การลดสัญญาณรบกวนจากโมดูลวัดความเร่ง ในการควบคุมขาเทียมอัตโนมัติ

Noise reduction of the accelerometer signal in controlling automatic prosthetic leg

พิสุทธิ์ เต็มจิตต์ภักดี
อุกฤษฎ บุญปกครอง

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)
ภาควิชาเทคโนโลยีระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การลดสัญญาณรบกวนจากโมดูลวัดความเร่ง ในการควบคุมขาเทียมอัตโนมัติ

Noise reduction of the accelerometer signal in controlling automatic prosthetic leg

T147133

พิสุทธิ์ เต็มจิตต์ภักดี

อุกฤษฎ บุญปกครอง

.b.12849945

.i.

เลขหมู่......

เลขทะเบียน 147133

วัน.เดือน.ปี 3 ก.ค. 2560

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม

หลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)

ภาควิชาเทคโนโลยีระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Noise reduction of the accelerometer signal in controlling automatic prosthetic leg

Pisut Temjitpkdee

Ukrit Boonpokkrong

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING
(MANUFACTURING SYSTEM ENGINEERING)
DEPARTMENT OF MANUFACTURING SYSTEM TECHNOLOGY
COLLEGE OF ADVANCED MANUFACTURING INNOVATION
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การลดสัญญาณรบกวนจากโมดูลวัดความเร่งในการควบคุมขาเทียมอัตโนมัติ Noise reduction of the accelerometer signal in controlling automatic prosthetic leg
ชื่อนักศึกษา	นาย พิสุทธิ์ เต็มจิตต์ภักดี รหัสนักศึกษา 55120026 นาย อุกฤษฎ บุญปกครอง รหัสนักศึกษา 55120045
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)
ภาควิชา	เทคโนโลยีระบบการผลิต
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฉัตรพล ภคศิริ

วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงงานพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต) ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.เลิศศักดิ์ เลขวัต ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ชานนท์ วริสาร กรรมการ	
ดร.วิไลลักษณ์ ศิริวงศ์รังสรร กรรมการ	
ดร.ฉัตรพล ภคศิริ อาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของวิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การลดสัญญาณรบกวนจากโมดูลวัดความเร่งในการควบคุมขาเทียมอัตโนมัติ Noise reduction of the accelerometer signal in controlling automatic prosthetic leg
ชื่อนักศึกษา	นาย พิสุทธิ์ เต็มจิตต์ภักดี รหัสนักศึกษา 55120026 นาย อุกฤษฎ บุญปกครอง รหัสนักศึกษา 55120045
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมระบบการผลิต)
ภาควิชา	เทคโนโลยีระบบการผลิต
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ฉัตรพล ภคศิริ

บทคัดย่อ

embedded system หรือ ระบบสมองกลฝังตัว สามารถนำไปพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานในต่างๆได้หลายด้าน ทั้งด้านวิศวกรรมและการแพทย์ คณะผู้จัดทำจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการใช้สมองกลฝังตัว นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาและออกแบบการเคลื่อนไหวของการเดินของมนุษย์พื่อใช้กับ ผู้ป่วยที่มีความพิการทางขาข้างเดียว ตั้งแต่ช่วงต้นขาลงไป โดยระบบที่ใช้จะประกอบด้วยโมดูลวัดความเร่ง, ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ เซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งเซอร์โวมอเตอร์จะทำหน้าที่ เสมือนข้อต่อหัวเข่าและข้อต่อเท้า และโมดูลวัดความเร่งนำมาประยุกต์ใช้ในส่วนของการวัดองศาเพื่อใช้ในการควบคุมขาเทียมแบบอัตโนมัติ เพื่อที่จะทำให้การเคลื่อนที่ของขาเทียมเป็นไปอย่างราบเรียบและเป็นไปตามัฏจักรการเดินของมนุษย์จำเป็นจะต้องควบคุมสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นของโมดูลวัดความเร่ง

ในโครงงานนี้ได้ศึกษาการลดสัญญาณรบกวนจากการใช้ low pass filter และ Kalman filter จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า Kalman filter มีความสามาถในการลดสัญญาณรบกวนเมื่อมีการเคลื่อนที่แบบ static ส่วนการเคลื่อนที่แบบ dynamic นั้น low pass filter จะมีความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนที่ดีกว่า

คำสำคัญ ระบบสมองกลแบบฝังตัว,ขาเทียมอัตโนมัติ, โมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน, เซอร์โวมอเตอร์, วัฏจักรการเดิน, Low pass filter, Kalman filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Noise reduction of the accelerometer signal in controlling automatic prosthetic leg
Students	Mr.Pisut Temjitpakdee Student ID 55120026
	Mr.Ukrit Boonpokkrong Student ID 55120045
Degree	Bachelor of Engineering (Manufacturing System Engineering)
Department	Manufacturing System Technology
Faculty	College of Advanced Manufacturing Innovation
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2015
Advisor	Dr.Chatrpol Pakasiri

Abstract

Embedded system have been applied to various fields, such as enginerring field, biomedical field, rehabilitation therapy fields and so on. For example embedded system can be developed to control prosthetic leg movement. In order to move a prosthetic leg based on a gait cycle. A control system consists of accelerometer, microcontroller and servo motor are used. The servo motor are served as the knee joint and ankle joint of the prosthetic leg. The accelerometer is adopt as the angle sensor for controlling movement of the servo motor. In order to make the movement angle as smooth as possible and based on gait cycle, we have to control the noise signal from the accelerometer.

In this project, we study a low pass filter and Kalman filter to reduce the signal noise. The experiment shows that the Kalman filter has an advantage in reducing the noise signal over the low pass filter when the movement is short and static. However, for a dynamic movement, the lowpass filter yields a better result.

Keyword: embedded system, automatic prosthetic leg, gait cycle, accelerometer, servo motor, low pass filter, Kalman filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ดร.ฉัตรพล ภคศิริ และ ดร. อรรถสิทธิ์ อารยางกูร อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ รวมถึง ดร. วรวุฒิ มรรคเจริญ ซึ่งบุคคลเหล่านี้ ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงานอีกด้วย นอกจากนี้ ขอบพระคุณ พี่ๆ น้องๆ ในกลุ่ม Embedded System Research Group ที่คอยให้กำลังใจและคำปรึกษาเพิ่มเติม

สุดท้ายนี้ ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัว ซึ่งเปิดโอกาสให้ได้รับการศึกษาเล่าเรียน ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

พิสุทธิ์ เต็มจิตต์ภักดี

อุกฤษฎ บุญปกครอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...... II

กิตติกรรมประกาศ...... III

สารบัญ...... IV

สารบัญตาราง...... VI

สารบัญรูปภาพ...... VIII

บทที่ 1 บทนำ...... 1

1.1 ความสำคัญและที่มา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

1.3 ขอบเขตของการศึกษา 1

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน 2

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 การเดินของมนุษย์...... 3

2.2 วัฏจักรการเดินของมนุษย์...... 9

2.3 กายอุปกรณ์และวิวัฒนาการของขาเทียม 11

2.4 Arduino 30

2.5 MEMSIC2125 โมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน...... 43

2.6 Servo motor...... 47

2.7 Kalman filter...... 57

2.8 Low pass filter...... 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน 62

3.1 ออกแบบชุดเก็บข้อมูลจากโมดูลตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน 62

3.2 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อปรับค่า filter 68

3.3 ออกแบบสเตชั่น 71

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน 78

4.1 การเก็บข้อมูลองศาจากชุดเก็บข้อมูล 78

4.2 การนำข้อมูลที่ได้ผ่านกระบวนการ filter 82

4.3 การประยุกต์ใช้ filter เข้ากับสเตชั่นทดสอบการเดินของมนุษย์ 96

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 100

5.1 สรุปผล 100

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน 101

5.3 แนวทางการแก้ไขปัญหา 101

5.4 แนวทางการพัฒนา 101

เอกสารอ้างอิง 102

ภาคผนวก 104

ประวัติผู้จัดทำ 152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 1 2

ตารางที่ 1.2 ตารางการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 2 2

ตารางที่ 2.1 จำนวนบิตของแต่ละสมาชิกในแฟรม 35

ตารางที่ 2.2 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์ UCSRA แต่ละบิต 39

ตารางที่ 2.3 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์ UCSRB แต่ละบิต 40

ตารางที่ 2.4 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์ UCSRC แต่ละบิต 41

ตารางที่ 2.5 แสดงสถานะของบิตที่ 6 และ 7 41

ตารางที่ 2.6 แสดงสถานะของบิตที่ 4 และ 5 41

ตารางที่ 2.7 แสดงสถานะของบิตที่ 3 42

ตารางที่ 2.8 แสดงสถานะของบิตที่ 1 และ 2 42

ตารางที่ 2.9 แสดงสถานะของบิตที่ 0 42

ตารางที่ 2.10 ตารางแสดงค่า g ที่เอาต์พุต Xout หรือ Yout ของโมดูล MXD2125 ที่มุมเอียงค่าต่างๆ 46

ตารางที่ 2.11 ตารางแสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับความลาดเอียงของโมดูล MXD2125 47

ตารางที่ 3.1 แสดงองศาของเซอร์โวมอเตอร์ในข้อต่อต่างๆในสถานะ Stance Phase 76

ตารางที่ 3.2 แสดงองศาของเซอร์โวมอเตอร์ในข้อต่อต่างๆในสถานะ Swing Phase 77

ตารางที่ 4.1 ตารางสรุปค่า Raw Data ที่ 80 องศา 79

ตารางที่ 4.2 ตารางสรุปค่า Raw Data ที่ 90 องศา 80

ตารางที่ 4.3 ตารางสรุปค่า Raw Data ที่ 120 องศา 81

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา 83

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา 84

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา 85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้า

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา 88

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา 89

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา 90

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเดินปกติของมนุษย์ 3

รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเดินช่วง Swing Phase 5

รูปที่ 2.3 การติดตั้งการทดลองของงานวิจัยเรื่อง Foot gait Analysis and Simulation.......... 7

รูปที่ 2.4 การติดตั้งการทดลองของงานวิจัยเรื่อง Plug in Gait Marker Placements............. 7

รูปที่ 2.5 การติดตั้งการทดลองของงานวิจัยเรื่อง Skeletal Parameter

Estimation from Optical Motion Capture Data 8

รูปที่ 2.6 ลำดับทั้งหมดของการเดินของมนุษย์ 9

รูปที่ 2.7 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(1) 16

รูปที่ 2.8 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(2) 17

รูปที่ 2.9 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(3) 23

รูปที่ 2.10 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(4) 23

รูปที่ 2.11 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(5) 24

รูปที่ 2.12 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(6) 24

รูปที่ 2.13 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(7) 25

รูปที่ 2.14 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(8) 25

รูปที่ 2.15 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(9) 26

รูปที่ 2.16 ช่วงจังหวะการเดินในวงรอบของการก้าวขา 1 ครั้ง 27

รูปที่ 2.17 การวัดตำแหน่งมุมข้อต่อต่างๆ 28

รูปที่ 2.18 บอร์ด Arduino Uno 31

รูปที่ 2.19 ขาต่างของบอร์ด Arduino Uno 31

รูปที่ 2.20 รูปแบบการสื่อสารแบ่งตามลักษณะการสื่อสาร 34

รูปที่ 2.21 ลักษณะแฟรมของ โปรโตคอล HDLC ที่ใช้ WAN 35

รูปที่ 2.22 รูปแบบการส่งข้อมูลจะเป็นการส่งครั้งละ1 ไบต์ 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.23 เวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล 1 ไบต์ 36

รูปที่ 2.24 แสดง ขา Serial Comuniction ของ ATMega16 37

รูปที่ 2.25 รีจิสเตอร์สำหรับอ่าน/เขียนข้อมูลขนาด 8 บิต 38

รูปที่ 2.26 ตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน 43

รูปที่ 2.27 โครงสร้างภายในของตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน 44

รูปที่ 2.28 แสดงทิศทางความเร่งในแนวแกน X และ Y ที่ตัวตรวจจับความเร่งวัดได้............ 44

รูปที่ 2.29 มุมที่ตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกนในแนวระดับ 45

รูปที่ 2.30 เซอร์โวมอเตอร์.. 47

รูปที่ 2.31 ส่วนประกอบภายนอกของเซอร์โวมอเตอร์ 49

รูปที่ 2.32 ส่วนประกอบภายในของเซอร์โวมอเตอร์... 48

รูปที่ 2.33 แสดงระบบการควบคุมแบบวงปิดของเซอร์โวมอเตอร์....................................... 49

รูปที่ 2.34 การรับคำสั่งผ่าน Remote เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์...................................... 50

รูปที่ 2.35 ความกว้างของพัลส์และองศาที่แตกต่างกันของเซอร์โวมอเตอร์ 50

รูปที่ 2.36 ความกว้างของพัลส์ที่ 1.250 ms. และองศาของเซอร์โวมอเตอร์ที่ 45 องศา........... 51

รูปที่ 2.37 การต่อบอร์ด Arduino Uno ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ผ่าน Potentiometer 55

รูปที่ 2.38 Continuous Rotation Servo.. 56

รูปที่ 2.39 รูปแบบของการทำงานของ Kalman Filter 58

รูปที่ 2.40 ขั้นตอนของการประมวลผลด้วย Kalman Filter ที่เวลา t(k) ใดๆ........................... 59

รูปที่ 3.1 โครงสร้างของชุดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ 62

รูปที่ 3.2 องค์ประกอบและขนาดของสเตชั่นชุดเก็บค่าจากเซนเซอร์.................................... 63

รูปที่ 3.3 สเตชั่นชุดเก็บค่าจากเซนเซอร์.. 64

รูปที่ 3.4 Schematic วงจรของชุดเก็บค่าจากเซนเซอร์.. 64

รูปที่ 3.5 ภาพรวมของระบบชุดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์... 65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.6 ภาพรวมของระบบการควบคุมด้วยไมโครคอนโทลเลอร์.. 66

รูปที่ 3.7 รูปแบบสัญญาณ Pulse... 67

รูปที่ 3.8 หน้าต่าง GUI วิเคราะห์ข้อมูล Low pass filter ผ่านโปรแกรม Matlab 69

รูปที่ 3.9 หน้าต่าง GUI วิเคราะห์ข้อมูล Kalman filter ผ่านโปรแกรม Matlab........................ 71

รูปที่ 3.10 การออกแบบสเตชั่นขาเทียมอัตโนมัติ... 72

รูปที่ 3.11 โครงสร้างขาส่วนบน (Upper Leg) 72

รูปที่ 3.12 โครงสร้างขาส่วนล่าง(Lower Leg)... 73

รูปที่ 3.13 การประกอบของ Lower Leg และ Upper Leg โดยเซอร์โวมอเตอร์เป็นข้อต่อ....... 73

รูปที่ 3.14 สเตชั่นขาเทียมแบบอัติโนมัติ 74

รูปที่ 3.15 การต่อวงจรของขาเทียมแบบอัตโนมัติ... 74

รูปที่ 3.16 แผนผังแสดงลักษณะการทำงานของสเตชั่นขาเทียม 75

รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลคงที่ ที่ 80 องศา จำนวน 600 ค่า 78

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลคงที่ ที่ 90 องศา จำนวน 600 ค่า...................................... 79

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลคงที่ ที่ 120 องศา จำนวน 600 ค่า 80

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลของการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา
จำนวน 600 ค่า.. 81

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลของการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า
โดยสั่งการผ่านการ Potentiometer... 82

รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา 83

รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา 84

รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา........................ 85

รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา.............. 86

รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา
จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการ Potentiometer 87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา 88

รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา 89

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา 90

รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา 91

รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการ Potentiometer 92

รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบ Low pass filter กับ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 จำนวน 600 ค่า 93

รูปที่ 4.17 ค่าความคาดเคลื่อนที่ตำแหน่ง 80-120ค่าความคาดเคลื่อนที่ตำแหน่ง 80-120 จำนวน 600 ค่า โดยผ่าน Low pass และ Kalmanfilter 94

รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบ Low pass filter กับ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการ Potentiomete 94

รูปที่ 4.19 ค่าความคาดเคลื่อนที่ตำแหน่ง 80-120 จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการ Potentiometer โดยผ่าน Low pass และ Kalmanfilter 95

รูปที่ 4.20 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 1 และ Phase 8 96

รูปที่ 4.21 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 2 97

รูปที่ 4.22 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 3 97

รูปที่ 4.23 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 4 98

รูปที่ 4.24 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 5 98

รูปที่ 4.25 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 6 99

รูปที่ 4.26 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 7 99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ขาเทียมมีความสำคัญต่อผู้พิการทางขาอย่างมาก เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มาแทนที่อวัยวะที่สูญเสียไป ซึ่งในปัจจุบันขาเทียมมีการพัฒนาหลายรูปแบบให้เหมาะสมกับผู้ใช้และให้เหมาะสมกับสถานการณ์ โดยปกติแล้วขาเทียมที่ใช้สำหรับผู้พิการในปัจจุบัน เป็นแบบพื้นฐานไม่มีกลไกซับซ้อน นอกจากนี้ก็มีขาเทียมอีกหลากหลายประเภทที่ช่วยสนับสนุนผู้พิการให้สามารถเดินได้สะดวกและเป็นธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ซึ่งนั้นหมายถึงค่าใช้จ่ายในการสร้างหรือพัฒนาขาเทียมก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งยังมีอีกปัญหาคือ ความยากของการควบคุม ขาเทียมอัตโนมัติ คือการรับรู้ว่าผู้พิการจะเคลื่อนที่ไปทิศทางใด ซึ่งได้ตรวจจับการเคลื่อนไหวของเส้นประสาทเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของผู้พิการ จึงส่งผลให้ราคาของขาเทียมอัตโนมัติที่มีอยู่ในปัจจุบันมีราคาที่สูงขึ้นไปด้วย

ทางคณะผู้จัดทำจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนาขาเทียมแบบอัตโนมัติให้ต้นทุนในการผลิตหรือพัฒนาน้อยลงแต่ยังคงประสิทธิภาพที่สามารถช่วยเหลือให้ผู้พิการเดินได้อย่างเป็นธรรมชาติมากที่สุด โดยกำหนดขอบเขตของการศึกษาไว้ที่รูปแบบการเดินของมนุษย์ซึ่งจะใช้ เซอร์โวมอเตอร์ในการควบคุมข้อต่อต่างๆ ตามลักษณะที่ถูกต้องของวัฏจักรการเดินของมนุษย์

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงลักษณะการเดินของมนุษย์
2. เพื่อศึกษาการใช้งานเซนเซอร์ตรวจจับความลาดเอียงให้มีความสัมพันธ์ตามจักรการเดินของมนุษย์อย่างเหมาะสม
3. เพื่อศึกษาการควบคุมและการสั่งการของมอเตอร์ให้เป็นไปตามวัฏจักรการเดินของมนุษย์โดยใช้ระบบสมองกลแบบฝังตัวหรือ Embedded System
4. เพื่อศึกษาการทำงานของ filter เพื่อประยุกต์ใช้งานร่วมกันกับโมดูลตรวจจับความลาดเอียง
5. เพื่อนำทฤษฎีที่ศึกษามา นำมาใช้กับงานจริง

