดง Artriculate Robot**

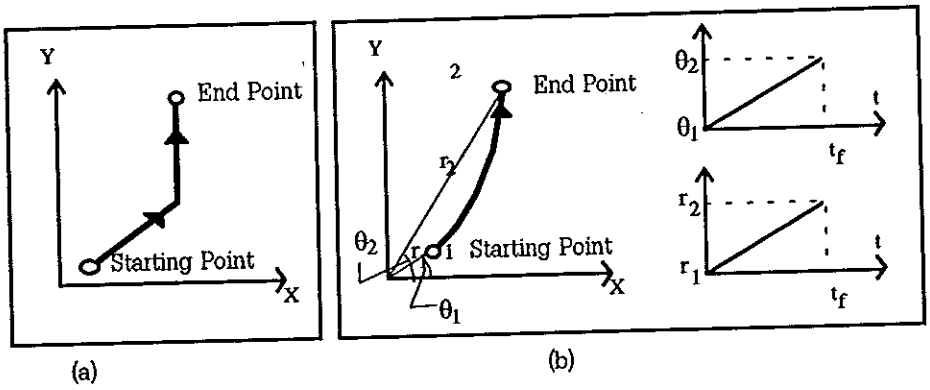
ขอบเขตการทำงานของหุ่นยนต์ นี้ค่อนข้างจะซับซ้อนและกว้างไปรอบๆฐาน

## 6. การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ (Robot Motion Control)

เราสามารถจำแนกหุ่นยนต์ออกเป็นประเภทได้หลายรูปแบบและแบบหนึ่งที่สำคัญคือ การจำแนกตามรูปแบบการควบคุมการเคลื่อนที่ (Motion Control) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ

### 6.1 การเคลื่อนที่แบบจุดต่อจุด (Point - to - Point Motion, PTP)

คือการควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่เป็นเป้าหมาย (Goal หรือ End point) โดยไม่สนใจเส้นทางระหว่างการเคลื่อนที่ ดังนั้นเส้นทางและความเร็วของหุ่นยนต์ชนิดนี้จึงไม่มีความหมายระบบ PTP โดยพื้นฐานแล้วจะต้องการทราบค่าที่เป็นจุดเป้าหมายและตัวตรวจรู้ตำแหน่ง (Position Sensor) จะบอกให้ทราบว่าถึงจุดที่ต้องการแล้วหรือยัง




**ภาพประกอบ A6 แสดง PTP Robot System**

ในโครงสร้างของหุ่นยนต์แบบ PTP อาจแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบแรกแต่ละแกนจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของตนเองให้เร็วที่สุด ดังนั้นก็จะไม่มีการกำหนดและควบคุมเส้นทางเคลื่อนที่ดังภาพประกอบ 6 (a) ซึ่งจะเห็นได้ว่าเริ่มแรกการ เคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y จะไปพร้อมกันและเมื่อแกน x ถึงจุดสิ้นสุดก่อนก็จะเคลื่อนที่เฉพาะในแนวแกน y จนถึงจุด เป้าหมาย

โครงสร้างอีกแบบหนึ่งจะใช้ในระบบ PTP ที่มีความซับซ้อนกว่าคือ ระบบที่การเคลื่อนที่ไปของทุกแกนจะถึงจุดสิ้นสุดพร้อมกัน นั่นคือต้องมีการคำนวนหาค่าความเร็วในแต่ละแกนให้ได้ก่อน ซึ่งอาจจะไม่เท่ากันดังในภาพประกอบ 6 (b) และ ทุกแกนจะใช้เวลา ($t_f$) ในการเคลื่อนที่มาถึงจุดเป้าหมายพร้อมกัน โดยทั่วไปมักนิยมใช้ในหุ่นยนต์ประเภทเชื่อมผลิตภัณฑ์แบบจุด, หุ่นยนต์จับยกวัตถุ, หรืองานประกอบผลิตภัณฑ์แบบไม่ซับซ้อนมากนัก เป็นต้น

**6.2 การเคลื่อนที่แบบเส้นทางต่อเนื่อง (Continueous - Path Motion, CP)**

ในระบบนี้หุ่นยนต์จะทำงานทุกจุดตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ เพราะฉะนั้นเส้นทางการเคลื่อนที่และความเร็วจะมีความหมายต่อคุณภาพของงาน เช่น หุ่นยนต์เชื่อมไฟฟ้า (Arc Welding Robot) ที่จะต้องนำปืนเชื่อมไปตามเส้นทางที่ได้โปรแกรมเอาไว้ในระบบนี้ทุกแกนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วของตนเอง ผลลัพท์ของความเร็วของจุดทำงานจะมีผลต่อคุณภาพของงาน เช่น ถ้าเคลื่อนที่เร็วเกินไปอาจจะทำให้รอยเชื่อมบางจนเป็นผลทำให้ชิ้นงานไม่ติดกันตามต้องการได้หรือถ้าเคลื่อนที่ช้าเกินไปจะทำให้บริเวณที่ถูกเชื่อมร้อนเกิน ซึ่งมีผลให้รอยเชื่อมทะลุได้การพิจารณาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบนี้สามารถพิจารณาได้ดังในภาพประกอบ 6 (b) ถ้าแขนหุ่นยนต์แบบ 3 ท่อนแขนที่มีทุกท่อนแขนเลื่อนในแนวตรงตั้งฉากต่อกันที่เรียกว่า Cartesian Robot เคลื่อนที่ไปในทิศทาง *l* ด้วย ความเร็ว *V* แต่ละแกนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว

$$V_x = (x/l)V$$

$$V_y = (y/l)V$$

และ

$$V_z = (z/l)V$$

โดยที่

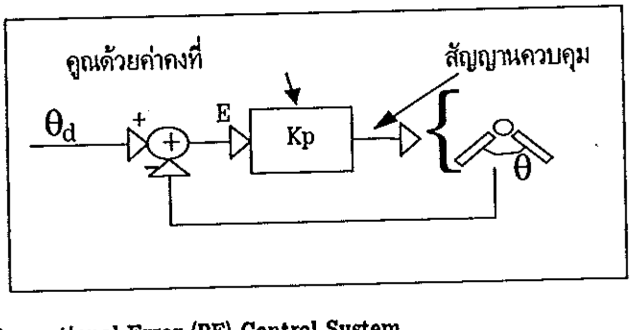
$$l = \sqrt{(x^2 + y^{2+} z^2)}$$

ในระบบนี้ความผิดพลาด (error) จะเกิดขึ้นได้ถ้าความเร็วของแกนใดแกนหนึ่งผิดไปซึ่งทำให้แขนหุ่นยนต์ไม่อยู่ที่จุดเป้าหมายเมื่อการเคลื่อนที่สิ้นสุด ดังนั้นเพื่อป้องกันและลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้จึงจำเป็นต้องมีการส่งข้อมูลของตำแหน่งปัจจุบันกลับไปยังระบบควบคุมอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา ซึ่งก็คือการนำระบบตรวจรู้ตำแหน่งเข้ามาใช้นั่นเองหุ่นยนต์ประเภทนี้มักจะใช้ในงานเชื่อมไฟฟ้าแบบอาร์คต่อเนื่อง (Continue Arc Welding), หรือหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานตรวจสอบ (Inspection Robot) เป็นต้น

**7. หลักการควบคุมแขนหุ่นยนต์ (Principle of Robot Manipulator Control)**

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบที่ใช้กันมาก และมีความซับซ้อนน้อยเหมาะต่อการศึกษาและการพัฒนาในขั้นต้นคือแบบ Point-To-Point ซึ่งหลักพื้นฐานของการควบคุมคือ การเคลื่อนที่ในทิศทางที่ลด Error Function ให้มีค่าน้อยที่สุด (Error=0) เช่น กำหนดให้ Error Function เป็น $E = \theta_d - \theta$ , โดยที่ $\theta_d$ เป็นมุมที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป และ $\theta$ เป็นตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์จริงๆขณะนั้น นั่นคือการทำงานจะเสร็จสิ้นเมื่อ $\theta_d = \theta$ หรือ $E = 0$ หมายความว่าแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่มาถึงจุดเป้าหมาย (Goal หรือ End Point) ที่ต้องการแล้ว ถ้า *E* มีค่าเป็น *ลบ* ก็แสดงว่าแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เลยจุดเป้าหมายไป ดังนั้นการควบคุมคือการส่งสัญญาณควบคุมไปยังระบบขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ในทิศทางที่ทำให้ค่า *E* เป็น ศูนย์

การควบคุมแบบที่ง่ายที่สุดคือการที่ให้สัญญาณควบคุม M แปรผันโดยตรงกับ *E* ดัง ภาพประกอบ 7 ซึ่งเป็นการควบคุมแบบ มีการป้อนกลับ ระบบควบคุมแบบนี้เรียกว่า 'Proprtional Error (PE) Control System'




**ภาพประกอบ A7 แสดง Proportional Error (PE) Control System**

สมการสำหรับระบบ PE คือ

$M = Kp(qd - q)$

หรือ $M = Kp\,E$ .............................................................................................. (1)

เพราะฉนั้นในเวลาใดๆ

$m(t) = Kp\,e(t)$ .............................................................................................. (2)

โดยที่ m(t) : สัญญาณควบคุม

Kp : ค่าคงที่ (อัตราขยายสัญญาณ)

e(t) : Error

ซึ่ง m(t) ในที่สุดแล้วก็คือทอร์ก (Torgue) ของมอเตอร์ที่จ่ายกำลังให้กับแขนหุ่นยนต์นั่นเอง ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับ error คูณด้วยค่าคงที่ จากสมการที่ (2) จะเห็นได้ว่า ถ้า e(t) มีค่ามาก (แขนหุ่นยนต์อยู่ห่างจากจุดเป้าหมายมาก) ทอร์กก็จะมีค่ามากตามไปด้วยและทอร์กจะลดลงตาม e ในทางปฏิบัติเมื่อแขนกลเคลื่อนที่ถึงตำแหน่งเป้าหมายหรือ e(t) = 0 ระบบควบคุมจะไม่ให้มีการจ่ายกำลังให้กับระบบขับเคลื่อน (ทอร์กเป็นศูนย์) แขนหุ่นยนต์จะไม่หยุดนิ่งทันทีทันใดเนื่องจากการมีแรงเฉื่อย (Inertia) ทำให้การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เลยจุดเป้าหมายหรือ e(t) มีค่าเป็น ลบ ลักษณะนี้เรียกว่าการเกิด "Over Shoot" เป้าหมายซึ่งจะทำให้ m(t) มีค่าเป็นลบอันเป็นผลให้แขนหุ่นยนต์ถูกดึงกลับและ ก็จะเกิดปัญหาเช่นนี้อีกครั้งในทิศทางตรงกันข้ามปัญหานี้เรียกว่า "Steady State Error Problem" นั่นก็คือถ้า Kp มีค่าสูง หุ่นยนต์ก็จะเคลื่อนที่ได้เร็วแต่ก็จะทำให้เกิด Over Shoot มาก ในทำนองเดียวกันถ้าให้ Kp มีค่าต่ำ Over Shoot ก็จะน้อยแต่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ก็จะต่ำไปด้วย

ในบางกรณีเมื่อ Error มีค่ามากๆ (แขนหุ่นยนต์อยู่ห่างจากเป้าหมายมาก) จะทำให้ m(t) มีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว วิธีแก้คือ การให้ค่า Kp มีค่าต่ำ และเพิ่มการควบคุมที่พิจารณาผลรวมของค่า Error ที่เปลี่ยนไปในอดีตเข้ามาดังสมการ

$m(t) = Kp\,e(t) + Ki\ e(t)dt$ .............................................................................................. (3)

โดยที่ Ki : ค่าคงที่ หรือ อัตราขยายของอินทีเกรเตอร์

หรือ $m(t) = Kp\,e(t) + \frac{Kp}{Ti}\ e(t)dt$ .............................................................................................. (4)

เมื่อ Ti เป็นค่าในการปรับอัตราขยายของอินทีเกรเตอร์ และ Kp เป็นอัตราขยายของทั้ง Proportional และ Integrator

การควบคุมแบบนี้เรียกว่า "Propritional Intregral (PI) Control System" ซึ่งใน ระบบนี้การออกแบบค่า Kp และKi (หรือ Ti) ที่เหมาะสมจะทำให้การเพิ่มของความเร็วของแขนหุ่นยนต์ไม่เป็นไปในทันทีทันใด (เมื่อ Error มีค่าสูง) ทำให้มีความนุ่มนวลในการเคลื่อนที่แต่ก็จะไม่หยุดลงอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงจุดเป้าหมายแล้วซึ่งจะทำให้เกิดข้อเสียเรื่องการมี Over Shoot ดังนั้นเราจึงต้องทำการแก้ไขปัญหานี้ซึ่งสิ่งที่ต้องการคือการ พยายามทำให้การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์เป็นไปในลักษณะดังนี้ :

- ถ้า Error มีขนาดใหญ่ (แขนหุ่นยนต์อยู่ห่างจากจุดเป้าหมายมาก) และความเร็วในปัจจุบันมีค่าต่ำให้เพิ่มความเร็วให้กับแขนกล (เพิ่มกำลังเข้าไป)
- ถ้า Error มีขนาดเล็ก (แขนหุ่นยนต์เข้าใกล้จุดเป้าหมาย) และความเร็วในขณะนั้นมีค่าสูงให้ขับกำลังในทิศทางที่ตรงกันข้ามเพื่อลดความเร็วลง

ซึ่งวิธีที่จะทำให้การควบคุมเป็นไปตามความต้องการดังกล่าวก็สามารถทำได้ โดยการเพิ่มระบบควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control System) เข้าไปได้เป็นดังสมการ

$$m(t) = Kp\ e(t) + Ki \int e(t)dt + Kd \frac{de(t)}{d(t)} \qquad \text{.......... (5)}$$

หรือ

$$m(t) = Kp\ e(t) + (Kp/Ti)\int e(t)dt + (KpTd)\frac{de(t)}{d(t)} \qquad \text{.......... (6)}$$

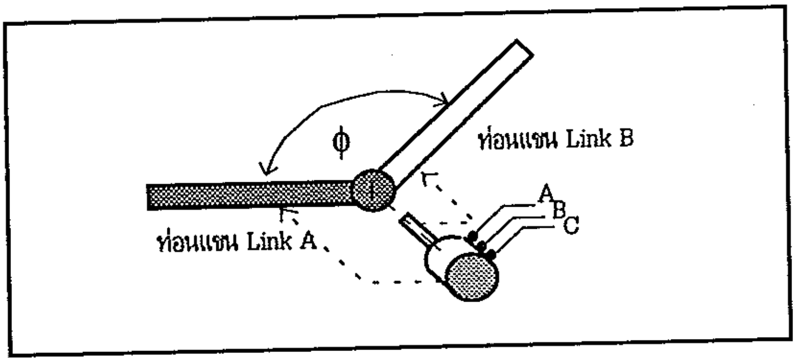
เมื่อ Td เป็นค่าในการปรับอัตราขยายของตัวดิฟเฟอร์เรนชิเอเตอร์ และ Kp เป็นอัตราขยายของทั้ง Proportional, Integrator และ Derivative ซึ่งต้องมีการนำ ความเร็วของแขนหุ่นยนต์มาพิจารณาด้วยระบบควบคุมแบบนี้ เรียกว่า "Propotional Integral Derivative (PID) Control System" ซึ่งเป็นระบบควบคุมที่นิยมใช้ในงานควบคุมโดยทั่วไปมากที่สุดในปัจจุบัน

## การนำโพเทนชิออมิเตอร์มาใช้ในระบบตรวจรู้ตำแหน่ง

ในการวิจัยระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์นี้ จะใช้โพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง (Positon Sensor) ซึ่งการใช้งานจะนำมาทำในลักษณะของตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) และจะถูกติดตั้งอยู่บนข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ และจะให้ค่าของมุมหรือระยะทางที่แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปออกมาในรูปของแรงดันที่แปรตามมุมหรือระยะทางนั้น

## ลักษณะการติดตั้งตัวตรวจรู้แหน่งแบบโพเทนชิออมิเตอร์เข้ากับแขนหุ่นยนต์

ในภาพประกอบ A8 แสดงตัวอย่างการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์เข้ากับจุดหมุนหรือข้อต่อ (Joint) ของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นแบบหมุนกวาด (Rotation) การติดตั้งอาจจะทำได้โดยตรง คือให้ตัวถัง (Body) ของโพเทนชิออมิเตอร์ติดกับท่อนแขนอ้างอิง (Reference Link) และให้แกนหมุน (Wiper) ของโพเทนชิออมิเตอร์ติดกับอีกท่อนแขนหนึ่งซึ่งจะทำให้มุมที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ท่อนแขน $\phi$ ที่เปลี่ยนไปเท่ากับความต้านทานของโพเทนชิออมิเตอร์ที่เปลี่ยนไป (ระหว่าง Link A กับ Link B)




**ภาพประกอบ A8 แสดงตัวตรวจรู้ตำแหน่งที่วัดมุมระหว่างท่อนแขน A และท่อนแขน B**

ซึ่งลักษณะนี้จะเห็นได้ว่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะไม่เกี่ยวข้องกับแหล่งจ่ายกำลัง ไม่ว่าจะมีการลดทอนโดยการทดรอบด้วยระบบเฟืองหรือระบบอะไรก็ตาม เนื่องจากเป็นการวัดที่ตำแหน่งจริงๆของการหมุน หรือเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ ดังนั้นความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก็จะเนื่องมาจากความผิดพลาดของระบบวัดและของตัวตรวจรู้เอง เช่นในกรณีของโพเทนชิโอมิเตอร์ความผิดพลาดก็อาจจะเกิดจากความเที่ยง (Precision) และความเป็นเชิงเส้น (Linearity) ของโพเทนชิโอมิเตอร์ เป็นต้น

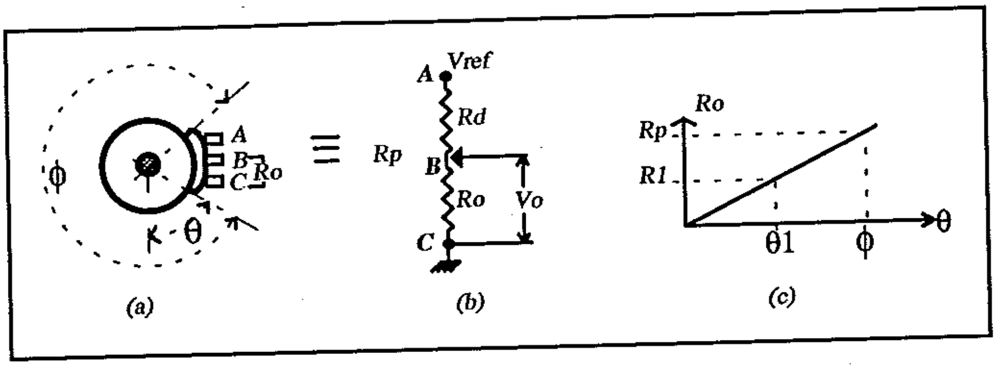
## ข้อมูลที่ได้จากการนำ โพเทนชิออมิเตอร์มาเป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง

ในการวิจัยนี้จะนำโพเทนชิออมิเตอร์มาในลักษณะของตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) ดังภาพประกอบ A9 โดยที่จะได้ความสัมพันธ์ของตัวแบ่งแรงดันเป็น

$$Vo = \frac{Ro}{(Ro+Rd)} Vref \qquad \text{......(7)}$$

หรือ

$$Vo = \frac{Ro}{Rp} Vref \qquad \text{......(8)}$$




**ภาพประกอบ A9 แสดงโพเทนชิออมิเตอร์ ซึ่งนำมาใช้เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่ง**

เมื่อ Vo คือแรงดันที่ขา B ซึ่งจะส่งไปยังระบบคอมพิวเตอร์ (แรงดันด้านออกจากโพเทนชิออมิเตอร์), Ro คือความต้านทานจากขา B ถึงขา C, Rd คือความต้านทานจากขา B ถึงขา A, Rp คือความต้านทานของโพเทนชิออมิเตอร์ มีค่าเท่ากับ Ro+Rd, Vref คือแรงดันอ้างอิงที่ต่อกับขา A โดยให้ขา C เป็นกราวด์

ในกรณีที่โพเทนชิออมิเตอร์ที่ใช้ มีการกระจายของความต้านทานต่อมุมการหมุนของหน้าสัมผัสตัวนำเป็นเส้นตรง (Linear) จะทำให้ความต้านทานที่หน้าสัมผัสตัวนำ (Ro) แปรผันโดยตรงกับมุมของการหมุนของแกนหมุน (θ) และแรงดันเอาท์พุท (Vo) ก็จะแปรผันโดยตรงกับความต้านทานที่หน้าสัมผัสตัวนำ (Ro) หรือมุมของการหมุนของแกนหมุน (θ) ด้วย ดังภาพประกอบ A9(c) ซึ่งความชันของกราฟจะมีค่าคงที่ (Constant) ซึ่งจะได้ว่า

$$\Delta\theta/\Delta\theta Ro = K1$$

โดยที่ $K_1$ : ค่าคงที่ (Constant), $\Delta\theta$ เป็นอัตราการเปลี่ยนมุมของแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ที่ทำให้ความต้านทานระหว่างขา B และ C เปลี่ยนไป $\Delta Ro$

นั่นคือ

$$\frac{d\theta}{dRo} = K_2$$

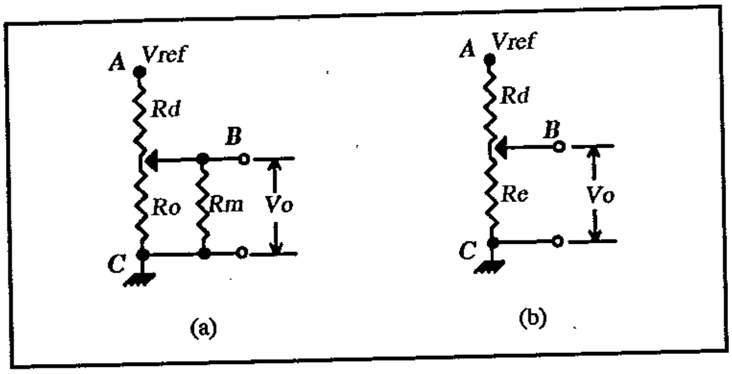
ในทำนองเดียวกันถ้าเราให้แรงดันอ้างอิง Vref เข้าที่ขา A และกราวด์เข้าที่ขา C แล้วอัตราการเปลี่ยนแรงดันที่ขา B (Vo) เมื่อเทียบกับอัตราการเปลี่ยนของ R ก็จะเป็นค่าคงที่

$$\frac{dVo}{dRo} = K_3$$

ในแง่ของการใช้งานซึ่งไม่เป็นไปตามอุดมคติแรงดัน Vo ที่จะเข้าสู่วงจร A/D จะไม่เป็นไปตามผลลัพท์ของสมการที่กล่าวมาพอดีแต่จะมีค่าที่เบี่ยงเบนไปอันเนื่องมาจากความผิดพลาด (Error) ในส่วนต่างๆ ซึ่งในความเป็นจริงการนำโพเทนชิออมิเตอร์มาต่อเป็นวงจรแบ่งแรงดันจะมีผลกระทบหลายอย่างที่ทำให้ผลการวัด หรือข้อมูลที่ได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพื่อปรับแก้ความผิดพลาดให้น้อยที่สุด

## ความผิดพลาดที่เกิดจากการใช้โพเทนชิออมิเตอร์

โดยทั่วไปในกรณีที่นำโพเทนชิออมิเตอร์มาต่อในลักษณะของตัวแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) เมื่อนำสัญญาณ Vo ที่ได้ไปต่อกับวงจรอีกส่วนหนึ่งจะมีความผิดพลาดซึ่งเกิดจากผลกระทบของการโหลด (Loading Effect) ดังในภาพประกอบ A10(a) และวงจรสมมูลในภาพประกอบ A10(b)




**ภาพประกอบ A10 แสดงวงจรของโพเทนชิออมิเตอร์เมื่อมีการโหลดและวงจรสมมูล**

ให้ Re = (RoRm)/(Ro+Rm) ..........(9)

โดยที่ Rm คืออิมพิแดนซ์ด้านเข้าของภาคที่จะมาต่อเพื่อรับข้อมูลจากวงจรตัวแบ่งแรงดัน, Rp คือความต้านทานของโพเทนชิออมิเตอร์หรือความต้านทานระหว่างขั้ว AC เมื่อไม่มี Rm, และ R'p คือความต้านทานระหว่างขั้ว AC เมื่อมี Rm

เพราะฉนั้น R'p = Rd+Re

และ Rd = Rp-Ro

ดังนั้น R'p = Rp-Ro+(RoRm/Ro+Rm) ..........(10)

และ

Vo = (Re/R'p)Vref

หรือ Vo/Vref = Re/R'p ..........(11)

จาก (9) และ (10) เพราะฉนั้น

$$Vo/Vref = \frac{RoRm/(Ro+Rm)}{Rp-Ro+Rm/(Ro+Rm)} \quad \text{..........(12)}$$

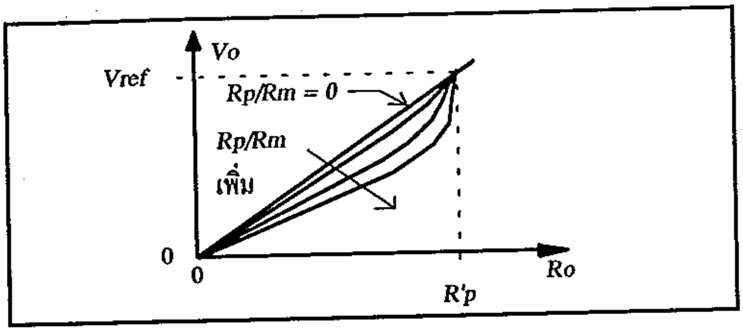
$$= \frac{1}{Rp/Ro+(Ro/Rm)[1-(Ro/Rp)]} \quad \text{..........(13)}$$

จากสมการที่ (13) จะเห็นได้ว่าถ้า Rm มีค่าสูงมากๆ (ไม่มีการโหลด)

ได้เป็น $\frac{Vo}{Vref} = \frac{1}{(Rp/Ro)}$

หรือ Vo = (Ro/Rp)Vref

นั่นคือเป็นสมการของ ตัวแบ่งแรงดันในทางทฤษฎีนั่นเอง ซึ่งถ้าไม่มีผลกระทบของโหลดมาแบ่งกระแสของ Ro แล้วกราฟระหว่าง Ro และ Vo จะเป็นเส้นตรงซึ่งในความเป็นจริง Rm จะไม่เป็นอนันต์ ดังนั้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vo และ Rm จะมีลักษณะดังภาพประกอบ A11