1.3 ขอบเขตการศึกษา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเพื่อพัฒนาการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ สำหรับเพื่อใช้เป็นข้อต่อหัวเข่าและข้อต่อเท้าของขาเทียมแบบอัตโนมัติ ซึ่งใช้เซนเซอร์ตรวจจับความลาดเอียงในการวัดระดับองศา ซึ่งค่ามุมต่างๆที่สามารถวัดออกมาได้นั้นจะผ่าน filter เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ระยะเวลาในการดำเนินงาน

ภาคเรียนที่1

ตารางที่ 1.1 ตารางการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 1

รายการ	ส.ค.		ก.ย.		ต.ค.		พ.ย.		ธ.ค.	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1.ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง										
2.ศึกษาวัฏจักรการเดินของมนุษย์										
3.ศึกษาโมดูลวัดความเร่ง										
4.สร้าง Station										
5.สร้างชุดจำลองขาเทียมอัตโนมัติ										
6.วิเคราะห์ปัญหาที่เกิด										

ภาคเรียนที่2

ตารางที่ 1.2 ตารางการดำเนินงานในภาคเรียนที่ 2

รายการ	ม.ค.		ก.พ.		มี.ค.		เม.ย.		พ.ค.	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1.ศึกษา Kalman Filter และ Low-pass Filter										
2.สร้างชุดทดสอบโมดูลวัดความเร่ง										
3.เก็บค่าที่สามารถวัดได้ และนำเข้าสมการ Filter ทั้งสองแบบ										
4.เปรียบเทียบค่าที่ได้จาก Filter										
5.ติดตั้ง Filter เข้ากับ Station ขาเทียม										
6.ปรับปรุง สรุปผลและจัดทำรายงาน										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

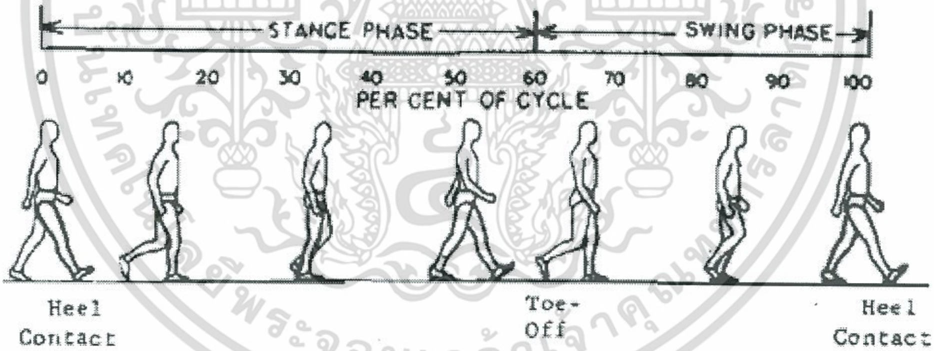
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเดินของมนุษย์ [1]

การเดิน เป็นวิวัฒนาการที่เป็นไปตามธรรมชาติ ทำให้คนทั่วไปไม่เห็นความสำคัญ จนกระทั่งเมื่อมีความผิดปกติของการเดิน อันเนื่องมาจากสาเหตุต่างๆเกิดขึ้นแล้ว จึงจะรู้สึกว่าการเดินนี้เป็นปัญหาที่ใหญ่มากต้องมีการบำบัดรักษาและการฝึกหัดเดิน ซึ่งปัญหาดังกล่าว จำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการช่วยวิเคราะห์ความผิดปกติ เพื่อให้การบำบัดรักษาสามารถทำได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การเดินมีด้วยกันหลายชนิด และหลายวิธีการในการได้มาซึ่งค่าที่สามารถใช้ในการวิเคราะห์

การเดินเกิดจากวงจรการเคลื่อนไหวของขาทั้ง 2 ข้าง ซึ่งแบ่งวงจรของการเดิน (Gait cycle) ออกเป็น 2 ช่วง คือ

1. Stance phase คือ ช่วงที่เท้ายันอยู่กับพื้นดิน
2. Swing phase คือ ช่วงที่เท้าลอยอยู่ในอากาศ



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเดินปกติของมนุษย์

จากรูป 2.1 เมื่อก้าวออกเดินด้วยเท้าขวา ในช่วงแรกเท้าขวา ในช่วงแรก เท้าขวาจะยันพื้นรับน้ำหนักตัว (Stance phase) ลำตัวจะเคลื่อนไปข้างหน้า โดยเท้าซ้ายจะดันตัวไป เมื่อลำตัวเคลื่อนไปข้างหน้า เท้าซ้ายซึ่งลอยก็จะมาแตะพื้นเพื่อจะรับน้ำหนัก เท้าขวาก็จะกลายเป็นตัวดันลำตัวให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า แล้วตัวเท้าเองก็จะลอยจากพื้น (Swing phase) เพื่อจะไปคอยรับน้ำหนักตัวต่อไป ช่วงการเดินที่กล่าวถึงนี้ คือการศึกษาขาข้างใดข้างหนึ่ง ซึ่งจะเห็นว่าขาขวาจะมี Stance phase และ Swing phase ตามกันไปป เมื่อขาขวาเป็น Swing phase ขาซ้ายต้องเป็น Stance phase สลับกันไป จึงทำให้เกิดการเดินเป็นไปตามธรรมชาติ ซึ่งถ้าศึกษาให้ละเอียดแล้ว จะเห็นว่าช่วงต่างๆ ยังแบ่งออกได้เป็นขั้นตอนดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ช่วงการเคลื่อนไหวที่ใช้ในการเดิน

2.1.1.1 Stance phase ประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ 5 ขั้นตอนดังนี้

1. Heel strike คือ ขั้นตอนที่ส้นเท้ากระทบกับพื้น กล้ามเนื้อที่ทำงานระยะนี้ คือ
   - กล้ามเนื้อ Quadriceps ทำหน้าที่ให้เข่าเหยียด
   - กล้ามเนื้อ Gluteu maximus ทำหน้าที่เหยียดสะโพกให้ส้นเท้ากดกับพื้น
   - กล้ามเนื้อ Hamstrings ทำหน้าที่ช่วยเหยียดสะโพกเพื่อให้ส้นเท้ากดกับพื้น
   - กล้ามเนื้อกลุ่มกระดกข้อเท้าขึ้น ทำให้เท้ากระดกพ้นพื้น

2. Foot flat เป็นระยะของการเดินที่เท้าแตะพื้น ใช้กล้ามเนื้อเหมือนกับระยะ Heel strike เว้นแต่ข้อเท้าอยู่ในท่ากระดกลง 15 องศา

3. Mid –stance เป็นระยะของการเดินที่มีการเคลื่อนไหวของลำตัวมาด้านหน้ามากขึ้น น้ำหนักตัวตกลงในแนวศูนย์กลางมวลของร่างกาย ผ่านหลังข้อสะโพกหน้าข้อเข่าและข้อเท้า กล้ามเนื้อที่ทำงานระยะนี้คือ
   - กล้ามเนื้อ Iliopsoas ทำหน้าที่ให้ข้อสะโพกงอ กันไม่ให้ Hyperextension
   - กล้ามเนื้อ Gluteus medius, Gluteus minimus และ Tensor fascia lata ทำหน้าที่ให้กระดูกเชิงกรานอยู่ในระดับ ไม่ให้เอียงไปด้านใดด้านหนึ่ง และไม่ให้เสียหลักง่าย
   - กล้ามเนื้อ Quadriceps ทำหน้าที่ไม่ให้เข่างอพับลงมา
   - กล้ามเนื้อกระดกเท้า ทำหน้าที่ให้ฝ่าเท้าแนบพื้น

4. Heel off เป็นระยะที่ส้นเท้ายกสูงจากพื้น ลำตัวจะเอนไปข้างหน้ามากขึ้น กล้ามเนื้อที่ทำงานในระยะนี้ คือ
   - กล้ามเนื้อ Iliopsoas ทำหน้าที่ให้ข้อสะโพกงอ กันไม่ให้ Hyperextension
   - กล้ามเนื้อ Hamstring ทำหน้าที่งอเข่า
   - กล้ามเนื้อกระดกเท้าลงทำหน้าที่กระดกข้อเท้าลง

5. Top off เป็นระยะที่นิ้วเท้าดันให้ขาไปข้างหน้า เพื่อเข้าสู่ระยะ Swing phase กล้ามเนื้อที่ทำงานในระยะนี้ คือ
   - กล้ามเนื้อ Iliopsoas ทำหน้าที่ให้ข้อสะโพกเพื่อเหวี่ยงขาไปข้างหน้า
   - กล้ามเนื้อ Quadriceps ทำหน้าที่ป้องกันการงอเข่าเร็วเกินไป
   - กล้ามเนื้อกระดกเท้าลงทำหน้าที่ดันให้ขาเหวี่ยงไปข้างหน้า

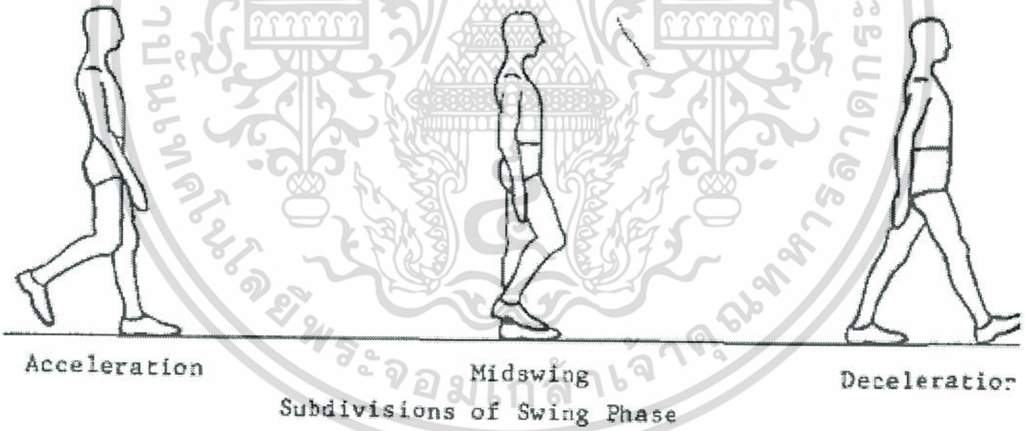
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 Swing Phase กินเวลาประมาณ 1/3 ของวงจรการเดิน แบ่งเป็น 3 ระยะ ดังนี้

1. Acceleration คือระยะที่ขาเหวี่ยงไปข้างหน้าด้วยความเร็วจากแรงเฉื่อยมาเร่ง กล้ามเนื้อที่ทำงานระยะนี้ คือ
   - กล้ามเนื้อ Iliopsoas ทำหน้าที่เหวี่ยงและงอข้อสะโพกไปข้างหน้า
   - กล้ามเนื้อ Quadriceps ทำหน้าที่ป้องกันการงอเข่ามากเกินไป
   - กล้ามเนื้อกระดกเท้าขึ้นทำให้ข้อเท้ากระดกขึ้น เพื่อไม่ให้ปลายเท้าแตะพื้นกันล้ม

2. Mid swing เป็นระยะที่ขาข้างนั้นถูกดึงให้ลอยมาอยู่ใต้ลำตัว กล้ามเนื้อที่ใช้ เหมือนระยะ acceleration

3. Deceleration คือ ระยะการเดินที่ขาที่ถูกเหวี่ยงไปข้างหน้าจากแรงกล้ามเนื้อที่กล่าวมา ถูกชะลอให้ช้าลงเพื่อเข้าสู่ Stance phase อีกครั้งเป็นวงจรการเดินใหม่ต่อไป



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเดินช่วง Swing Phase

2.1.2 การวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของชิ้นส่วนขาของมนุษย์ในช่วงการเดิน

บทความนี้โดย จักรกริช ชัยเทวรักษ์, มนต์ศักดิ์ พิมสาร, อุนนัต พิณโสภณ ตีพิมพ์ในวารสารการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 19 เมื่อวันที่ 19 ตุลาคม 2548 งานวิจัยนี้ทำขึ้นเพื่อนำเสนอวิธีการวัดความเร็วและความเร่งของข้อต่อต่างๆ ของชิ้นส่วนของด้านขาขวาของมนุษย์ขณะที่มีการเคลื่อนไหวในช่วงการเดิน วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ การประมวลผลภาพ (Image Processing) ร่วมกับการวิเคราะห์ทางจลศาสตร์ (Kinematics Analysis) เพื่อแสดงผลลัพธ์ของความเร็วและความเร่งของข้อต่อ ซึ่งจากผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและการวิเคราะห์ผลพบว่า ข้อมูลที่ได้ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันที จะต้องมีการลดสัญญาณรบกวนโดยการทำข้อมูลให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ราบเรียบ (Data smoothing) ก่อน จากนั้นได้นำข้อมูลที่ได้ไปทำการจำลองการเดินของชิ้นส่วนขา เพื่อตรวจสอบดูว่าเป็นไปตามที่ได้บันทึกจากกล้องวีดีทัศน์ ซึ่งจากการเปรียบเทียบ ผลได้ว่า ได้ผลที่สอดคล้องกัน ในงานวิจัยนี้ใช้การถ่ายภาพจากกล้อง 2 ตัวเพื่อใช้ในการประมวลผลภาพหาพิกัดของมาร์คเกอร์ ใน 3 มิติ ซึ่งกล้องทั้งสองตัววางอยู่ในแนวที่ทำมุมกัน ถ่ายภาพจาก 2 มุม หลังจากนั้นผ่านกระบวนการประมวลผลภาพ จะทำให้ได้พิกัดของมาร์คเกอร์ ในพิกัด 2 มิติจากกล้องแต่ละตัว จากนั้นนำค่าในพิกัด 2 มิติที่ได้มาคำนวณหาพิกัดของ มาร์คเกอร์ใน 3 มิติ โดยใช้วิธีการ Direct Linear Transformation (DLT) โดยติด มาร์คเกอร์ ในตำแหน่ง เอวที่ข้อต่อหัวเข่า และ ข้อเท้า

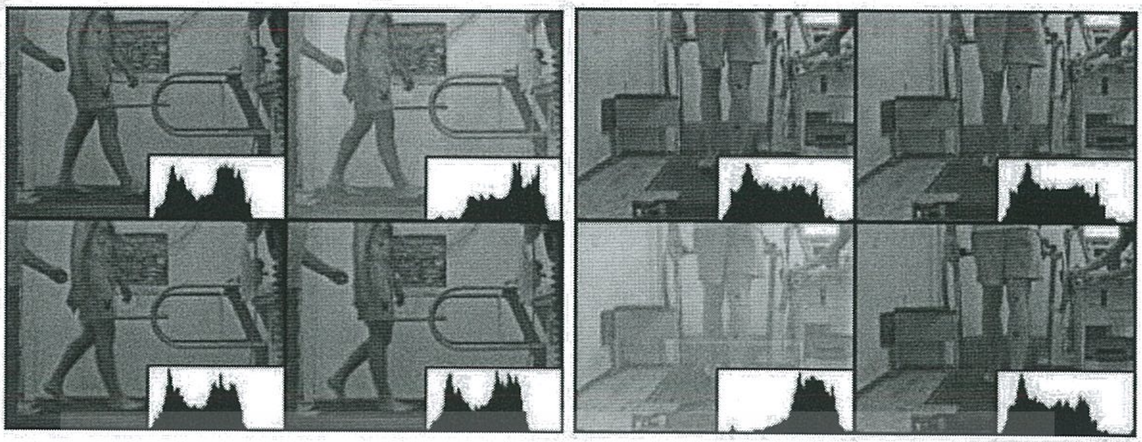
2.1.2 Accuracies of Skin Marker Based Knee Motion Analysis using Different Techniques

บทความนี้เขียนโดย B Gao, BP Conrad, N Zheng University of Florida USA เมื่อปี 2007 งานวิจัยนี้ได้ศึกษาหาความแม่นยำของการเคลื่อนที่ของกระดูกซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญในการเข้าใจปัญหาที่เกิดขึ้นของระบบกล้ามเนื้อ ในการติด มาร์คเกอร์ มีข้อจำกัดโดย Soft Tissue Artifact (STA) error ในการศึกษาความแม่นยำของเทคนิคการลด STA มี 3 วิธี ประกอบด้วย Point Cluster Technique (PCT), Modified Least Square method (MLS) และ มาร์คเกอร์ Triad Technique (MTT) ในการทดสอบจะใช้เข่าของศพวัยรุ่น 6 ศพในการศึกษา ซึ่งเป็นส่วนที่ต่ำจากกระดูกเชิงกรานลงมาที่ยังอยู่ในสภาพที่ดี ไม่มีการแช่แข็งก่อนการทดสอบ เพื่อให้เนื้อเยื่อยังมีการยืดหยุ่นได้ เพื่อวัดการเคลื่อนที่ของโครงร่างท่อนบนและขาท่อนล่างโดยใช้กล้อง 11 ตัว จากผลการทดสอบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของวิธี PCT, MLS และ MTT ใน 3 มิติ ในการหาค่าทางจลศาสตร์ของเข่า ในทั้ง 3 เทคนิค MLS มีความแม่นยำที่สุด ในการวิเคราะห์จลศาสตร์ข้อเข่า ซึ่งน้อยกว่า 3.5 mm/2 degree รองลงมาเป็น MTT และ PCT ตามลำดับ แต่วิธี PCT ง่ายต่อการติดตั้ง มาร์คเกอร์มากที่สุด

2.1.3 Foot Gait Analysis and Simulation

บทความนี้เขียนโดย Ludovit Lucenic, Peter Argalas, Zuzana Halanova, Martin Soltis จาก Slovak University of Technology บทความนี้เป็นงานวิจัยที่ช่วยในการวินิจฉัยของแพทย์ ในการเคลื่อนที่ของส่วนล่างของร่างกาย โดยการวิเคราะห์ความเร็วเชิงมุม ของข้อต่อต่างๆ ซึ่งปัญหาของงานวิจัยนี้คือ ปัญหาการจัดการกับการเชื่อมต่อกับกล้องหลายตัว การใช้กระบวนการภาพในการคัดแยกระหว่าง มาร์คเกอร์ กับสีผิว ซึ่งการแยกภาพของงานวิจัยนี้ใช้ Skin color model โดยการแปลงสีของภาพไปอยู่ในรูปแบบของ Gray scale สามารถแปลงค่าเป็น binary image เพื่อแยก มาร์คเกอร์ ออกจากสีผิว โดยภาพที่ได้เป็นภาพจากกล้อง 2 ตัวคือภาพด้านข้าง และภาพด้านหลัง ตำแหน่ง มาร์คเกอร์ ที่ติดอยู่บริเวณข้อเข่า-กึ่งกลางของขาท่อนล่าง-ตาตุ่ม-เท้า ผลการทดลอง แสดงกราฟความเร็วเชิงมุมระหว่างข้อเข่าและตาตุ่ม ที่ได้จากภาพด้านหลังและด้านข้าง

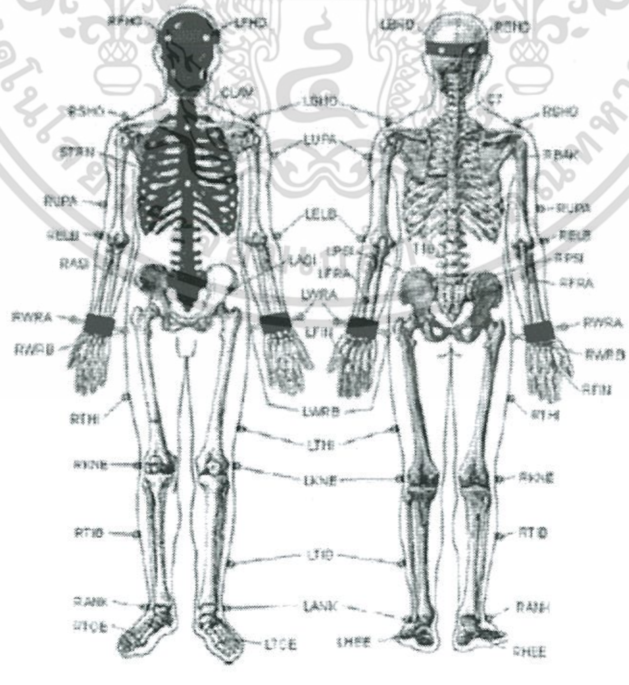
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การติดตั้งการทดลองของงานวิจัยเรื่อง Foot gait Analysis and Simulation

2.1.4 Plug-in-Gait Marker Placement

บทความนี้ได้มาจาก http://www.uta.edu/ (20 July 2008) เป็นเว็บไซต์ของ The University of Texas บทความนี้ ให้ข้อมูลตำแหน่งมาตรฐานในการติดมาร์คเกอร์ ทั่วร่างกาย โดยให้รายละเอียดตำแหน่งติด มาร์คเกอร์ ตามส่วนที่ต้องการวิเคราะห์ แบ่งเป็นส่วนบน และส่วนล่าง โดยตำแหน่งส่วนล่างของร่างกายแบ่งเป็น กระดูกเชิงกราน (Pelvis), ขา (Legs) และเท้า (Foot) โดยบอกแรงที่เกิดขึ้นกับกระดูกแต่ละชิ้นจากการเคลื่อนที่ในแนวแกนต่างๆ รวมทั้งมุมที่เกิดขึ้นระหว่างกระดูกแต่ละส่วนเมื่อมีการเคลื่อนที่ในลักษณะต่างๆ เช่นตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.4 การติดตั้งการทดลองของงานวิจัยเรื่อง Plug in Gait Marker Placements

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 Skeletal Parameter Estimation from Optical Motion Capture Data

บทความนี้เขียนโดย Adam Kirk จาก University of California, Berkeley เป็นงานวิจัยที่ใช้การประมาณโครงสร้างของร่างกายจาก มาร์คเกอร์ ซึ่งสามารถแสดงผลการเคลื่อนไหวได้ทั้ง 3 มิติ เนื้อหาสำคัญของงานวิจัยนี้คือ การใช้ มาร์คเกอร์ ที่เป็นหลอดไฟ ติดไว้ทั่วร่างกาย แทนการติดมาร์คเกอร์ที่เป็นสี หรือเป็นรูปแบบต่างๆ และการใช้เทคนิค Random Sample Consensus (RANSAC) เป็นขั้นตอนในการประมาณโครงสร้างของร่างกายจาก มาร์คเกอร์ ที่อ่านได้จากตำแหน่งต่างๆ คือ หลักการที่ตำแหน่ง มาร์คเกอร์ บริเวณลำตัวจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วน ยกเว้นตำแหน่งมาร์คเกอร์ (Marker) บริเวณแขนและขา

รูปที่ 2.5 การติดตั้งการทดลองของงานวิจัยเรื่อง Skeletal Parameter Estimation from Optical Motion Capture Data

2.1.6 MATLAB Application in Gait Analysis

บทความนี้เขียนโดย Dr. Bruce Mac Williams จาก University of Utah Department of Bioengineering 5/1/2007 บทความนี้อธิบายความหมายของ Gait Analysis อธิบายการทำงานของโปรแกรมวิเคราะห์ โดยแสดงเป็นแผนผังการทำงานของโปรแกรม (Flow Chart) โดยเริ่มจากการนำไฟล์ที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลการเดินของเด็กในโรงพยาบาล จากนั้นจึให้โปรแกรมคัดแยกตำแหน่ง มาร์คเกอร์ ใน 2 มิติ หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการประมาณค่าเวกเตอร์การเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนของขาเพื่อเตรียมข้อมูลในการหมุนของข้อต่อต่างๆจากนั้นหามุมของข้อต่อโดยเปรียบเทียบระหว่างเทคนิค Transformation matrices และ Cardan/Euler matrix โดยผลการทดลองที่ได้เป็นค่ามุมทางจลศาสตร์ (Kinematics angle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าส่วนใหญ่จะแบ่งเป็นกระบวนการในการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือตำแหน่งหรือเทคนิคในการติดมาร์คเกอร์ และ กระบวนการในการคัดแยก มาร์คเกอร์ จากภาพ เพื่อนำไปคำนวณค่าทางจลศาสตร์ ในเรื่องตำแหน่งหรือเทคนิคในการติด มาร์คเกอร์ ซึ่งส่วนใหญ่มีตำแหน่งตามทฤษฎีต่างๆ ของตำแหน่งแต่อาจมีการเพิ่มตำแหน่งในการติดมากขึ้น เพื่อให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ส่วนเรื่องวิธีการคัดแยกภาพ (Segmention) กระบวนการต่างๆ เป็นทฤษฎีพื้นฐานของการประมวลผลภาพซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการใด เหมาะสมชนิดหรือตำแหน่งมาร์คเกอร์แบบใด

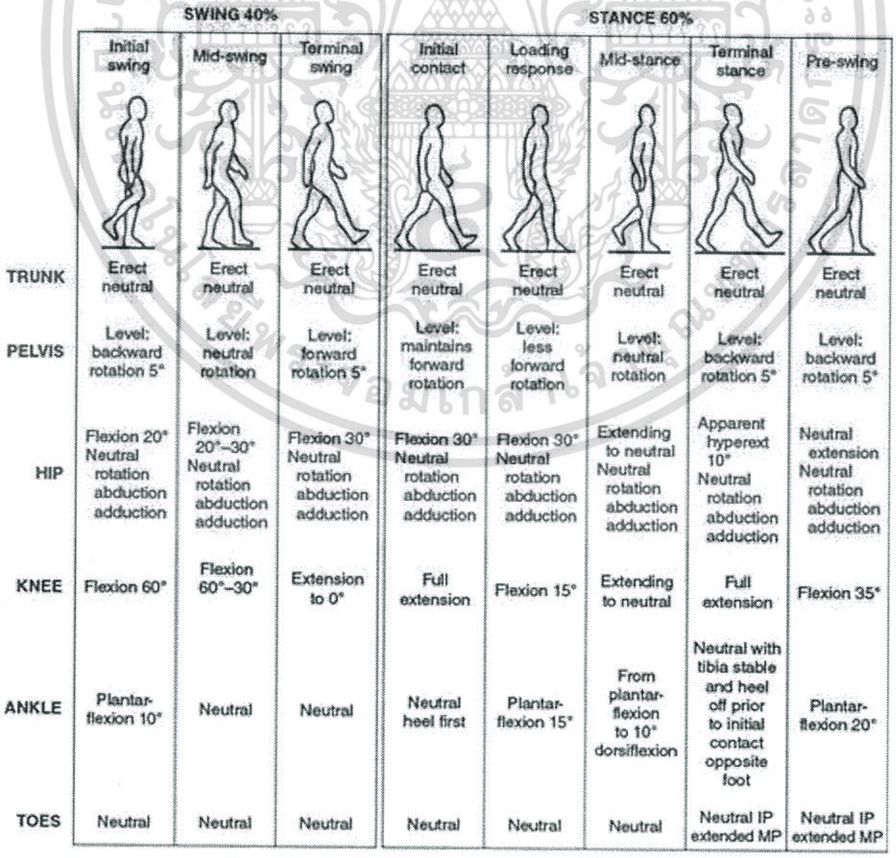
2.2 วัฏจักรการเดินของมนุษย์

การเดินของมนุษย์ จะมีลักษณะเป็นการเคลื่อนไหวอย่างเป็นจังหวะและมีการสลับกันของขาทั้ง 2 ข้าง โดยมีการเคลื่อนที่ของลำตัวเพื่อให้จุดศูนย์ถ่วง ของร่างกายเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและการเดินจะต้องเป็น วัฏจักรการเดิน หรือที่เรียกว่า “Gait cycle” ซึ่งครอบคลุมระยะต่างๆได้แก่

1) Stance Phase คือระยะขาข้างนั้น ยังคงวางอยู่บนพื้น

2) Swing Phase คือ ระยะที่ขาข้างนั้นลอยขึ้นจากพื้น

โดยระยะต่างๆจะประกอบไปด้วยรูปแบบการเคลื่อนไหวต่างๆดังรูปที่2.6



รูปที่2.6 ลำดับทั้งหมดของการเดินของมนุษย์[2]

จากรูปที่2.6 สามารถแสดงวัฏจักรการเดินนั้นสามารถรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1 Stance Phase

1) Initial Contact คือขั้นตอนที่ส้นเท้ากระทบกับพื้น มีข้อต่อต่างๆทำมุมดังนี้

- สะโพกทำมุมกับแนวปกติไปข้างหน้าเป็นระยะ 30 องศา
- ข้อต่อเข่าจะเหยียดตรง
- บริเวณข้อต่อเท้าจะอยู่สภาวะปกติซึ่งทำให้บริเวณส้นเท้ากดทับลงที่พื้น

2) Loading Response คือระยะของการเดินที่เท้าแตะพื้น มีข้อต่อต่างๆทำมุมดังนี้

- สะโพกทำมุมกับแนวปกติไปข้างหน้าเป็นระยะ 5 องศา
- ข้อต่อเข่าพับเข้ามาเป็นระยะ 15 องศาจากแนวปกติ
- ข้อเท้าทำมุมออกจากแนวปกติ 15 องศาเพื่อให้ฝ่าเท้ากดทับลงบนพื้น

3) Mid-stance คือระยะการเดินที่มีการเคลื่อนไหวของลำตัวมาด้านหน้ามากขึ้น มีข้อต่อต่างๆทำมุมดังนี้

- สะโพกอยู่ในแนวปกติ
- ข้อต่อเข่า เหยียดตรงตามแนวปกติ
- ข้อเท้าทำมุมเพื่อคงสถานะให้ฝ่าเท้ากดทับลงบนพื้น

4) Terminal stance คือระยะที่ส้นเท้ายกสูงจากพื้น ลำตัวเอนไปข้างหน้ามากขึ้น มีข้อต่อต่างๆ ทำมุมดังนี้

- สะโพกทำมุมกับแนวปกติไปข้างหลัง 10 องศา
- ข้อต่อเข้าเหยียดตรง
- ข้อต่อเท้าทำมุมเพื่อให้ปลายเท้ากดทับลงบนพื้น

5) Pre-swing คือระยะที่นิ้วเท้าดันขาไปข้างหน้าเพื่อเข้าสู่ Swing phase ขึ้น มีข้อต่อต่างๆ ทำมุมดังนี้

- สะโพกอยู่ในแนวปกติ
- ข้อต่อเข่าพับเข้าทำมุม 35 องศากับแนวปกติ
- ข้อต่อเท้ากางออกมาทำมุม 20 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 Swing Phase

1) Initial swing คือ ระยะที่ขาเหวียงไปข้างหน้าด้วยความเร็วจากแรงเฉื่อยมีข้อต่อ ต่างๆทำมุมดังนี้

- สะโพกทำมุมกับแนวปกติไปข้างหน้า 20 องศา
- ข้อต่อเข่าพับเข้ามา 60 องศา
- ข้อต่อเท้ากางออกทำมุม 10 องศา

2) Mid-swing คือ ระยะที่ขาข้างนั้นถูกดึงให้ลอยมาอยู่หน้าลำตัว มีข้อต่อต่างๆทำมุมดังนี้

- สะโพก ทำมุมกับแนวปกติ ไปข้างหน้า 30 องศา
- ข้อต่อเข่า พับเข้ามาที่ 30 องศา จากเดิม 60 องศา
- ข้อต่อเท้าอยู่ในสถานะปกติ

3) Terminal swing คือ ระยะการเดินที่ขาที่ถูกเหวี่ยงไปข้างหน้า ถูกชะลอให้ช้าลงเพื่อเข้าสู่ Stance phase อีกครั้งเป็นวัฏจักรการเดินมีข้อต่อต่างๆทำมุมดังนี้

- สะโพกทำมุมกับแนวปกติกับแนวปกติไปข้างหน้า 30 องศา
- ข้อต่อเข่า เหยียดตรง
- ข้อต่อเท้าอยู่ในสถานะปกติ

2.3 กายอุปกรณ์และวิวัฒนาการของขาเทียม

กายอุปกรณ์ หมายถึง อุปกรณ์ทางการแพทย์ต่างๆที่ใช้กับร่างกาย ในความหมายที่ใช้ในปัจจุบัน มักจะหมายถึงอุปกรณ์ที่ใช้กับร่างกายเพื่อช่วยเหลือการเคลื่อนไหว เช่น แขนเทียม ขาเทียม อุปกรณ์ประคองหรือดามหลัง อุปกรณ์ดามมือ เป็นต้น แต่โดยทั่วไป ขอบเขตที่แท้จริงของกายอุปกรณ์ ยังรวมไปถึงอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้กับร่างกายด้วย เช่น ลูกตาเทียม ข้อเข่าเทียมที่ใช้สำหรับผ่าตัดทดแทนเข่าเดิมในผู้ป่วยข้อเข่าเสื่อม เป็นต้น และอุปกรณ์ช่วยเหลือการเคลื่อนไหวต่างๆ เช่น รถล้อเข็น (Wheelchair) ไม้เท้า เป็นต้น [3]

งานกายอุปกรณ์ หมายถึงการตรวจวัดขนาด ออกแบบ ประดิษฐ์ ผลิต ดัดแปลง แก้ไข ซ่อมแซม อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้กับร่างกายให้เหมาะสมกับผู้ป่วยแต่ละราย เพื่อช่วยเหลือการเคลื่อนไหวเท่านั้น งานกายอุปกรณ์ต้องอาศัยทักษะฝีมือและความเชี่ยวชาญชำนาญเฉพาะบุคคลค่อนข้างสูง (ร่วมกับความรู้ความเข้าใจในเรื่องวัสดุศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ ศิลปะ และเรื่องวิทยาศาสตร์การแพทย์ด้านกายวิภาคประยุกต์ ด้าน ชีวกลศาสตร์และการเคลื่อนไหวประยุกต์พอสมควร)และ งานกายอุปกรณ์ จัดเป็นส่วนหนึ่งของทีมงานด้าน เวชศาสตร์ฟื้นฟู อีกด้วย ในภาษาอังกฤษคำว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กายอุปกรณ์ ใช้ใน US ว่า Orthosis and Prosthesis (ตัวย่อว่า O&P) ส่วนในประเทศไทยนิยมเรียกว่า Prosthesis and Orthosis (ตัวย่อ PO) อนึ่งคำว่า Prosthesis อาจเขียนว่า Prostheses ก็ได้เมื่อมีความหมายเป็นพหูพจน์ และคำว่า Orthosis สามารถเขียนให้อยู่ในรูปพหูพจน์ได้ว่า Orthoses ส่วนคำว่า งานกายอุปกรณ์ ใช้ว่า Prosthetics and Orthotics (ตัวย่อ P&O) หรือ Orthotics and Prosthetics (ตัวย่อ O&P) ก็ได้เช่นกัน

2.3.1 ประเภทของกายอุปกรณ์

กายอุปกรณ์แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1.กายอุปกรณ์เทียม (prosthesis) กายอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ทดแทนอวัยวะหรือชิ้นส่วนของอวัยวะที่ขาดหายไป เช่น ขาเทียม แขนเทียม นิ้วมือเทียม เป็นต้น

- ในทางกายอุปกรณ์สำหรับแขนขา หมายถึง อุปกรณ์ใดๆก็ตามภายนอกร่างกาย ที่นำมาทดแทนส่วนของระยางค์ (แขน-ขา) ทั้งหมดหรือบางส่วนซึ่งไม่เคยมีอยู่เลยหรือขาดหายไป

2.กายอุปกรณ์เสริม (orthosis) คือ กายอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้เพื่อเสริมการทำหน้าที่ของอวัยวะที่มีปัญหาในการทำงาน (เช่น อ่อนแรง, เจ็บปวด, เสื่อมสมรรถภาพ เป็นต้น) อาจเรียกชื่อสามัญว่าอุปกรณ์เสริม, อุปกรณ์ดาม หรือที่ประคอง (Splint หรือ Brace) ก็ได้

- ในทางกายอุปกรณ์สำหรับแขนขา หมายถึง อุปกรณ์ใดๆก็ตามภายนอกร่างกาย ที่นำมาดัดแปลงลักษณะโครงสร้างหรือการทำหน้าที่ของระบบประสาท-กล้ามเนื้อและระบบค้ำจุนร่างกาย (กระดูก-กล้ามเนื้อ) ของร่างกาย
- เมื่อดูจากคำจำกัดความตาม ISO อุปกรณ์ช่วยเหลือการเคลื่อนไหว (Mobility aids) ชนิดต่างๆ เช่น รถล้อเข็น (Wheelchair) , ไม้เท้า (Cane) , ไม้ค้ำยัน (Crutches) ก็จัดได้ว่าเป็นกายอุปกรณ์เสริมชนิดหนึ่งเช่นกัน แต่ตามปกติในทางปฏิบัติ มักไม่ถูกรวมอยู่ในกายอุปกรณ์เสริม มักจัดเป็นอีกกลุ่มซึ่งแยกออกมา

2.3.1.1 กายอุปกรณ์เทียม

ในงานกายอุปกรณ์ แบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆคือ

- กายอุปกรณ์สำหรับระยางค์ล่าง หรือเรียกง่ายๆว่า ขาเทียม
- กายอุปกรณ์เทียมสำหรับระยางค์บน หรือเรียกแบบง่ายว่า แขนเทียม

รยางค์ล่าง (Lower extremity) หมายถึง ขา (ตั้งแต่ปลายนิ้วเท้าจนถึงข้อสะโพก) และกระดูกเชิงกราน (ทำหน้าที่เป็นโครงให้ขายึดกับแกนกลางร่างกายที่กระดูกสันหลัง)

รยางค์บน (Upper extremity) หมายถึง แขน (ตั้งแต่ปลายนิ้วมือจนถึงข้อไหล่) กระดูกไหปลาร้าและกระดูกสะบัก (ทำหน้าที่เป็นโครงให้ขายึดกับแกนกลางร่างกายที่กระดูกซี่โครง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเรียกชื่อชนิดต่างๆของแขนเทียมและขาเทียม สามารถทำได้ 2 แบบคือ