**ภาพประกอบ A11 แสดงกราฟผลของโหลดในวงจรที่นำมาต่อกับโพเทนชิออมิเตอร์**

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (3.6) เป็นความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear Relations) ระหว่าง Vo และ Ro และพบว่าค่าความผิดพลาดสูงสุด (Maximun Error) จะแปรผันโดยตรงกับค่า Rp/Rm ถ้า Rp/Rm = 1 ค่าความผิดพลาดสูงสุดจะประมาณ 12 % ของค่าเต็มสเกลและถ้า Rp/Rm = 0.1 ค่าความผิดพลาดสูงสุดจะเหลือประมาณ 1.5 % ของค่าเต็มสเกลและในกรณีที่ค่าอัตราส่วน Rp/Rm < 0.1

MAX Error $\cong$ 1.5(Rp/Rm) ..........(14)

ดังนั้นเพื่อให้ความสัมพันธ์ระหว่าง Vo และ Ro เป็นไปอย่างเชิงเส้นจึงจำเป็นต้องมีการเลือกให้ความต้านทานของโพเทนชิออมิเตอร์ (Rp) มีค่าต่ำเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ขาเข้าของภาคที่จะมาต่อ (Rm) แต่การจะเลือกให้ Rm มีค่าน้อยก็จะมีผลกระทบในเรื่องของความไวของโพเทนชิออมิเตอร์ (Sensitivity) ที่เราต้องการให้มีค่าสูงๆ ซึ่งในกรณีนี้เราจะได้ว่าความไวของโพเทนชิออมิเตอร์

$$Sp = \Delta Vo/\Delta\theta$$

หรือ

$$Sp = \Delta Vo/\Delta Ro$$

นั่นคือความไวของโพเทนชิออมิเตอร์ (Sp) คืออัตราการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านออกของโพเทนชิออมิเตอร์ $\Delta$Vo เมื่อเทียบกับมุมการหมุนของแกนหมุนโพเทนชิออมิเตอร์ ($\Delta\theta$) หรือเทียบกับการเปลี่ยนไปของ Ro (ความต้านทานด้านออกของ ตัวแบ่งแรงดัน) หรือถ้าความสัมพันธ์ของ Vo และ Ro เป็นเส้นตรง

$$Sp = dVo/dRo \quad \text{..........(15)}$$

จากวงจรตัวแบ่งแรงดัน $\Delta$Vo จะแปรผันตาม Vref โดยที่ถ้า Vref มีค่า สูง $\Delta$Vo ก็จะมีค่ามากไปด้วยนั่นคือ Sp จะแปรผันโดยตรงกับ Vref ถ้าเราใช้ Rp ค่าน้อยๆก็จะทำให้เราไม่สามารถใช้ Vref ค่าสูงๆได้ เนื่องจากคุณสมบัติของโพเทนชิออมิเตอร์ที่จะมีอัตราความสามารถในการสูญเสียความร้อน (Heat-Dissipating Capacity) จำกัด ซึ่งคุณสมบัตินี้จะบอกในรูปของอัตรากำลัง (Power Rating) ของโพเทนชิออมิเตอร์ ดังนั้นถ้าการสูญเสียความร้อนถูกจำกัดที่ P วัตต์ ค่าสูงสุดของ Vref ที่จะใช้ได้จะมีค่าเป็น

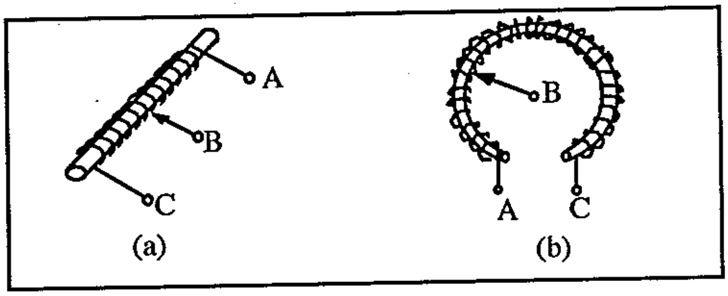
$$Max\ Vref = \sqrt{PRp} \quad \text{..........(16)}$$

นั่นคือ P จะเป็นตัวจำกัดไม่ให้ Vref สูงมากนัก ในหลายกรณี Vref จะถูกกำหนด ห้มีค่าใดค่าหนึ่ง ั้งนั้น Rp จะถูก จำกัดไม่ให้มีค่าต่ำมากนักโดยที่

$$Min\ Rp = \sqrt{Vref / Rp} \quad \text{..........(17)}$$

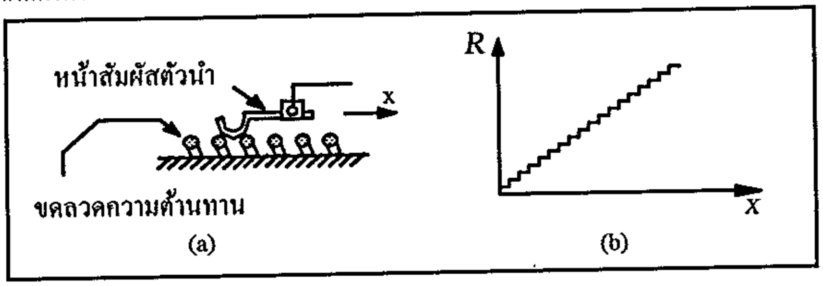
ซึ่งค่า Rp นี้จะเป็นค่าต่ำสุดที่เป็นไปได้และในทางปฏิบัติจะใช้ Rp สูงกว่าค่านี้เพื่อให้ระบบมีความเชื่อถือได้ดียิ่งขึ้น

ความละเอียด (Resolution) ของโพเทนชิออมิเตอร์โดยทั่วไปแล้วขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางด้านองค์ประกอบของตัวต้านทาน (Resistive Element) หรือขึ้นอยู่กับระยะทางที่หน้าสัมผัสตัวนำจะเคลื่อนที่ไปได้บนองค์ประกอบตัวต้านทานนั้นเป็นหลักหรือในกรณีโพเทนชิออมิเตอร์ที่เป็นแบบหมุนกวาด (Rotation) ความละเอียดจะแปรผันโดยตรงกับเส้นผ่าศูนย์กลาง (ซึ่งหมายถึงความยาวขององค์ประกอบความต้านทาน) ดังนั้นค่าความต้านทานของโพเทนชิออมิเตอร์ที่ได้จะมีค่าไม่สูงมากนักเนื่องจากจะถูกจำกัดด้วยความยาวขององค์ประกอบความต้านทาน (Rp) และในกรณีที่ต้องการความต้านทาน Rp มากๆก็จะทำโดยการลดขนาดของเส้นที่เป็นองค์ประกอบความต้านทานลงแต่ก็จะทำให้ความทนทานต่อการใช้งานลดลงไปด้วย ดังนั้นเพื่อให้ได้ความต้านทานเพิ่มมากขึ้นในพื้นที่น้อยๆจึงมีการใช้โพเทนชิออมิเตอร์แบบ ไวร์วาวด์ (Wire-Wound) ซึ่งส่วนที่เป็นองค์ประกอบความต้านทานมีลักษณะเป็นขดลวดความต้านทานพันอยู่รอบๆแกน




**ภาพประกอบ A12 โพเทนชิออมิเตอร์แบบไวววาวน์**

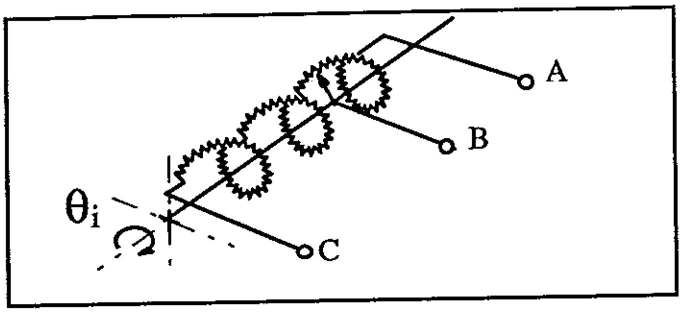
โดยทั่วไปถ้าต้องการความละเอียดสูงๆแล้ว ส่วนที่เป็นองค์ประกอบความต้านทานมักจะใช้คาร์บอนฟิล์ม (Carbon-Film) หรือพลาสติกตัวนำ (Conductive-Plastic) ซึ่งคาร์บอนฟิล์มจะมีความละเอียดสูงถึง $5x10^{-6}$ นิ้ว แต่ความละเอียดโดยรวมของโพเทนชิออมิเตอร์จะมีค่าต่ำกว่านี้มากเนื่องจากการถูกจำกัดด้วยผลของระบบกลไก และการยืดหยุ่นของแกนของหน้าสัมผัสตัวนำ




**ภาพประกอบ A13 ความผิดพลาดที่เกิดจากโพเทนชิออมิเตอร์แบบไววาวน์**

วิธีเพิ่มความละเอียดของโพเทนชิออมิเตอร์ให้มากขึ้นโดยไม่ทำให้ขนาดของตัวถังของโพเทนชิออมิเตอร์ เปลี่ยนไปมากนักคือ การใช้โพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนได้หลายรอบ (Multiturn Potentiometer) ซึ่งโพเทนชิออมิเตอร์แบบนี้จะมีองค์ประกอบความต้านทานเป็นรูปขดสปริง โดยที่เราสามารถที่จะหมุนแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์โดยปกติได้ 10 รอบ และอาจจะมากถึง 60 รอบ ในบางชนิดซึ่งความละเอียดที่เพิ่มขึ้นมาก็คือการเพิ่มระยะทางนั่นเอง

จากภาพประกอบ A14 เมื่อมีการหมุนแกนของโพเทนชิออมิเตอร์แปลงหมุนก็จะมีการหมุนเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางขององค์ประกอบความต้านทาน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูปเกลียวนั่นคือจะมีการเคลื่อนที่ไปตามเส้นรอบวงและเคลื่อนที่ไปตามแนวนอนด้วย




**ภาพประกอบ A14 โพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนรายรอบ**

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในการพิจารณาโพเทนชิออมิเตอร์ในระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์จะต้อง พิจารณาให้ความต้านทานของโพเทนชิออมิเตอร์มีค่าต่ำที่สุด โดยไม่มีผลต่อความร้อนที่จะเกิดจากพลังงานของการสูญเสียความร้อนตามที่กล่าวมาแล้วอีกส่วนที่สำคัญคือการพิจารณาเลือกส่วนที่จะมาต่อกับโพเทนชิออมิเตอร์ ให้มีอิมพีแดนซ์ด้านเข้าสูงๆ เพื่อลดการโหลดกระแสจากตัวโพเทนชิออมิเตอร์เองดังนั้นในการวิจัยนี้จึงใช้ออปแอมป์ (Op-Amp) มาเป็นตัวเชื่อมต่อโพเทนชิออมิเตอร์กับส่วนอื่นๆ ซึ่งนอกจากออปแอมป์จะมีความต้านทานขาเข้าสูงแล้วเรายังนำออปแอมป์มาต่อเป็นวงจรที่ใช้สำหรับปรับแต่งสัญญาณที่ได้จากโพเทนชิออมิเตอร์ให้อยู่ในระดับที่ต้องการและมีอัตราขยายที่เหมาะสมด้วยได้ด้วย

## การติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่ง

เนื้อความในบทนี้จะได้กล่าวถึงแนวความคิดในการออกแบบระบบตรวจรู้ ตำแหน่งที่ใช้โพเทนชิออมิเตอร์เป็นตรวจรู้รวมทั้งส่วนเพิ่มเติม เพื่อช่วยในการทำงานของระบบตรวจรู้แบบนี้ซึ่งจะนำเสนอในลักษณะของแผนภาพแบบบล็อกแสดงโครงสร้างของระบบโดยรวม และในแต่ละส่วน รวมทั้งรายละเอียดเบื้องต้น

ในโครงงานนี้จะใช้ระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์วัดตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ในขณะปฏิบัติงาน โดยที่จะทำการติดตั้งตัวรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ไว้บริเวณข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ซึ่งปกติจะมีมากกว่า 1 ชุด ข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งกลับไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบอกตำแหน่งและสภาวะของแขนในขณะนั้นๆ และข้อมูลแต่ละจุดของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ (และตัวตรวจรู้สัมผัส) จะถูกส่งกลับไปยังคอมพิวเตอร์ในลักษณะของการมัลติเพลกซ์เพื่อลดจำนวนของสายและเพิ่มความสะดวกในการติดตั้งในขณะที่ข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจรู้ตำแหน่งจะถูกนำเข้า มามัลติเพลกซ์และทำการแปลงข้อมูลจากอนาลอกเป็นดิจิตอล

## การติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งเข้ากับแขนของหุ่นยนต์

ในการออกแบบเพื่อติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งเข้ากับแขนหุ่นยนต์นั้นสิ่งที่เกี่ยวข้องโดยตรงเลยก็คือ ข้อต่อ(Joint) ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะเน้นที่การติดตั้ง เพื่อทำการวัดตำแหน่งที่เปลี่ยนไปของบริเวณข้อต่อเป็นหลักและดังที่กล่าวมาแล้วนั้นเราสามรถแยกข้อต่อออกได้เป็นหลายแบบตามรูปร่างและลักษณะของการเคลื่อนที่ เพราะฉะนั้นการติดตั้งตัวตรวจรู้ก็จะมีความแตกต่างออกไปด้วยแต่อย่างไรก็ตามเราสามารถจำแนกข้อต่อออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ คือแบบหมุน (Rotation) และแบบเลื่อนแนวตรง (Linear) ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

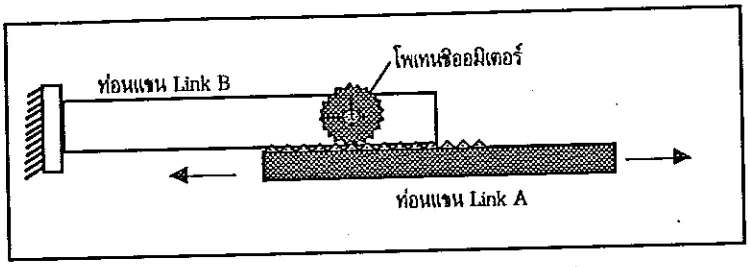
### 1. การติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งเข้ากับข้อต่อแบบเลื่อนแนวตรง

ในที่นี้เมื่อเราใช้โพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้ และเราพบว่าโพเทนชิออมิเตอร์แบ่งออกได้เป็นหลายประเภท ดังนั้นปัญหาของการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์ต่างประเภทก็มีปัญหาที่แตกต่างกันไป แต่อย่างไรก็ตามเราสามารถแยกโพเทนชิออมิเตอร์ออกได้เป็น 2 แบบหลักๆ คือแบบเลื่อน (Slide) และแบบหมุน (Rotation)

ถึงแม้ว่าโพเทนชิออมิเตอร์แบบเลื่อนแนวตรงจะดูว่ามีการเคลื่อนที่ เหมือนการเคลื่อนที่ของข้อต่อแบบเลื่อนแนวตรงที่กำลังพิจารณานี้อยู่แล้วแต่โพเทนชิออมิเตอร์แบบนี้ก็มีข้อจำกัดซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการติดตั้งกับแขนหุ่นยนต์คือ

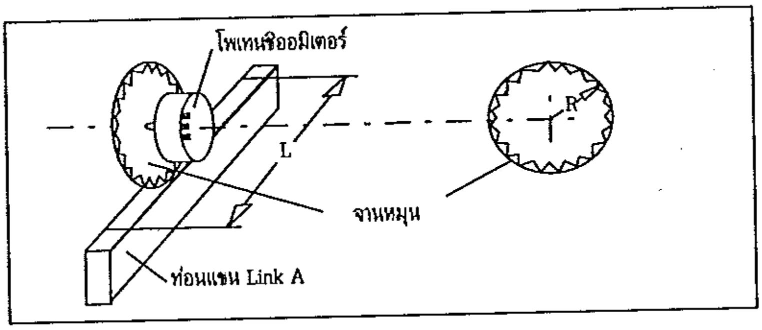
- ปกติโพเทนชิออมิเตอร์แบบนี้ที่มีขายในท้องตลาดจะมีความเที่ยงและสภาพเชิงเส้นต่ำทั้งนี้เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานโดยทั่วไปของโพเทนชิออมิเตอร์แบบเลื่อนแนวตรง มักจะใช้ในงานที่ไม่ต้องการความแม่นยำในการใช้งานมากนักเนื่องจากโดยสภาพการใช้งานแล้วก็จะเห็นได้ว่าการปรับแบบเลื่อนจะทำให้คนเราควบคุมตำแหน่งได้ยาก
- โดยทั่วไปโพเทนชิออมิเตอร์แบบนี้จะมีขนาดสั้นทำให้ไม่ยาวพอกับแขนหุ่นยนต์ ซึ่งปกติจะเลื่อนได้ในระยะทางที่มากกว่า ดังนั้นถ้าจะทำการติดตั้งก็ต้องออกแบบกลไกให้ทดความยาวของการเลื่อนของแขนกลให้ลดลงเพื่อให้อยู่ในขอบเขตการเคลื่อนที่ของ โพเทนชิออมิเตอร์แบบนี้ ซึ่งจะมีความยุ่งยากมาก

ดังนั้นจากการพิจารณาจะเห็นได้ว่าแม้จะเป็นแขนหุนยนต์ที่มีข้อต่อแบบเลื่อน ก็ยังมีความเหมาะสมมากกว่าถ้าจะใช้โพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุน ซึ่งตัวอย่างของการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนบนข้อต่อแบบเลื่อนเป็นดังภาพประกอบ A15




**ภาพประกอบ A15 แสดงการนำโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนมาติดตั้งกับข้อต่อแบบเลื่อนแนวตรง**

ภาพประกอบ A15 จะเป็นการแสดงการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนลงบนข้อต่อแบบเลื่อนแนวตรง ซึ่งจะมีความสะดวกในการติดตั้งมากโดยที่ตัวถังของโพเทนชิออมิเตอร์จะถูกยึดกับท่อนแขน LinkB ในส่วนของแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์จะมีจานหมุนติดอยู่ซึ่งส่วนริมของจานจะสัมผัสกับขอบของท่อนแขน LinkA ที่เลื่อนเข้า-ออกสัมพัทธ์กับท่อนแขน Link_B ในส่วนสัมผัสนี้อาจจะทำในลักษณะของเฟืองที่สัมผัสกันหรือทำในลักษณะของยางหนืดที่หน้าสัมผัส ดังนั้นจากรูปจะเห็นว่า เมื่อท่อนแขน LinkA เลื่อนเข้าออกก็จะทำให้แผ่นหมุนที่ยึดติดกับแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์หมุนไปด้วย ซึ่งระยะทางที่ท่อนแขน LinkA เคลื่อนที่ไปจะแปรผันกับมุมของการหมุนของแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานของขาเอาท์พุทของโพเทนชิออมิเตอร์หรือแรงดันเอาท์พุทของโพเทนชิออมิเตอร์เปลี่ยนตามไปด้วยไป




**ภาพประกอบ A16 แสดงลักษณะของโพเทนชิออมิเตอร์และท่อนแขน**

พิจารณาภาพประกอบ A16 จะเห็นได้ว่าถ้าท่อนแขน Link A สามารถเลื่อนที่ไปมาได้ในช่วงระยะทาง L และโพเทนชิออมิเตอร์มีมุมองศาในการหมุนอยู่ในช่วง $\theta$ องศาเรเดียน โดยที่จานหมุนที่ติดกับแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์มีรัศมี R ให้ ท่อนแขน Link B สัมผัสขอบของจานหมุนพอดี

จะได้ว่า $L = qR$ .......................................................................................(18)

หรือ $R = L/\theta$ .......................................................................................(19)

ในทางปฏิบัติ เพื่อที่จะป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการที่โพเทนชิออมิเตอร์ถูกหมุนเกินขอบเขตการทำงานอาจป้องกันได้หลายวิธี เช่นโดยการออกแบบให้แผ่นหมุนมีขนาดรัศมีมากกว่า *R* เล็กน้อย หรือการติดตั้งตำแหน่งของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ (Limitting Sensor) ให้อยู่ในตำแหน่งก่อนถึงจุดสิ้นสุดทั้งสองข้างของการเคลื่อนที่

ในบางกรณีถ้าต้องการลดขนาดของจานหมุนของตัวตรวจรู้ตำแหน่งลงก็สามารถทำได้ โดยการติดเฟืองเพื่อทดระยะทางลงก่อนซึ่งจะทำให้ลดขนาดจานหมุนลงได้แต่ก็อาจทำให้เกิดความผิดพลาดมากขึ้นได้ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความผิดพลาดสามารถทำให้ลดลงได้โดยการออกแบบเฟืองให้มีความละเอียดมากๆ และในกรณีนี้ก็สามารถทำได้ง่ายเนื่องจากเฟืองที่ใช้ไม่ต้องการความแข็งแรงมากนักเพราะใช้หมุนตัวตรวจรู้เท่านั้นไม่เหมือนกับเฟืองที่ใช้ ในระบบส่งกำลัง

สำหรับโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนหลายรอบ (Multiturn Potetiometer) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความแม่นยำ และความเป็นเชิงเส้นดีกว่าแบบหมุนรอบเดียว ดังนั้นในกรณีนี้เราสามารถคำนวนหารัศมีจานหมุน (R) ที่ใช้ติดกับแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ได้โดย

ให้ L เป็นระยะทางที่ท่อนแขน Link A สามารถเลื่อนไปมาได้ และโพเทนชิออมิเตอร์ หมุนได้สูงสุด N รอบ ดังนั้น

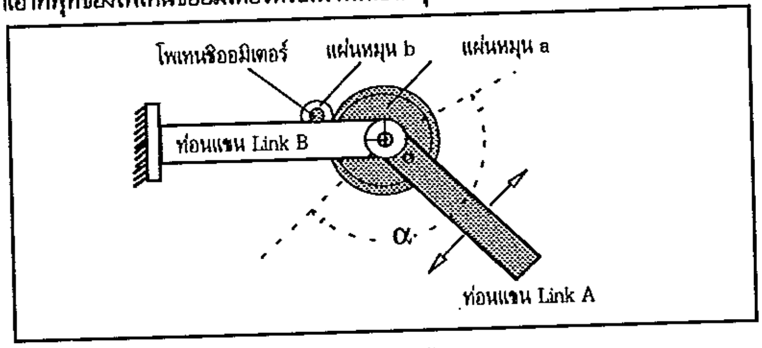
จะได้ว่า $L = 2\pi NR$ ......(20)

หรือ $R = L/(2\pi N)$ ......(21)

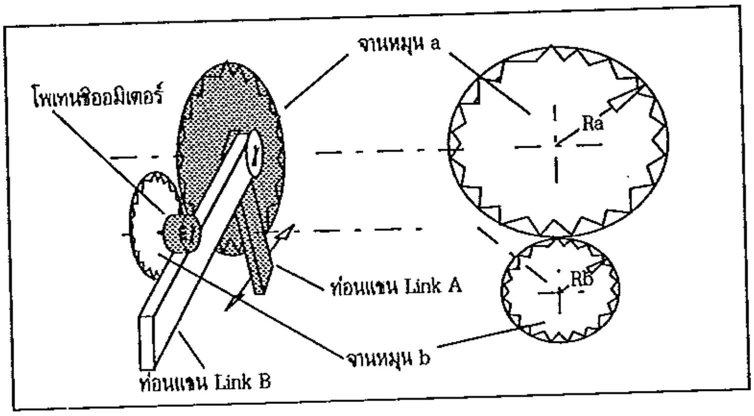
2. **การติดตั้งตัวตรวจรู้ตำแหน่งกับข้อต่อแบบหมุน (Rotation Joint)**

ในที่นี้จะพิจารณาการใช้โพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนในการติดตั้งเป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ เนื่องจากมีความเหมาะสมกว่าดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะเสนอแนวความคิดแบบหนึ่งของการนำโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนมาติดตั้งบนข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบหมุน

ภาพประกอบ A16 จะเป็นการแสดงการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์ลงบนข้อต่อแบบหมุนโดยที่ตัวถังของโพเทนชิออมิเตอร์จะถูกยึดกับท่อนแขน Link B ในส่วนของแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์จะมีจานหมุน b ติดอยู่ซึ่งส่วนริมของจานจะสัมผัสกับขอบของจานหมุน a ซึ่งยึดติดท่อนแขน Link B โดยที่ให้จุดศูนย์กลางของจานหมุน a อยู่ตรงกับจุดหมุนของข้อต่อนี้ ซึ่งเมื่อท่อนแขน Link A หมุนกวาดไปมาสัมพัทธ์กับท่อนแขน Link B ก็จะส่งผลให้แกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์หมุนตามไปด้วยในส่วนสัมผัสนี้อาจจะทำในลักษณะของเฟืองที่สัมผัสกัน หรือทำในลักษณะของยางที่หน้าสัมผัสดังนั้นจากรูปมุมที่ท่อนแขน Link A เคลื่อนที่ไปจะแปรผันโดยตรงกับมุมของการหมุนของแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ ซึ่งส่งผลให้ความต้านทานของขาเอาท์พุทของโพเทนชิออมิเตอร์หรือแรงดันเอาท์พุทของโพเทนชิออมิเตอร์เปลี่ยนไป




**ภาพประกอบ A17 แสดงการนำโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนมาติดตั้งกับข้อต่อแบบหมุน**




**ภาพประกอบ A18 แสดงลักษณะของโพเทนชิออมิเตอร์และท่อนแขน**

พิจารณาภาพประกอบ A18 จะเห็นได้ว่าถ้าท่อนแขน Link A สามารถหมุนไปมาได้ในช่วงมุม $\alpha$ องศาเรเดียน และโพเทนชิออมิเตอร์มีมุมในการหมุนอยู่ในช่วง $\theta$ องศาเรเดียน โดยที่จานหมุนที่ติดกับแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ (จานหมุน b) มีรัศมี Rb และจานหมุนที่ยึดติดกับแกนหมุนของท่อนแขน Link A (จานหมุน a) มีรัศมี Ra โดยที่ให้ขอบของจาน หมุนทั้งสองสัมผัสกันพอดี

จะได้ว่า $\alpha Ra = \theta Rb$ ........................................................................(22)

หรือ $Rb = \alpha Ra/\theta$ ........................................................................(23)

ซึ่งก็เช่นเดียวกันในทางปฏิบัติ เพื่อที่จะป้องกันความเสียหายที่เกิดจากการถูกหมุนเกินขอบเขตการทำงาน อาจป้องกันได้โดยการออกแบบให้แผ่นหมุนมีขนาดรัศมีมากกว่า R เล็กน้อยหรือการติดตั้งตำแหน่งของตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ (Limitting Sensor) ให้อยู่ในตำแหน่งก่อนถึงมุมสิ้นสุดทั้งสองข้างของการเคลื่อนที่

ในกรณีที่ใช้โพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนหลายรอบมาเป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่งเราสามารถคำนวนหารัศมีจานหมุน b (Rb) ที่ใช้ติดกับแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ได้ดังนี้