- เรียกตามตำแหน่งที่ระยางค์ล่างโดนตัด แบ่งได้เป็น (จากด้านล่างขึ้นมาด้านบน)
    - สำหรับระยางค์ล่าง แบ่งได้เป็น
        - กายอุปกรณ์เทียมทดแทนนิ้วเท้า (Toe prosthesis)
        - กายอุปกรณ์เทียมทดแทนบางส่วนของเท้า (Partial foot prosthesis)
        - ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านข้อเท้า (Ankle disarticulation (AD) prosthesis)
        - ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านกระดูกหน้าแข้ง (Transtibial (TT) prosthesis)
        - ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านข้อเข่า (Knee disarticulation (KD) prosthesis)
        - ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านกระดูกต้นขา (Transfemoral (TF) prosthesis)
        - ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านข้อสะโพก (Hip disarticulation (HD) prosthesis)
        - ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาและเอากระดูกเชิงกรานออกไปด้วย 1 ข้าง (Hemipelvectomy prosthesis)
    - สำหรับระยางค์บน แบ่งได้เป็น
        - กายอุปกรณ์เทียมทดแทนนิ้วมือ (Finger prosthesis)
        - กายอุปกรณ์เทียมทดแทนบางส่วนของมือ (Partial hand prosthesis)
        - แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนผ่านข้อมือ (Wrist disarticulation (WD) prosthesis)
        - แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนผ่านกระดูกปลายแขน (Transradial (TR) prosthesis)
        - แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนผ่านข้อศอก (Elbow disarticulation (ED) prosthesis)
        - แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนผ่านกระดูกต้นแขน (Transhumeral (TH) prosthesis)
        - แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนผ่านกระดูกต้นแขนที่คอกระดูกต้นแขน (Humeral-neck amputation prosthesis)
        - แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนผ่านข้อไหล่ ("True" shoulder disarticulation prosthesis)
        - แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนร่วมกับเอากระดูกสะบักและกระดูกไหปลาร้าออกไปด้วย 1 ข้าง (Forequater amputation prosthesis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เรียกโดยอ้างอิงจากตำแหน่งของข้อต่อ เป็นการแบ่งง่ายๆและเป็นระบบเดิมที่นิยมใช้กันมา ได้แก่
    - ขาเทียม มักใช้ข้อเข่าเป็นจุดอ้างอิง โดย
        - ใช้ ขาเทียมระดับใต้เข่า (Below-knee (BK) prosthesis) แทน ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านกระดูกหน้าแข้ง
        - ใช้ ขาเทียมระดับข้อเข่า (Through-knee (TK) prosthesis) แทน ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านข้อเข่า
        - ใช้ ขาเทียมระดับเหนือเข่า (Above-knee (AK) prosthesis) แทน ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านกระดูกต้นขา
    - แขนเทียม มักใช้ข้อศอกเป็นจุดอ้างอิง โดย
        - ใช้ แขนเทียมระดับใต้ศอก (Below-elbow (BE) prosthesis) แทน แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนผ่านกระดูกปลายแขน
        - ใช้ แขนเทียมระดับข้อศอก (Through-elbow (TE) prosthesis) แทน แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนผ่านข้อศอก
        - ใช้ แขนเทียมระดับเหนือศอก (Above-elbow (AE) prosthesis) แทน แขนเทียมสำหรับผู้ถูกตัดแขนผ่านกระดูกต้นแขน

- นอกจากนี้ สำหรับแขนเทียม ยังสามารถแบ่งตามคุณสมบัติได้แก่
    - ประเภทสวยงาม (Cosmetic type) ประเภทนี้ไม่สามารถเคลื่อนไหวมือเทียม/ข้อมือ/ข้อศอก/ข้อไหล่ได้
    - ประเภทใช้งานได้ (Functional type) สามารถเคลื่อนไหวส่วนต่างๆของแขนเทียมได้ตามความต้องการของผู้พิการ โดยยังสามารถแบ่งลงไปได้ตามประเภทของการควบคุมการเคลื่อนไหวเป็น
        - ควบคุมโดยการใช้การเคลื่อนไหวของร่างกาย (Body controlled)
        - ควบคุมโดยใช้พลังงานภายนอก (External-power controlled) ซึ่งควบคุมการจ่ายไฟฟ้าด้วยปุ่มสวิตช์กด (Switch controlled) หรือ ตัวรับสัญญาณไฟฟ้าในกล้ามเนื้อ (Myoelectric)

2.3.1.2 กายอุปกรณ์เสริม [3]

- มีหน้าที่ต่างๆ เช่น
    - จำกัดการเคลื่อนไหวของอวัยวะ
    - ช่วยให้มีการเคลื่อนไหวของอวัยวะ
    - บรรเทาอาการเจ็บปวด
    - ช่วยส่งเสริมให้กระดูกที่หักติดเป็นปกติ
    - ป้องกันภาวะแทรกซ้อนต่างๆ เช่น ข้อเคลื่อนหลุด เอ็นฉีกขาด เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กายอุปกรณ์เสริมแบ่งประเภทใหญ่ๆตามอวัยวะที่ใช้เป็น 4 ประเภทได้แก่
    - กายอุปกรณ์สำหรับศีรษะ (Head orthosis)
    - กายอุปกรณ์สำหรับกระดูกสันหลัง (Spinal orthosis)
    - กายอุปกรณ์สำหรับระยางค์บน (Upper-extremity orthosis)
    - กายอุปกรณ์สำหรับระยางค์ล่าง (Lower-extremity orthosis) รวมถึงกายอุปกรณ์เสริมสำหรับเท้า (Foot orthosis) และการดัดแปลงรองเท้า (Shoe modification) อีกด้วย

โดยการเรียกชื่อสำหรับกายอุปกรณ์เสริมแต่ละชนิด สามารถเรียกชื่อได้หลายแบบตามแต่ละระบบมาตรฐานทางการแพทย์ โดยแบ่งเป็นกลุ่มย่อยๆตามข้อต่อที่กายอุปกรณ์เสริมพาดผ่าน เช่น กายอุปกรณ์เสริมสำหรับมือ-ข้อมือ (Wrist-hand orthosis: WHO), กายอุปกรณ์เสริมสำหรับเท้าข้อเท้า (Ankle-foot orthosis: AFO) หรือ กายอุปกรณ์เสริมสำหรับกระดูกสันหลังส่วนอก ส่วนหลังส่วนกระเบนเหน็บ (Thoracolumbosacaral spinal orthosis: TLSO) เป็นต้น

และมักเพิ่มเติมชื่อกายอุปกรณ์เสริมแต่ละชนิดเพื่อให้จำเพาะเจาะจงไปมากกว่านี้ โดยอาจเรียกตามหน้าที่การทำงาน เช่น ป้องกันการเหยียด (Extension-stopped), ช่วยการงอ (Flexion assisted) หรือตามตำแหน่ง"ด้าน"ที่อยู่บนร่างกาย เช่น ด้านหลังมือ (Dorsal), ด้านฝ่ามือ (Volar) เป็นต้น

นอกจากนี้ อาจเรียกตามชื่อสามัญ ซึ่งเป็นชื่อเดิมที่มีมาก่อนจะจัดระบบ เช่น อุปกรณ์เสริมชนิดจีเว็ตต์ เบรซ (Jewette brace) , อุปกรณ์เสริมชนิดไนท์เบรซ (Knight brace) หรือ ยูนิเวอร์ซัลคัฟฟ์ (Universal cuff) เป็นต้น

2.3.2 อุปกรณ์ช่วยเหลือการเคลื่อนไหว

อุปกรณ์ช่วยเหลือการเคลื่อนไหว (Mobility aids) ต่างๆ เช่น รถล้อเข็น (Wheelchair), ไม้เท้า (Cane), ไม้ค้ำยัน (Crutches) เป็นต้น มีหลากหลายชนิด ซึ่งต้องอาศัยความรู้ในการเลือกชนิดและส่วนประกอบของอุปกรณ์เหล่านี้เป็นอย่างมาก โดยเฉพาะแผ่นรองนั่งของรถล้อหมุน

สำหรับรถล้อเข็น สามารถแบ่งจำพวกเป็น

- รถล้อเข็นมือหมุน
    - รถล้อเข็นมือหมุนใช้งานทั่วไป
    - รถล้อเข็นมือหมุนใช้งานพิเศษ (เช่น สำหรับใช้แข่งขันกีฬา เป็นต้น)
- รถล้อเข็นไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

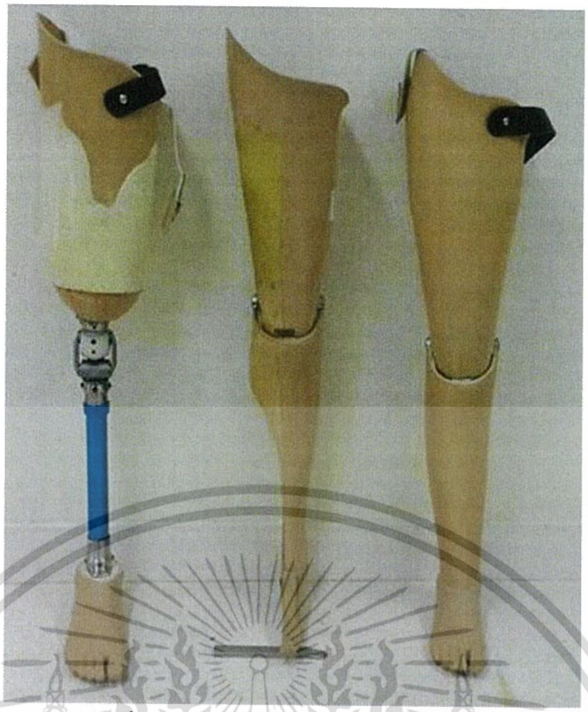
2.3.3 สถานการณ์คนพิการตัดขา

ในปัจจุบันมีผู้พิการแขนขาขาดเป็นจำนวนมาก จากรายงานการสำรวจคนพิการ พ.ศ. 2544 ของสำนักงานสถิติแห่งชาติ สำนักนายกรัฐมนตรีพบว่า มีผู้พิการมือแขนขาขาด/ด้วนทั้งหมด 50,825 คน คิดเป็นร้อยละ 4.6 ของผู้พิการทั้งหมด หากรวมผู้ที่มีนิ้วมือขาดด้วยจะเพิ่มเป็น 100,505 คน (ร้อยละ 9.1 ของผู้พิการทั้งหมด) และหากรวมผู้ที่มีนิ้วเท้าขาด/ด้วนด้วยจะเพิ่มเป็น 122,042 คน (ร้อยละ 11.1ของผู้พิการทั้งหมด)1 โดยสาเหตุของความพิการอาจเป็นจากความพิการแต่กำเนิด อุบัติเหตุ โรคภัยไข้เจ็บต่างๆ ซึ่งการฟื้นฟูสมรรถภาพผู้พิการกลุ่มนี้จะช่วยให้ผู้พิการเหล่านี้มีระดับความสามารถสูงขึ้นช่วยเหลือตนเองได้ และสามารถดำรงตนอยู่ในสังคมได้อย่างปกติและมีความสุขตามที่สภาพร่างกายและสังคมจะเอื้ออำนวย และยังสามารถก่อให้เกิดผลผลิตแก่สังคมได้นอกจากนี้ การผลิตขาเทียมในประเทศไทย ยังต้องมีการนำเข้าวัสดุส่วนประกอบจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาสูง โดยนำเข้ามาประกอบในประเทศ ซึ่งหน่วยงานที่ให้บริการ ได้แก่ ศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ มูลนิธิขาเทียมในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี โรงพยาบาลของรัฐที่มีหน่วยการอุปกรณ์เป็นต้น ซึ่งจากสถิติคนพิการตัดแขนขาข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีจำนวนไม่น้อย และมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นจากสาเหตุต่างๆ หลายประการ ซึ่งหน่วยงานที่มีความสามารถและให้บริการยังมีน้อย ดังนั้นการให้บริการจึงจำเป็นต้องออกหน่วยให้บริการและทำการผลิตขาเทียมด้วยความเร่งด่วนและรวดเร็ว ขาเทียม มีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับระดับของการตัดและพยาธิสภาพของคนไข้เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการฟื้นฟูสมรรถภาพของคนไข้จึงต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ร่วมกันกับแพทย์เพื่อให้อุปกรณ์เหมาะสมกับคนไข้มากที่สุด

รูปที่ 2.7 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(1) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.8 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(2) [4]

ชนิดของขาเทียมแบ่งตามกระดูกที่ตัด [5]

1. กายอุปกรณ์เทียมทดแทนบางส่วนของเท้า (Partial foot prosthesis)
2. ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านข้อเท้า (Ankle disarticulation (AD) prosthesis)
3. ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านกระดูกหน้าแข้ง (Below Knee Prosthesis)
4. ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านข้อเข่า (Knee disarticulation Prosthesis)
5. ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านกระดูกต้นขา (Above Knee prosthesis)
6. ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาผ่านข้อสะโพก (Hip disarticulation Prosthesis)

7.ขาเทียมสำหรับผู้ถูกตัดขาและเอากระดูกเชิงกรานออกไปด้วย 1 ข้าง (Hemipelvectomy prosthesis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

147133

2.3.4 ขาเทียมและส่วนประกอบของขาเทียม

ประเภทขาเทียมตามตำแหน่งของการตัด

1. ขาเทียมแบบเหนือเข่า (Above Knee Prosthesis) เป็นขาเทียมที่ใช้สำหรับคนพิการตัดขาระดับเหนือเข่า (Above Knee: AK) โดยขาเทียมประเภทนี้มีส่วนประกอบ ได้แก่. soft socket ทำด้วย pelite, เบ้าพลาสติก แบบ hard socket ทำด้วย HDPE, couplinf ทำด้วยอะลูมิเนียม, alignment unit ทำด้วย ABS, ข้อเข่าเทียม, แกนหน้าแข้ง (pylon) ทำด้วย Nylon-6, และเท้าเทียม

2. ขาเทียมแบบใต้เข่า (Below Knee Prosthesis) เป็นขาเทียมที่ใช้สำหรับคนพิการตัดขาระดับใต้เข่า (Below Knee: AK) โดยขาเทียมประเภทนี้มีส่วนประกอบ ได้แก่. soft socket ทำด้วย pelite, เบ้าพลาสติก แบบ hard socket ทำด้วย HDPE, couplinf ทำด้วยอะลูมิเนียม, alignment unit ทำด้วย ABS,แกนหน้าแข้ง (pylon)และเท้าเทียม

ประเภทของขาเทียมตามลักษณะแกนของขาเทียม

1. ขาเทียมแกนนอก (Exoskeleton Prosthesis) เป็นระบบขาเทียมใช้ไม้ หรือโฟมอัดแน่นเป็นแกนขา และหุ้มด้วยพลาสติกเรซิน เพื่อป้องกันการสึกกร่อนและมีความสวยงามคล้ายขาจริง

2. ขาเทียมแกนใน (Endoskeleton Prosthesis) เป็นขาเทียมใช้แกนขาเป็นโลหะ หรือพลาสติกเป็นแกน นอกจากนี้สามารถใช้งานแบบเปลือย หรือหุ่มด้วยโฟมเพื่อความสวยงานก็ได้

ความแตกต่างของขาเทียมแบบแกนนอก และขาเทียมแบบแกนใน

1. ขาเทียมแกนนอกจะมีน้ำหนักมากว่าขาเทียมแกนใน โดยเฉพาะวัสดุแกนขาที่ทำจากไม้

2. ขาเทียมแกนนอกจะใช้ระยะเวลาในการผลิตนานกว่า โดยเฉพาะการแต่งไม้ให้มีรูปทรงที่เหมาะสม กับขา

3. ความคงทนแข็งแรง ขาเทียมแกนนอกจะมีอายุการใช้งานที่สั้นกว่าขาเทียมแกนใน

4. ขาเทียมแกนนอกหากเกิดการแตกหัก หรือเกิดความเสียหายขึ้นกับส่วนประกอบของขาเทียมส่วนใดส่วนหนึ่งจะต้องผลิตใหม่ทั้งชิ้น เนื่องจากการผลิตเป็นชิ้นส่วนที่ติดต่อกันทุกส่วน ส่วนขาเทียมแกนใน สามารถถอดเปลี่ยนได้ จึงเป็นการลดการสิ้นเปลืองทรัพยากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 ส่วนประกอบของขาเทียม

1. เบ้าพลาสติก (socket) เป็นพลาสติก HDPE และ Polypropylene Copolymer

2. ลิ้นดูดสุญญากาศ (suction valve)

3. ข้อเข่า (hinge joint) สำหรับการถูกตัดผ่านระดับข้อทำด้วย stainless steel

    1. ข้อเข่าเทียมแบบปลอดภัย (safety knee) ข้อ ซึ่งจะช่วยลดอุบัติเหตุการหกล้มขณะลงน้ำหนัก

    2. ข้อเข่าเทียมงอพับง่ายทำด้วยพลาสติก

    3. ข้อเข่าเทียมแบบปลอดภัยชนิดหลายจุดศูนย์กลาง (Poly centric knee joint) เป็นข้อชนิดใหม่ที่มูลนิธิขาเทียม ผลิตขึ้นซึ่งจะช่วยลดอุบัติเหตุการหกล้มขณะลงน้ำหนักอันเนื่องมาจากข้อเข่าเทียมงอพับง่าย มีน้ำหนักเบา สามารถถอดประกอบได้ง่าย มีความมั่นคงในขณะก้าวเดิน ลงน้ำหนัก

4. แกนหน้าแข้ง (pylon) ทำด้วยพลาสติก

5. เท้าเทียม ประกอบด้วย

    1. เท้าเทียมแบบ SACH (dynamic) ที่จะสร้างด้วยพลาสติกเปลือกหุ้มรูปเท้าทำด้วย polyurethane

    2. เท้าเทียม แบบ syme เปลือกหุ้มทำด้วย polypropylene แกนในเป็น polyurethane

    3. เท้าเทียมประหยัดพลังงาน ผู้พิการสวมใส่เดินได้ไกลขึ้นและเหนื่อยน้อยลง

    4. เท้าเทียมเกษตร มูลนิธิขาเทียมเป็นผู้พัฒนาขึ้นมา ซึ่งเท้าเทียมนี้มีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความแข็งแรงทนทาน ยึดเกาะพื้นดินได้ดี ราคาถูกทนความเป็นกรดด่าง สามารถใส่เดินในน้ำในดินโคลน ในคอกปศุสัตว์ ปีนต้นไม้และภูเขาได้ง่าย

6. อุปกรณ์ยึดและปรับความเอียงของเบ้า (coupling)

7. อุปกรณ์ปรับแนว (alignment unit) ทำด้วยพลาสติก ส่วนประกอบที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ได้แก่ เท้าเทียม ข้อเข่า แกนขา ทั้งชนิดแกนในและแกนนอก โดยทั่วไปนำเข้าโดย บริษัท OTTOBOCK (South East Asia) จำกัด เป็นผู้นำเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 หน่วยงานที่ให้บริการขาเทียมแก่คนพิการ [6]

หน่วยงานที่ให้บริการขาเทียมแก่คนพิการหน่วยงานที่ให้บริการผลิตและบริการขาเทียมด้านต่างๆ ในประเทศไทยประกอบด้วย

1. มูลนิธิขาเทียมในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนีเป็นหน่วยงานที่ให้บริการผลิตขาเทียมให้กับคนพิการตัดขา โดยไม่คิดมูลค่า และผลิตกายอุปกรณ์อื่นๆ โดยขาเทียมของมูลนิธิฯเป็นขาเทียมชนิดแกนใน (endoskeletal) เป็นเบ้าประกอบกับอุปกรณ์ปรับแนวและแกนหน้าแข้ง (pylon) ทำด้วยพลาสติกหุ้มแต่งเป็นรูปขาด้วยโฟมแข็ง (rigid foam) และเคลือบหุ้ม (laminate) ด้วย polyester resin หรือ น่องสำเร็จรูปทำจาก polyurethane (P.U.) ทำให้ได้ขาเทียมที่ทำได้รวดเร็วมีน้ำหนักเบาตามแบบของชนิดแกนในแต่แข็งแรงทนทานเหมือนชนิดแกนนอก

2. ศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ เป็นหน่วยงานด้านการฟื้นฟูสมรรถภาพคนพิการด้านร่างกาย รวมทั้งกายอุปกรณ์ ขาเทียม โดยมีโรงเรียนกายอุปกรณ์ซึ่งทางประเทศญี่ปุ่น ได้ส่งบุคลากรที่มีความชำนาญด้านขาเทียมมาสอน นอกจากนี้ยังได้จัดให้มีการออกหน่วยบริการสำหรับคนพิการที่ต้องได้รับขาเทียมตามโครงการต่างๆ

3. โรงพยาบาลของรัฐ ที่มีหน่วยให้บริการด้านกายอุปกรณ์และแขนขาเทียม เป็นหน่วยให้บริการผลิต และซ่อมแซมขาเทียม ซึ่งจะมีช่างกายอุปกรณ์เป็นผู้จัดทำ

4. โรงพยาบาลในสังกัด กระทรวงกลาโหม ได้แก่ โรงพยาบาลพระมงกุฎเกล้า โรงพยาบาลทหารผ่านศึก เป็นต้น

5. โรงพยาบาลสังกัดกระทรวงมหาดไทย ได้แก่ โรงพยาบาลตำรวจ

6. โรงพยาบาลเอกชน ที่มีหน่วยให้บริการด้านกายอุปกรณ์และแขนขาเทียม

7. บริษัทผู้แทนจำหน่าย เช่น บริษัท OTTOBOCK (South East Asia) จำกัด เป็นต้น

2.3.7 เทคโนโลยีขาเทียมในประเทศไทย

ในประเทศไทย มีหน่วยงานที่ทำการวิจัย พัฒนาขาเทียมและส่วนประกอบขาเทียมหลายหน่วยงาน

1. สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทำการพัฒนาขาเทียมแบบปรับอัตราหน่วงได้ เป็นการพัฒนาระบบขาเทียมโดยเฉพาะข้อเข่าเทียมที่สามารถปรับอัตราหน่วงของของไหล เพื่อให้การเคลื่อนไหวของข้อเข่าเป็นไปอย่างราบเรียบ

2. กลุ่มบริการเทคโนโลยี สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร การพัฒนาและผลิตอุปกรณ์ช่วยเหลือคนพิการ ซึ่งเป็นโครงการเพื่อพัฒนาส่วนประกอบต่างๆ ของแขนขาเทียมประกอบด้วย สลักยึด แกนขา ข้อเข่า และมือตะขอ เพื่อส่งต่อให้หน่วยงานที่ผลิตขาเทียมนำไปผลิตให้กับคนพิการไว้ใช้ ในราคาถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติทำการผลิตและทดสอบต้นแบบเท้าเทียมเพื่อใช้ในเชิง สาธารณประโยชน์สำหรับผู้พิการร่วมกับศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อขยายผลจากงานวิจัยเรื่อง "การพัฒนาต้นแบบเท้าเทียมสำหรับผู้พิการโดยกระบวนการฉีดขึ้นรูป" ซึ่งเป็นการศึกษาเพื่อเลือกวัสดุที่เหมาะสมกับการใช้เป็นส่วนประกอบต่างๆ ในเท้าเทียม การนำคอมพิวเตอร์มาช่วยในออกแบบเท้าเทียม และการนำต้นแบบเท้าเทียมไปทดสอบกับผู้พิการ

2.3.8 เทคโนโลยีขาเทียมของต่างประเทศ

Akin O. Kapti, M. Sait Yucenur (2006). ทำการศึกษาออกแบบข้อต่อขาเทียมโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวควบคุมในการเคลื่อนไหว งอและเหยียดขา เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างอิสระ โดยทดลองให้ผู้พิการตัดขาเดินและทดสอบการใช้งานจริง ซึ่งจากการทดลองพบว่า การควบคุมการเดิน ทำได้สะดวกขึ้นคล้ายการเดินโดยขาจริง แต่ขนาดของมอเตอร์แบตเตอรี่ยังมีขนาดใหญ่ และน้ำหนัก จึงได้มีการพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลงและน้ำหนักเบาขึ้นต่อไป

Woodie C. Flowers. ทำการพัฒนาระบบขาเทียม โดยใช้การโปรแกรมคอมพิวเตอร์โปรแกรมการทำงานของข้อต่อ ซึ่งได้ทำการพัฒนาระบบข้อต่อให้สามารถควบคุมการทำงาน การงอและเหยียด ผ่านการควบคุมโดยมือซึ่งทำการต่อสายออกมา เพื่อง่ายต่อการสั่งงานควบคุม การงอและเหยียดขา

The National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities (NRCD) ประเทศญี่ปุ่น พัฒนาพัฒนาต้นแบบขาเทียมหุ่นยนต์ขึ้นโดยการสั่งงานผ่านคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถควบคุมการเดิน ตำแหน่งการลงน้ำหนักเท้าให้เหมาะสมโดยการติดตั้ง sensor ตรวจวัดค่าการลงน้ำหนักเพื่อป้องกันการล้ม การเคลื่อนไหวข้อเข่า เพื่อทำการวิเคราะห์ผลและทำการปรับปรุงให้มีความเหมาะสมในแต่ละบุคคล ซึ่งขณะนี้อยู่ในระหว่างการพัฒนาต้นแบบ โดยในปัจจุบันยังมีขนาดใหญ่ และในอนาคตจะทำการพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลงใกล้เคียงกับขามนุษย์ นอกจากนี้ ได้ทำการพัฒนาเครื่องทดสอบเท้าเทียมเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของเท้าเทียม

Media lab of Massachusetts Institutes of Technology: MIT ประเทศสหรัฐอเมริกา พัฒนาเท้าเทียมแบบประหยัดพลังงาน โดยใช้ระบบ Multiple spring และ Battery- powered motor ช่วยในการควบคุมการทำงานและการเดิน ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินมากขึ้นถึง 30-40 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะขณะก้าวเท้า ในปัจจุบันได้พัฒนาเป็นต้นแบบซึ่งมีขนาดใหญ่และน้ำหนักค่อนข้างมาก และในอนาคตจะทำการพัฒนาให้มีขนาดที่เล็กลงใกล้เคียงกับเท้ามนุษย์ มีน้ำหนักเบาขึ้นและมีการเดินใกล้เคียงและเป็นธรรมชาติมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.9 อนาคตด้านเทคโนโลยีขาเทียม

1. ปัจจุบันการพัฒนาระบบควบคุมขาเทียมโดยใช้สัญญาณการทำงานของกล้ามเนื้อ EMG เป็นการเอาสัญญาณไฟฟ้าของกล้ามเนื้อในส่วนที่เหลือของขามาควบคุมการทำงานของขาเทียม

2. ในอนาคต ได้มีการวางแผนการพัฒนาการควบคุมขาเทียม จากสัญญาณคลื่นสมอง (Brain Wave) โดยการติด Sensor ไว้บนศีรษะในส่วนสมองที่ควบคุมการเคลื่อนไหวกล้ามเนื้อขา และส่งสัญญาณไปยังขาเทียมเพื่อทำการควบคุมการเดินของขาเทียม

3. ขาเทียมแบบหุ่นยนต์ ปัจจุบันนักวิจัยที่ทำการพัฒนาหุ่นยนต์ได้พัฒนาการเดินของหุ่นยนต์ให้ใกล้เคียงกับมนุษย์ ทำให้การควบคุมการเดินมีความใกล้กับการเดินของมนุษย์โดยทั่วไป และนำเทคโนโลยีนี้มาพัฒนากับขาเทียมหุ่นยนต์เพื่อให้การเดินใกล้เคียงกับมนุษย์

4. ในประเทศไทย มูลนิธิขาเทียมในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี ศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ และหน่วยงานเครือข่าย ได้จัดทำโครงการวิจัย พัฒนา และให้บริการแขนขาเทียม ตามพระราชดำริสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี โดยได้ร่วมมือพัฒนาขาเทียม และส่วนประกอบขาเทียมในราคาถูก และมีประสิทธิภาพเท่าเทียมกับของต่างประเทศ เพื่อให้คนพิการไวใช้

5. การพัฒนาเครื่องมือทดสอบประสิทธิภาพของส่วนประกอบขาเทียม ได้แก่ เครื่องทดสอบเท้าเทียม เครื่องทดสอบข้อเข่าเทียม เครื่องทดสอบประสิทธิภาพของส่วนประกอบต่างๆ ของขาเทียม

6. การพัฒนาศูนย์ และหน่วยทดสอบประสิทธิภาพขาเทียม เพื่อทำการทดสอบขาเทียมและส่วนประกอบขาเทียมเป็นไปตามมาตรฐานสากล

2.3.10 วิวัฒนาการของอวัยวะเทียม [7]

ในเมืองไทยการพัฒนาอวัยวะเทียมไม่ปรากฏหลักฐานทางประวัติศาสตร์มากนัก ที่พอสืบได้คือเริ่มมีการสอนเรื่องนี้จริงจังโดยรับเทคโนโลยีจากตะวันตกช่วง 50 ปีที่ผ่านมา ที่น่าสนใจคือระหว่างที่มีความพยายามสร้างองค์ความรู้ในเมือง ในพื้นที่ชายแดนที่เต็มไปด้วยการสู้รบและในพื้นที่ชนบทห่างไกล มีการสร้างอวัยวะเทียมจากวัสดุท้องถิ่นโดยฝีมือประชาชนในพื้นที่ ขาเทียมและอุปกรณ์เสริมที่ปรากฏในหน้านี้คือส่วนหนึ่งของวิวัฒนาการดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.9 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(3)

ขาเทียมรุ่นเก่าสำหรับผู้พิการที่ถูกตัดขาในระดับเหนือเข่า เทคนิคสร้างขาเทียมแบบนี้นิยมมากช่วงหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 ตัวขาเทียมประดิษฐ์จากวัสดุง่ายๆ เบ้าทำจากหนังสัตว์ แกนหน้าแข้งทำจากไม้ ข้อเสียคือสวมใส่ไม่สบายและมีน้ำหนักมาก

รูปที่ 2.10 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาเทียมรุ่นใหม่สำหรับผู้พิการที่ถูกตัดขาในระดับเหนือเข่า เบ้าสำหรับสวมกับตอขาเป็นพลาสติกน้ำหนักเบา มีข้อเข่าที่ทำงานได้ใกล้เคียงกับหัวเข่าจริง แกนหน้าแข้งทำจากอะลูมิเนียม เท้าทำจากพลาสติกที่มีความยืดหยุ่นน้ำหนักเบาและใช้งานได้ง่าย ขาเทียมลักษณะนี้นิยมใช้มาตั้งแต่หลังปี 2500

รูปที่ 2.11 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(5)

ขาเทียมสำหรับผู้พิการที่ถูกตัดขาระดับเหนือเข่า หลังจากตกแต่งให้มีลักษณะคล้ายขาจริงแล้ว ขาเทียมสำหรับผู้พิการที่ถูกตัดขาระดับใต้เข่า เทคนิคยุคปัจจุบัน เบ้าทำจากพลาสติก น้ำหนักเบา แกนหน้าแข้งทำจากอะลูมิเนียม และเท้าทำจากพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น

รูปที่ 2.12 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(6)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขาเทียมสำหรับผู้พิการที่ถูกตัดขาระดับใต้เข่า เทคนิคยุคปัจจุบัน เบ้าทำจากพลาสติกน้ำหนักเบา แกนหน้าแข้งทำจากอะลูมิเนียม และเท้าทำจากพลาสติกที่มีความยืดหยุ่น

รูปที่ 2.13 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(7)

ขาเทียมสำหรับผู้พิการที่ถูกตัดขาระดับใต้เข่า หลังจากตกแต่งให้มีลักษณะคล้ายกับขาจริง เพื่อให้ผู้พิการใช้งานในชีวิตประจำวันได้อย่างกลมกลืนกับคนปกติในสังคม

รูปที่ 2.14 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(8)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล็กพยุงขา (Brace) ช่วยในการเดินของผู้ป่วยที่มีขาลีบเล็กทั้งขา อันมีสาเหตุมาจากโรคโปลิโอ ทำจากโครงโลหะ และพลาสติกน้ำหนักเบา

รูปที่ 2.15 ขาเทียมรูปแบบต่างๆ(9)

เหล็กพยุงขา (Brace) ช่วยในการเดินของผู้ป่วยที่มีขาลีบเล็กเฉพาะส่วนใต้เข่าลงมา อันมีสาเหตุมาจากโรคโปลิโอ ทำจากโครงโลหะ และได้รับการออกแบบให้ใส่รองเท้าผ้าใบได้เหมือนคนปกติ

2.3.11 ขาเทียมยุคใหม่ [8]

ปัจจุบันประเทศไทยมีจำนวนผู้พิการสูญเสียขามากกว่า 50,000 ราย สาเหตุของการเกิดความพิการนั้นมาจากหลายกรณี หากเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย คือ เกิดจากอุบัติเหตุทางการจราจร การเหยียบกับระเบิด เกิดจากแผลเรื้อรังจากโรคเบาหวาน ความพิการผิดปกติมาแต่กำเนิดและสาเหตุอื่นๆ ทั้งนี้ผู้พิการเหล่านี้ล้วนมีความต้องการที่จะได้รับความช่วยเหลือเรื่องขาเทียมชนิดสวมใส่พอดี เดินได้เหมือนธรรมชาติ ทนทาน น้ำหนักเบา ผลิตภัณฑ์ขาเทียมจากต่างประเทศ

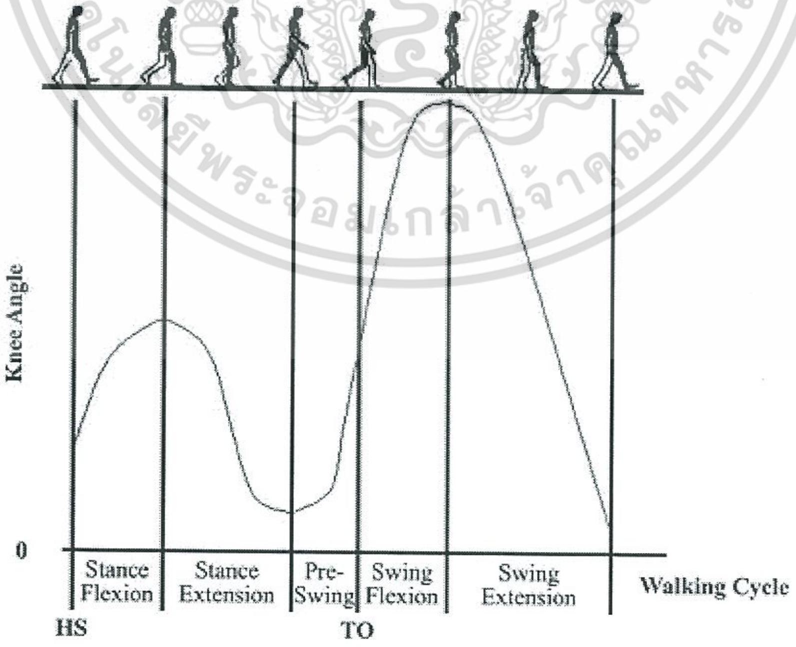
มีสมรรถนะดีแต่จำหน่ายในราคาที่สูงมาก ดังนั้นเพื่อสร้างโอกาสให้กับผู้พิการของประเทศไทย มีโอกาสใช้ขาเทียมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่และสามารถดำรงชีวิตประจำวันได้สะดวกขึ้น สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (ฟีโบ้) จึงร่วมงานกับศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ มูลนิธิขาเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี ดำเนินงานโครงการตามพระราชดำริ เพื่อความก้าวหน้าในการวิจัยพัฒนา และให้บริการแขนขาเทียมในประเทศไทย โดยฟีโบ้รับทำหน้าที่ วิจัย ออกแบบ จัดสร้าง ทดสอบขาเทียมแบบเหนือหัวเข่า ด้วยมุ่งหวังนำองค์ความรู้และเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดต้นทุนการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศ อีกทั้งเป็นการดำเนินงานตามนโยบายเรื่องการขยายโอกาสเข้าถึงบริการสังคมของผู้พิการเพื่อเสริมสร้างสุขภาพ และศักยภาพต่อไป

ระบบการทำงานของหัวเข่าของมนุษย์เป็นส่วนที่มีความสลับซับซ้อนอย่างมาก เนื่องจากหัวเข่าเป็นส่วนที่ต้องรองรับการยืน การเคลื่อนไหวต่างๆ การนั่ง และต้องอาศัยการควบคุมการเดินให้มีความสะดวกราบรื่นรวมทั้งยังต้องรองรับแรงที่กระทำในขณะที่ทำการเดินอยู่ด้วย ดังนั้นระบบเข่าเทียมจึงได้มีวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปเข่าเทียมที่นิยมทำกันจะเป็นระบบแบบ Passive คือกลไกของเข่าเทียมจะทำการสะสมพลังงานเมื่อมีการรับน้ำหนักและจะทำการปลดปล่อยพลังงานออกไปเมื่อมีการแกว่งขา ซึ่งจะทำการปรับการแกว่งของขาโดยใช้ ยางและสปริง หรือแม้กระทั่งระบบนิวเมติกหรือไฮดรอลิกเป็นส่วนประกอบ ในปัจจุบันระบบเข่าเทียมได้นำระบบการควบคุมมาใช้ในการปรับค่าการสะสมและการปลดปล่อยพลังงานในช่วงจังหวะการเดินโดยผ่านทางระบบการปรับความหนืดของกลไกข้อเข่า เพื่อช่วยให้ผู้พิการสามารถเดินได้อย่างราบรื่นและสามารถทำกิจวัตรประจำวันได้เหมือนกับคนปกติทั่วไป

ลักษณะการเดินของมนุษย์โดยปกติทั่วไปเราสามารถแบ่งช่วงจังหวะการเดินในวงรอบของการก้าวขา 1 ครั้งนั้นแบ่งได้เป็น 5 ช่วงด้วยกันดังรูปที่ 2.16 คือ