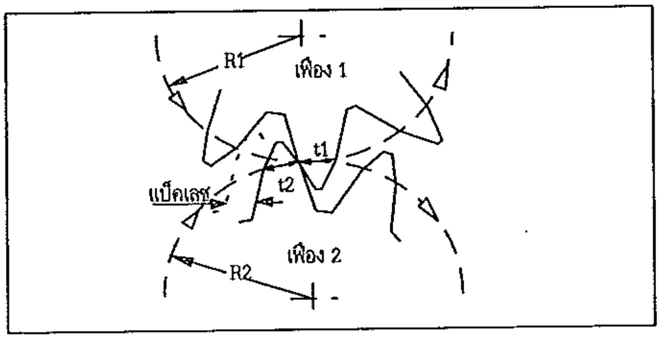
ถ้าให้ท่อนแขน Link A สามารถหมุนไปมาได้ในช่วงมุม $\alpha$ องศาเรเดียน และโพเทนชิออมิเตอร์หมุนได้สูงสุด N รอบ โดยที่จานหมุนที่ยึดถูกติดกับท่อนแขน Link A (จานหมุน a) มีรัศมี Ra cm และจานหมุนที่ติดกับโพเทนชิออมิเตอร์ (จานหมุน b) มีรัศมี Rb cm

จะได้ว่า $\alpha Ra = 2\pi NRb$ ........................................................................(24)

หรือ $Rb = \alpha Ra/2\pi N$ ........................................................................(25)

ในทางปฏิบัติถ้าต้องการให้มีขนาดใหญ่กว่านี้ก็สามารถทำได้ โดยการเพิ่มขนาดรัศมีจานหมุน a หรือในอีกกรณีหนึ่งโดยการใช้งานโพเทนชิออมิเตอร์ไม่เต็ม 10 รอบ ซึ่งก็ อาจจะส่งผลให้ความแม่นยำของระบบลดลงไปบ้างแต่เมื่อเทียบกับโพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนรอบเดียวที่มีขาย โดยทั่วไปก็ยังจัดว่าสูงกว่าอยู่สำหรับความเสียหายที่เกิดจากการที่โพเทนชิออมิเตอร์ถูกหมุนเกินขอบเขตการทำงาน ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกับกรณีใช้โพเทนชิออมิเตอร์แบบหมุนรอบเดียว

ที่กล่าวมานั้นเป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งของการนำโพเทนชิออมิเตอร์มาติดตั้งบนข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ้าไม่นับความผิดพลาดในตัวโพเทนชิออมิเตอร์เองแล้วความผิดพลาดในจุดนี้ โดยส่วนใหญ่จะเกิดจากระบบกลไกที่ใช้มาทำเป็นตัวถ่ายทอดตำแหน่งจากท่อนแขนไปยังโพเทนชิออมิเตอร์ ซึ่งถ้าใช้ระบบเฟืองก็พิจารณาเลือกใช้ชุดเฟืองที่มีความผิดพลาดน้อยซึ่งโดยทั่วไปแล้วความผิดพลาดในระบบเฟืองมักจะเกิดจากแบ็คแลช (Backlash) ของระบบเฟืองซึ่งหมายถึงระยะที่ช่องว่างระหว่างฟันของเฟืองหนึ่งมีความหนามากกว่าความหนาของฟันของเฟืองอีกตัวหนึ่ง (ควรจะมีค่าเป็นศูนย์)




**ภาพประกอบ A19 แสดงแบ็คเลชในระบบเฟือง**

การเกิดแบ็คเลชนี้ไม่มีผลต่ออัตราเร็วเชิงมุมของเฟือง หรือจะไม่ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการส่งผ่านตราบใดที่เฟืองทั้งสองยังคงขบกันอยู่แต่ถ้ามีการเปลี่ยนทิศการหมุนของเฟืองตัวขับ เช่น เดิมหมุนทวนเข็มนาฬิกาเปลี่ยนเป็นหมุนตามเข็มนาฬิกาจะมีช่วงระยะเวลาหนึ่งหรือจุดหนึ่งที่เฟืองตัวตามจะไม่หมุน เนื่องจากช่วงนั้นตัวขับจะเคลื่อนที่ผ่านระยะแบ็คเลช

ในกรณีที่ระยะแบ็คเลชมีค่ามากหรือมีผลต่อข้อมูล การแก้ไขอย่างพื้นฐานสามารถทำได้โดยมีการชดเชยระยะแบ็คเลสเมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ทุกครั้งซึ่งระยะแบคเล็ชสามารถหาได้โดยการทดลองก่อนนำไปใช้งาน

ในกรณีที่เราสามรถออกแบบเฟืองขึ้นเองได้ เราสามารถลดระยะแบ็คเล็ชได้โดยการพิจารณาสมการต่อไปนี้

$$t1 + t2 + B = 2\pi R1/N1 = 2\pi R2/N2 \quad \text{.................(26)}$$

โดยที่

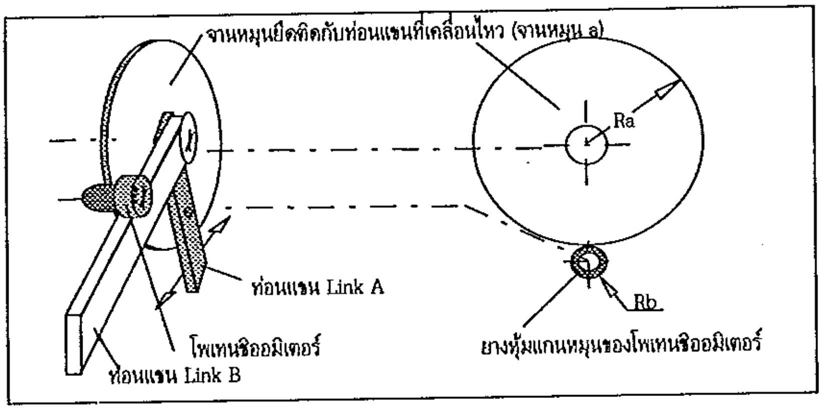
t ความหนาของฟันบนวงกลม พิทช์ ที่ใช้งาน

B คือ แบ็คเลช

R รัศมีของวงกลม พิทช์ ที่ใช้งาน

N จำนวนฟันของเฟือง

พิจารณาจากสมการที่ (26) จะเห็นได้ว่าแบ็คเลช (B) ที่ต้องการคือให้ได้ค่าน้อยที่สุด ซึ่งเราสามรถลดลงได้โดยการลดรัศมีของเฟือง, ความหนาของฟันเฟือง, และเพิ่มจำนวนฟันของเฟืองที่ใช้ซึ่งจะเห็นได้ว่าในทางปฏิบัติ เราอาจจะไม่สามารถลดขนาดของรัศมีของเฟืองได้เนื่องจากเป็นข้อจำกัดที่ได้จากการคำนวนในการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ ดังนั้นเราจึงเลี่ยงไปใช้การออกแบบเฟืองที่มีจำนวนเฟืองมากๆและมีความหนาของเฟืองน้อยๆแทน (ซึ่งจะส่งผลถึงกันอยู่แล้ว) หรือการเลือกใช้เฟืองที่มีความละเอียดของฟันเฟืองมากๆนั้นเอง แต่การที่ใช้เฟืองที่ฟันมีขนาดเล็กก็อาจจะมีปัญหาเรื่องความแข็งแรงได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากการใช้งานแล้วจะเห็นว่าสามารถลดความเข้มงวดการพิจารณาในจุดนี้ลงไปได้เนื่องจากตัวตรวจรู้ไม่สร้างภาระให้กับระบบเฟืองมากนัก




**ภาพประกอบ A20 แสดงลักษณะการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์โดยใช้ยางหุ้มแกนโพเทนชิออมิเตอร์**

อีกแบบหนึ่งของการออกแบบระบบกลไก ที่ใช้มาทำหน้าที่ตัวถ่ายทอดตำแหน่งจากท่อนแขนไปยังโพเทนชิออมิเตอร์ คือการใช้ยางหุ้มรอบแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ในขณะที่ส่วนจานหมุนของท่อนแขนทำเป็นแผ่นแข็งไว้ดังภาพประกอบ A20

โดยการติดตั้งโพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้ตำแหน่งแบบนี้ผลที่เกิดขึ้นก็คือเมื่อจานหมุน a หมุนไปก็จะดันให้ยางที่หุ้มอยู่รอบๆแกนหมุนของโพเทนชิออมิเตอร์ทำให้แกนนี้หมุนตามไปด้วย ซึ่งส่งผลให้สามารถทราบระยะทางหรือมุมที่ท่อนแขน a เปลี่ยนไป ข้อดีของระบบนี้ก็คือง่ายต่อการออกแบบและติดตั้งแต่ก็มีความผิดพลาดที่อาจจะเป็นไปได้คือ การที่ใช้ยางทำให้รัศมีของจานหมุน b ไม่แน่นอน ซึ่งส่งผลให้ค่าที่ได้ผิดพลาดไปได้และในกรณีที่มีแรงเสียดทานภายในชิ้นส่วน

เคลื่อนไหวของโพเทนชิออมิเตอร์เมื่อจานหมุน a หมุน ไปยางสามารถให้ตัวได้เล็กน้อยซึ่งทำให้ความผิดพลาดคล้ายกรณีแบ็คเล็ชของระบบเฟือง

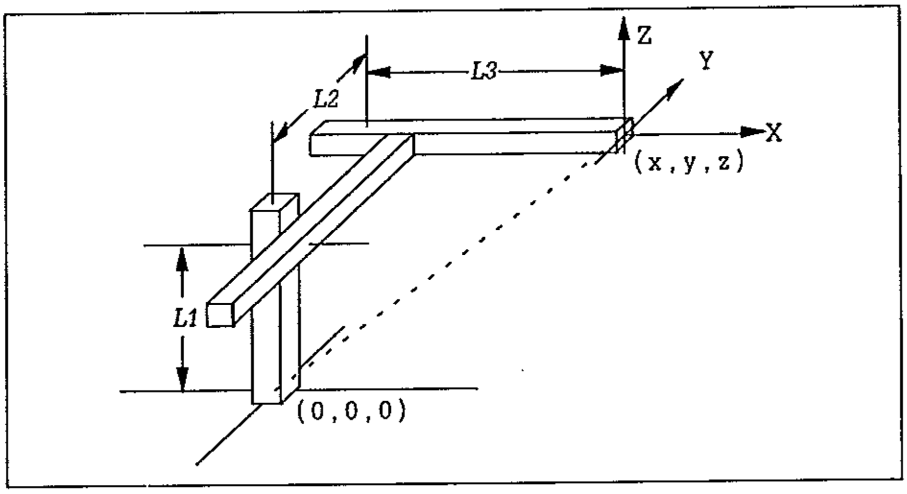
การลดความผิดพลาดที่เกิดจากกรณีดังกล่าวมาแล้วสามารถทำได้ โดยการยึดตัวโพเทนชิออมิเตอร์อย่างมั่นคงในตำแหน่งที่แน่นอนก็จะช่วยลดเรื่องรัศมี Rb ให้ผิดพลาดน้อยลงได้และการออกแบบให้ความหนาของขอบยางน้อยก็ช่วยลดการให้ตัวของยาง ซึ่งเป็นอีกสาเหตุหนึ่งของความผิดพลาดได้เช่นกัน

นอกจากนี้ยังอาจติดตั้งโดยใช้ระบบสายพานซึ่งอาจเป็นสายพานก็ได้ซึ่งแต่ละแบบก็จะมีความผิดพลาดแตกต่างกันไป

## การคำนวนตำแหน่งของจุดทำงานในแขนหุ่นยนต์แบบต่างๆ

ปกติการทำงานของแขนหุ่นยนต์จะสมบูรณ์เมื่อจุดทำงานของแขนหุ่นยนต์เข้าถึงเป้าหมาย และปฏิบัติภาระกิจจนเสร็จสิ้นตามโปรแกรมหรือเงื่อนไขที่กำหนดตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่าแขนหุ่นยนต์พื้นฐานที่มีข้อต่อ 3 ข้อต่อแบบต่างๆ มีพื้นที่ในการทำงานในระนาบ 3 มิติที่ไม่เหมือนกันขึ้นอยู่กับรูปแบบ, ความยาวของแขน และชนิดของข้อต่อดังนั้นในทางปฏิบัติเมื่อเราต้องการทราบตำแหน่งของปลายแขนของแขนหุ่นยนต์หรือจุดทำงานว่าอยู่ที่ใด จึงต้องมีการคำนวนจากข้อมูลของมุมของข้อต่อแบบหมุน, ระยะทางของข้อต่อแบบเลื่อนแนวตรงและความยาวของท่อนแขน ในที่นี้จะพูดถึงการนำข้อมูลต่างๆที่กล่าวมาของแขนหุ่นยนต์แบบพื้นฐานมาคำนวนเพื่อทราบตำแหน่งของปลายแขนหรือจุดทำงานของหุ่นยนต์ในระนาบ 3 มิติ ซึ่งประกอบด้วยแขนแบบต่างๆ ดังนี้

1. ***Cartesian Robot*** การคำนวนในแขนหุ่นยนต์แบบนี้ค่อนข้างง่ายเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแขนเป็นไปในระนาบแกน X, Y, Z อยู่แล้ว พิจารณาดังภาพประกอบ A21




**ภาพประกอบ A21 แสดงการพิจารณาตำแหน่งจุดทำงานของ Cartesian Robot**

จากภาพประกอบ A21 ให้จุดกึ่งกลางฐานของแขนหุ่นยนต์เป็นจุด ( 0 , 0 , 0 ) ในระนาบ (X,Y,Z) ดังภาพ และจุดทำงานของแขนหุ่นยนต์ในขณะนี้อยู่ที่ (x,y,z) และให้ในแขนหุ่นยนต์นี้มีตัวตรวจรู้ตำแหน่งที่ทราบระยะทางที่ท่อนแขนท่อนต่างๆ เลื่อนไปดังในภาพคือ

L1 : ระยะทางของท่อนแขนท่อนที่ 1 เมื่อเทียบกับจุด (0,0,0)

L2 : ระยะทางจากของท่อนแขนท่อนที่ 2 เทียบจากจุดกึ่งกลางของท่อนแขนท่อน ที่ 1 ถึงจุดกึ่งกลางของท่อนแขนท่อนที่ 3

L3 : ระยะทางจากของท่อนแขนท่อนที่ 3 เทียบจากจุดกึ่งกลางของท่อนแขนท่อนที่ 2 ถึงจุดทำงาน

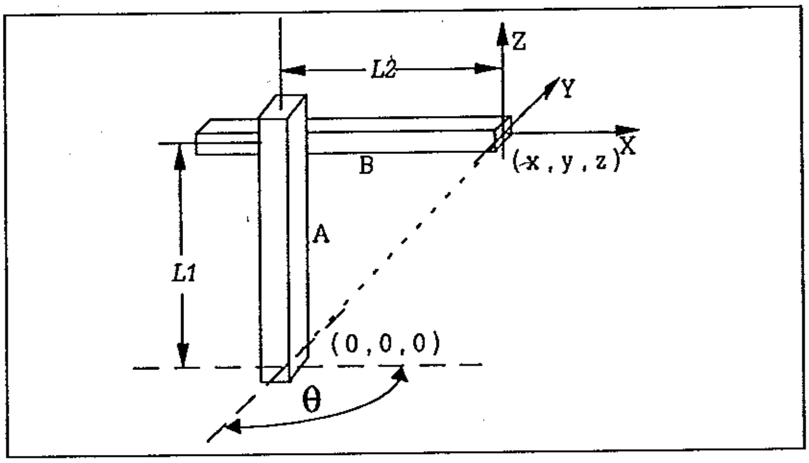
เรา สามารถหาตำแหน่งของจุดทำงาน (x,y,z) ให้อยู่ในรูปของ L1, L2 L3 ได้ดังนี้

x = L1

y = L2

z = L3

2. ***Cylindrical Robot*** การคำนวนหาตำแหน่งจุดทำงานในแขนหุ่นยนต์แบบนี้เป็นการพิจารณาตัวแปร 3 ตัว คือ มุมที่ฐานหมุนเบี่ยงไปจากจุดอ้างอิง, ตำแหน่งที่ท่อนแขนท่อน B เลื่อนขึ้นสูงจากฐาน และระยะทางที่จุดทำงานห่างจากจุดกึ่งกลางของท่อนแขน A ดังภาพ ที่ A22




**ภาพประกอบ A22 แสดงการพิจารณาตำแหน่งจุดทำงานของ Cylindrical Robot**

จากภาพประกอบ A22 ให้ จุดกึ่งกลางฐานของแขนหุ่นยนต์เป็นจุด (0,0,0) ในระนาบ (X,Y,Z) ดังภาพ และจุดทำงานของแขนหุ่นยนตในขณะนี้อยู่ที่ (x,y,z) และในแขนหุ่นยนต์นี้ไม่พิจารณาความกว้างของท่อนแขนโดยที่มีการติดตั้งตัวตรวจรู้ซึ่งทำให้ได้ค่าที่ตำแหน่งดังนี้

$\theta$ : มุมที่แนวท่อนแขน B ทำกับแนวแกน Y ดังในรูป

L1 : ระยะทางของท่อนแขน B ที่เลื่อนสูงจากฐาน ( จุด (0,0,0) )

L2 : ระยะทางจากจุดกึ่งกลางของท่อนแขน A ถึงจุดทำงาน

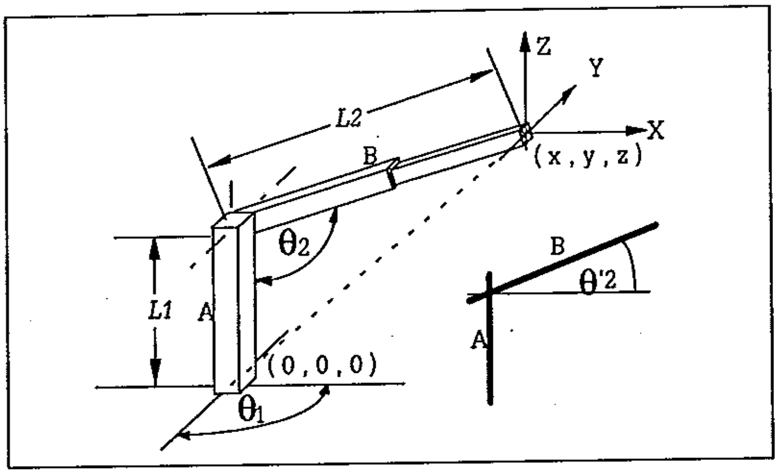
เรา สามารถหาตำแหน่งของจุดทำงาน (x,y,z) ให้อยู่ในรูปของ L1, L2 L3 ได้ดังนี้

$x = L2 \sin \theta$

$y = L2 \cos \theta$

$z = L1$

3. ***Sphereical Robot*** การคำนวนหาตำแหน่งจุดทำงานในแขนหุ่นยนต์แบบนี้เป็นการพิจารณาตัวแปร 3 ตัว คือ มุมที่ฐานหมุนเบี่ยงไปจากจุดอ้างอิง, มุมที่ท่อนแขนสองท่อน (A และ B) กระทำต่อกันและระยะทางที่จุดทำงานห่างจากจุดหมุนของท่อนแขนทั้งสองท่อน (เกิดจากการยืดตัวของท่อนแขน B ) ดังภาพประกอบ A23




**ภาพประกอบ A23 แสดงการพิจารณาตำแหน่งจุดทำงานของ Spherical Robot**

จากภาพประกอบ A23 ให้จุดกึ่งกลางฐานของแขนหุ่นยนต์เป็นจุด (0,0,0) ในระนาบ (X,Y,Z) ดังภาพและจุดทำงานของแขนหุ่นยนต์ในขณะนี้อยู่ที่ (x,y,z) ในที่นี้ไม่พิจารณาความกว้างของท่อนแขนโดยที่มีการติดตั้งตัวตรวจรู้ซึ่งทำให้ได้ค่าที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

$\theta_1$ : มุมที่แนวท่อนแขน A ทำกับฐาน

$\theta_2$ : มุมที่แนวท่อนแขน B ทำกับท่อนแขน A

$\theta'_2$ : มุมที่แนวท่อนแขน B ทำกับแนวแกน X

L2 : ความยาวของท่อนแขน B ซึ่งสามารถยืดหดได้ในแนวแกน

L1 : ความยาวของท่อนแขน A ที่สูงจากฐาน ( คงที่ )

เรา สามารถหาตำแหน่งของจุดทำงาน (x,y,z) ให้อยู่ในรูปของ L1, L2 L3 ได้ดังนี้

$$x = L2 \sin\theta'_2 \sin\theta_1$$

$$y = L2 \cos\theta'_2 \cos\theta_1$$

$$z = L1 + L2 \sin\theta'_2$$

$$\theta'_2 = \theta_2 - \tau/2$$

4. ***SCARA Robot*** (Selective Compliance Assembly Robot Arm) การคำนวนหาตำแหน่งจุดทำงานในแขนหุ่นยนต์แบบนี้จะเป็นการพิจารณาตัวแปร 3 ตัว คือมุมที่ฐาน (หรือท่อนแขนท่อนที่ 1) หมุนเบี่ยงไปจากจุดอ้างอิง, มุมที่ท่อนแขนท่อนที่ 2 (B)
กระทำต่อฐานในทิศทางของการหมุนกวาดขนานกับพื้นและระยะทางที่จุดทำงานห่างจากท่อนแขน B ซึ่งเกิดจากการเลื่อนตัวของท่อนแขน C ตั้งฉากกับท่อนแขน B ดังภาพประกอบ A24

จากภาพประกอบ A24 ให้จุดกึ่งกลางฐานของแขนหุ่นยนต์เป็นจุด (0,0,0) ในระนาบ (X,Y,Z) ดังภาพและจุดทำงานของแขนหุ่นยนต์ในขณะนี้อยู่ที่ (x,y,z) ในที่นี้ไม่พิจารณาความกว้างของท่อนแขน โดยที่มีการติดตั้งตัวตรวจรู้ซึ่งทำให้ได้ค่าที่ตำแหน่งต่างๆ ดังนี้

$\theta_1$ : มุมที่แนวท่อนแขน A ทำกับฐานอ้างอิงกับแกน Y

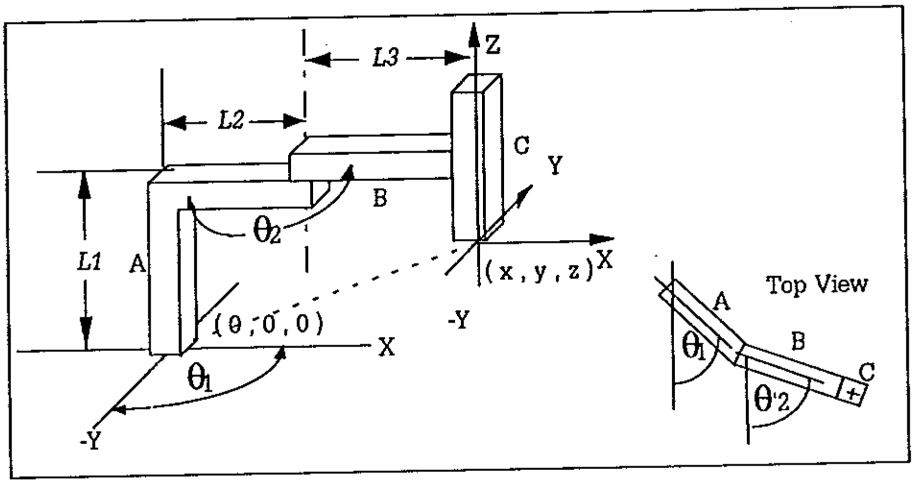
$\theta_2$ : มุมที่แนวท่อนแขน B ทำกับท่อนแขน A

L4 : ความยาวของ ท่อนแขน C จากจุดต่อกับท่อนแขน B กับจุดทำงาน

L1 : ความสูงของ ท่อนแขน A จากฐานถึงระดับท่อน แขน B (คงที่)

L2 : ความยาวของท่อนแขน A จากจุดกึ่งกลางฐานถึงจุดหมุนท่อนแขน B (คงที่)

L3 : ความยาวของท่อนแขน B (คงที่)




**ภาพประกอบ A24 แสดงการพิจารณาตำแหน่งจุดทำงานของ SCARA Robot**

เรา สามารถหาตำแหน่งของจุดทำงาน (x,y,z) ให้อยู่ในรูปของ $\theta_1$, $\theta_2$, L4 ได้ดังนี้

$$x = L3 \cos \theta'_2 + L2 \cos \theta_1$$

$$y = L3 \cos \theta'_2 + L3 \sin \theta_1$$

$$z = L1 - L4$$

$$\theta'_2 = \theta_2 + \theta_1$$

5. ***Artriculate Robot*** การคำนวนหาตำแหน่งจุดทำงานในแขนหุ่นยนต์แบบนี้เป็นการพิจารณาตัวแปร 3 ตัว คือ มุมที่ฐานหมุนเบี่ยงไปจากจุดอ้างอิง, มุมที่ท่อนแขน B กระทำ ต่อท่อนแขน A และมุมที่ท่อนแขน C กระทำต่อท่อนแขน B ซึ่งความยาวของท่อนแขนใน แขนหุ่นยนต์ชนิดนี้จะคงที่ ดังภาพประกอบ A25

จากภาพประกอบ A25 ให้จุดกึ่งกลางฐานของแขนหุ่นยนต์เป็นจุด (0,0,0) ในระนาบ (X,Y,Z) ดังภาพ และจุดทำงานของแขนหุ่นยนต์ในขณะนี้อยู่ที่ (x,y,z) ในที่นี้ไม่พิจารณาความกว้างของท่อนแขนโดยที่มีการติดตั้งตัวตรวจรู้ซึ่งทำให้ได้ค่าที่ตำแหน่งต่างๆดังนี้

$\theta_1$ : มุมที่ฐานหมุนเบี่ยงไปจากจุดอ้างอิง

$\theta_2$ : มุมที่แนวท่อนแขน B ทำกับท่อนแขน A

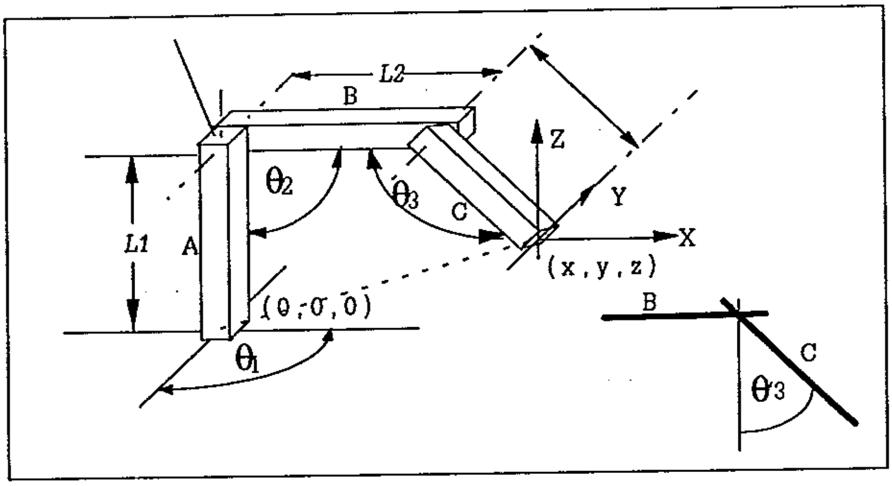
$\theta_3$ : มุมที่แนวท่อนแขน C ทำกับแนวท่อนแขน B

$\theta'_3$ : มุมที่แนวท่อนแขน C ทำกับแนวแกน Z

L1 : ความยาวของท่อนแขน A

L2 : ความยาวของท่อนแขน B

L3 : ความยาวของท่อนแขน C




**ภาพประกอบ A25 แสดงการพิจารณาตำแหน่งจุดทำงานของ Artriculate Robot**

เรา สามารถหาตำแหน่งของจุดทำงาน (x,y,z) ให้อยู่ในรูปของ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ได้ดังนี้

$$x = (L2 \cos\theta_2 + L3\cos\theta'_3)\cos\theta_1$$

$$y = (L2 \cos\theta_2 + L3\cos\theta'_3)\sin\theta_1$$

$$z = L1 + L2 \sin\theta_2 + L3\sin\theta'_3$$

$$\theta'_3 = (\theta_2 + \theta_2) - 2\tau$$

## ภาคผนวก ช

## ผลการทดสอบของงานวิจัย

## ตารางผลการทดสอบ

## ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ

### 1. การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ @ B1k

TYPE : Single Turn Carbon Film Resistive Element

RESISTANCE RANGE : 0-1k Ohm

MAXIMUM OF MOVEMENT : $300^{o}$

INSTRUMENT: MULTIMITER : Digital Multimeter Gold Star DM-8243

: ANGLE :Angle Plate Concise 18 cm

ROOM TEMPERATURE : 29 $^{o}$ C

METHODE : Measure 30 step of $10^{o}$

**ตารางที่ B1 ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบ @ 1k**

| Angle (°) | R (Ω) | R' (Ω) | Error1 lR-R'l | \| | R* 40-260 (Linear Range) | Error2 lR*-Rl |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.4 | 0.0 | 0.4 | \| | | |
| 10 | 0.6 | 29.8 | 29.2 | \| | | |
| 20 | 1.2 | 59.6 | 58.4 | \| | | |
| 30 | 19.7 | 89.4 | 69.7 | \| | | |
| 40 | 48.2 | 119.2 | 71.0 | \| | 48.2 | 0.0 |
| 50 | 86.4 | 149.0 | 62.6 | \| | 86.0 | 0.3 |
| 60 | 123.6 | 178.8 | 55.2 | \| | 123.8 | 0.2 |
| 70 | 160.6 | 208.6 | 48.0 | \| | 161.6 | 1.0 |
| 80 | 200.4 | 238.4 | 38.0 | \| | 199.4 | 0.9 |
| 90 | 238.4 | 268.2 | 29.8 | \| | 237.2 | 1.1 |
| 100 | 277.6 | 298.0 | 20.4 | \| | 275.0 | 2.5 |
| 110 | 314.0 | 327.8 | 13.8 | \| | 312.8 | 1.1 |
| 120 | 352.0 | 357.6 | 5.6 | \| | 350.6 | 1.3 |
| 130 | 390.0 | 387.4 | 2.6 | \| | 388.4 | 1.5 |
| 140 | 426.8 | 417.2 | 9.6 | \| | 426.2 | 0.5 |
| 150 | 461.3 | 447.1 | 14.2 | \| | 464.1 | 2.8 |
| 160 | 501.8 | 476.9 | 24.9 | \| | 501.9 | 0.1 |
| 170 | 535.0 | 506.7 | 28.3 | \| | 539.7 | 4.7 |

ตารางที่ B1 (ต่อ)

| Angle (°) | R (Ω) | R' (Ω) | Error1 \|R-R'\| | R* 40-260 (Linear Range) | Error2 \|R*-R\| (Linear Range) |
|---|---|---|---|---|---|
| 180 | 572.1 | 536.5 | 35.6 | 577.5 | 5.4 |
| 190 | 611.0 | 566.3 | 44.7 | 615.3 | 4.3 |
| 200 | 650.0 | 596.1 | 53.9 | 653.1 | 3.1 |
| 210 | 691.7 | 625.9 | 65.8 | 690.9 | 0.7 |
| 220 | 731.0 | 655.7 | 75.3 | 728.7 | 2.2 |
| 230 | 768.8 | 685.5 | 83.3 | 766.5 | 2.2 |
| 240 | 809.8 | 715.3 | 94.5 | 804.3 | 5.4 |
| 250 | 842.5 | 745.1 | 97.4 | 842.1 | 0.3 |
| 260 | 880.0 | 774.9 | 105.1 | 880.0 | 0.0 |
| 270 | 890.5 | 804.7 | 85.8 | | |
| 280 | 894.1 | 834.5 | 59.6 | | |
| 290 | 894.1 | 864.3 | 29.8 | | |
| 300 | 894.1 | 894.1 | 0.00 | | |

R Data From Experiment (@ B1k)

R' from Calculating (Ideal)

R* Ideal Case in Linear Range (40-260°):

Error1 Error of All angle

Max Error1 : 105.1 Ω

Full Scale Value : 1000 Ω

Accuray of all Range : ± 10.5% FSO

Error2 Error when use on Range 40-260°

Max Error2 : 5.4 Ω

Full Scale Value : 1000 Ω

Accuray of Linear range : ± 0.5 %FSO

**2. การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 3590s-1-102**

TYPE : Multiturn Wirewound

RESISTANCE RANGE : 0-1k Ohm

MAXIMUM OF MOVEMENT : 10 round (360x10 °)

INSTRUMENT : MULTIMETER :Digital Multimeter Gold Star DM-8243

: ANGLE :Angle Plate Conoise 18 cm

ROOM TEMPERATURE : 29 ° C

METHODE : Measure 40 step of 90° (3600°)

**ตารางที่ B2 ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 3590s-1-102**

| Angle (°) | R (Ω) | R' (Ω) | Error \| R-R'\| | Angle (°) | R (Ω) | R' (Ω) | Error \| R-R'\| |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1890 | 523.1 | 523.7 | 0.6 |
| 90 | 24.5 | 24.9 | 0.4 | 1980 | 548.2 | 548.6 | 0.4 |
| 180 | 49.3 | 49.9 | 0.6 | 2070 | 573.6 | 573.6 | 0.0 |
| 270 | 74.4 | 74.8 | 0.4 | 2160 | 598.1 | 598.5 | 0.4 |
| 360 | 99.0 | 99.8 | 0.8 | 2250 | 623.2 | 623.4 | 0.2 |
| 450 | 123.9 | 124.7 | 0.8 | 2340 | 648.2 | 648.4 | 0.2 |
| 540 | 149.0 | 149.6 | 0.6 | 2430 | 673.9 | 673.3 | 0.6 |
| 630 | 174.0 | 174.6 | 0.6 | 2520 | 698.3 | 698.3 | 0.0 |
| 720 | 198.5 | 199.5 | 1.0 | 2610 | 723.1 | 723.2 | 0.1 |
| 810 | 223.7 | 224.4 | 0.7 | 2700 | 748.3 | 748.1 | 0.2 |
| 900 | 248.4 | 249.4 | 1.0 | 2790 | 773.3 | 773.1 | 0.2 |
| 990 | 273.8 | 274.3 | 0.5 | 2880 | 798.2 | 798.0 | 0.2 |
| 1080 | 298.6 | 299.3 | 0.7 | 2970 | 823.0 | 822.9 | 0.0 |
| 1170 | 323.4 | 324.2 | 0.8 | 3060 | 848.1 | 847.9 | 0.2 |
| 1260 | 348.7 | 349.1 | 0.4 | 3150 | 873.4 | 872.8 | 0.6 |
| 1350 | 373.7 | 374.1 | 0.3 | 3240 | 898.3 | 897.8 | 0.5 |
| 1440 | 398.2 | 399.0 | 0.8 | 3330 | 923.0 | 922.7 | 0.3 |
| 1530 | 423.2 | 423.9 | 0.7 | 3420 | 948.0 | 947.6 | 0.4 |
| 1620 | 448.0 | 448.9 | 0.9 | 3510 | 973.5 | 972.6 | 0.8 |
| 1710 | 473.5 | 473.8 | 0.3 | 3600 | 998.2 | 997.5 | 0.7 |
| 1800 | 498.4 | 498.8 | 0.4 | 3609 | 1000.0 | 1000.0 | 0.0 |

R Data From Experiment (Bourns 3590s-1-102)

R' Ideal Voltage (Angle 0-3609 -> Volt 0-10 V.)

Error Error of Potentiometer (R and R')

Max Error2 : 0.8 Ω

Full Scale Resistance 1000 Ω

Accuray of Potentiometer : 0.08 %FSO

### 3. การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Alps 5k Ohm

TYPE : Slide (Linear potentiometer) Carbon Resistive Element

MAXIMUM OF MOVEMENT : 45.0 mm  ROOM TEMPERATURE : 29 °C

INSTRUMENT: MULTIMETER :Digital Multimeter Gold Star DM-8243

: LENGTH : Vernier Caliper > Whale Brand 0-150mm

**ตารางที่ B3 ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Alps 5k Ohm**

| Length (mm) | R (kΩ) | R' (kΩ) | Error1 (R-R') | R" (kΩ) | Error2 (R"-R) |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.005 | 0.000 | 0.005 | | |
| 2 | 0.038 | 0.217 | 0.179 | 0.038 | 0.000 |
| 4 | 0.263 | 0.435 | 0.172 | 0.267 | 0.004 |
| 6 | 0.493 | 0.652 | 0.159 | 0.497 | 0.004 |
| 8 | 0.712 | 0.870 | 0.158 | 0.726 | 0.014 |
| 10 | 0.947 | 1.087 | 0.140 | 0.956 | 0.009 |
| 12 | 1.187 | 1.304 | 0.117 | 1.185 | 0.002 |
| 14 | 1.406 | 1.522 | 0.116 | 1.414 | 0.008 |
| 16 | 1.641 | 1.739 | 0.098 | 1.644 | 0.003 |
| 18 | 1.867 | 1.957 | 0.090 | 1.873 | 0.006 |
| 20 | 2.094 | 2.174 | 0.080 | 2.103 | 0.009 |
| 22 | 2.323 | 2.391 | 0.068 | 2.332 | 0.009 |
| 24 | 2.548 | 2.609 | 0.061 | 2.561 | 0.013 |
| 26 | 2.771 | 2.826 | 0.055 | 2.791 | 0.020 |
| 28 | 3.002 | 3.043 | 0.041 | 3.020 | 0.018 |
| 30 | 3.233 | 3.261 | 0.028 | 3.250 | 0.017 |
| 32 | 3.477 | 3.478 | 0.001 | 3.479 | 0.002 |
| 34 | 3.716 | 3.696 | 0.020 | 3.708 | 0.008 |
| 36 | 3.939 | 3.913 | 0.026 | 3.938 | 0.001 |
| 38 | 4.165 | 4.130 | 0.035 | 4.167 | 0.002 |
| 40 | 4.402 | 4.348 | 0.054 | 4.397 | 0.005 |
| 42 | 4.626 | 4.565 | 0.061 | 4.626 | 0.000 |
| 44 | 4.696 | 4.783 | 0.087 | | |
| 46 | 4.696 | 5.000 | 0.304 | | |

R Data From Experiment (Alps 5k Ohm (Slide))

R' Resistance From Calcuting (Ideal)

R" Ideal in Linear Range ( Length 2-42 ) Calculated Form :

Error1 Error of all Range ( | R'-R | ) Error2 Error in Range 2-42mm ( | R"-R | )

Max Error1 : 0.304 kΩ Max Error2 : 0.0198 kΩ

Full Scale Resister : 5.000 kΩ Full Scale Resister : 4.626 kΩ

Accuracy of all Range : 6.08% FSO Accuracy of Range 2-42mm : 0.428 %FSO

## 4. การทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ RS 1k

TYPE : Single Turn Conductive Plastic Servo Potentiometer

RESISTANCE RANGE : 0-1k Ω

MAXMUM OF MOVEMENT : 360 °

INSTRUMENT: MULTIMETER :Digital Multimeter Gold Star DM-8243

ROOM TEMPERATURE : 29 ° C

METHODE : Measure 36 step of 10 ° (360 ° )

**ตารางที่ B4 ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบ RS 1k**

| Angle (Degree) | R (kΩ) | R' (kΩ) | Error (R-R') | Angle (Degree) | R (kΩ) | R' (kΩ) | Error (R-R') |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.002 | 0.000 | 0.002 | 200 | 0.556 | 0.556 | 0.000 |
| 20 | 0.056 | 0.056 | 0.001 | 220 | 0.616 | 0.611 | 0.005 |
| 40 | 0.112 | 0.111 | 0.001 | 240 | 0.672 | 0.667 | 0.005 |
| 60 | 0.167 | 0.167 | 0.000 | 260 | 0.730 | 0.722 | 0.008 |
| 80 | 0.223 | 0.222 | 0.001 | 280 | 0.785 | 0.778 | 0.008 |
| 100 | 0.279 | 0.278 | 0.001 | 300 | 0.839 | 0.833 | 0.006 |
| 120 | 0.335 | 0.333 | 0.001 | 320 | 0.894 | 0.889 | 0.005 |
| 140 | 0.391 | 0.389 | 0.002 | 340 | 0.944 | 0.944 | 0.000 |
| 160 | 0.444 | 0.444 | 0.000 | 348 | 0.964 | 0.967 | 0.003 |
| 180 | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 360 | Open | - | - |

R Data From Experiment (RS 1k) R' Resistance Form Calculation ->(Angle/MaxAngle)*MaxResistance

Error = Resistance Error ( |R'-R| )

Max Error : 0.0076 k$\Omega$ Full Scale Resistance : 1.00 k$\Omega$

Accuracy (Full Scale Output) : $\pm$ 0.76% FSO

## 5. สรุปผลการทดสอบ โพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ

จากการทดลองเราสามารถสรุปผลความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ ได้ดังตารางที่ B5

**ตารางที่ B5 สรุปผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ**

| | @ (B1k) | | Alps (5k) | | RS (1k) | Bourns (1k) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | (0-300°) | (40-260°) | (0-45mm) | (2-42mm) | (0-360°) | (0-3600°) |
| Accuracy(%FSO) | 10.51 % | 0.54 % | 6.08 % | 0.43 % | 0.76 % | 0.083 % |

## ผลการทดสอบหาผลกระทบของการโหลดของโพเทนชิออมิเตอร์ค่าต่างๆ

### 1. ข้อมูลโดยรวมของโพเทนชิออมิเตอร์ที่ใช้ทดสอบและการทดสอบ

ซึ่งในการวิจัยนี้จะใช้รูปแบบการทดสอบแบบนี้ในทุกค่าความต้านทาน

**BRAND : Bourns 3590s**

TYPE : Multiturn Wirewound

MAXIMUM OF MOVEMENT : 10 round (360x10 degree)

INSTRUMENT: MULTIMETER :Digital Multimeter Gold Star DM-8243

: ANGLE :Angle Plate Concise 18 cm

ROOM TEMPERATURE : 29 Celcius degree

VOLTAGE REFERENCE : 10 volt

METHODE : Measure 40 step of 90 ° (3600° )

## 2. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns ขนาด 500 Ohm

ตารางที่ B6 ผลการทดสอบเพื่อหาผลของการโหลดและความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 500 Ω

| Angle (°) | R (Ω) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (Ω) | Error2 \|R-R'\| | Angle (°) | R (Ω) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (Ω) | Error2 \|R-R'\| |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *0* | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | *1890* | 266.5 | 5.239 | 5.249 | 0.010 | 265.9 | 0.6 |
| *90* | 12.7 | 0.252 | 0.250 | 0.002 | 12.7 | 0.0 | *1980* | 279.0 | 5.487 | 5.495 | 0.008 | 278.5 | 0.7 |
| *180* | 25.4 | 0.495 | 0.500 | 0.005 | 25.3 | 0.1 | *2070* | 291.8 | 5.738 | 5.747 | 0.009 | 291.2 | 0.6 |
| *270* | 38.2 | 0.750 | 0.752 | 0.002 | 38.0 | 0.2 | *2160* | 304.4 | 5.986 | 5.996 | 0.010 | 303.9 | 0.5 |
| *360* | 50.8 | 0.997 | 1.001 | 0.004 | 50.6 | 0.2 | *2250* | 317.1 | 6.237 | 6.246 | 0.009 | 316.5 | 0.6 |
| *450* | 63.3 | 1.242 | 1.247 | 0.005 | 63.3 | 0.0 | *2340* | 329.9 | 6.486 | 6.498 | 0.012 | 329.2 | 0.7 |
| *540* | 76.1 | 1.496 | 1.499 | 0.003 | 76.0 | 0.1 | *2430* | 342.4 | 6.735 | 6.744 | 0.009 | 341.8 | 0.6 |
| *630* | 89.0 | 1.748 | 1.753 | 0.005 | 88.6 | 0.4 | *2520* | 354.9 | 6.985 | 6.990 | 0.005 | 354.5 | 0.4 |
| *720* | 101.7 | 1.995 | 2.003 | 0.008 | 101.3 | 0.4 | *2610* | 367.6 | 7.235 | 7.240 | 0.005 | 367.2 | 0.4 |
| *810* | 114.2 | 2.243 | 2.249 | 0.006 | 113.9 | 0.3 | *2700* | 380.4 | 7.484 | 7.493 | 0.009 | 379.8 | 0.6 |
| *900* | 126.9 | 2.496 | 2.500 | 0.004 | 126.6 | 0.3 | *2790* | 393.0 | 7.731 | 7.741 | 0.010 | 392.5 | 0.5 |
| *990* | 139.8 | 2.747 | 2.754 | 0.007 | 139.3 | 0.5 | *2880* | 405.5 | 7.980 | 7.987 | 0.007 | 405.1 | 0.4 |
| *1080* | 152.2 | 2.993 | 2.998 | 0.005 | 151.9 | 0.3 | *2970* | 418.2 | 8.231 | 8.237 | 0.006 | 417.8 | 0.4 |
| *1170* | 164.8 | 3.243 | 3.246 | 0.003 | 164.6 | 0.2 | *3060* | 430.9 | 8.481 | 8.487 | 0.006 | 430.5 | 0.4 |
| *1260* | 177.7 | 3.490 | 3.500 | 0.010 | 177.3 | 0.4 | *3150* | 443.5 | 8.731 | 8.735 | 0.004 | 443.1 | 0.4 |
| *1350* | 190.0 | 3.742 | 3.742 | 0.000 | 189.9 | 0.1 | *3240* | 456.0 | 8.978 | 8.982 | 0.004 | 455.8 | 0.2 |
| *1440* | 203.0 | 3.990 | 3.998 | 0.008 | 202.6 | 0.4 | *3330* | 468.6 | 9.226 | 9.230 | 0.004 | 468.5 | 0.1 |
| *1530* | 215.5 | 4.237 | 4.245 | 0.008 | 215.2 | 0.3 | *3420* | 481.4 | 9.480 | 9.482 | 0.002 | 481.1 | 0.3 |
| *1620* | 228.4 | 4.491 | 4.499 | 0.008 | 227.9 | 0.5 | *3510* | 494.1 | 9.731 | 9.732 | 0.001 | 493.8 | 0.3 |
| *1710* | 240.0 | 4.729 | 4.727 | 0.002 | 240.6 | 0.6 | *3600* | 506.7 | 9.980 | 9.980 | 0.000 | 506.4 | 0.3 |
| *1800* | 253.5 | 4.987 | 4.993 | 0.006 | 253.2 | 0.3 | *3609* | 507.7 | 9.999 | 10.000 | 0.001 | 507.7 | 0.0 |

R,V : Data From Experiment (R500 Ohm)

V' : Voltage From Calculation = (R/Rmax)*10

R' : Ideal Resistance(Angle 0-3609 -> R 0-Rmax V.)

Error1 : (Loading Effect) (Abs(V'-V)) Error2 : Accuracy (Abs(R'-R))

Max Error1 : 0.012 Volt Max Error2 : 0.7 Ω

Full Scale Voltage : 10.00 Volt Full Scale Resistance : 500 Ω

Loading Error (%FSO) : ±0.12 % Accuray of Potentiometer %FSO : ± 0.1%

## 3. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ขนาด 1k Ω

ตารางที่ B7 ผลการทดสอบเพื่อหาผลของการโหลดและความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 1k Ω

| *Angle* (° ) | R (Ω) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (Ω) | Error2 \| R-R' \| | *Angle* (° ) | R (Ω) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (Ω) | Error2 \| R-R'\| |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *0* | 0.0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.0 | 0.0 | *1890* | 523.1 | 5.220 | 5.231 | 0.011 | 523.7 | 0.6 |
| *90* | 24.7 | 0.245 | 0.247 | 0.002 | 24.9 | 0.2 | *1980* | 548.2 | 5.470 | 5.482 | 0.012 | 548.6 | 0.4 |
| *180* | 49.3 | 0.488 | 0.493 | 0.005 | 49.9 | 0.6 | *2070* | 573.6 | 5.723 | 5.736 | 0.013 | 573.6 | 0.0 |
| *270* | 74.4 | 0.741 | 0.744 | 0.003 | 74.8 | 0.4 | *2160* | 598.1 | 5.971 | 5.981 | 0.010 | 598.5 | 0.4 |
| *360* | 99.0 | 0.989 | 0.990 | 0.000 | 99.8 | 0.8 | *2250* | 623.2 | 6.219 | 6.232 | 0.013 | 623.4 | 0.2 |
| *450* | 123.9 | 1.236 | 1.239 | 0.003 | 124.7 | 0.8 | *2340* | 648.2 | 6.470 | 6.482 | 0.012 | 648.4 | 0.2 |
| *540* | 149.0 | 1.484 | 1.490 | 0.006 | 149.6 | 0.6 | *2430* | 673.9 | 6.723 | 6.739 | 0.016 | 673.3 | 0.6 |
| *630* | 174.0 | 1.736 | 1.740 | 0.004 | 174.6 | 0.6 | *2520* | 698.3 | 6.970 | 6.983 | 0.013 | 698.3 | 0.1 |
| *720* | 198.8 | 1.981 | 1.988 | 0.007 | 199.5 | 0.7 | *2610* | 723.1 | 7.221 | 7.231 | 0.010 | 723.2 | 0.1 |
| *810* | 223.7 | 2.230 | 2.237 | 0.007 | 224.4 | 0.7 | *2700* | 748.3 | 7.472 | 7.483 | 0.011 | 748.1 | 0.2 |
| *900* | 249.4 | 2.479 | 2.494 | 0.015 | 249.4 | 0.0 | *2790* | 773.3 | 7.723 | 7.733 | 0.010 | 773.1 | 0.2 |
| *990* | 273.8 | 2.732 | 2.738 | 0.006 | 274.3 | 0.5 | *2880* | 798.2 | 7.974 | 7.982 | 0.008 | 798.0 | 0.2 |
| *1080* | 298.6 | 2.979 | 2.986 | 0.007 | 299.3 | 0.7 | *2970* | 823.0 | 8.222 | 8.230 | 0.008 | 822.9 | 0.1 |
| *1170* | 323.4 | 3.226 | 3.234 | 0.008 | 324.2 | 0.8 | *3060* | 848.1 | 8.472 | 8.481 | 0.009 | 847.9 | 0.2 |
| *1260* | 348.7 | 3.476 | 3.487 | 0.011 | 349.1 | 0.4 | *3150* | 873.4 | 8.730 | 8.734 | 0.004 | 872.8 | 0.6 |
| *1350* | 373.7 | 3.729 | 3.737 | 0.008 | 374.1 | 0.4 | *3240* | 898.3 | 8.977 | 8.983 | 0.006 | 897.8 | 0.5 |
| *1440* | 398.2 | 3.974 | 3.982 | 0.008 | 399.0 | 0.8 | *3330* | 923.0 | 9.227 | 9.230 | 0.003 | 922.7 | 0.3 |
| *1530* | 423.2 | 4.222 | 4.232 | 0.010 | 423.9 | 0.7 | *3420* | 948.0 | 9.480 | 9.480 | 0.000 | 947.6 | 0.4 |
| *1620* | 448.3 | 4.470 | 4.483 | 0.013 | 448.9 | 0.6 | *3510* | 973.4 | 9.735 | 9.734 | 0.001 | 972.6 | 0.8 |
| *1710* | 473.5 | 4.722 | 4.735 | 0.013 | 473.8 | 0.3 | *3600* | 998.2 | 9.988 | 9.982 | 0.006 | 997.5 | 0.7 |
| *1800* | 498.4 | 4.972 | 4.984 | 0.012 | 498.8 | 0.4 | *3609* | 1000.0 | 10.000 | 10.000 | 0.000 | 1000.0 | 0.0 |

R,V Data From Experiment (R1k)

V' : Voltage From Calculation = (R/Rmax)*10

R' : Ideal Resistance(Angle 0-3609 -> R 0-Rmax V.)