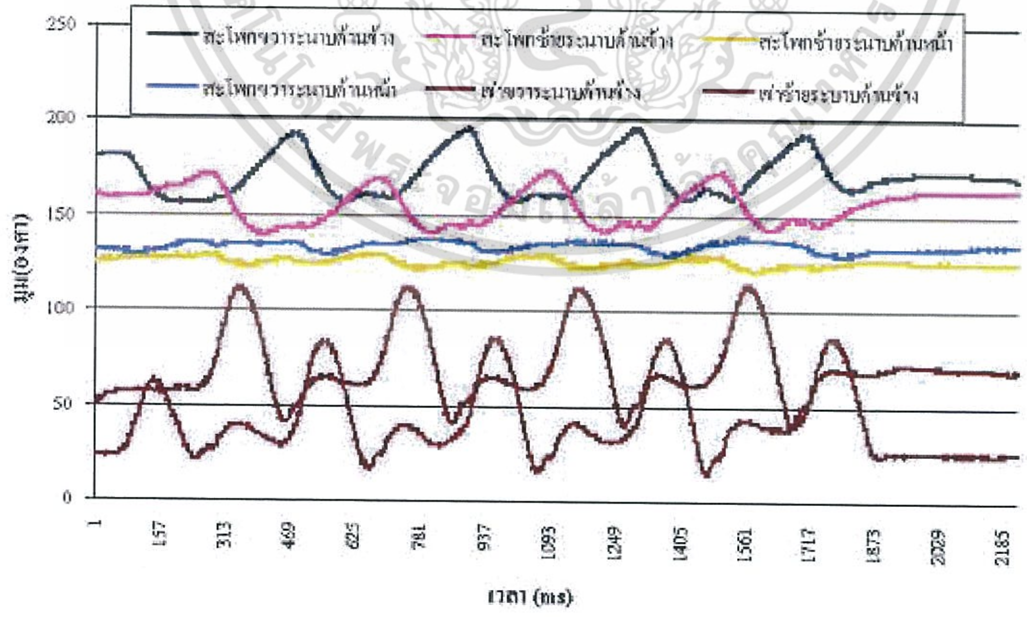


รูปที่ 2.16 ช่วงจังหวะการเดินในวงรอบของการก้าวขา 1 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **Stance Flexion** คือสภาวะที่คนเราเริ่มนำขาที่ก้าวไปนั้นรองรับน้ำหนักในวงรอบต่อไปโดยจุดแรกที่เริ่มรองรับน้ำหนักคือ ส่วนของส้นเท้าโดยจะเห็นจากรูป (ขาด้านสีดำ) ว่าในช่วงเริ่มต้นช่วงนี้ขาข้างที่ก้าวไปรับน้ำหนักนั้นจะมีมุมของข้อเข่าน้อย(ขายืดเกือบสุด)
- **Stance Extension** คือสภาวะที่เราถ่ายเทน้ำหนักของลำตัวไปที่ขาด้านที่เราก้าวเข้ามารับน้ำหนักในช่วง Stance Flexion เมื่อน้ำหนักทั้งหมดถูก ถ่ายเทมาจนหมดก็จะทำการก้าวขาอีกข้างหนึ่ง(ขาด้านสีขาว)เพื่อไปทำการลองรับน้ำหนักในช่วงก้าวต่อไป
- **Pre-swing** เมื่อขาอีกข้างหนึ่ง(ขาด้านสีขาว)ก้าวไปรับและเริ่มทำการถ่ายเทน้ำหนักไปแล้ว ในช่วงนี้ขาด้านสีดำจะเตรียมตัวในการก้าวเดินเพื่อไปอยู่ในช่วงต่อไป ในช่วงสภาวะนี้จะเริ่มขึ้นจนกระทั่งหัวแม่เท้าของขาด้านที่เตรียมก้าวเริ่มลอยออกจากพื้น
- **Swing Flexion** คือสภาวะที่ขาด้านที่ก้าวออกจากพื้น(ขาด้านสีดำ) ทำการแกว่งไปด้านหน้าจนกระทั่งผ่านลำตัว ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่ามุมที่ข้อเข่าของขาด้านนี้จะมีค่าสูงที่สุดหรืองอมากที่สุดเพื่อที่จะทำให้สามารถแกว่งขาไปได้โดยไม่ติดพื้น
- **Swing Extension** เมื่อขาด้านที่แกว่งก้าวผ่านจุดศูนย์กลางลำตัวไปแล้ว ขาด้านนี้ก็จะต้องแกว่งไปด้านหน้าพร้อมกับยืดขาไปอีกเพราะจะต้องไปทำหน้าที่ในการรับน้ำหนักในช่วงก้าวต่อไปซึ่งหลังจากสภาวะนี้แล้วกระบวนการเดินก็จะวนกลับไปเป็น Stance Extension และก็วนเป็นวงรอบแบบนี้ไปเรื่อยๆตลอดเวลาในการเดิน

ดังนั้นถ้าเราทำการเดินแบบต่อเนื่องจะทำให้สามารถวัดตำแหน่งมุมข้อต่อต่างๆภายในขาของเราออกมาได้ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าข้อเข่านั้นมีการเปลี่ยนแปลงองศาในการเคลื่อนที่มากที่สุด



รูปที่ 2.17 การวัดตำแหน่งมุมข้อต่อต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันประเทศไทยมีจำนวนผู้พิการสูญเสียขามากกว่า 50,000 ราย สาเหตุของการเกิดความพิการนั้นมาจากหลายกรณี หากเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย คือ เกิดจากอุบัติเหตุทางการจราจร การเหยียบกับระเบิด เกิดจากแผลเรื้อรังจากโรคเบาหวาน ความพิการผิดปกติมาแต่กำเนิดและสาเหตุอื่นๆ ทั้งนี้ผู้พิการเหล่านี้ล้วนมีความต้องการที่จะได้รับความช่วยเหลือเรื่องขาเทียมชนิดสวมใส่พอดี เดินได้เหมือนธรรมชาติ ทนทาน น้ำหนักเบา ผลิตภัณฑ์ขาเทียมจากต่างประเทศ

มีสมรรถนะดีแต่จำหน่ายในราคาที่สูงมาก ดังนั้นเพื่อสร้างโอกาสให้กับผู้พิการของประเทศไทย มีโอกาสใช้ขาเทียมที่ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วยเทคโนโลยีสมัยใหม่และสามารถดำรงชีวิตประจำวันได้สะดวกขึ้น สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (ฟีโบ้) จึงร่วมงานกับศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ศูนย์สิรินธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ มูลนิธิขาเทียมในสมเด็จพระศรีนครินทราบรมราชชนนี ดำเนินงานโครงการตามพระราชดำริ เพื่อความก้าวหน้าในการวิจัยพัฒนา และให้บริการแขนขาเทียมในประเทศไทย โดยฟีโบ้รับทำหน้าที่ วิจัย ออกแบบ จัดสร้าง ทดสอบขาเทียมแบบเหนือหัวเข่า ด้วยมุ่งหวังนำองค์ความรู้และเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ ลดต้นทุนการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศ อีกทั้งเป็นการดำเนินงานตามนโยบายเรื่องการขยายโอกาสเข้าถึงบริการสังคมของผู้พิการเพื่อเสริมสร้างสุขภาพ และศักยภาพต่อไป

ระบบการทำงานของหัวเข่าของมนุษย์เป็นส่วนที่มีความสลับซับซ้อนอย่างมาก เนื่องจากหัวเข่าเป็นส่วนที่ต้องรองรับการยืน การเคลื่อนไหวต่างๆ การนั่ง และต้องอาศัยการควบคุมการเดินให้มีความสะดวกราบรื่นรวมทั้งยังต้องรองรับแรงที่กระทำในขณะที่ทำการเดินอยู่ด้วย ดังนั้นระบบเข่าเทียมจึงได้มีวิวัฒนาการมาอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปเข่าเทียมที่นิยมทำกันจะเป็นระบบแบบ Passive คือกลไกของเข่าเทียมจะทำการสะสมพลังงานเมื่อมีการรับน้ำหนักและจะทำการปลดปล่อยพลังงานออกไปเมื่อมีการแกว่งขา ซึ่งจะทำการปรับการแกว่งของขาโดยใช้ ยางและสปริง หรือแม้กระทั่งระบบนิวเมติกหรือไฮดรอลิกเป็นส่วนประกอบ ในปัจจุบันระบบเข่าเทียมได้นำระบบการควบคุมมาใช้ในการปรับค่าการสะสมและการปลดปล่อยพลังงานในช่วงจังหวะการเดินโดยผ่านทางระบบการปรับความหนืดของกลไกข้อเข่า เพื่อช่วยให้ผู้พิการสามารถเดินได้อย่างราบรื่นและสามารถทำกิจวัตรประจำวันได้เหมือนกับคนปกติทั่วไป

ขาเทียมที่ปรับอัตราหน่วงด้วยระบบ Microprocessor ใช้หลักการเลียนแบบลักษณะของมุมหัวข้อเข่าในการปรับอัตราหน่วงโดยถ้าเราเดินแบบต่อเนื่องนั้น หัวข้อเข่าเทียมนั้นจะพยายามรักษาขนาดของมุมของข้อเข่าให้ได้ ซึ่งก็คือการทำงานของหัวข้อเข่าของคนเรานั่นเอง ในปัจจุบัน การทำหัวเข่าเทียมที่ใช้ระบบ Microprocessor ควบคุมนั้น มีการทำอยู่หลายบริษัทด้วยกัน ลักษณะการทำงาน

- ผู้ป่วยใช้การงอขา ทำให้เกิดการหมุนตัวของข้อหัวเข่า และควบคุมความหนืดด้วยของเหลว ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ทันที จากไมโครโปรเซสเซอร์
- ผู้ป่วยใช้การเหวี่ยงขา และ/หรือสปริงเป็นตัวทำให้ขากลับไปสู่ตำแหน่งยืดตรงและควบคุมความหนืดด้วยของเหลว ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนได้ทันที จากไมโครโปรเซสเซอร์
- เมื่อขาเริ่มสัมผัสพื้นเพื่อยืน หรือเพื่อก้าวต่อไป ไมโครโปรเซสเซอร์จะทำการปิดช่องทางการไหลเพื่อทำการ ล็อกขาให้อยู่ในตำแหน่งนั้น
- ลักษณะกิจกรรมที่เหมาะสม : กิจกรรมทั่วๆ ไป และสามารถเดินภายนอกบ้านได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rheo-Knee เป็นระบบเข่าเทียมที่ใช้ระบบ Microprocessor ควบคุมอัตราหน่วงเหมาะกับผู้ใช้ที่มีน้ำหนักไม่เกิน 90 กิโลกรัม สามารถปรับเปลี่ยนการทำงานได้เอง โดยอาศัยปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) มาช่วยในการเรียนรู้และจดจำ เพื่อทำการควบคุมการทำงานของระบบขาเทียมตอบสนองผู้ใช้ได้ทันทีเมื่อผู้ใช้ปรับเปลี่ยนความเร็ว ลักษณะ น้ำหนักและพื้นผิวในการเดินมีการเคลื่อนไหวที่เป็นธรรมชาติและมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยเทคโนโลยีของ Actuator ที่ระดับความแม่นยำสูง ซึ่งทำให้การควบคุมการเคลื่อนไหวเป็นไปได้อย่างลื่นไหลและรวดเร็วในแต่ละช่วงของการเดินได้อย่างเป็นธรรมชาติ ไม่เหมือนกับระบบขาเทียมแบบไฮดรอลิก ที่ต้องใช้การปรับเปลี่ยนความเสียดทานเพื่อตอบสนองการเดินของผู้ใช้คนเดียว ทำให้การปรับจะไม่เหมือนกันในทุกๆ คน

มีความปลอดภัยสูง เนื่องจากมีระบบที่ป้องกันไม่ให้เกิดการล้ม ในกรณีการยืน และมีการเรียนรู้สิ่งรบกวนในเส้นทางเดินอย่างอัตโนมัติ และมีรองรับการหกล้ม ซึ่งจะทำงานเมื่อเกิดการหกล้ม ใช้งานง่ายและสะดวก มีการติดตั้งและปรับเทียบค่าที่ไม่ซับซ้อน และใช้แบตเตอรีก้อนเล็กเพียงก้อนเดียว สามารถใช้งานได้ 48 ชั่วโมง

2.4 Arduino

Arduino อ่านว่า (อา-ดู-อิ-โน่ หรือ อาดุยโน่) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัว บอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย

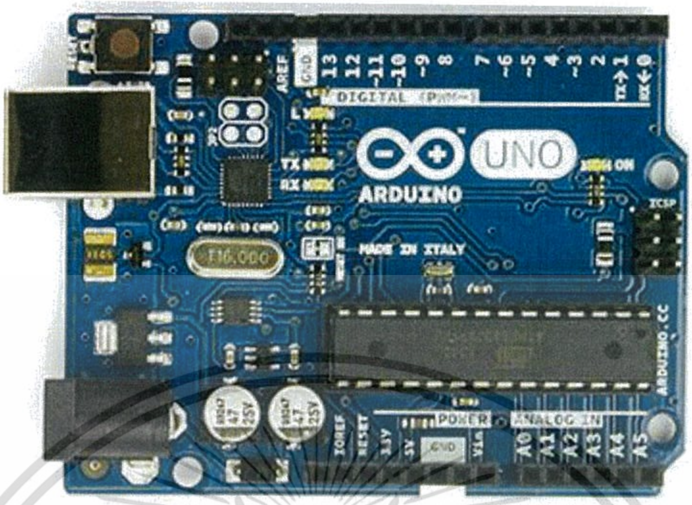
ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิคส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย

2.4.1 จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม

- ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
- มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแรง
- Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- ราคาไม่แพง
- Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

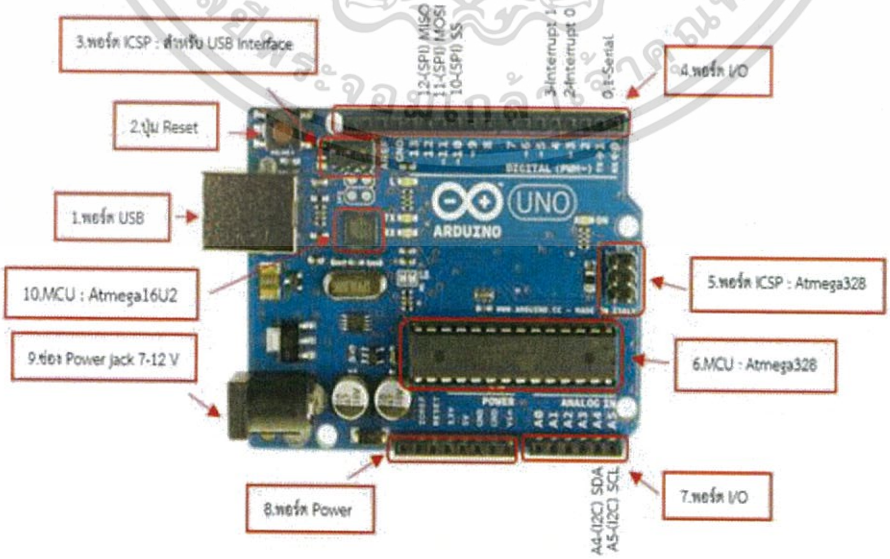
2.4.2 Arduino Uno



รูปที่ 2.18 บอร์ด Arduino Uno [9]

คำว่า Uno เป็นภาษาอิตาลี ซึ่งแปลว่าหนึ่ง เป็นบอร์ด Arduino รุ่นแรกที่ออกมา มีขนาดประมาณ 68.6x53.4mm เป็นบอร์ดมาตรฐานที่นิยมใช้งานมากที่สุด เนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสำหรับการเริ่มต้นเรียนรู้ Arduino และมี Shields ให้เลือกใช้งานได้มากกว่าบอร์ด Arduino รุ่นอื่นๆ ที่ออกแบบมาเฉพาะมากกว่า โดยบอร์ด Arduino Uno ได้มีการพัฒนาเรื่อยมา ตั้งแต่ R2 R3 และรุ่นย่อยที่เปลี่ยนชิปไอซีเป็นแบบ SMD

2.4.2.1 ขาต่างๆของ Arduino UNO



รูปที่ 2.19 ขาต่างของบอร์ด Arduino Uno [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. USBPort: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัพโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button: เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/OPort:Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0, 1 เป็นขา Tx , Rx Serial, Pin3, 5, 6, 9, 10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port: Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. MCU: Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/OPort: นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, Vin
9. Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่านAtmega16U2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 ข้อมูลจำเพาะ

• ชิปไอซีไมโครคอนโทรเลอร์	ATmega328	
• ใช้แรงดันไฟฟ้า	5	V
• รองรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (ที่แนะนำ)	7 – 12	V
• รองรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้า (ที่จำกัด)	6 – 20	V
• พอร์ต Digital I/O	14	พอร์ต
• พอร์ต Analog Input	6	พอร์ต
• กระแสไฟที่จ่ายได้ในแต่ละพอร์ต	40	mA
• กระแสไฟที่จ่ายได้ในพอร์ต 3.3V	50	mA
• พื้นที่โปรแกรมภายใน	32	kB
• พื้นที่แรม	2	kB
• พื้นที่หน่วยความจำถาวร (EEPROM)	1	kB
• ความถี่คริสตัล	16	MHz

2.4.3 Arduino Communication to MATLAB [10]

การติดต่อสื่อสารระหว่าง Arduino กับโปรแกรม Matlab เพื่อให้ Arduino ส่งข้อมูลไปหา Matlab และให้ Matlab นำไปใช้ในการวิเคราะห์ ผลของข้อมูลได้ สามารถทำได้โดยการติดต่อสื่อสารระหว่างกันได้ ผ่านทางพอร์ทอนุกรม (Serial Port) ซึ่ง Arduino จะมีพอร์ทอนุกรม เป็นขา Tx (*Transmitter*) และ Rx (Receiver) หรือสามารถใช้งานผ่าน พอร์ท USB (USB PORT) หากเชื่อมต่อสาย USB เข้ากับคอมพิวเตอร์ ที่ใช้ในการคำนวณของโปรแกรม MATLAB สามารถรับส่งข้อมูลระหว่างกันได้ และการส่งข้อมูลของทั้งสองฝั่งจะต้องอาศัยการใช้ค่าความเร็วในการส่งข้อมูล (baud rate) ที่เหมือนกันเพื่อให้ข้อมูลที่ได้รับมานั้นมีความถูกต้องและครบถ้วนของการส่งข้อมูล

2.4.3.1 การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม

การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมเป็นการรับส่งข้อมูลทีละบิตแทนที่จะทำการรับส่งข้อมูลพร้อมกันทุกบิตในเวลาเดียวกันข้อดีของการสื่อสารแบบนี้คือใช้จำนวนสายในการสื่อสารน้อยสามารถรับส่งได้ในระยะทางที่ไกลๆแต่ก็มีข้อเสียในด้านเวลาเพราะต้องใช้เวลาในการสื่อสารมากเมื่อเทียบกับการสื่อสารแบบขนานอีกทั้งโอกาสเกิดการผิดพลาดของข้อมูลก็สูงกว่าแบบขนาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของการสื่อสาร

รูปแบบของการสื่อสารแบ่งได้ 3 แบบคือ

1. แบบซิมเพล็กซ์(Simplex) เป็นการสื่อสารทางเดียว
2. แบบฮาล์ฟดูเพล็กซ์(Half-duplex) เป็นการสื่อสารได้ทั้งสองทางแต่จะต้องผลัดกันรับ-ส่ง
3. แบบฟูลดูเพล็กซ์(Full-duplex) เป็นการสื่อสารได้ทั้งสองทางและทำได้ในเวลาเดียวกัน

รูปที่ 2.20 รูปแบบการสื่อสารแบ่งตามลักษณะการสื่อสาร

รูปแบบการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม

การติดต่อแบบอนุกรมเมื่อแบ่งตามลักษณะของการส่งข้อมูลแบ่งได้2 แบบคือ

1.การสื่อสารแบบซิงโครนัส (Synchronous)

2.การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous)

3.การส่งข้อมูลแบบไอโซโครนัส (Isochronous Transmission)

การสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส(Synchronous)

เป็นการส่งข้อมูลเป็นบล็อกครั้งละหลายๆไบต์สัญญาณนาฬิกาที่ช่วยให้การทำงานของตัวส่งและตัวรับสอดคล้องกันอาจจะถูกเข้ารหัสอยู่ในชุดของข้อมูลนั้นหรือแยกอิสระออกเป็นสายต่างหากก็ได้ ตัวอย่างการรับส่งข้อมูลแบบนี้ได้แก่โปรโตคอล High-Level Data Link Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรโตคอลHigh-Level Data Link Control (HDLC)