Error1 = Loading Effect (Abs(V'-V)) Error2 = Accuracy (Abs(R'-R))

Max Error1 : 0.016 Volt Max Error2 : 0.8 Ω

Full Scale Voltage : 10.00 Volt Full Scale Resistance : 1000 Ω

Loading Error : 0.16 %(FSO) Accuray : 0.08 % (FSO)

## 4.. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ขนาด 5k Ohm

ตารางที่ B8 ผลการทดสอบ เพื่อหาผลของการโหลดและความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 5k Ω

| Angle (°) | R (kΩ) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (kΩ) | Error2 \|R-R'\| | Angle (°) | R (kΩ) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (kΩ) | Error2 \|R-R'\| |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 1890 | 2.644 | 5.174 | 5.238 | 0.064 | 2.644 | 0.000 |
| 90 | 0.123 | 0.244 | 0.244 | 0.000 | 0.126 | 0.003 | 1980 | 2.770 | 5.424 | 5.487 | 0.063 | 2.769 | 0.001 |
| 180 | 0.247 | 0.493 | 0.489 | 0.004 | 0.252 | 0.005 | 2070 | 2.896 | 5.671 | 5.737 | 0.066 | 2.895 | 0.001 |
| 270 | 0.375 | 0.744 | 0.743 | 0.001 | 0.378 | 0.003 | 2160 | 3.021 | 5.917 | 5.985 | 0.068 | 3.021 | 0.000 |
| 360 | 0.502 | 0.992 | 0.994 | 0.002 | 0.504 | 0.002 | 2250 | 3.146 | 6.163 | 6.232 | 0.069 | 3.147 | 0.001 |
| 450 | 0.628 | 1.238 | 1.244 | 0.006 | 0.629 | 0.001 | 2340 | 3.272 | 6.414 | 6.482 | 0.068 | 3.273 | 0.001 |
| 540 | 0.753 | 1.487 | 1.492 | 0.005 | 0.755 | 0.002 | 2430 | 3.400 | 6.663 | 6.735 | 0.072 | 3.399 | 0.001 |
| 630 | 0.879 | 1.735 | 1.741 | 0.006 | 0.881 | 0.002 | 2520 | 3.524 | 6.912 | 6.981 | 0.069 | 3.525 | 0.001 |
| 720 | 1.003 | 1.979 | 1.987 | 0.008 | 1.007 | 0.004 | 2610 | 3.651 | 7.163 | 7.233 | 0.070 | 3.651 | 0.000 |
| 810 | 1.130 | 2.223 | 2.239 | 0.016 | 1.133 | 0.003 | 2700 | 3.778 | 7.417 | 7.484 | 0.067 | 3.777 | 0.001 |
| 900 | 1.257 | 2.471 | 2.490 | 0.019 | 1.259 | 0.002 | 2790 | 3.905 | 7.671 | 7.736 | 0.065 | 3.902 | 0.003 |
| 990 | 1.384 | 2.718 | 2.742 | 0.024 | 1.385 | 0.001 | 2880 | 4.029 | 7.922 | 7.981 | 0.059 | 4.028 | 0.001 |
| 1080 | 1.509 | 2.963 | 2.989 | 0.026 | 1.511 | 0.002 | 2970 | 4.155 | 8.175 | 8.231 | 0.056 | 4.154 | 0.001 |
| 1170 | 1.635 | 3.210 | 3.239 | 0.029 | 1.637 | 0.002 | 3060 | 4.282 | 8.430 | 8.483 | 0.053 | 4.280 | 0.002 |
| 1260 | 1.761 | 3.455 | 3.489 | 0.034 | 1.762 | 0.001 | 3150 | 4.409 | 8.687 | 8.734 | 0.047 | 4.406 | 0.003 |
| 1350 | 1.888 | 3.701 | 3.740 | 0.039 | 1.888 | 0.000 | 3240 | 4.534 | 8.944 | 8.982 | 0.038 | 4.532 | 0.002 |
| 1440 | 2.013 | 3.944 | 3.988 | 0.044 | 2.014 | 0.001 | 3330 | 4.660 | 9.201 | 9.231 | 0.030 | 4.658 | 0.002 |
| 1530 | 2.138 | 4.187 | 4.235 | 0.048 | 2.140 | 0.002 | 3420 | 4.787 | 9.462 | 9.483 | 0.021 | 4.784 | 0.003 |
| 1620 | 2.264 | 4.435 | 4.485 | 0.050 | 2.266 | 0.002 | 3510 | 4.915 | 9.724 | 9.737 | 0.013 | 4.910 | 0.005 |
| 1710 | 2.392 | 4.684 | 4.739 | 0.055 | 2.392 | 0.000 | 3600 | 5.038 | 9.987 | 9.980 | 0.007 | 5.035 | 0.003 |
| 1800 | 2.517 | 4.929 | 4.986 | 0.057 | 2.518 | 0.001 | 3609 | 5.048 | 10.000 | 10.000 | 0.000 | 5.048 | 0.000 |

R,V : Data From Experiment (R5k)

V' : Voltage From Calculation = (R/Rmax)*10

R' : Ideal Resistance(Angle 0-3609 -> R 0-Rmax V.)

Error1 : Loading Effect (Abs(V'-V))  Error2 : Accuracy (Abs(R'-R))

Max Error1 : 0.072 Volt  Max Error2 : 0.005 kΩ

Full Scale Voltage : 10.00 Volt  Full Scale Resistance : 5.000 kΩ

Loading Error : ± 0.72 (%FSO)  Accuray : ± 0.109 % (FSO)

## 5. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ขนาด 10k Ohm

**ตารางที่ B9 ผลการทดสอบ เพื่อหาผลของการโหลดและความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 10k Ω**

| Angle (°) | R (kΩ) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (kΩ) | Error2 \|R-R'\| | Angle (°) | R (kΩ) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (kΩ) | Error2 \|R-R'\| |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 1890 | 5.314 | 5.11 | 5.24 | 0.13 | 5.310 | 0.004 |
| 90 | 0.254 | 0.25 | 0.25 | 0.00 | 0.253 | 0.001 | 1980 | 5.568 | 5.36 | 5.49 | 0.14 | 5.563 | 0.005 |
| 180 | 0.498 | 0.49 | 0.49 | 0.00 | 0.506 | 0.008 | 2070 | 5.822 | 5.60 | 5.74 | 0.14 | 5.815 | 0.007 |
| 270 | 0.752 | 0.74 | 0.74 | 0.01 | 0.759 | 0.007 | 2160 | 6.076 | 5.85 | 5.99 | 0.15 | 6.068 | 0.008 |
| 360 | 1.004 | 0.98 | 0.99 | 0.01 | 1.011 | 0.007 | 2250 | 6.330 | 6.10 | 6.24 | 0.15 | 6.321 | 0.009 |
| 450 | 1.260 | 1.23 | 1.24 | 0.02 | 1.264 | 0.004 | 2340 | 6.584 | 6.34 | 6.49 | 0.15 | 6.574 | 0.010 |
| 540 | 1.513 | 1.47 | 1.49 | 0.02 | 1.517 | 0.004 | 2430 | 6.837 | 6.59 | 6.74 | 0.15 | 6.827 | 0.010 |
| 630 | 1.770 | 1.72 | 1.75 | 0.03 | 1.770 | 0.000 | 2520 | 7.088 | 6.84 | 6.99 | 0.15 | 7.080 | 0.008 |
| 720 | 2.021 | 1.96 | 1.94 | 0.03 | 2.023 | 0.002 | 2610 | 7.341 | 7.09 | 7.24 | 0.15 | 7.332 | 0.009 |
| 810 | 2.277 | 2.21 | 2.24 | 0.04 | 2.276 | 0.001 | 2700 | 7.592 | 7.35 | 7.49 | 0.14 | 7.585 | 0.007 |
| 900 | 2.528 | 2.45 | 2.49 | 0.05 | 2.528 | 0.000 | 2790 | 7.845 | 7.60 | 7.74 | 0.14 | 7.838 | 0.007 |
| 990 | 2.783 | 2.69 | 2.74 | 0.06 | 2.781 | 0.002 | 2880 | 8.097 | 7.86 | 7.99 | 0.13 | 8.091 | 0.006 |
| 1080 | 3.034 | 2.93 | 2.99 | 0.06 | 3.034 | 0.000 | 2970 | 8.352 | 8.12 | 8.24 | 0.121 | 8.344 | 0.008 |
| 1170 | 3.286 | 3.17 | 3.24 | 0.07 | 3.287 | 0.001 | 3060 | 8.603 | 8.38 | 8.49 | 0.11 | 8.597 | 0.006 |
| 1260 | 3.539 | 3.41 | 3.49 | 0.08 | 3.540 | 0.001 | 3150 | 8.856 | 8.64 | 8.74 | 0.10 | 8.850 | 0.006 |
| 1350 | 3.794 | 3.65 | 3.74 | 0.09 | 3.793 | 0.001 | 3240 | 9.109 | 8.90 | 8.98 | 0.08 | 9.102 | 0.007 |
| 1440 | 4.049 | 3.90 | 3.99 | 0.10 | 4.045 | 0.004 | 3330 | 9.361 | 9.17 | 9.23 | 0.07 | 9.355 | 0.006 |
| 1530 | 4.302 | 4.14 | 4.24 | 0.10 | 4.298 | 0.004 | 3420 | 9.615 | 9.44 | 9.48 | 0.05 | 9.608 | 0.007 |
| 1620 | 4.554 | 4.38 | 4.49 | 0.11 | 4.551 | 0.003 | 3510 | 9.868 | 9.71 | 9.73 | 0.03 | 9.861 | 0.007 |
| 1710 | 4.810 | 4.63 | 4.74 | 0.12 | 4.804 | 0.006 | 3600 | 10.122 | 9.98 | 9.98 | 0.00 | 10.114 | 0.008 |
| 1800 | 5.060 | 4.87 | 4.99 | 0.12 | 5.057 | 0.003 | 3609 | 10.139 | 10.00 | 10.00 | 0.00 | 10.139 | 0.000 |

R,V : Data From Experiment (R10k)

V' : Voltage From Calculation = (R/Rmax)*10

R' : Ideal Resistance(Angle 0-3609 -> R 0-Rmax V.)

Error1 : Loading Effect (Abs(V'-V))　　Error2 : Accuracy (Abs(R'-R))

Max Error1 : 0.15 Volt　　Max Error2 : 0.01 kΩ

Full Scale Voltage : 10 Volt　　Full Scale Resistance : 10 kΩ

Loading Error : ± 1.5 %(FSO)　　Accuray : ± 0.100 %FSO

## 6. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 100k Ohm

**ตารางที่ B10 ผลการทดสอบ เพื่อหาผลของการโหลดและความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์แบบ Bourns 100k Ω**

| Angle (°) | R (kΩ) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (kΩ) | Error2 \|R-R'\| | Angle (°) | R (kΩ) | V (Volt) | V' (Volt) | Error1 \|V-V'\| | R' (kΩ) | Error2 \|R-R'\| |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **0** | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.00 | 0.00 | **1890** | 52.45 | 4.190 | 5.245 | 1.055 | 52.37 | 0.08 |
| **90** | 2.42 | 0.236 | 0.242 | 0.006 | 2.49 | 0.07 | **1980** | 54.96 | 4.397 | 5.496 | 1.099 | 54.86 | 0.10 |
| **180** | 4.95 | 0.473 | 0.495 | 0.022 | 4.99 | 0.04 | **2070** | 57.46 | 4.609 | 5.746 | 1.137 | 57.36 | 0.10 |
| **270** | 7.48 | 0.701 | 0.748 | 0.047 | 7.48 | 0.00 | **2160** | 59.93 | 4.824 | 5.993 | 1.169 | 59.85 | 0.08 |
| **360** | 9.97 | 0.915 | 0.997 | 0.082 | 9.98 | 0.01 | **2250** | 62.41 | 5.044 | 6.241 | 1.197 | 62.34 | 0.07 |
| **450** | 12.48 | 1.123 | 1.248 | 0.125 | 12.47 | 0.01 | **2340** | 64.91 | 5.276 | 6.491 | 1.215 | 64.84 | 0.07 |
| **540** | 14.99 | 1.328 | 1.499 | 0.171 | 14.96 | 0.03 | **2430** | 67.41 | 5.516 | 6.741 | 1.225 | 67.33 | 0.08 |
| **630** | 17.49 | 1.527 | 1.749 | 0.222 | 17.46 | 0.03 | ***2520*** | ***69.91*** | ***5.765*** | ***6.991*** | ***1.226*** | 69.83 | 0.08 |
| **720** | 19.97 | 1.719 | 1.997 | 0.278 | 19.95 | 0.02 | **2610** | 72.39 | 6.023 | 7.239 | 1.216 | 72.32 | 0.07 |
| **810** | 22.46 | 1.910 | 2.246 | 0.336 | 22.44 | 0.02 | **2700** | 74.90 | 6.294 | 7.490 | 1.196 | 74.81 | 0.09 |
| **900** | 24.98 | 2.101 | 2.498 | 0.397 | 24.94 | 0.04 | **2790** | 77.41 | 6.579 | 7.741 | 1.162 | 77.31 | 0.10 |
| **990** | 27.49 | 2.290 | 2.749 | 0.459 | 27.43 | 0.06 | **2880** | 79.89 | 6.872 | 7.989 | 1.117 | 79.80 | 0.09 |
| **1080** | 29.99 | 2.475 | 2.999 | 0.524 | 29.93 | 0.06 | **2970** | 82.36 | 7.182 | 8.236 | 1.054 | 82.29 | 0.07 |
| **1170** | 32.47 | 2.660 | 3.247 | 0.587 | 32.42 | 0.05 | **3060** | 84.87 | 7.513 | 8.487 | 0.974 | 84.79 | 0.08 |
| **1260** | 34.99 | 2.846 | 3.499 | 0.653 | 34.91 | 0.08 | **3150** | 87.36 | 7.862 | 8.736 | 0.874 | 87.28 | 0.08 |
| **1350** | 37.49 | 3.033 | 3.749 | 0.716 | 37.41 | 0.08 | **3240** | 89.83 | 8.226 | 8.983 | 0.757 | 89.78 | 0.05 |
| **1440** | 39.95 | 3.216 | 3.995 | 0.779 | 39.90 | 0.05 | **3330** | 92.33 | 8.618 | 9.233 | 0.615 | 92.27 | 0.06 |
| **1530** | 42.44 | 3.405 | 4.244 | 0.839 | 42.39 | 0.05 | **3420** | 94.86 | 9.042 | 9.486 | 0.444 | 94.76 | 0.10 |
| **1620** | 44.96 | 3.596 | 4.496 | 0.900 | 44.89 | 0.07 | **3510** | 97.35 | 9.488 | 9.735 | 0.247 | 97.26 | 0.09 |
| **1710** | 47.46 | 3.792 | 4.746 | 0.954 | 47.38 | 0.08 | **3600** | 99.82 | 9.962 | 9.982 | 0.020 | 99.75 | 0.07 |
| **1800** | 49.95 | 3.987 | 4.995 | 1.008 | 49.88 | 0.08 | **3609** | 100.00 | 10.000 | 10.000 | 0.000 | 100.00 | 0.00 |

R,V : Data From Experiment (R100k)

V' : Voltage From Calculation = (R/Rmax)*10

R' : Ideal Resistance(Angle 0-3609 -> R 0-Rmax V.)

Error1 : Loading Effect (Abs(V'-V)) Error2 : Accuracy (Abs(R'-R))

Max Error1 : 1.226 Volt Max Error2 : 0.10 kΩ

Full Scale Voltage : 10 Volt Full Scale Resistance : 100 kΩ

Loading Error : ± 12.26 % (FSO) Accuray : ± 0.10 % FSO

## 7. สรุปผลการทดลองเปรียบเทียบผลของการโหลดทุกค่าความต้านทานที่ทดสอบ

**ตารางที่ B11** เปรียบเทียบผลของการโหลดของค่าความต้านทานต่างๆ

| **Angle** | V Ideal | <------ | | V out (Volt) | | ------> | **Angle** | V Ideal | <------ | | V out (Volt) | | ------> |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ( $^{o}$ ) | Volt | R500 | R1k | R5k | R10k | R100k | ( $^{o}$ ) | Volt | R500 | R1k | R5k | R10k | R100k |
| **0** | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | **1890** | 5.24 | 5.24 | 5.22 | 5.17 | 5.11 | 4.19 |
| **90** | 0.25 | 0.25 | 0.24 | 0.24 | 0.25 | 0.24 | **1980** | 5.49 | 5.49 | 5.47 | 5.42 | 5.36 | 4.40 |
| **180** | 0.50 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.49 | 0.47 | **2070** | 5.74 | 5.74 | 5.72 | 5.67 | 5.60 | 4.61 |
| **270** | 0.75 | 0.75 | 0.74 | 0.74 | 0.74 | 0.70 | **2160** | 5.99 | 5.99 | 5.97 | 5.92 | 5.85 | 4.82 |
| **360** | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 0.99 | 0.98 | 0.92 | **2250** | 6.23 | 6.24 | 6.22 | 6.16 | 6.10 | 5.04 |
| **450** | 1.25 | 1.24 | 1.24 | 1.24 | 1.23 | 1.12 | **2340** | 6.48 | 6.49 | 6.47 | 6.41 | 6.35 | 5.28 |
| **540** | 1.50 | 1.50 | 1.48 | 1.49 | 1.47 | 1.33 | **2430** | 6.73 | 6.74 | 6.72 | 6.66 | 6.60 | 5.52 |
| **630** | 1.75 | 1.75 | 1.74 | 1.74 | 1.72 | 1.53 | **2520** | 6.98 | 6.99 | 6.97 | 6.91 | 6.84 | 5.76 |
| **720** | 2.00 | 2.00 | 1.98 | 1.98 | 1.96 | 1.72 | **2610** | 7.23 | 7.24 | 7.22 | 7.16 | 7.09 | 6.02 |
| **810** | 2.24 | 2.24 | 2.23 | 2.22 | 2.21 | 1.91 | **2700** | 7.48 | 7.48 | 7.47 | 7.42 | 7.35 | 6.29 |
| **900** | 2.49 | 2.50 | 2.48 | 2.47 | 2.45 | 2.10 | **2790** | 7.73 | 7.73 | 7.72 | 7.67 | 7.60 | 6.58 |
| **990** | 2.74 | 2.75 | 2.73 | 2.72 | 2.69 | 2.29 | **2880** | 7.98 | 7.98 | 7.97 | 7.92 | 7.86 | 6.87 |
| **1080** | 2.99 | 2.99 | 2.98 | 2.96 | 2.93 | 2.48 | **2970** | 8.23 | 8.23 | 8.22 | 8.18 | 8.12 | 7.18 |
| **1170** | 3.24 | 3.24 | 3.23 | 3.21 | 3.17 | 2.66 | **3060** | 8.48 | 8.48 | 8.47 | 8.43 | 8.38 | 7.51 |
| **1260** | 3.49 | 3.49 | 3.48 | 3.46 | 3.41 | 2.85 | **3150** | 8.73 | 8.73 | 8.73 | 8.69 | 8.64 | 7.86 |
| **1350** | 3.74 | 3.74 | 3.73 | 3.70 | 3.65 | 3.03 | **3240** | 8.98 | 8.98 | 8.98 | 8.94 | 8.90 | 8.23 |
| **1440** | 3.99 | 3.99 | 3.97 | 3.94 | 3.90 | 3.22 | **3330** | 9.23 | 9.23 | 9.23 | 9.20 | 9.17 | 8.62 |
| **1530** | 4.24 | 4.24 | 4.22 | 4.19 | 4.14 | 3.40 | **3420** | 9.48 | 9.48 | 9.48 | 9.46 | 9.44 | 9.04 |
| **1620** | 4.49 | 4.49 | 4.47 | 4.43 | 4.38 | 3.60 | **3510** | 9.73 | 9.73 | 9.73 | 9.72 | 9.71 | 9.49 |
| **1710** | 4.74 | 4.73 | 4.72 | 4.68 | 4.63 | 3.79 | **3600** | 9.98 | 9.98 | 9.99 | 9.99 | 9.98 | 9.96 |
| **1800** | 4.99 | 4.99 | 4.97 | 4.93 | 4.87 | 3.99 | **3609** | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 | 10.00 |

**ตารางที่ B12** สรุปผลของการโหลดและความผิดพลาดของโพเทนชิออมิเตอร์ค่าต่างๆ

| Potentiometer | R500 | R1k | R5k | R10k | R100k |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Loading Effect*** (%FSO) | ± 0.125 | ± 0.16 | ± .723 | ± 1.50 | ± 12.26 |
| ***Accuracy*** (%FSO) | ± 0.143 | ± 0.083 | ± 0.109 | ± 0.100 | ± 0.103 |

## ผลการวิจัยการตรวจสอบความผิดพลาดต่ออุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์

### 1. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ @ B1K

ตารางที่ B13 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์ @ 1k Ω

| Temp (°C) | R (Ω) | Error (R-Rm) | % |
|---|---|---|---|
| 30 | 504.0 | 0.00 | 0.000 |
| 40 | 500.6 | -3.40 | 0.675 |
| 50 | 497.7 | -6.30 | 1.250 |
| 60 | 494.0 | -10.00 | 1.984 |
| 70 | 491.2 | -12.80 | 2.540 |

R = Resistance Measure at Each Temperature (@ B1k)

Error = R (Measure) - Rm(504.0)

Max Error : -12.80 Ω

Max % Error : 2.540 %

Temperature Coefficient (30-70C) = - 0.32 Ω/°C

### 2. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ RS 1k

ตารางที่ B14 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์ RS 1K

| Temp (°C) | R (Ω) | Error (Rm-R) | % |
|---|---|---|---|
| 32 | 499.8 | 0.0 | 0.00 |
| 40 | 499.8 | 0.0 | 0.00 |
| 50 | 500.1 | 0.3 | 0.06 |
| 60 | 500.5 | 0.7 | 0.14 |
| 70 | 501.2 | 1.4 | 0.28 |

R : Resistance Measure at Each Temperature (RS 1k)

Error = Rm(Room Temperature) and R (Measure)

Max Error : 1.40 Ω

Max % Erro : 0.28 %

Temperature Coefficient (30-70C) = 0.037 Ω/°C

3. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Alps 5k

ตารางที่ B15 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์ Alps 5k

| Temp (°C) | R (Ω) | Error (Rm-R) | % |
|---|---|---|---|
| 32 | 2.488 | 0.000 | 0.00 |
| 40 | 2.481 | -0.007 | 0.28 |
| 50 | 2.472 | -0.016 | 0.64 |
| 60 | 2.459 | -0.029 | 1.17 |
| 70 | 2.438 | -0.050 | 2.01 |

R : Resistance Measure at Each Temperature

Error = Rm(Room Temperature) and R (Measure)

Max Error : -0.050

Max % Error : 2.01 %

Temperature Coefficient (30-70C) = -1.32 Ω/°C

4. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 3590s-1-501

ตารางที่ B16 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 500Ω

| Temp (°C) | R (Ω) | Error (Rm-R) | % |
|---|---|---|---|
| 32 | 250.0 | 0.0 | 0.00 |
| 40 | 250.2 | 0.2 | 0.08 |
| 50 | 250.3 | 0.3 | 0.12 |
| 60 | 250.4 | 0.4 | 0.16 |
| 70 | 250.5 | 0.5 | 0.20 |

R : Resistance Measure at Each Temperature (Bourns 500)

Error : Difference From Rm(Room Temperature) and R (read)

Max Error : 0.50 Ω

Max % Error : 0.20 %

Temperature Coefficient (30-70C) = 0.013 Ω/°C

5. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 3590s-1-102

ตารางที่ B17 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 1kΩ

| Temp (°C) | R (Ω) | Error (Rm-R) | % |
|---|---|---|---|
| 32 | 500.0 | 0.0 | 0.00 |
| 40 | 500.1 | 0.1 | 0.02 |
| 50 | 500.3 | 0.3 | 0.06 |
| 60 | 500.3 | 0.3 | 0.06 |
| 70 | 500.4 | 0.4 | 0.08 |

R : Resistance Measure at Each Temperature

Error : Difference From Rm(Room Temperature) and R (read)

Max Error : 0.40 Ω

Max % Error : 0.08 %

Temperature Coefficient (30-70C) = 0.011 Ω/°C

6. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 3590s-1-103

ตารางที่ B18 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 10kΩ

| Temp (°C) | R (kΩ) | Error (Rm-R) | % |
|---|---|---|---|
| 32 | 5.007 | 0.000 | 0.00 |
| 40 | 5.008 | 0.001 | 0.02 |
| 50 | 5.009 | 0.002 | 0.04 |
| 60 | 5.009 | 0.002 | 0.04 |
| 70 | 5.010 | 0.003 | 0.06 |

R : Resistance Measure at Each Temperature (Bourns 10k)

Error = Rm(Room Temperature) - R (Measure)

Max Error : 0.003 kΩ

Max % Error : 0.06 %

Temperature Coefficient (30-70C) = 0.079 Ω/°C

7. ผลการทดสอบโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 3590s-1-104

ตารางที่ B19 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์ Bourns 100kΩ

| Temp (°C) | R (kΩ) | Error (Rm-R) | % |
|---|---|---|---|
| 31 | 50.00 | 0.00 | 0.00 |
| 40 | 50.01 | 0.01 | 0.02 |
| 50 | 50.01 | 0.01 | 0.02 |
| 60 | 50.02 | 0.02 | 0.04 |
| 70 | 50.03 | 0.03 | 0.06 |

R : Resistance Measure at Each Temperature (Bourns 100k)

Error = Rm(Room Temperature) and R (Measure)

Max Error : 0.030 kΩ

Max % Error : 0.060 %

Temperature Coefficient (30-70C) = 0.79 Ω/°C

8. สรุปผลการเปลี่ยนแปลงความต้านทานต่ออุณหภูมิของโพเทนชิออมิเตอร์แบบต่างๆ

ตารางที่ B20

| | @ | RS | Alps | <- - - - - Bourns | | | - - - - - - - - > |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1k | 1k | 5k | 500 | 1k | 10k | 100k |
| Max Error (Ω) | -12.80 | 1.40 | -0.05k | 0.50 | 0.40 | 0.003k | 0.030k |
| Max Error (%) | 2.54% | 0.28% | 2.01% | 0.20% | 0.08% | 0.060% | 0.060% |
| Temp. Coef (Ω/°C) | -0.32 | 0.037 | -1.32 | 0.013 | 0.011 | 0.079 | 0.79 |

# ผลการทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์

1. ผลการทดสอบตัวแปลงสัญญาณจากอนาลอกเป็นดิจิตอล

ตารางที่ B21

| Input (Volt) | Output Digital | Ideal Digital | Error Abs | Input (Volt) | Output Digital | Ideal Digital | Error Abs |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 5.50 | 2251 | 2252.25 | 1 |
| 0.50 | 204 | 204075 | 1 | 6.00 | 2460 | 2457.00 | 3 |
| 1.00 | 408 | 409.50 | 2 | 6.50 | 2661 | 2661.75 | 1 |
| 1.50 | 613 | 614..25 | 1 | 7.00 | 2866 | 2866.50 | 1 |
| 2.00 | 817 | 819.00 | 2 | 7.50 | 3071 | 3071.25 | 0 |
| 2.50 | 1022 | 1021.75 | 2 | 8.00 | 3275 | 3276.00 | 1 |
| 3.00 | 1227 | 1228.50 | 2 | 8.50 | 3480 | 3480.75 | 1 |
| 3.50 | 1432 | 1433.25 | 1 | 9.00 | 3686 | 3685.50 | 1 |
| 4.00 | 1636 | 1638.00 | 2 | 9.50 | 3889 | 3890.25 | 1 |
| 4.50 | 1841 | 1842.75 | 2 | 10.00 | 4095 | 4095.00 | 0 |

Error = I Ideal - Output I

Maximum Error : 3

Full Scale Value : 4095

Accuracy (Full Scale Output) % FSO : ±0.07 %

2. **ผลการทดสอบส่วน Analog Data Processing Unit**

ในที่นี้ได้ทดสอบให้มีการปรับอัตราขยายเป็น 1 และ 2 ได้ผลลัพท์ดังตารางที่ B22

ตารางที่ B22

| Gain = 1 Vin (Volt) | Vout Volt) | Error1 Volt) | I | Gain = 2 Vin Volt) | Vout Volt) | Error2 Volt) | I | Ideal Volt) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | I | 0.000 | 0.000 | 0.000 | I | 0.000 |
| 0.500 | 0.500 | 0.000 | I | 0.250 | 0.500 | 0.000 | I | 0.500 |
| 1.000 | 1.000 | 0.000 | I | 0.500 | 1.001 | 0.001 | I | 1.000 |
| 1.500 | 1.500 | 0.000 | I | 0.750 | 1.502 | 0.002 | I | 1.500 |

**ตารางที่ B22 (ต่อ)**

| Gain = 1 | | | | Gain = 2 | | | | Ideal |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Vin (Volt) | Vout Volt) | Error1 Volt) | I | Vin Volt) | Vout Volt) | Error2 Volt) | I | Volt) |
| 2.000 | 2.000 | 0.000 | I | 1.000 | 2.002 | 0.002 | I | 2.000 |
| 2.500 | 2.500 | 0.000 | I | 1.250 | 2.502 | 0.002 | I | 2.500 |
| 3.000 | 3.000 | 0.000 | I | 1.500 | 3.002 | 0.002 | I | 3.000 |
| 3.500 | 3.501 | 0.001 | I | 1.750 | 3.502 | 0.002 | I | 3.500 |
| 4.000 | 4.000 | 0.000 | I | 2.000 | 4.000 | 0.000 | I | 4.000 |
| 4.500 | 4.502 | 0.002 | I | 2.250 | 4.504 | 0.004 | I | 4.500 |
| 5.000 | 5.002 | 0.002 | I | 2.500 | 5.005 | 0.005 | I | 5.000 |
| 5.500 | 5.502 | 0.002 | I | 2.750 | 5.507 | 0.007 | I | 5.500 |
| 6.000 | 6.002 | 0.002 | I | 3.000 | 6.007 | 0.007 | I | 6.000 |
| 6.500 | 6.502 | 0.002 | I | 3.250 | 6.508 | 0.008 | I | 6.500 |
| 7.000 | 6.999 | 0.001 | I | 3.500 | 7.007 | 0.007 | I | 7.000 |
| 7.500 | 7.497 | 0.003 | I | 3.750 | 7.508 | 0.008 | I | 7.500 |
| 8.000 | 8.000 | 0.000 | I | 4.000 | 8.008 | 0.008 | I | 8.000 |
| 8.500 | 8.497 | 0.003 | I | 4.250 | 8.508 | 0.008 | I | 8.500 |
| 9.000 | 8.997 | 0.003 | I | 4.500 | 9.000 | 0.000 | I | 9.000 |
| 9.500 | 9.500 | 0.000 | I | 4.750 | 9.500 | 0.000 | I | 9.500 |
| 10.000 | 10.000 | 0.000 | I | 5.000 | 10.000 | 0.000 | I | 10.000 |

* Error = |Vout-Videal|

| Gain = 1 | Gain = 2 |
|---|---|
| Max Error1 : 0.003 V. | Max Error2 : 0.008 V. |
| Max Ideal Value : 10.00 V. | Max Ideal Value : 10.00 V. |
| Accuracy (%FSO) : ± 0.030 % | Accuracy (%FSO) : ± 0.080 % |

3. **ผลการทดสอบระบบตรวจรู้ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ทั้งระบบเมื่อใช้โพเทนชิออมิเตอร์เป็นตัวตรวจรู้**

ข้อมูลการทดสอบ

- Potentiometer : Bourns 3590s-1-501 500 Ohm
- Maximum of Movement : 10 round (360x10 degree)
- Room Temperature : 29 Celcius degree
- Voltage Reference : 10.00 Volt

**ตารางที่ B23**

| Angle (Degree) | Digital (Output) | Ideal (Output) | Error | Angle (Degree) | Digital (Output) | Ideal (Output) | Error |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0.00 | 0 | 1890 | 2145 | 2143.47 | 2 |
| 90 | 100 | 102.07 | 2 | 1980 | 2246 | 2245.54 | 1 |
| 180 | 202 | 204.14 | 2 | 2070 | 2348 | 2347.61 | 0 |
| 270 | 305 | 306.21 | 1 | 2160 | 2452 | 2449.68 | 2 |
| 360 | 407 | 408.28 | 1 | 2250 | 2553 | 2551.75 | 1 |
| 450 | 509 | 510.35 | 1 | 2340 | 2657 | 2653.82 | 3 |
| 540 | 612 | 612.42 | 0 | 2430 | 2759 | 2755.89 | 3 |
| 630 | 715 | 714.49 | 1 | 2520 | 2860 | 2857.96 | 2 |
| 720 | 817 | 816.56 | 0 | 2610 | 2962 | 2960.02 | 2 |
| 810 | 919 | 918.63 | 0 | 2700 | 3062 | 3062.09 | 0 |
| 900 | 1021 | 1020.70 | 0 | 2790 | 3163 | 3164.16 | 1 |
| 990 | 1125 | 1122.77 | 2 | 2880 | 3264 | 3266.23 | 2 |
| 1080 | 1225 | 1224.84 | 0 | 2970 | 3367 | 3368.30 | 1 |
| 1170 | 1327 | 1326.91 | 0 | 3060 | 3470 | 3470.37 | 0 |
| 1260 | 1429 | 1428.98 | 0 | 3150 | 3573 | 3572.44 | 1 |
| 1350 | 1532 | 1531.05 | 1 | 3240 | 3673 | 3674.51 | 2 |
| 1440 | 1633 | 1633.12 | 0 | 3330 | 3776 | 3776.58 | 1 |
| 1530 | 1734 | 1735.19 | 1 | 3420 | 3882 | 3878.65 | 3 |
| 1620 | 1838 | 1837.26 | 1 | 3510 | 3984 | 3980.72 | 3 |
| 1710 | 1939 | 1939.33 | 0 | 3600 | 4085 | 4082.79 | 2 |
| 1800 | 2043 | 2041.40 | 2 | 3609 | 4093 | 4093.00 | 0 |

* Error = I Output Digital - Ideal I

Max Error : 3

Full Scale Value : 4095

Accuracy (% FSO) : ±0.08 %

5. **ผลการทดสอบค่าแรงดันที่ได้เมื่อต่อโพเทนชิออมิเตอร์กับแรงดันอ้างอิงเป็นเวลานาน**

ผลการทดสอบเป็นดังตารางที่ B24 โดยมีเงื่อนไขและอุปกรณ์ดังนี้

BRAND : Bourns 3590s-1-501

RESISTANCE : 250.0 Ohm (Set Resistance at center point)

ROOM TEMPERATURE : 30 C

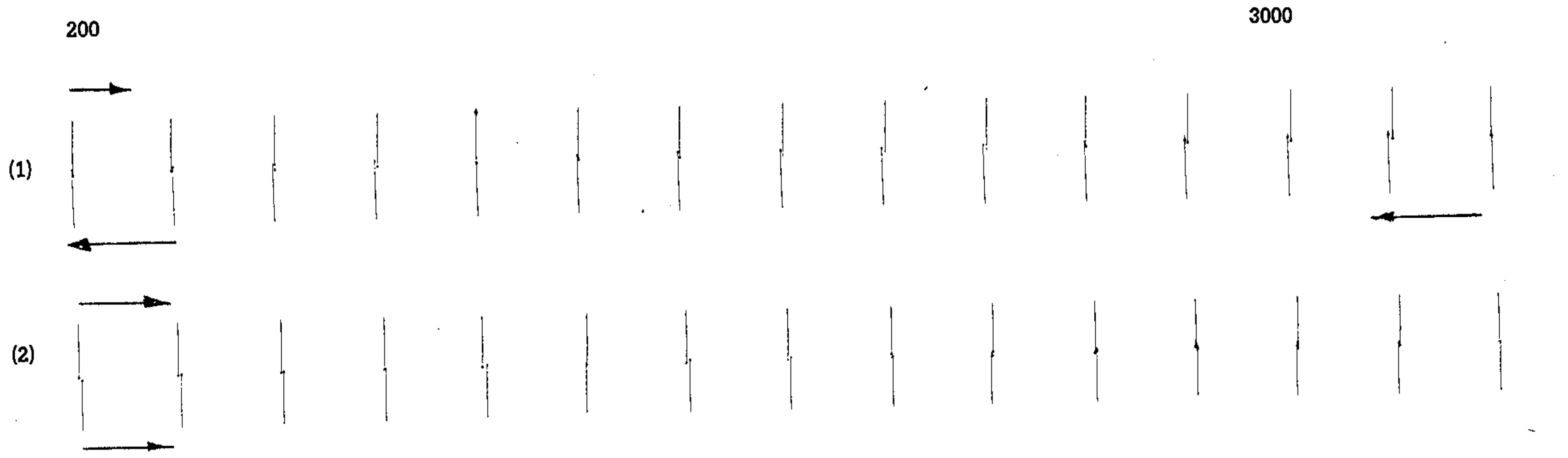
VOLTAGE REFERENCE : 10.00 volt

**ตารางที่ B24**

| Time (Minute) | R (Ohm) | V (Volt) | V Ref (Volt) | Error % |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 250.0 | 4.915 | 10.000 | 0.000 |
| 5 | 250.0 | 4.915 | 10.000 | 0.000 |
| 10 | 250.0 | 4.915 | 10.000 | 0.000 |
| 15 | 250.0 | 4.915 | 10.000 | 0.000 |
| 20 | 250.0 | 4.915 | 10.000 | 0.000 |
| 25 | 250.0 | 4.915 | 10.000 | 0.000 |
| 30 | 250.0 | 4.915 | 10.000 | 0.000 |

**ผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรี**

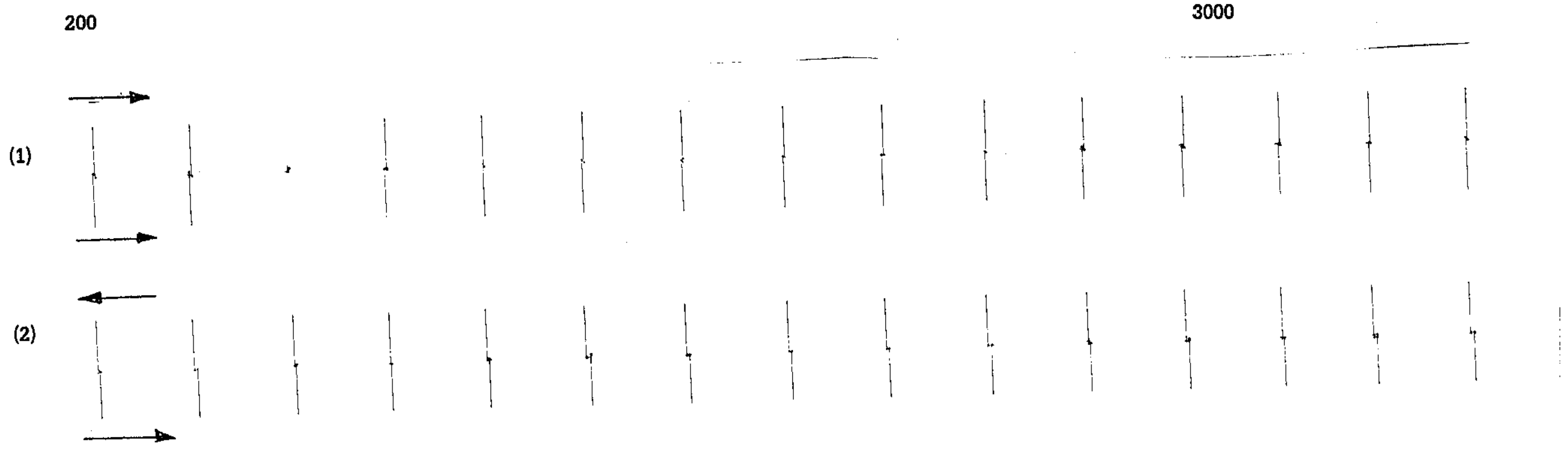
**การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y**




(1) เคลื่อนที่ในทิศทางที่สวนกัน

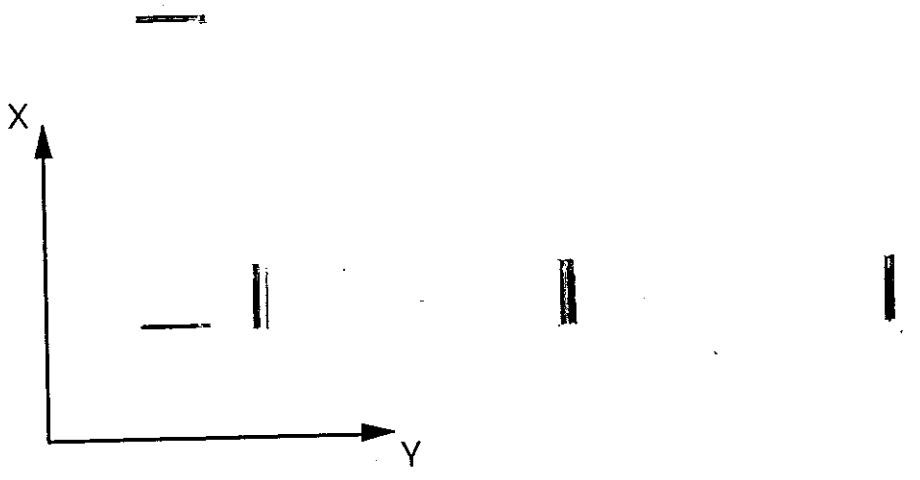
(2) เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน

## ผลการทดสอบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับขั้นความเสรี
## การเคลื่อนที่ในแนวแกน X

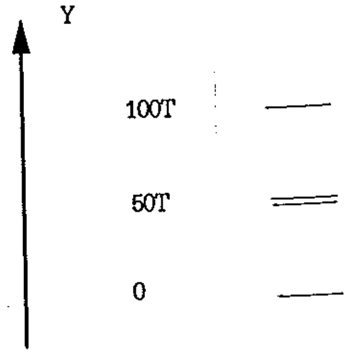



(1) เคลื่อนที่ในทิศทางที่สวนกัน

(2) เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน




ภาพประกอบ ผลการทดสอบแบคเลสของแขนหุ่นยนต์จากการใช้ระบบตรวจรู้ตำแหน่ง

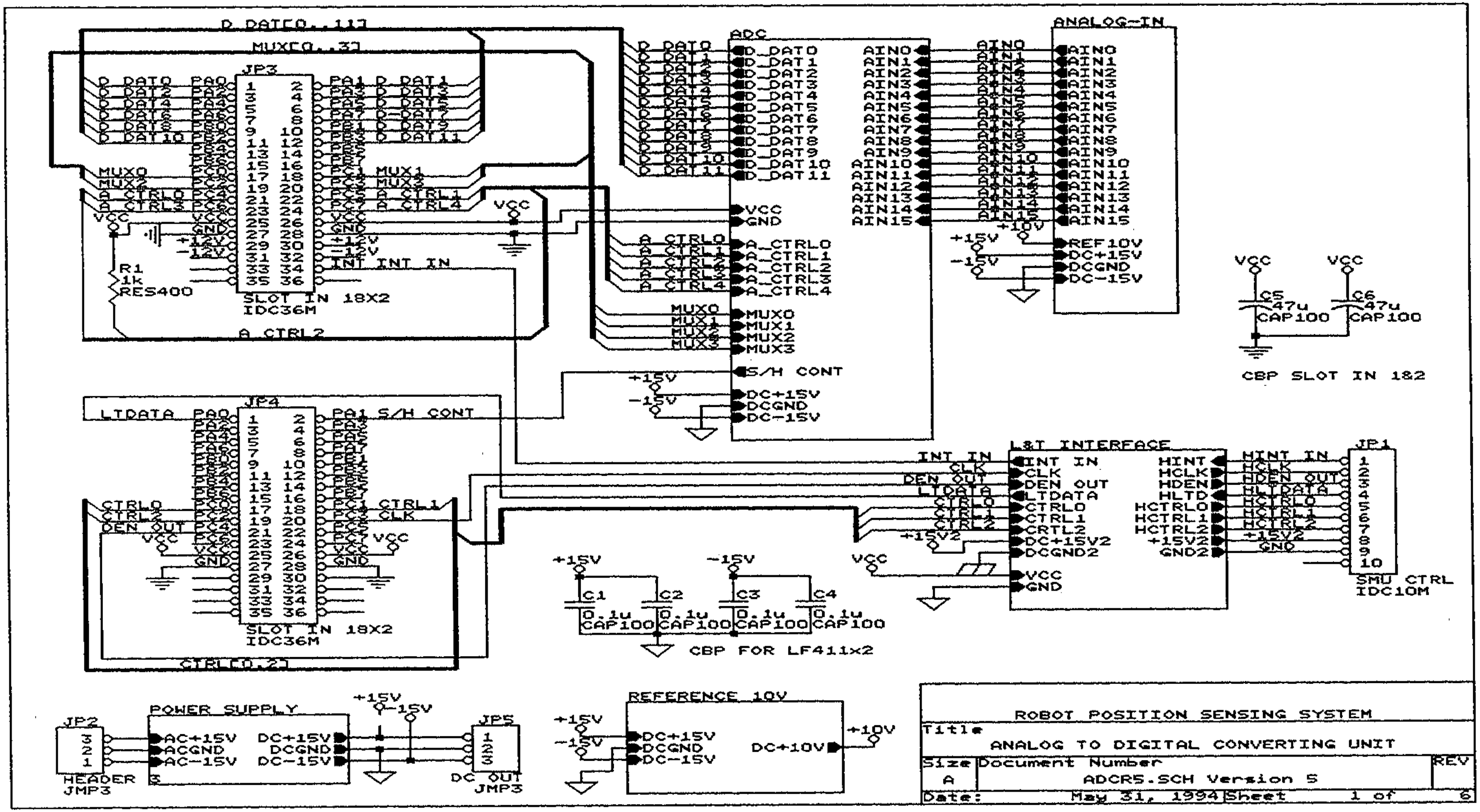


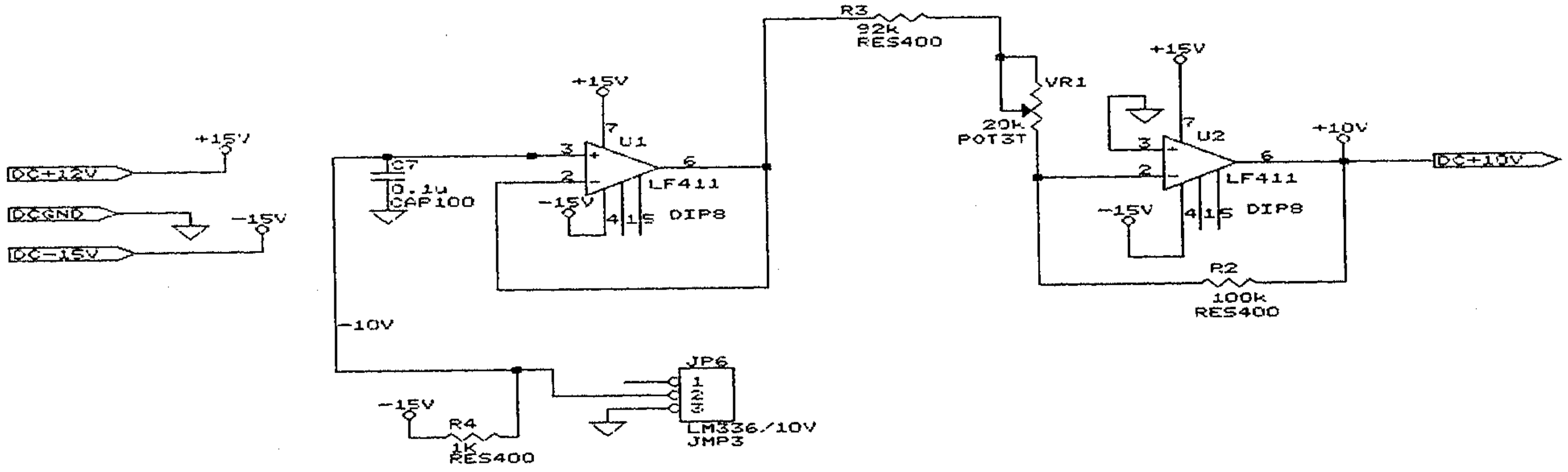

T : จำนวนรอบมอเตอร์

ภาพประกอบ ผลการทดสอบแบคเลสเมื่อวัดจำนวนรอบของมอเตอร์

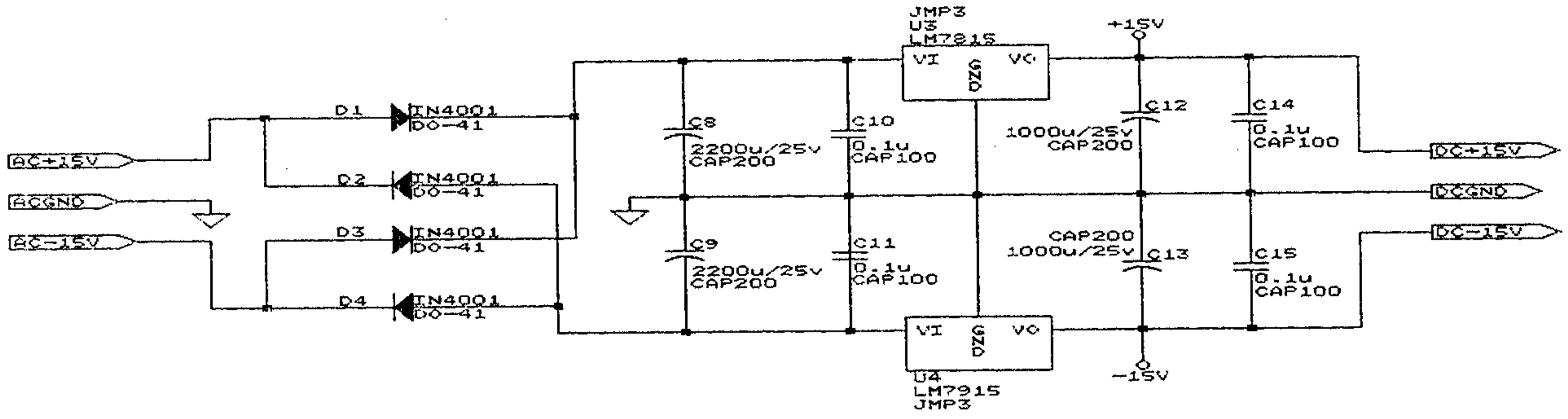
# ภาคผนวก ค

# วงจรไฟฟ้าและรายการอุปกรณ์ของงานวิจัย

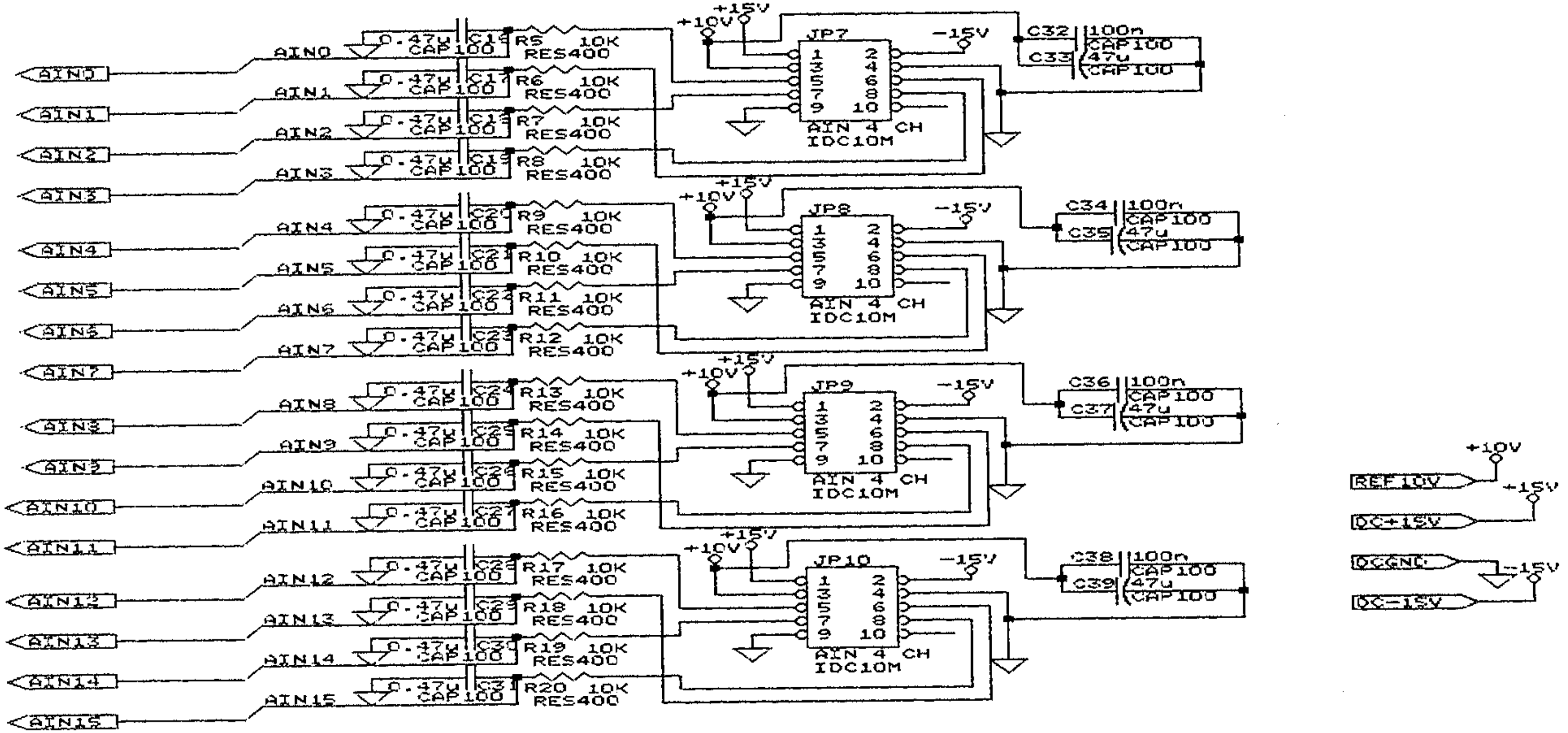

D_DAT[0..11]
MUX[0..3]
JP3
SLOT IN 18X2
IDC36M
R1
1k
RES400
A_CTRL2
ADC
VCC
GND
A_CTRL0
A_CTRL1
A_CTRL2
A_CTRL3
A_CTRL4
MUX0
MUX1
MUX2
MUX3
S/H CONT
DC+15V
DCGND
DC-15V
AIN0
AIN15
ANALOG-IN
REF10V
CBP SLOT IN 1&2
C5
47u
CAP100
C6
47u
CAP100
JP4
LTDATA
S/H CONT
CTRL0
CTRL1
CTRL2
DEN OUT
CLK
INT IN
CTRL[0..2]
L&T INTERFACE
HINT
HCLK
HDEN
HLTD
HCTRL0
HCTRL1
HCTRL2
+15V2
GND2
DC+15V2
DCGND2
JP1
SMU CTRL
IDC10M
C1
C2
C3
C4
0.1u
CAP100
CBP FOR LF411x2
JP2
HEADER 3
JMP3
POWER SUPPLY
AC+15V
ACGND
AC-15V
JP5
DC OUT
JMP3
REFERENCE 10V
DC+10V
ROBOT POSITION SENSING SYSTEM
Title
ANALOG TO DIGITAL CONVERTING UNIT
Size
A
Document Number
ADCR5.SCH Version 5
REV
Date:
May 31, 1994
Sheet 1 of 6




| | | | |
|---|---|---|---|
| ROBOT POSITION SENSING SYSTEM | | | |
| Title | REFERENCE 10 V. ADCU | | |
| Size A | Document Number ADCREF.SCH | | REV |
| Date: | May 30, 1994 | Sheet 2 of 6 | |