โปรโตคอลHigh-Level Data Link Control (HDLC) ที่ใช้กับโมเด็มแวน(WAN) ซึ่งมีลักษณะแฟรม(Fram) ดังนี้

รูปที่ 2.21 ลักษณะแฟรมของ โปรโตคอล HDLC ที่ใช้ WAN

ตารางที่ 2.1 จำนวนบิตของแต่ละสมาชิกในแฟรม

ชื่อฟิลด์	**ขนาด**
Flag Field(F)	8 บิต
Address Field(A)	8 บิต
Control Field(C)	8 or 16 บิต
Information Field(I)	เปลี่ยนแปลงได้ บางแฟรมก็ไม่ได้ใช้
Frame Check Sequence(FCS)	16 or 32 บิต
Closing Flag Field(F)	8 บิต

การสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส(Asynchronous)

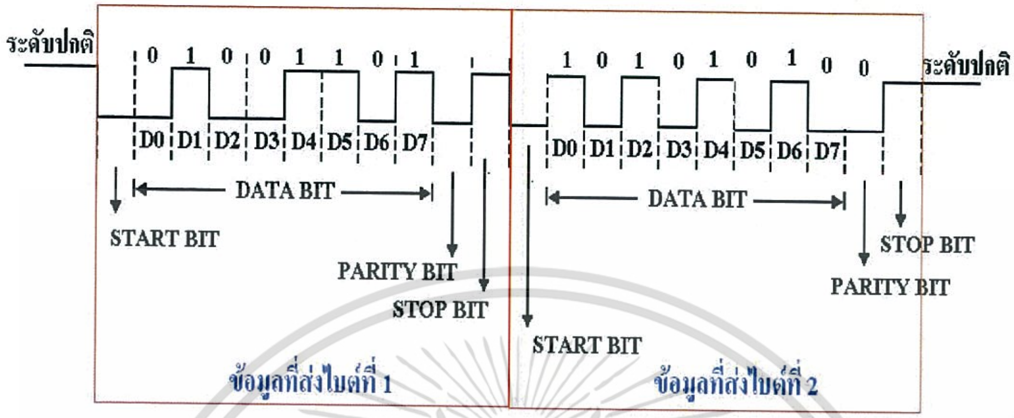
การสื่อสารแบบนี้ใช้มากในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์พีซีรูปแบบการสื่อสารจะเป็นการรับและส่งข้อมูลครั้งละ1 ไบต์ ตัวอย่างโปรโตคอลอะซิงโครนัส Serial Commincation -Example Protocols มีดังนี้

- Morse code
- RS-232 -Recommended Standard 232
- RS422, RS-423, RS-485
- I2C -Inter-Integrated Circuit
- SPI -Serial Peripheral Interface
- USB -Universal Serial Bus
- Firewire
- Ethernet
- Serial ATA -Serial Advanced TEchnology Attachment
- Serial Attach SCSI -Serial Attached Small Computer System
- Interface
- SONET -Synchronous Optical Network
- PCI Express -Peripheral Component Interconnect Express

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส(Asynchronous)

การสื่อสารแบบนี้ใช้มากในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์พีซีรูปแบบการส่งข้อมูลจะเป็นการส่งครั้งละ1 ไบต์โดยมีรูปแบบดังนี้



รูปที่ 2.22 รูปแบบการส่งข้อมูลจะเป็นการส่งครั้งละ1 ไบต์

ความหมายของบิต

Start Bit บอกจุดเริ่มต้นข้อมูลมีขนาด1 บิต Data Bit ค่าข้อมูลมีได้5 ถึง8 บิต Parity Bit บิตสำหรับใช้ตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลมีได้0 ถึง1 บิต Stop Bit บิตใช้บอกจุดสินสุดของข้อมูลมีได้ 1, 1.5 และ 2 บิต

ความเร็วในการสื่อสาร

รูปที่ 2.23 เวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล 1 ไบต์

ความเร็วในการสื่อสารหมายถึงจำนวนบิตที่ใช้รับส่งข้อมูลต่อวินาทีโดยปกติจะมีค่าเท่ากับ 110 150 300 1200 2400 4800 9600 และ19200 บิตต่อวินาทีอัตราความเร็วนี้บางครั้งก็เรียกว่าอัตราบอด(Baud rate) ทั้งตัวส่งและตัวรับต้องกำหนดให้มีความเร็วในการสื่อสารเท่ากันตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลส่งด้วยความเร็ว2400 บิตต่อวินาทีดังนั้นแต่ละบิตใช้เวลาส่งเท่ากับ1/2400 = 416.67 ไมโครวินาที

การสื่อสารแบบข้อมูลแบบไอโซโครนัส (Isochronous Transmission)

มาจากรากศัพท์ในภาษากรีก 2 คำ คือคำว่า iso หมายถึง เท่ากัน และคาว่า chronousที่หมาย ถึง เวลา เมื่อนามารวมกันจึงหมายความว่า เวลาที่เท่ากัน สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญของการส่งข้อมูลแบบไอโซโครนัส คือ การส่งผ่านข้อมูลด้วยความเร็วสูงใน อัตราคงที่ และรับประกันเวลาในการส่ง

เนื่องจากการส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ เช่น ระบบออดิโอและวิดีโอ จาเป็นต้องส่งข้อมูล ด้วยความเร็วสูง ซึ่งการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส (มีการหน่วงเวลาเกิดขึ้นจากช่องว่างระหว่าง เฟรม) และซิงโครนัสก็ยังไม่สามารถรองรับได้ จึงเกิดการส่งข้อมูลแบบไอโซโครนัสขึ้นมา เพื่อใช้งานเรียลไทม์ที่รับประกันข้อมูลที่จะส่งมาถึงด้วยอัตราเร็วคงที่

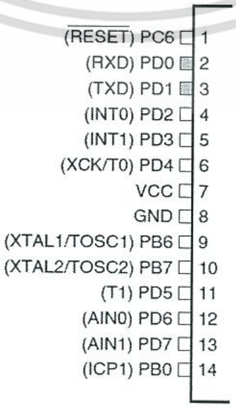
โดยจะนำการส่งข้อมูลแบบไอโซโครนัสมาใช้เพื่อส่งผ่านข้อมูลบนบัส 1394 หรือ เรียกว่า ไฟร์ไวร์ (FireWire) การส่งผ่านข้อมูลของไอโซโครนัสจะตั้งอยู่บนพื้นฐานของแพ็กเก็ต โดยขนาดของแพ็กเก็ตจะส่งผ่านอยู่บนแชนเนลที่ให้ไว้ และสามารถแปรผันจากเฟรมไปยังเฟรมได้ ส่วนขนาดของแพ็กเก็ตจะถูกจำกัดโดยแบนด์วิดธ์เท่าที่มีอยู่

การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR

ไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR สามารถสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมได้โดยใช้โมดูล USART (Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter) โดยสำหรับ ATMega16 ขาพอร์ทอนุกรมกาหนดไว้ที่

PD0 Serial input RxD

PD1 Serial output TxD



รูปที่ 2.24 แสดง ขา Serial Comuniction ของ ATMega16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะของ ATMega168-USART

USART -Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter.

1. ทำงานแบบ Full Duplex (การรับและส่งเป็นอิสระซึ่งกันและกัน)
2. ทำงานได้ทั้งแบบ Asynchronous และ Synchronous
3. Master or Slave Clocked Synchronous Operation
4. High Resolution Baud Rate Generator
5. รองรับการรับส่งข้อมูลแบบ 5, 6, 7, 8, or 9 Data Bits และ 1 หรือ 2 Stop Bits
6. Odd or Even Parity Generation and Parity Check Supported by Hardware
7. Data Over Run Detection
8. Framing Error Detection
9. Three Separate Interrupts on TX Complete, TX Data Register
10. Empty and RX Complete

รีจิสเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานในโหมด USART

1. รีจิสเตอร์ UDR (USART I/O Data Register)
2. รีจิสเตอร์ UCSRA (USART Control and Status Register A)
3. รีจิสเตอร์ UCSRB (USART Control and Status Register B)
4. รีจิสเตอร์ UCSRC (USART Control and Status Register C)
5. รีจิสเตอร์ UBRRL และ UBRRH (USART Baud Rate Register)

รีจิสเตอร์ UDR (USART I/O Data Register)

รีจิสเตอร์สำหรับอ่าน/เขียนข้อมูลขนาด 8 บิต โดยแบ่งเป็น RXB ใช้รับข้อมูลจากภายนอก และ TXB ใช้ส่งข้อมูลให้ภายนอก

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
	RXB[7:0]								UDRn (Read)
	TXB[7:0]								UDRn (Write)
Read/write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial value	0	0	0	0	0	0	0	0	

รูปที่ 2.25 รีจิสเตอร์สำหรับอ่าน/เขียนข้อมูลขนาด 8 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีจิสเตอร์ UCSRA (USART Control and Status Register A)

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานและแสดงสถานการณ์ทำงานของโมดูล USART ชุด A เกี่ยวข้องกับสถานะของการสื่อสารข้อมูล

ตารางที่ 2.2 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์ UCSRA แต่ละบิต

บิตที่	7	6	5	4	3	2	1	0
ชื่อบิต	RXC	TXC	UDRE	FE	DOR	PE	U2X	MPCM
Read/Write	R	R/W	R	R	R	R	R/W	R/W
ค่าเริ่มต้น	0	0	1	0	0	0	0	0

บิตที่ 7 - RXC: USART รับสมบูรณ์ (USART Receive Complete) บิตนี้จะเป็น 1 เมื่อได้รับข้อมูลจากบัฟเฟอร์รับข้อมูล และจะเป็น 0 เมื่อ บัฟเฟอร์ว่าง และถ้าใช้การอินเตอร์รัพท์ เมื่อบิตนี้เป็น 1 จะส่งสัญญาณไป อินเตอร์รัพท์ซีพียู

บิตที่ 6 - TXC: USART ส่งสมบูรณ์ (USART Transmit Complete) บิตนี้จะเป็น 1 เมื่อข้อมูลในบัฟเฟอร์ถูกส่งออกไปแล้วและยังไม่มีข้อมูลใหม่เข้ามา และจะเป็น 0 เมื่อบัฟเฟอร์ว่าง และถ้าใช้การอินเตอร์รัพท์ เมื่อบิตนี้เป็น 1 จะส่งสัญญาณไปอินเตอร์รัพท์ซีพียู

บิตที่ 5 –UDRE (USART data register empty) บิตนี้จะเป็น 1 เมื่อ รีจิสเตอร์ข้อมูล UDR ว่าง พร้อมจะรับข้อมูลตัวใหม่

บิตที่ 4 –FE (Frame error)บิตนี้จะเป็น 1 เมื่อเฟรมข้อมูลผิดพลาดหรือบิตหยุดข้อมูลเป็น 0

บิตที่ 3 –DOR (USART parity error) บิตนี้จะเป็น 1 เมื่อเกิดข้อผิดพลาดแบบ OverRun คือมีข้อมูลใหม่เข้ามาในขณะที่ข้อมูลเดิมยังไม่ถูกอ่านออกไป

บิตที่ 2 –PE (Parity Error)บิตนี้จะเป็น 1 เมื่อเกิดขอ้ผิดพลาดแบบพาริตี้

บิตที่ 1 –U2X (Double the USART transmission speed)ใช้กาหนดอัตราทวีคูณของการสื่อสาร

บิตที่ 0 –MPCM (Multi-processor communication mode)บิตนี้เป็น 1 เมื่อต้องการใช้การสื่อสารแบบมัลติโปรเซสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีจิสเตอร์ UCSRB (USART Control and Status Register B)

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานและแสดงสถานการณ์ทำงานของโมดูล USART ชุด B เกี่ยวข้องกับการอินเตอร์รัพท์และขนาดของข้อมูลแบบ 9 บิต

ตารางที่ 2.3 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์ UCSRB แต่ละบิต

บิตที่	7	6	5	4	3	2	1	0
ชื่อบิต	RXCIE	TXCIE	UDRIE	RXEN	TXEN	UCSZ2	RXB8	TXB8
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R/W
ค่าเริ่มต้น	0	0	0	0	0	0	0	0

บิตที่ 7 - RXCIE: (RX complete interrupt enable) ให้บิตนี้เป็น 1 เมื่อต้องการให้เกิดการอินเตอร์รัพท์ เมื่อรับข้อมูลเข้ามา

บิตที่ 6 - TXCIE: (TX complete interrupt enable) ให้บิตนี้เป็น 1 เมื่อต้องการให้เกิดการอินเตอร์รัพท์ เมื่อส่งข้อมูลแล้ว

บิตที่ 5 - UDRIE: USART data register empty interrupt enable ให้บิตนี้เป็น 1 เมื่อต้องการให้เกิดการอินเตอร์รัพท์ เมื่อรีจิสเตอร์ UDR ว่าง

บิตที่ 4 - RXEN: Receiver enable ให้บิตนี้เป็น 1 เมื่อต้องการให้เกิดการอินเตอร์รัพท์ เมื่อเกิดการรับข้อมูล

บิตที่ 3 - TXEN: Transmitter enable ให้บิตนี้เป็น 1 เมื่อต้องการให้เกิดการอินเตอร์รัพท์ เมื่อเกิดการส่งข้อมูล

บิตที่ 2 - UCSZ2: Character size ใช้กาหนดจำนวนบิตข้อมูล ใช้คู่กับ UCSZ1 และ UCSZ0 ในUCSRC

บิตที่ 1 - RXB8: Receive data bit 8 บิตที่ 8 ของการรับข้อมูล แบบ 9 บิต

บิตที่ 0 - TXB8: Transmit data bit 8 บิตที่ 8 ของการส่งข้อมูล แบบ 9 บิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รีจิสเตอร์ UCSRC (USART Control and Status Register C)

รีจิสเตอร์ควบคุมการทำงานและแสดงสถานการณ์ทำงานของโมดูล USART ชุด A เกี่ยวข้องกับอัตราบอตในการรับส่ง

ตารางที่ 2.4 แสดงสถานะของรีจิสเตอร์ UCSRCแต่ละบิต

บิตที่	7	6	5	4	3	2	1	0
ชื่อบิต	UMSEL	UMSEL0	UPM1	UPM0	USBS	UCSZ1	UCSZ0	UCPOL
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W
ค่าเริ่มต้น	0	0	0	0	0	1	1	0

บิตที่ 7:6 – UMSEL1:0 USART mode select

ตารางที่ 2.5 แสดงสถานะของบิตที่ 6 และ 7

UMSEL1	UMSEL0	Mode
0	0	Asynchronous USART
0	1	Synchronous USART
1	0	(Reserved)
1	1	Master SPI (MSPIM)(1)

บิตที่ 5:4–UPM1:0: Parity mode

ตารางที่ 2.6 แสดงสถานะของบิตที่ 4 และ 5

UPM1	UPM0	Parity mode
0	0	Disable
0	1	Reserved
1	0	Enable พาริตี้คู่
1	1	Enable พาริตี้คี่

บิตที่ 3 –USBS: Stop bit select

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 แสดงสถานะของบิตที่ 3

USBS	Stop bit (s)
0	1-bit
1	2-bit

บิตที่ 2:1 –UCSZ1:0: Character size ใช้ร่วมกับกับ UCSZ2 ในUCSRB

ตารางที่ 2.8 แสดงสถานะของบิตที่ 1 และ 2

UCSZ2	UCSZ1	UCSZ0	Character size
0	0	0	5 บิต
0	0	1	6 บิต
0	1	0	7 บิต
0	1	1	8 บิต
1	0	0	Reserved
1	0	1	Reserved
1	1	0	Reserved
1	1	1	9 บิต

บิตที่ 0 –UCPOL: Clock polarity ในแบบอะซิงโครนัสให้บิตนี้เป็น 0 ถ้าใช้ในแบบ ซิงโครนัสเป็นการกำหนดขอบสัญญาณ XCX

ตารางที่ 2.9 แสดงสถานะของบิตที่ 0

UCPOL	Transmitted data changed (output of TxDn pin)	Received data sampled (input on RxDn pin)
0	Rising XCK edge	Falling XCK edge1Falling
1	Falling XCK edge	Rising XCK edge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 MEMSIC2125 โมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน [11]

รูปที่ 2.26 ตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน

โมดูล MXD2125 เป็นโมดูลวัดความเร่ง (accelerometer sensor) ผลงานของ Memsic Inc. ภายในบรรจุตัวตวรจจับความเร่งแบบ 2 แกน สามารถวัดได้ทั้งความเร่งในเชิงพลศาสตร์ หรือความสั้นสะเทือน และเชิงสถิตยศาสตร์ ซึ่งก็คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

2.5.1.คุณสมบัติของโมดูล MXD2125

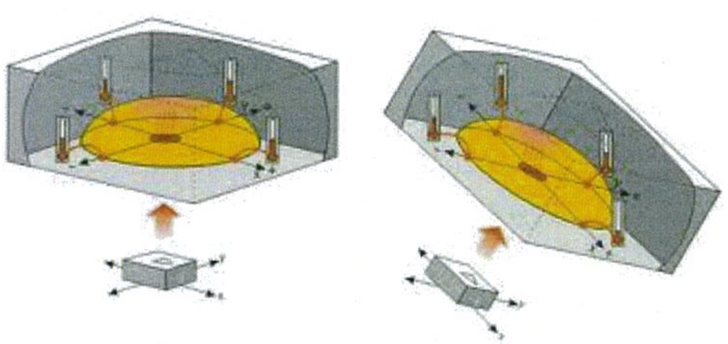
- วัดความเร่งในย่าน ± 2g
- ความละเอียดสูงกว่า 1 mg
- โครงสร้างตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน (ตั้งฉากกัน)
- ติดตั้งวงจรประมวลผลสัญญาณมาภายในตัวถังเดียวกัน
- ทนการเปลี่ยนแปลงแบบเฉียบพลันที่ความเร่งถึง 50,000 g
- รับแรงดันไฟเลี้ยงได้ตั้งแต่ +3 ถึง +5.25 V

เนื่องจากตัวถังของโมดูล MXD2125 เป็นแบบ SMD ทำให้การนำไปใช้งานอาจไม่สะดวกนัก จึงได้นำ MXD2125GL มาติดตั้งบนแผ่นวงจรพิมพ์ จากนั้นต่อขาออกมาให้สามารถติดตั้งบนแผงต่อวงจรหรือเบรดบอร์ดได้เพื่ออำนวยความสะดวกในการทดลองและใช้งาน

2.5.2 หลักการทำงาน

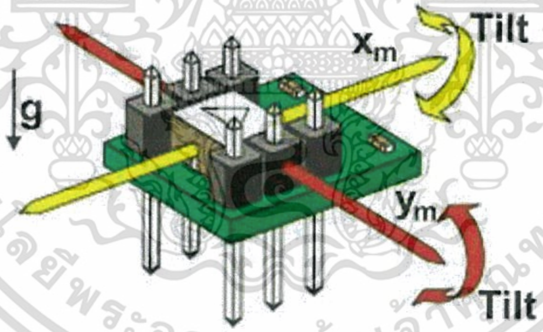
ภายใน MXD2125 ได้บรรจุตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกนที่ผลิตด้วยเทคโนโลยี CMOS ตัวตรวจจับความเร่งนี้ใช้หลักการนำพาความร้อนจากก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน และมีตัวกำเนิดความร้อนที่แกนกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 โครงสร้างภายในของตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน

ภายในตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกนมีชุดเทอร์โมคัปเปิ้ลถูกจัดเรียงทั้งหมด 4 ชุด ในแต่ละแกน ถูกเชื่อมต่อเข้าสู่วงจรประมวลผลสัญญาณเพื่อเปรียบเทียบความสมดุลในการกระจายตัวของความร้อน ซึ่งก็คือ การกระจายตัวของก๊าซภายในตัวตรวจจับ โดยเอาท์พุตจากการตรวจจับความเร่งในแต่ละแกนจะถูกส่งออกทางขาสัญญาณ Dout X สำหรับแกน X และ Dout Y สำหรับแกน Y แบบสัญญาณ PWM ที่มีค่าดิวตี้ไซเกิลแตกต่างกันไปตามสัดส่วนของปริมาณความเร่งในแต่ละแกน โดยทิศทางความเร่งจากการตรวจจับของแกน X และ Y เมื่อมองตัวตรวจจับ ดังรูป



รูปที่ 2.28 แสดงทิศทางความเร่งในแนวแกน X และ Y ที่ตัวตรวจจับความเร่งวัดได้

เมื่อตัวตรวจจับไม่ได้เคลื่อนที่และอยู่ในแนวระนาบ สัญญาณ PWM เอาต์พุตที่ได้ในแต่ละแกนจะมีค่าดิวตี้ไซเกิล เป็น 50% คาบเวลาของสัญญาณเท่ากับ 10 หรือ 2.5 ms ขึ้นอยู่กับเบอร์ของตัวตรวจจับ สำหรับในที่นี้ใช้เบอร์ MXD2125GL จึงให้สัญญาณที่มีคาบเวลา 10 ms มีสัดส่วนความไวต่อค่าดิวตี้ไซเกิลที่ 12.5%/g

นอกจากการนำโมดูล MXD2125 ไปใช้ในการวัดความเร่งในแนวระดับแล้ว นักพัฒนายังนิยมนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานตรวจจับความลาดเอียงของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งเข้ากับโมดูล MXD2125 เพื่อควบคุมแนวการเคลื่อนที่ เช่น ควบคุมหุ่นยนต์ไม่ให้ลาดเอียงตัวมากเกินไป หรือเพื่อเพิ่มกำลังขับของหุ่นยนต์เมื่อเดินทางผ่านที่ลาดชัน หรือแม้กระทั่งควบคุมทิศทางการฉายภาพของ Projector ในตำแหน่งมุมต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 MEMSIC2125 ใช้งานอะไรได้บ้าง

ใช้งานกับหุ่นยนต์

เพื่อวัดความเร่งและการเอียงของหุ่นยนต์

ระบบการตรวจวัดแรงสั่นสะเทือน

เพื่อวัดการสั่นสะเทือนจากเครื่องจักรขนาดใหญ่

ระบบการเตือนและตรวจจับการเคลื่อนไหว

ในโทรศัพท์เคลื่อนที่

เพื่อปรับเปลี่ยนหน้าจอให้หันทิศทางที่ถูกต้องกับผู้ใช้ตลอดเวลา

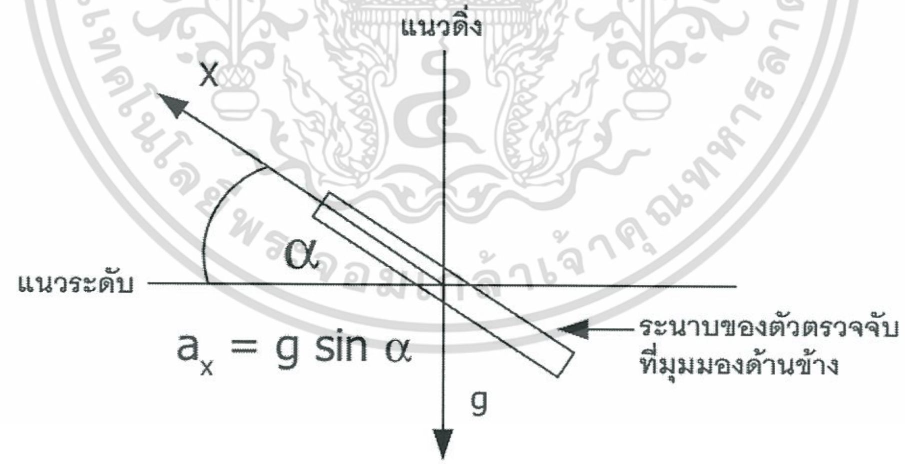
ในเครื่องบินบังคับวิทยุ

เพื่อตรวจสอบการยกตัวหรือเอียงตัวของเครื่องบิน (pitch and yaw)

ใช้ในไฟหน้าของรถยนต์เพื่อปรับระดับการเอียงของหลอดไฟหน้าอัตโนมัติ

ใช้ในระบบกันขโมยรถยนต์ ด้วยวิธีการตรวจจับการเอียงหรือการสั่นสะเทือน

2.5.4 การประยุกต์ใช้งานโมดูลMXD2125 ตรวจจับความลาดเอียง



รูปที่ 2.29 มุมที่ตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกนในแนวระดับ

เมื่อแกนใดๆของตัวตรวจจับเกิดการเอียงตัวทำมุมกับแนวดิ่งของโลก จะส่งผลให้เกิดความไม่สมดุลของกลุ่มอนุภาคก๊าซที่บรรจุอยู่ภายในตัวตรวจจับความลาดเอียงนี้ ทำให้การนำพาความร้อนภายในไม่สมดุลส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าดิวตี้ไซเกิลของสัญญาณ PWM ที่ขาเอาต์พุตของแต่ละแกนที่เกิดการเอียงตัว โดยค่าดิวตี้ไซเกิลที่เปลี่ยนแปลงไปจากสภาะปกตินั้นจะสัมพันธ์กับมุมเอียงไปในแต่ละแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าgที่เอาต์พุต Xout หรือ Yout ของโมดูล MXD2125 ที่มุมเอียงค่าต่างๆ

มุมเอียง (องศา)	เอาต์พุตที่ขา X out หรือ Y out (g)
90	1.000
85	0.996
80	0.985
70	0.940
60	0.866
45	0.707
30	0.500
20	0.342
10	0.174
5	0.087
0	0.000

การคำนวณมุมเอียงจากตัวตรวจจับ

สำหรับโมดูลวัดความเร่ง MXD2125GL จะให้สัญญาณพัลส์ที่เอาต์พุตสำหรับขา X-out และ Y-out ที่มีดิวตี้ไซเกิล 50% ความถี่ 100 Hz หรือมีความกว้างพัลส์ 10 มิลลิวินาที ในภาวะที่แกนนั้นๆ อยู่ในแนวระดับพอดี(ไม่เอียง) และจะให้ค่าดิวตี้ไซเกิลเปลี่ยนแปลงไป 12.5% เมื่อความเร่งเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับค่า g พอดี โดยขนาดของมุมเอียงซึ่งพอจะเทียบเคียงกับความเร่งในหน่วย g ที่เอาต์พุต X-out และ Y-out แสดงไว้ตามตาราง 2.10

ดังนั้นความเร่งเนื่องจากแกนใดแกนหนึ่งในหน่วยจำนวนเต็มเท่าของค่า g โดยสมมติให้เป็น a จะสัมพันธ์กับความกว้างของสัญญาณพัลส์บวกในหน่วยมิลลิวินาที ซึ่งกำหนดเป็น t ซึ่งสามารถสรุปเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$a = \frac{\frac{t}{10} - 0.5}{0.125} \qquad (2.1)$$

การคำนวณมุมเอียงเมื่อเทียบกับแกน X หรือ Y เอียงทำมุม α กับแนวระดับ

จากรูป เมื่อแกน X ของตัวตรวจจับทำมุมเงย α องศากับแนวระดับ สัญญาณพัลส์ที่อ่านได้จากขาสัญญาณ X-out เนื่องจากการเอียงตัวจะเทียบเคียงได้กับปริมาณความเร่ง a_x

โดย $a_x = g sin\alpha$ ดังนั้น $\frac{a_x}{g} = sin\alpha$

จะได้ $\alpha = sin^{-1}\left(\frac{a_x}{g}\right) \qquad (2.2)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.11 ตารางแสดงค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการตรวจจับความลาดเอียงของโมดูล MXD2125 เมื่อประมาณค่าด้วยสมการ (2.3)

ช่วงมุมในการวัด	k(arc/g)	ความผิดพลาด
±10	57.50	±0.02%
±20	58.16	±016%
±30	59.04	±0.48%
±40	60.47	±1.13%
±50	62.35	±2.24%

ค่าของ a_x สามารถคำนวณจากสมการที่ (2.1) โดยค่าที่ได้จะเป็นจำนวนเต็มเท่าของค่า g ซึ่งจะเป็นการหักล้างตัวส่วน g ในสมการ (2.2) ไปในตัว

การคำนวณหาค่ามุมเอียงจะให้ผลลัพธ์ได้แม่นยำในช่วง ±60 องศา ซึ่งถือว่ายังพอประมาณเป็นเชิงเส้นได้ เมื่อต้องการประมาณมุมเอียงจากสมการที่ (2.2) ให้เป็นสมการเชิงเส้นเพื่อเหตุผลบางประการ เช่น ประหยัดหน่วยความจำในการเขียนโปรแกรม หรือช่วยในการพัฒนาด้วยภาษา Assembly ซึ่งยากต่อการเขียนโปรแกรมย่อย arcsin (sin^{-1}) ตามสมการ (2.2) จึงลดรูปได้เป็น

$$\alpha = \mathrm{k}a_x \tag{2.3}$$

2.6 Servo Motor [12]

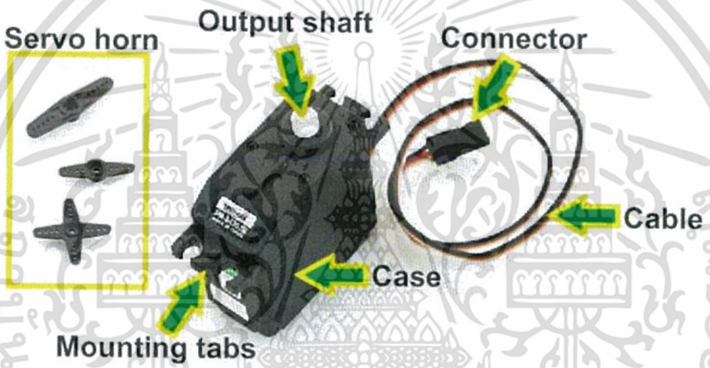
รูปที่ 2.30 เซอร์โวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Servo เป็นคำศัพท์ที่ใช้กันทั่วไปในระบบควบคุมอัตโนมัติ มาจากภาษาละตินคำว่า Sevus หมายถึง “ทาส” (Slave) ในเชิงความหมายของ Servo Motor ก็คือ Motor ที่เราสามารถสั่งงานหรือตั้งค่า แล้วตัว Motor จะหมุนไปยังตำแหน่งองศาที่เราสั่งได้เองอย่างถูกต้อง โดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) ในบทความนี้จะกล่าวถึง RC Servo Motor ซึ่งนิยมนำมาใช้ในเครื่องเล่นที่บังคับด้วยคลื่นวิทยุ (RC = Radio - Controlled) เช่น เรือบังคับวิทยุ รถบังคับวิทยุ เฮลิคอปเตอร์บังคับวิทยุ เป็นต้น

Feedback Control คือ ระบบควบคุมที่มีการวัดค่าเอาต์พุตของระบบนำมาเปรียบเทียบกับค่าอินพุตเพื่อควบคุมและปรับแต่งให้ค่าเอาต์พุตของระบบให้มีค่า เท่ากับ หรือ ใกล้เคียงกับค่าอินพุต

2.6.1 ส่วนประกอบภายนอก RC Servo Motor

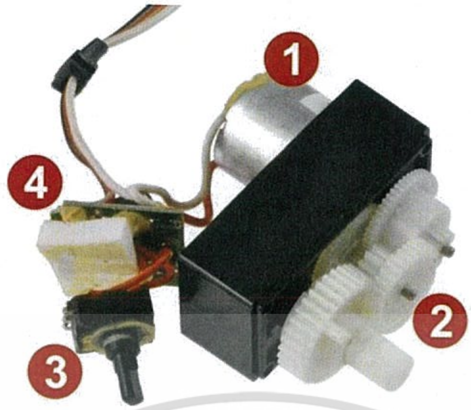


รูปที่ 2.31 ส่วนประกอบภายนอกของเซอร์โวมอเตอร์

- Case ตัวถัง หรือ กรอบของตัว Servo Motor
- Mounting Tab ส่วนจับยึดตัว Servo กับชิ้นงาน
- Output Shaft เพลาส่งกำลัง
- Servo Horns ส่วนเชื่อมต่อกับ Output shaft เพื่อสร้างกลไกล
- Cable สายเชื่อมต่อเพื่อ จ่ายไฟฟ้า และ ควบคุม Servo Motor จะประกอบด้วยสายไฟ 3 เส้น และ ใน RC Servo Motor จะมีสีของสายแตกต่างกันไปดังนี้
    - สายสีแดง คือ ไฟเลี้ยง (4.8-6V)
    - สายสีดำ หรือ น้ำตาล คือ กราวด์
    - สายสีเหลือง (ส้ม ขาว หรือฟ้า) คือ สายส่งสัญญาณพัลซ์ควบคุม (3-5V)
- Connector จุดเชื่อมต่อสายไฟ

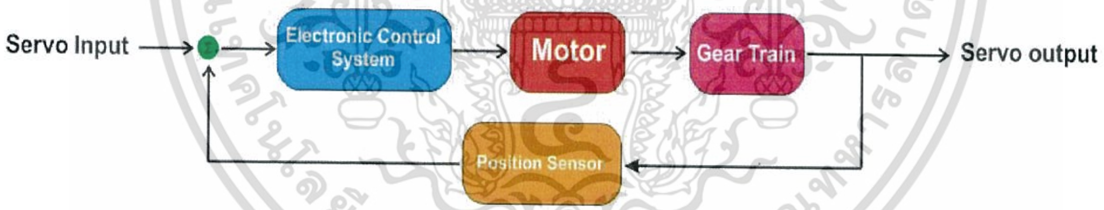
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ส่วนประกอบภายใน RC Servo Motor



รูปที่ 2.32 ส่วนประกอบภายในของเซอร์โวมอเตอร์

1. Motor เป็นส่วนของตัวมอเตอร์
2. Gear Train หรือ Gearbox เป็นชุดเกียร์ทดแรง
3. Position Sensor เป็นเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งเพื่อหาค่าองศาในการหมุน
4. Electronic Control System เป็นส่วนที่ควบคุมและประมวลผล



รูปที่ 2.33 แสดงระบบการควบคุมแบบวงปิดของเซอร์โวมอเตอร์

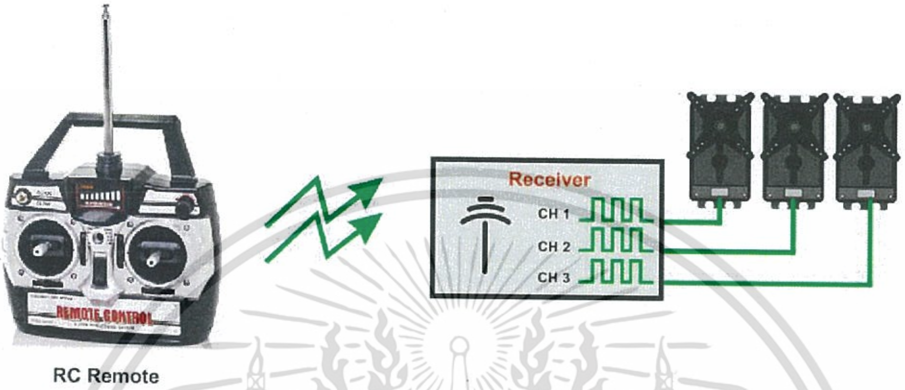
2.6.4 หลักการทำงานของ RC Servo Motor

เมื่อจ่ายสัญญาณพัลซ์เข้ามายัง RC Servo Motor ส่วนวงจรควบคุม (Electronic Control System) ภายใน Servo motor นั้น จะทำการอ่านและประมวลผลค่าความกว้างของสัญญาณพัลซ์ที่ส่งเข้ามาเพื่อแปลค่าเป็นตำแหน่งองศาที่ต้องการให้ Motor หมุนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งนั้น แล้วส่งคำสั่งไปทำการควบคุมให้ Motor หมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยจะมี Position Sensor เป็นตัวเซ็นเซอร์คอยวัดค่ามุมที่ Servo motor กำลังหมุนเป็น Feedback กลับมาให้วงจรควบคุมเปรียบเทียบกับค่าอินพุตเพื่อควบคุมให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการอย่างถูกต้องแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 สัญญาณ RC ในรูปแบบ PWM

ตัว RC Servo Motor ออกแบบมาใช้สำหรับรับคำสั่งจาก Remote Control ที่ใช้ควบคุมของเล่นด้วยสัญญาณวิทยุต่างๆ เช่น เครื่องบินบังคับ รถบังบังคับ เรือบังคับ เป็นต้น ซึ่ง Remote จำพวกนี้ที่ภาครับจะแปลงความถี่วิทยุออกมาในรูปแบบสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation)



รูปที่ 2.34 การรับคำสั่งผ่าน Remote เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

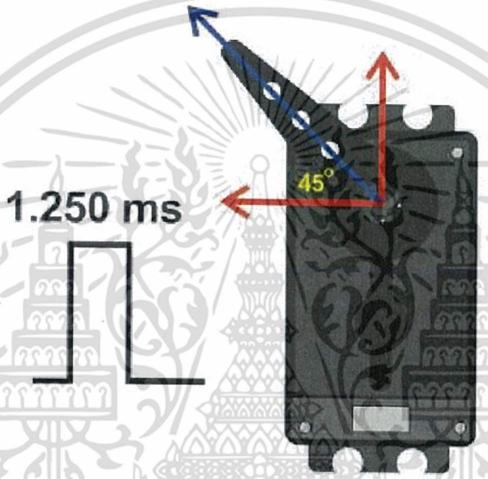
มุมหรือองศาจะขึ้นอยู่กับความกว้างของสัญญาณพัลซ์ ซึ่งโดยส่วนมากความกว้างของพัลซ์ที่ใช้ใน RC Servo Motor จะอยู่ในช่วง 1-2 ms หรือ 0.5-2.5 ms

ยกตัวอย่างเช่นหากกำหนดความกว้างของสัญญาณพัลซ์ไว้ที่ 1 ms ตัว Servo Motor จะหมุนไปทางด้ายซ้ายจนสุด ในทางกลับกันหากกำหนดความกว้างของสัญญาณพัลซ์ไว้ที่ 2 ms ตัว Servo Motor จะหมุนไปยังตำแหน่งขวาสุด แต่หากกำหนดความกว้างของสัญญาณพัลซ์ไว้ที่ 1.5 ms ตัว Servo Motor ก็จะหมุนมาอยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางพอดี

รูปที่ 2.35 ความกว้างของพัลส์และองศาที่แตกต่างกันของเซอร์โวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสามารถกำหนดองศาการหมุนของ RC Servo Motor ได้โดยการเทียบค่า เช่น RC Servo Motor สามารถหมุนได้ 180 องศา โดยที่ 0 องศาใช้ความกว้างพัลซ์เท่ากับ 1000 us ที่ 180 องศาความกว้างพัลซ์เท่ากับ 2000 us เพราะฉะนั้นค่