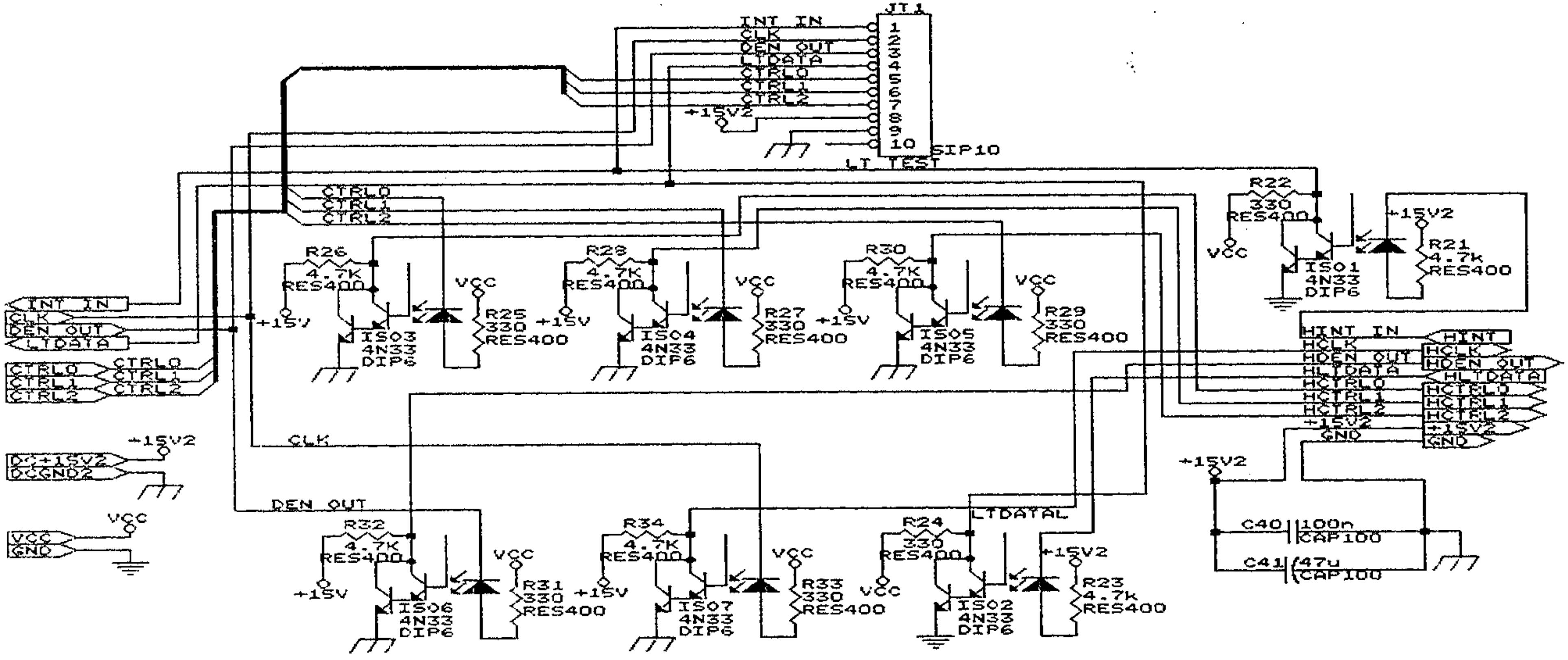



| | | | |
|---|---|---|---|
| ROBOT POSITION SENSING SYSTEM | | | |
| Title: POWER SUPPLY (ADCU) | | | |
| Size: A | Document Number: ADCPOW.SCH | | REV |
| Date: May 30, 1994 | | Sheet 3 of 6 | |



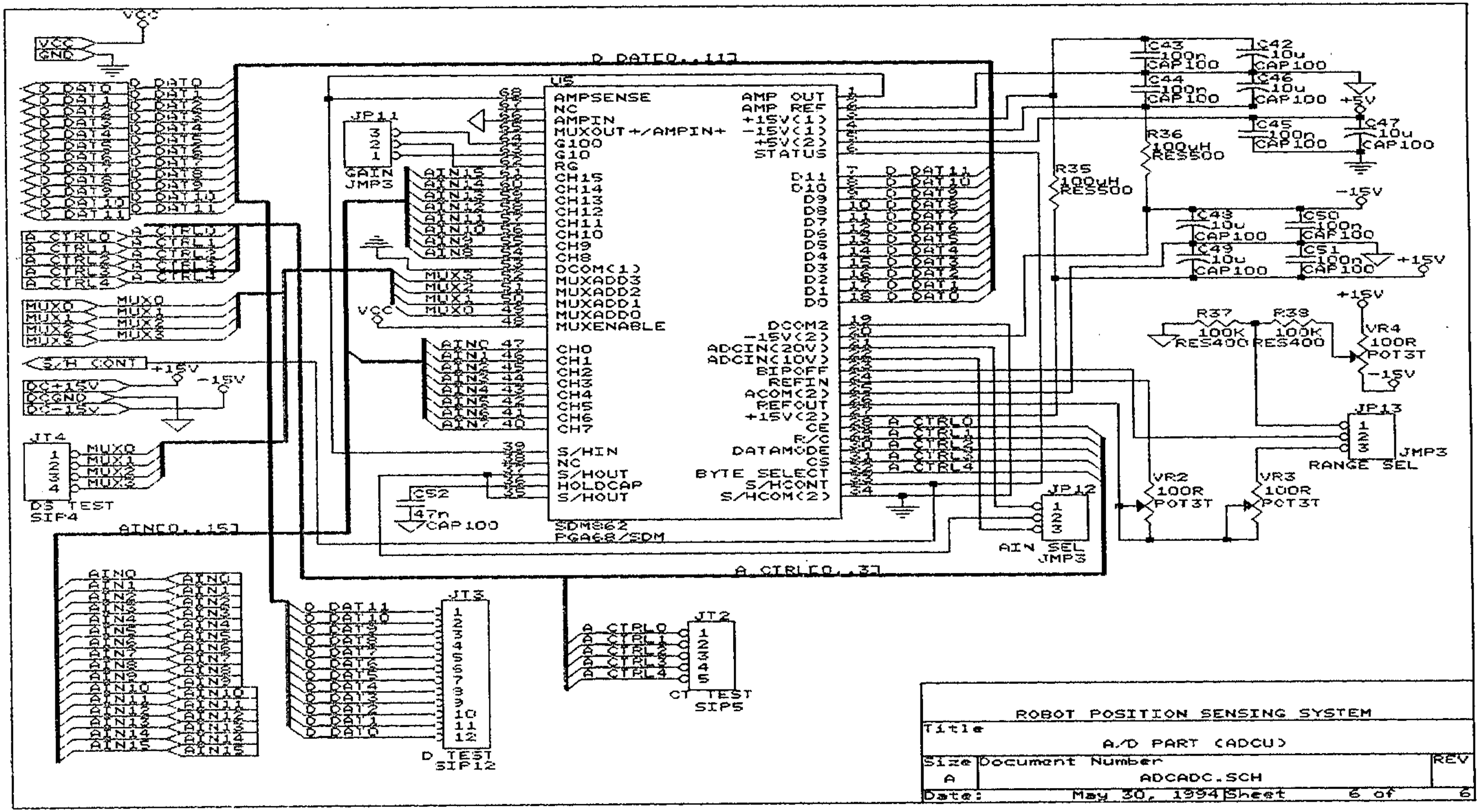

ROBOT POSITION SENSING SYSTEM

| | | | |
|---|---|---|---|
| Title | ANALOG IN (ADCU) | | |
| Size A | Document Number ADCAIN.SCH | | REV |
| Date: May 30, 1994 | Sheet 4 of 6 | | |

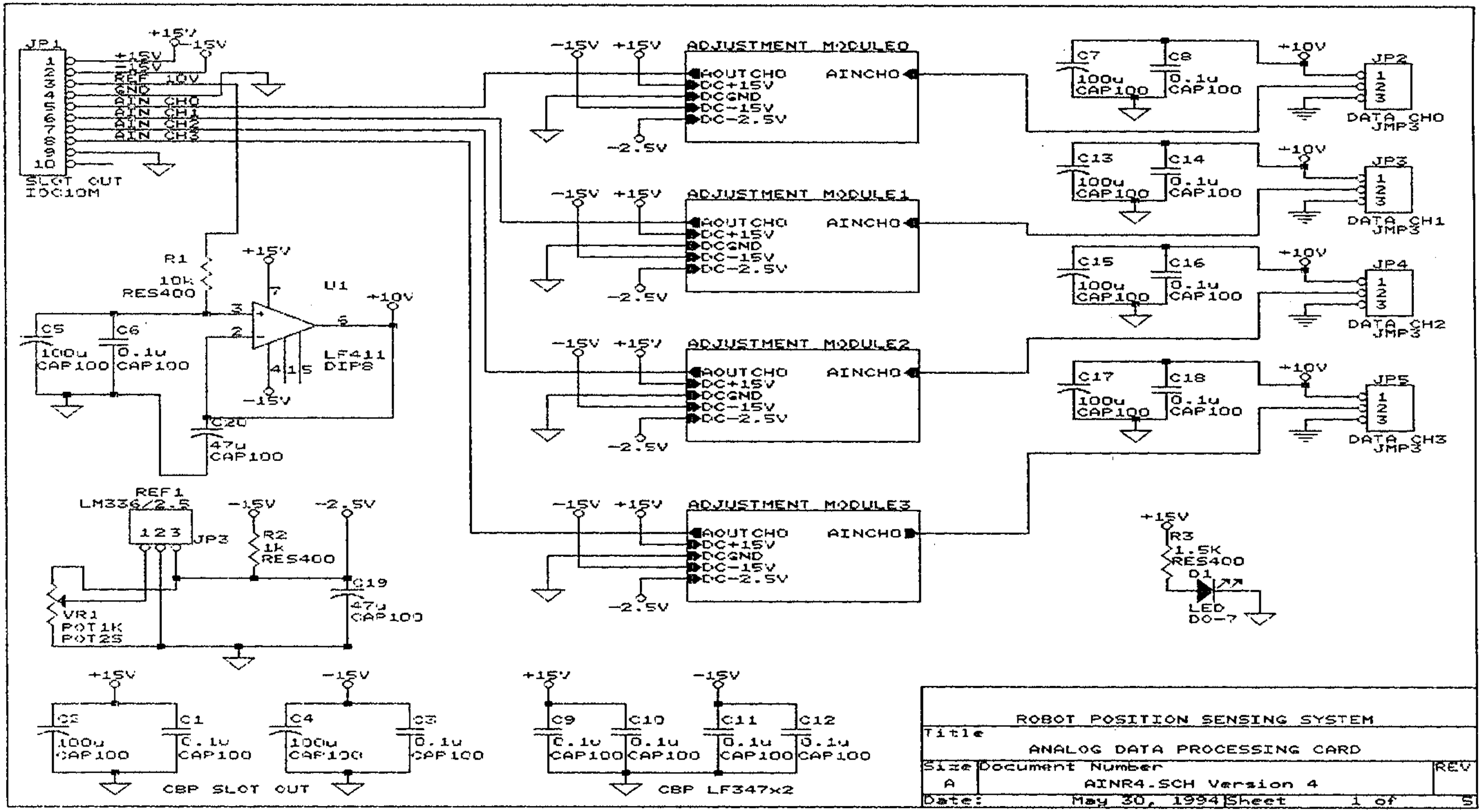


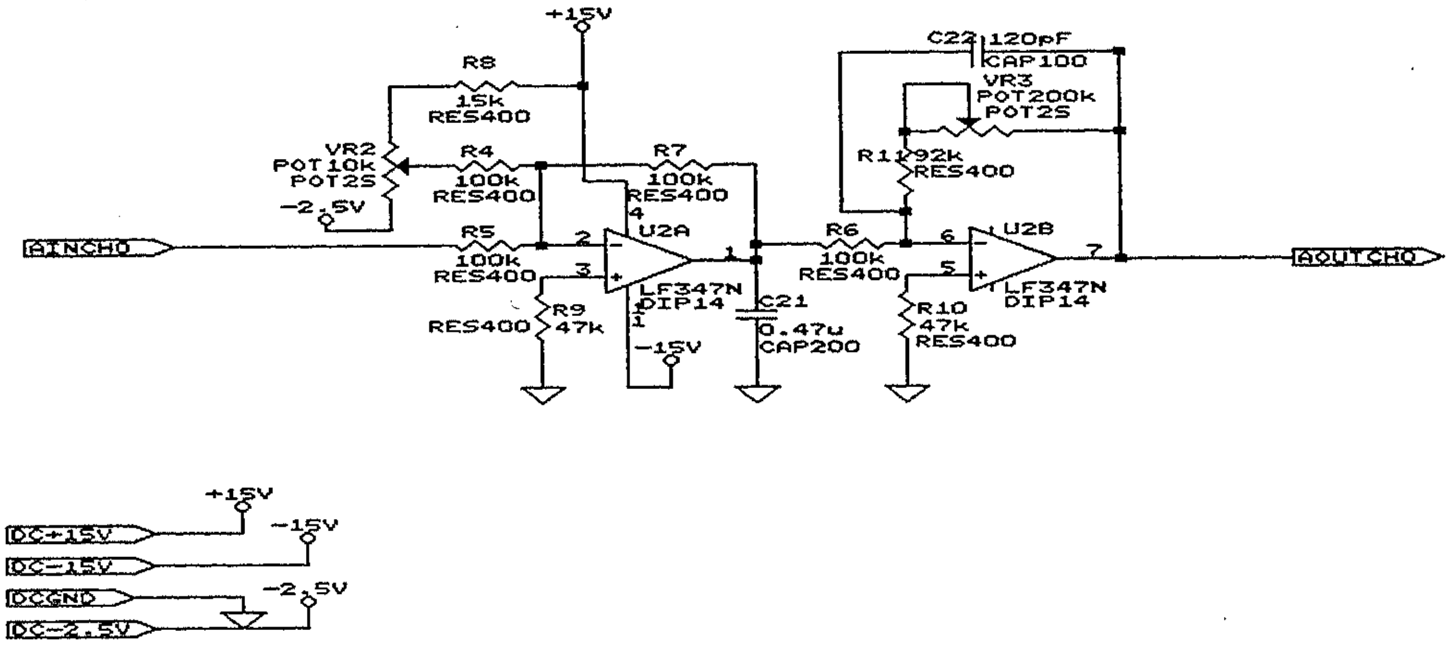

ROBOT POSITION SENSING SYSTEM

| | | |
|---|---|---|
| Title | L&T SENSOR INTERFACE (ADCU) | |
| Size A | Document Number ADCLTI.SCH | REV |
| Date: May 30, 1994 | Sheet 5 of 6 | |

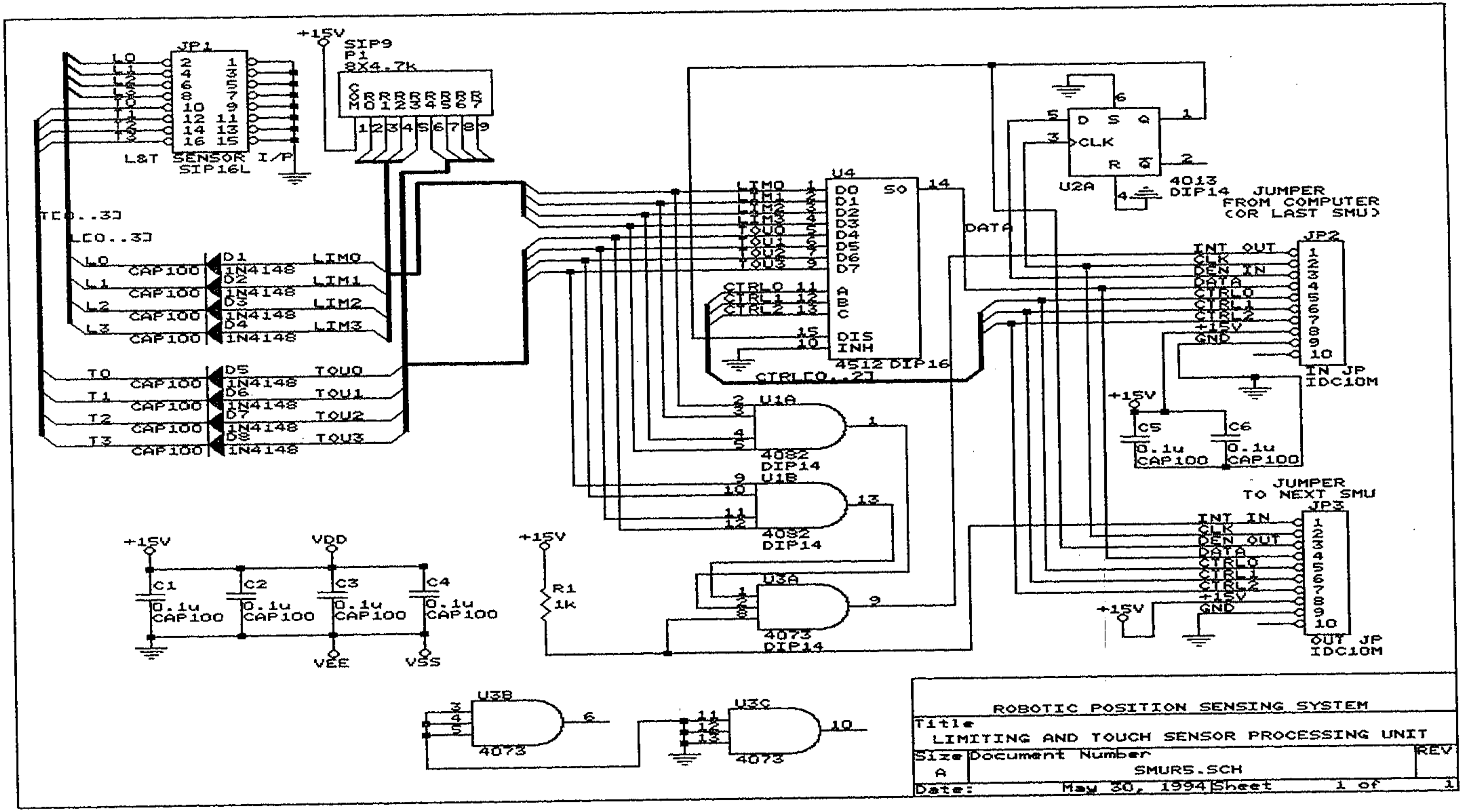


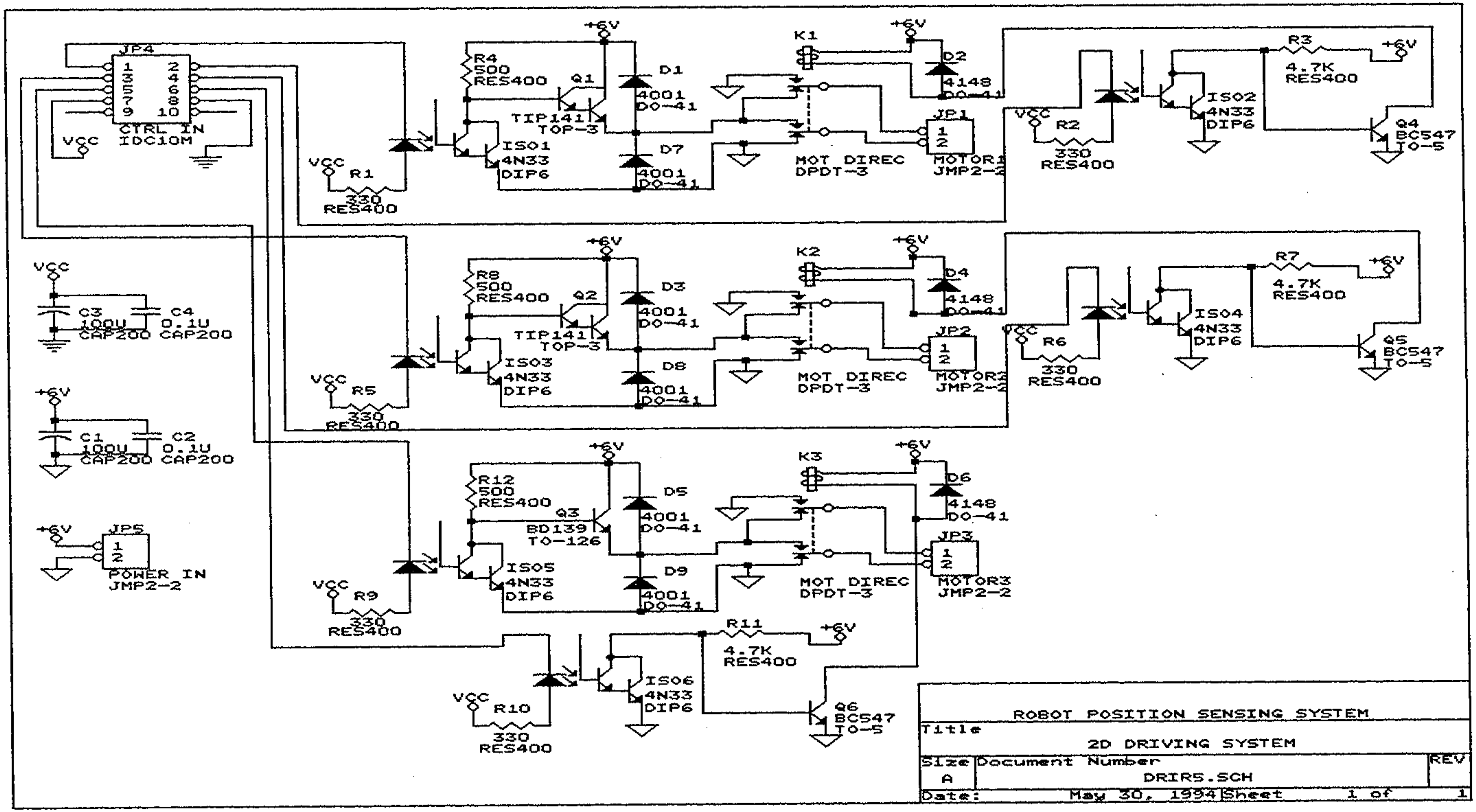

| | | |
|---|---|---|
| ROBOT POSITION SENSING SYSTEM | | |
| Title: A/D PART (ADCU) | | |
| Size: A | Document Number: ADCADC.SCH | REV |
| Date: May 30, 1994 | Sheet 6 of 6 | |


JP1
+15V
-15V
REF 10V
GND
AIN CH0
AIN CH1
AIN CH2
AIN CH3
SLOT OUT
IDC10M
R1
10k
RES400
U1
LF411
DIP8
+10V
C5
100u
CAP100
C6
0.1u
CAP100
C20
47u
CAP100
REF1
LM336/2.5
JP3
R2
1k
RES400
-2.5V
C19
47u
CAP100
VR1
POT1K
POT2S
ADJUSTMENT MODULE0
ADJUSTMENT MODULE1
ADJUSTMENT MODULE2
ADJUSTMENT MODULE3
AOUTCH0
DC+15V
DCGND
DC-15V
DC-2.5V
AINCH0
C7
C8
C13
C14
C15
C16
C17
C18
100u
0.1u
CAP100
JP2
JP3
JP4
JP5
DATA CH0
DATA CH1
DATA CH2
DATA CH3
JMP3
R3
1.5K
RES400
D1
LED
DO-7
C1
C2
C3
C4
C9
C10
C11
C12
CBP SLOT OUT
CBP LF347x2
ROBOT POSITION SENSING SYSTEM
Title
ANALOG DATA PROCESSING CARD
Size
A
Document Number
AINR4.SCH Version 4
REV
Date:
May 30, 1994
Sheet
1 of
5




| | | | |
|---|---|---|---|
| Title | ROBOT POSITION SENSING SYSTEM<br>ADJUSTMENT MODULE (ADPU) | | |
| Size<br>A | Document Number<br>AINADJ0.SCH | | REV |
| Date: | May 30, 1994 | Sheet 2 of 5 | |


ROBOTIC POSITION SENSING SYSTEM
Title
LIMITING AND TOUCH SENSOR PROCESSING UNIT
Size A
Document Number SMUR5.SCH
REV
Date: May 30, 1994
Sheet 1 of 1
JP1
L&T SENSOR I/P
SIP16L
+15V
SIP9
P1
8X4.7k
T[0..3]
L[0..3]
L0
L1
L2
L3
T0
T1
T2
T3
D1
D2
D3
D4
D5
D6
D7
D8
CAP100
1N4148
LIM0
LIM1
LIM2
LIM3
TOU0
TOU1
TOU2
TOU3
U4
4512 DIP16
D0
D1
D2
D3
D4
D5
D6
D7
A
B
C
DIS
INH
SO
DATA
CTRL0
CTRL1
CTRL2
CTRL[0..2]
U2A
4013
DIP14
D
S
Q
CLK
R
JUMPER
FROM COMPUTER
(OR LAST SMU)
JP2
INT OUT
CLK
DEN IN
DATA
CTRL0
CTRL1
CTRL2
+15V
GND
IN JP
IDC10M
C5
C6
0.1u
CAP100
JUMPER
TO NEXT SMU
JP3
INT IN
CLK
DEN OUT
DATA
CTRL0
CTRL1
CTRL2
+15V
GND
OUT JP
IDC10M
U1A
U1B
4082
DIP14
U3A
4073
DIP14
U3B
4073
U3C
4073
R1
1k
C1
C2
C3
C4
0.1u
CAP100
VDD
VEE
VSS


JP4
CTRL IN
IDC10M
VCC
R1
330
RES400
IS01
4N33
DIP6
R4
500
RES400
Q1
TIP141
TOP-3
+6V
D1
4001
DO-41
D7
4001
DO-41
K1
D2
4148
DO-41
MOT DIREC
DPDT-3
JP1
MOTOR1
JMP2-2
R2
330
RES400
IS02
4N33
DIP6
R3
4.7K
RES400
Q4
BC547
TO-5
C3
100U
CAP200
C4
0.1U
CAP200
R5
330
RES400
IS03
4N33
DIP6
R8
500
RES400
Q2
TIP141
TOP-3
D3
4001
DO-41
D8
4001
DO-41
K2
D4
4148
DO-41
MOT DIREC
DPDT-3
JP2
MOTOR2
JMP2-2
R6
330
RES400
IS04
4N33
DIP6
R7
4.7K
RES400
Q5
BC547
TO-5
C1
100U
CAP200
C2
0.1U
CAP200
JP5
POWER IN
JMP2-2
R9
330
RES400
IS05
4N33
DIP6
R12
500
RES400
Q3
BD139
TO-126
D5
4001
DO-41
D9
4001
DO-41
K3
D6
4148
DO-41
MOT DIREC
DPDT-3
JP3
MOTOR3
JMP2-2
R10
330
RES400
IS06
4N33
DIP6
R11
4.7K
RES400
Q6
BC547
TO-5
ROBOT POSITION SENSING SYSTEM
Title
2D DRIVING SYSTEM
Size
A
Document Number
DRIRS.SCH
REV
Date: May 30, 1994
Sheet 1 of 1

# รายการอุปกรณ์

## รายการอุปกรณ์วงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิตอล (ADCU)

| ลำดับ | จำนวน | ระหัสอ้างอิง | อุปกรณ์ |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | C1,C2 | 2200uF/25v |
| 2 | 9 | C3,C4,C7,C34,C35,C36,C37,C50,C51 | 0.1uF |
| 3 | 2 | C5,C6 | 1000uF/25v |
| 4 | 16 | C8,C9,C10,C11,C12,C13,C14,C15,C16,C17,<br>C18,C19,C20,C21,C22,C23 | 0.47uF |
| 5 | 5 | C24,C28,C29,C30,C31 | 10uF |
| 6 | 10 | C25,C26,C27,C32,C33,C38,C40,C42,C44,C46 | 100nF |
| 7 | 7 | C39,C41,C43,C45,C47,C48,C49 | 47uF |
| 8 | 1 | C52 | 47nF |
| 9 | 4 | D1,D2,D3,D4 | IN4001 |
| 10 | 7 | ISO1,ISO2,ISO3,ISO4,ISO5,ISO6,ISO7 | 4N33 |
| 11 | 1 | R2 | 100kΩ |
| 12 | 16 | R3,R4,R5,R6,R7,R8,R9,R10,R11,R12,R13,R14,<br>R15,R16,R17,R18 | 10KΩ |
| 13 | 1 | R1 | 10kΩ |
| 14 | 2 | R19,R20 | 100uH |
| 15 | 1 | R21 | 92kΩ |
| 16 | 2 | R22,R24 | 4.7kΩ |
| 17 | 7 | R23,R25,R26,R28,R30,R32,R34 | 330Ω |
| 18 | 5 | R27,R29,R31,R33,R35 | 4.7KΩ |
| 19 | 1 | R36 | 1KΩ |
| 20 | 1 | R37 | 1kΩ |
| 21 | 2 | R38,R39 | 100KΩ |
| 22 | 2 | U1,U2 | LF411 |
| 23 | 1 | U3 | LM7815 |
| 24 | 1 | U4 | LM7915 |

**รายการอุปกรณ์ (ต่อ)**

| ลำดับ | จำนวน | ระหัสอ้างอิง | อุปกรณ์ |
|---|---|---|---|
| 25 | 1 | U5 | SDM862 |
| 26 | 3 | VR1,VR2,VR4 | 100Ω |
| 27 | 1 | VR3 | 20kΩ |

**รายการอุปกรณ์วงจรจัดการสัญญาณอนาลอก (ADPU)**

| ลำดับ | จำนวน | ระหัสอ้างอิง | อุปกรณ์ |
|---|---|---|---|
| 1 | 4 | C1,C2,C3,C4 | 0.47uF |
| 2 | 11 | C5,C7,C10,C12,C17,C18,C19,C20,C22,C24,C26 | 0.1uF |
| 3 | 7 | C6,C8,C9,C11,C21,C23,C25 | 100uF |
| 4 | 4 | C13,C14,C15,C16 | 120pF |
| 5 | 2 | C27,C28 | 47uF |
| 6 | 1 | D1 | LED |
| 7 | 16 | R1,R2,R3,R4,R5,R6,R7,R8,R9,R10,R11,R12,R13, R14,R15,R16 | 100kΩ |
| 8 | 1 | R17 | 10kΩ |
| 9 | 4 | R18,R19,R20,R21 | 15kΩ |
| 10 | 8 | R22,R23,R24,R25,R27,R28,R29,R30 | 47kΩ |
| 11 | 1 | R26 | 1kΩ |
| 12 | 4 | R31,R32,R33,R34 | 92kΩ |
| 13 | 1 | R35 | 1.5KΩ |
| 14 | 1 | REF1 | LM336/2.5 |
| 15 | 2 | U1,U2 | LF347N |
| 16 | 1 | U3 | LF411 |
| 17 | 4 | VR1,VR3,VR5,VR7 | POT10kΩ |
| 18 | 4 | VR2,VR4,VR6,VR8 | POT200kΩ |
| 19 | 1 | VR9 | POT1KΩ |

**รายการอุปกรณ์วงจรมัลติเพล็กซ์สัญญาณจากตัวตรวจรู้จำกัดการเคลื่อนที่ (LTMU)**

| ลำดับ | จำนวน | ระหัสอ้างอิง | อุปกรณ์ |
|---|---|---|---|
| 1 | 6 | C1,C2,C3,C4,C5,C6 | 0.1uF |
| 2 | 8 | D1,D2,D3,D4,D5,D6,D7,D8 | 1N4148 |
| 3 | 1 | RPACK1 | 4x10kΩ |
| 4 | 1 | R1 | 10kΩ |
| 5 | 1 | U1 | 4082 |
| 6 | 1 | U2 | 4013 |
| 7 | 1 | U3 | 4073 |
| 8 | 1 | U4 | 4512 |

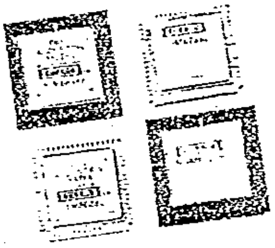
**รายการอุปกรณ์วงจรขับระบบแขนหุ่นยนต์แบบ 2 ระดับชั้นความเสรี**

| ลำดับ | จำนวน | ระหัสอ้างอิง | อุปกรณ์ |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | C1,C3 | 100uF |
| 2 | 2 | C2,C4 | 0.1uF |
| 3 | 6 | D1,D3,D5,D7,D8,D9 | 4001 |
| 4 | 3 | D2,D4,D6 | 4148 |
| 5 | 6 | ISO1,ISO2,ISO3,ISO4,ISO5,ISO6 | 4N33 |
| 11 | 3 | K1,K2,K3 | MOT DIREC |
| 12 | 2 | Q1,Q2 | TIP141 |
| 13 | 1 | Q3 | BD139 |
| 14 | 3 | Q4,Q5,Q6 | BC547 |
| 15 | 6 | R1,R2,R5,R6,R9,R10 | 330Ω |
| 16 | 3 | R3,R7,R11 | 4.7KΩ |
| 17 | 3 | R4,R8,R12 | 500Ω |

# ภาคผนวก ง

# เอกสารข้อมูลอุปกรณ์ไอซี

BURR-BROWN®



# SDM862 SDM863 SDM872 SDM873

## 16 Single Ended/8 Differential Input 12-BIT DATA ACQUISITION SYSTEMS

## FEATURES

- COMPLETE 12-BIT DATA ACQUISITION SYSTEM IN A MINIATURE PACKAGE
- INPUT RANGES SELECTABLE FOR UNIPOLAR OR BIPOLAR OPERATION
- THROUGHPUT RATES:

| | 862/3 | 872/3 |
|---|---|---|
| 8-BIT ACCURACY: | 45kHz | 67kHz |
| 12-BIT ACCURACY: | 33kHz | 50kHz |

- SELECTABLE GAINS OF 1, 10, AND 100
- FULL MICROPROCESSOR COMPATIBLE INTERFACE
- GUARANTEED NO MISSING CODES OVER TEMPERATURE
- SURFACE-MOUNT OR PIN GRID ARRAY PACKAGE OPTIONS
- FULL SPECIFICATION OVER THREE TEMPERATURE RANGES:
  0 TO +70°C
  −25 TO +85°C
  −55 TO +125°C

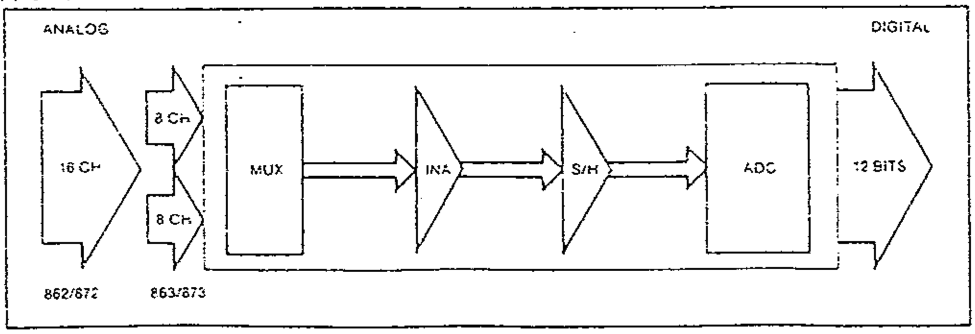
## DESCRIPTION

| | | |
|---|---|---|
| 16 Single-Ended Inputs: | SDM862 | SDM872 |
| 8 Differential Inputs: | SDM863 | SDM873 |
| 33kHz Throughput Rate: | SDM862 | SDM863 |
| 50kHz Throughput Rate: | SDM872 | SDM873 |

The SDM components are complete, pin-compatible, data acquisition systems housed in a hermetically sealed 1"-square leadless chip carrier or a 1.1"-square pin grid array. The small package outlines and low power consumption provide an ideal data acquisition solution when space is at a premium.

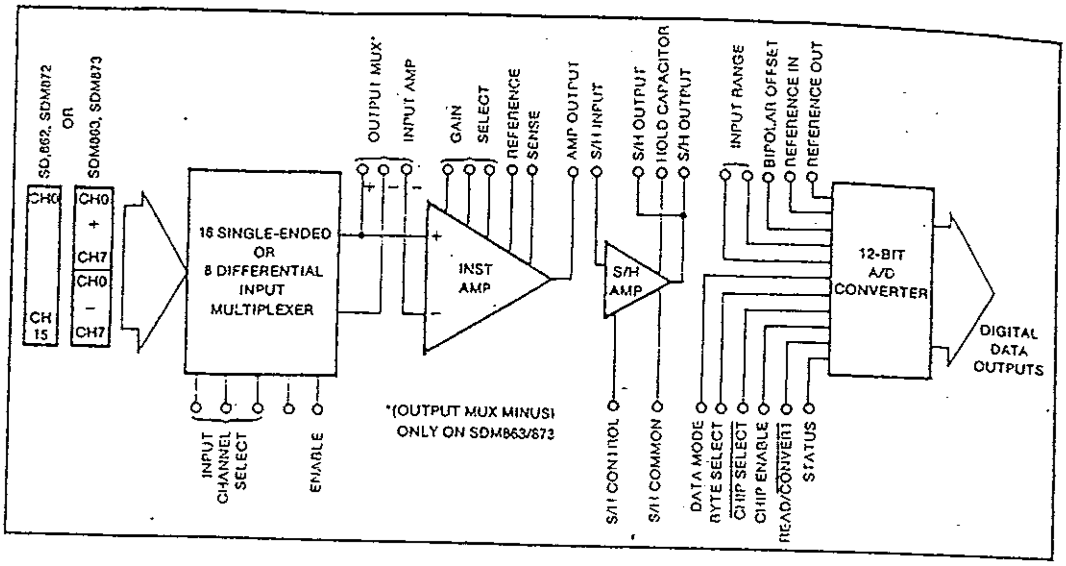
The devices comprise of an input multiplexer, instrumentation amplifier with selectable gains, sample/hold amplifier and A/D converter with microprocessor interface and three-state buffers.

The SDM family will accept unipolar or bipolar voltage inputs in the range 0 to +10V, ±5V and ±10V. For low-level signals, jumper-selectable gains of 10 or 100 can be applied. The number of input channels can be expanded by the addition of multiplexers. System integration is simplified by the microprocessor interface and the facility of the sample/hold amplifier being controlled directly by the A/D converter.




International Airport Industrial Park • P.O. Box 11400 • Tucson, Arizona 85734 • Tel.: (602) 746-1111 • Twx: 910-952-1111 • Cable: BBRCORP • Telex: 66-6491

PDS-686B




# SPECIFICATIONS

## ELECTRICAL

At 25°C, $V_{CC}$ = ±15V, $V_{DD}$ = 5V, external sample/hold capacitor of 4700pF. All grades are burned-in at +125°C for 48 hours min.

| | SDM852/863/872/873 J, A, R | | | SDM862/863/872/873 K, B, S | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MIN | TYP | MAX | MIN | TYP | MAX | UNITS |
| **RESOLUTION** | | | 12 | | | • | BITS |
| **INPUT** | | | | | | | |
| **ANALOG** | | | | | | | |
| Voltage Ranges: Bipolar | | | ±5, ±10 | | | | V |
| Unipolar | | | 0-10 | | | | V |
| Input Impedance: On Channel | | $10^{16}$ | | | • | | Ω |
| Off Channel | | $10^{16}$ | | | • | | Ω |
| Input Capacitance: On Channel | | 20 | | | • | | pF |
| Off Channel | | 20 | | | • | | pF |
| CMRR (20VDC to 1kHz) | 80 | 85 | | • | • | | dB |
| Crosstalk (20Vp-p, 1kHz)[1] | | −85 | −80 | | • | • | dB |
| Feedthrough (at 1kHz)[1] | | −85 | −80 | | • | • | dB |
| Offset (channel to channel) G = 1[2] | | 30 | 100 | | • | • | µV |
| Input Bias Current/Channel | | 1 | 5 | | • | • | nA |
| Input Voltage Range[3] | +10 | +11 | | • | • | | V |
| | −10 | −15 | | • | • | | V |
| **DIGITAL** | | | | | | | |
| MUX Input Channel Select: Logic '1' (2V) | | 5 | 30 | | • | • | µA |
| Logic '0' (0.8V) | | 5 | 30 | | • | • | µA |
| S/H Command: Logic '1' (2V) | | 0.2 | | | • | | nA |
| Logic '0' (0.8V) | | 5 | 30 | | • | • | µA |
| ADC Section: Logic '1' (2.4V) | | | 10 | | | • | µA |
| Logic '0' (0.8V) | | | 10 | | | • | µA |
| **TRANSFER CHARACTERISTICS** | | | | | | | |
| **ACCURACY** | | | | | | | |
| Integral Linearity[4] | | | ±0.024 | | | ±0.012 | %FSR |
| Differential Linearity[4] | | | ±0.024 | | | ±0.012 | %FSR |
| Gain Error[5]: G = 1 | | 0.7 | | | • | | % |
| : G = 100 | | 0.9 | | | • | | % |
| Unipolar Offset Error[5] | | 16 | | | • | | mV |
| Bipolar Offset Error[5] | | 50 | | | • | | mV |
| Noise Error (Measured at S/H Output) G = 1 | | 0.5 | 1 | | • | • | mVp-p |
| Droop Rate | | 50 | 500 | | • | • | µV/ms |
| Temperature Coefficients: | | | | | | | |
| Unipolar Offset | | | 20 | | | 15 | ppm of FSR/°C |
| Bipolar Offset | | | 30 | | | 25 | ppm of FSR/°C |
| Full-scale Calibration | | | 60 | | | 35 | ppm of FSR/°C |

## SPECIFICATIONS

### ELECTRICAL

At 25°C, $V_{CC}$ = ±15V, $V_{DD}$ = 5V, external sample/hold capacitor of 4700pF

| | SDM862/863/872/873 J, A, R | | | SDM862/863/872/873 K, B, S | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MIN | TYP | MAX | MIN | TYP | MAX | UNITS |
| **SYSTEM TIMINGS** | | | | | | | |
| ADC Conversion Time: SDM862/SDM863 | 15 | 20 | 25 | * | * | * | µs |
| SDM872/SDM873 | 9 | 12 | 15 | * | * | * | µs |
| S/H Aperture Delay | | 50 | | | * | | ns |
| S/H Aperture Uncertainty | | 2 | | | * | | ns |
| **TIMING** | | | | | | | |
| Acquisition Time (to 0.01% of final value for full scale step) | | 5 | | | * | | µs |
| Throughput (Serial Mode) | | | | | | | |
| SDM862/SDM863 | | | 22 | | | * | kHz |
| SDM872/SDM873 | | | 26 | | | * | kHz |
| (Overlap Mode): | | | | | | | |
| SDM862/SDM863 | | | 33 | | | * | kHz |
| SDM872/SDM873 | | | 50 | | | * | kHz |
| **MULTIPLEXER**(4) | | | | | | | |
| Switching time (between channels) | | −1.5 | | | * | | µS |
| Settling time (10V step to 0.02%) | | 2.5 | | | * | | µS |
| Enable time "ON" | | [illegible] | 2 | | * | * | µS |
| "OFF" | | 0.25 | 0.5 | | * | * | µS |
| **INSTRUMENTATION AMPLIFIER**(4) | | | | | | | |
| Settling time (20V step to 0.01%) | | | | | | | |
| G = 1 | | 5 | 12.5 | | * | * | µS |
| G = 10 | | 3 | 7.5 | | * | * | µS |
| G = 100 | | 4 | 7.5 | | * | * | µS |
| Slew rate | 12 | 17 | | * | * | * | V/µS |
| **S/H AMPLIFIER**(4) | | | | | | | |
| Acquisition time (10V step to 0.01%) | | 5 | | | * | | µS |
| Aperture delay | | 50 | | | * | | nS |
| Hold mode settling time | | 1.5 | | | * | | µS |
| Slew rate | | 10 | | | * | | V/µS |
| **OUTPUT** | | | | | | | |
| **DIGITAL DATA** | | | | | | | |
| Output Codes: Unipolar | | | Unipolar Straight Binary (USB) | | | | |
| Bipolar | | | Bipolar Offset Binary (BOB) | | | | |
| Logic Levels: Logic 0 (sink = 1.6mA) | | | +0.4 | | | * | V |
| Logic 1 (source = 500µA) | +2.4 | | | * | | | V |
| Leakage (Data Bits Only) High-Z State | −5 | 0.1 | +5 | * | * | * | µA |
| **POWER SUPPLY REQUIREMENTS** | | | | | | | |
| Rated Voltage: Analog (±Vcc) | 14.25 | 15 | 15.75 | * | * | * | VDC |
| Digital (VDD) | 4.75 | 5 | 5.25 | * | * | * | VDC |
| Supply Drain: +15V | | 26 | 40 | | * | * | mA |
| −15V | | 36 | 45 | | * | * | mA |
| +5V | | 8 | 15 | | * | * | mA |
| Power Dissipation | | [illegible] | [illegible] | | * | * | W |
| **TEMPERATURE RANGE** | | | | | | | |
| Operating Temperature Range | | | | | | | |
| JH, KH/JL, KL | 0 | | 70 | * | | * | °C |
| AH, BH/AL, BL | −25 | | 85 | * | | * | °C |
| RH, SH/RL, SL | −55 | | 125 | * | | * | °C |
| Storage Temperature Range | −65 | | 150 | * | | * | °C |

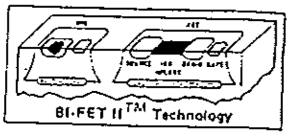
* Specification same as SDM862/863/872/873J, A, R grades

NOTES. (1) Measured at the sample and hold output. (2) Measured with all input channels grounded. (3) The range of voltage on any input with respect to common over which accuracy and leakage current is guaranteed. (4) Applicable over the operating temperature range. NO MISSING CODES GUARANTEED OVER TEMPERATURE RANGE. (5) Adjustable to zero using external potentiometer or select-on-test resistor. (6) Specifications are at +25°C and measured at 50% level of transition.

DATA ACQUISITION COMPONENTS

SDM862/863/872/873

National Semiconductor




# LF411A/LF411 Low Offset, Low Drift JFET Input Operational Amplifier

## General Description

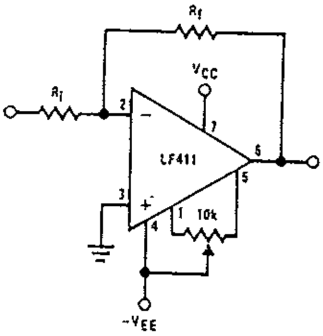
These devices are low cost, high speed, JFET input operational amplifiers with very low input offset voltage and guaranteed input offset voltage drift. They require low supply current yet maintain a large gain bandwidth product and fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF411 is pin compatible with the standard LM741 allowing designers to immediately upgrade the overall performance of existing designs.

These amplifiers may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample and hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage and drift, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth.

## Features

- Internally trimmed offset voltage 0.5 mV(max)
- Input offset voltage drift 10 μV/°C(max)
- Low input bias current 50 pA
- Low input noise current 0.01 pA/$\sqrt{Hz}$
- Wide gain bandwidth 3 MHz(min)
- High slew rate 10V/μs(min)
- Low supply current 1.8 mA
- High input impedance $10^{12}\Omega$
- Low total harmonic distortion $A_V=10$, $R_L=10k$, $V_O=20$ Vp-p, BW=20 Hz–20 kHz <0.02%
- Low 1/f noise corner 50 Hz
- Fast settling time to 0.01% 2 μs

## Typical Connection




TL/H/5655-1

## Ordering Information

LF411XYZ

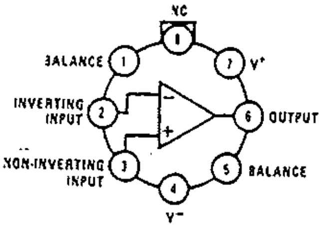
X indicates electrical grade

Y indicates temperature range
"M" for military
"C" for commercial

Z indicates package type
"H" or "N"

## Connection Diagrams

**Metal Can Package**



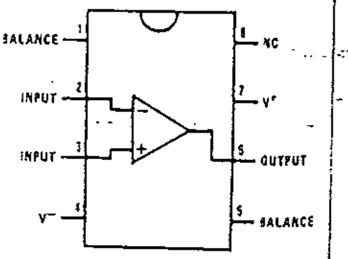

TL/H/5655-5

Top View

Note: Pin 4 connected to case.

Order Number LF411AMH, LF411MH, LF411ACH or LF411CH
See NS Package Number H08B

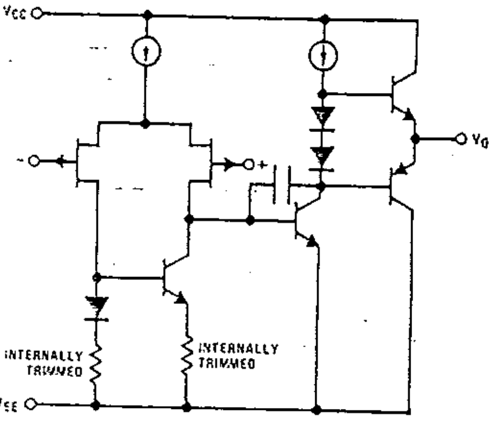
**Dual-In-Line Package**




TL/H/5655-7

Top View
Order Number
LF411ACN or LF411CN
See NS Package Number N08E

## Simplified Schematic




TL/H/5655-6

## Absolute Maximum Ratings

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications. (Note 8)

| | LF411A | LF411 |
|---|---|---|
| Supply Voltage | ±22V | ±18V |
| Differential Input Voltage | ±38V | ±30V |
| Input Voltage Range (Note 1) | ±19V | ±15V |
| Output Short Circuit Duration | Continuous | Continuous |

| | H Package | N Package |
|---|---|---|
| Power Dissipation (Notes 2 and 9) | 670 mW | 670 mW |
| $T_j$max | 150°C | 115°C |
| $\theta_jA$ | 162°C/W (Still Air) 65°C/W (400 LF/min Air Flow) | 120°C/W |
| $\theta_jC$ | 20°C/W | |
| Operating Temp. Range | (Note 3) | (Note 3) |
| Storage Temp. Range | $-65°C \le T_A \le 150°C$ | $-65°C \le T_A \le 150°C$ |
| Lead Temp. (Soldering, 10 sec.) | 260°C | 260°C |

ESD rating to be determined.

## DC Electrical Characteristics (Note 4)

| Symbol | Parameter | Conditions | | LF411A Min | LF411A Typ | LF411A Max | LF411 Min | LF411 Typ | LF411 Max | Units |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $V_{OS}$ | Input Offset Voltage | $R_S = 10\ k\Omega$, $T_A = 25°C$ | | | 0.3 | 0.5 | | 0.8 | 2.0 | mV |
| $\Delta V_{OS}/\Delta T$ | Average TC of Input Offset Voltage | $R_S = 10\ k\Omega$ (Note 5) | | | 7 | 10 | | 7 | 20 (Note 5) | μV/°C |
| $I_{OS}$ | Input Offset Current | $V_S = \pm 15V$ (Notes 4, 6) | $T_j = 25°C$ | | 25 | 100 | | 25 | 100 | pA |
| | | | $T_j = 70°C$ | | | 2 | | | 2 | nA |
| | | | $T_j = 125°C$ | | | 25 | | | 25 | nA |
| $I_B$ | Input Bias Current | $V_S = \pm 15V$ (Notes 4, 6) | $T_j = 25°C$ | | 50 | 200 | | 50 | 200 | pA |
| | | | $T_j = 70°C$ | | | 4 | | | 4 | nA |
| | | | $T_j = 125°C$ | | | 50 | | | 50 | nA |
| $R_{IN}$ | Input Resistance | $T_j = 25°C$ | | | $10^{12}$ | | | $10^{12}$ | | Ω |
| $A_{VOL}$ | Large Signal Voltage Gain | $V_S = \pm 15V$, $V_O = \pm 10V$, $R_L = 2k$, $T_A = 25°C$ | | 50 | 200 | | 25 | 200 | | V/mV |
| | | Over Temperature | | 25 | 200 | | 15 | 200 | | V/mV |
| $V_O$ | Output Voltage Swing | $V_S = \pm 15V$, $R_L = 10k$ | | ±12 | ±13.5 | | ±12 | ±13.5 | | V |
| $V_{CM}$ | Input Common-Mode Voltage Range | | | ±16 | +19.5 | | ±11 | +14.5 | | V |
| | | | | | −16.5 | | | −11.5 | | V |
| CMRR | Common-Mode Rejection Ratio | $R_S \le 10k$ | | 80 | 100 | | 70 | 100 | | dB |
| PSRR | Supply Voltage Rejection Ratio | (Note 7) | | 80 | 100 | | 70 | 100 | | dB |
| $I_S$ | Supply Current | | | | 1.8 | 2.8 | | 1.8 | 3.4 | mA |

## AC Electrical Characteristics (Note 4)

| Symbol | Parameter | Conditions | LF411A Min | LF411A Typ | LF411A Max | LF411 Min | LF411 Typ | LF411 Max | Units |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SR | Slew Rate | $V_S = \pm 15V$, $T_A = 25°C$ | 10 | 15 | | 8 | 15 | | V/μs |
| GBW | Gain-Bandwidth Product | $V_S = \pm 15V$, $T_A = 25°C$ | 3 | 4 | | 2.7 | 4 | | MHz |
| $e_n$ | Equivalent Input Noise Voltage | $T_A = 25°C$, $R_S = 100\Omega$, $f = 1\ kHz$ | | 25 | | | 25 | | $nV/\sqrt{Hz}$ |
| $i_n$ | Equivalent Input Noise Current | $T_A = 25°C$, $f = 1\ kHz$ | | 0.01 | | | 0.01 | | $pA/\sqrt{Hz}$ |

## ประวัติผู้เขียน

**ชื่อ** นายดำรงค์ เคล้าดี

**วัน เดือน ปีเกิด** 5 มิถุนายน 2505

**วุฒิการศึกษา**

| วุฒิ | ชื่อสถาบัน | ปีที่สำเร็จการศึกษา |
|---|---|---|
| วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต | คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ | 2531 |

**ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน**

อาจารย์ ระดับ 4 ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา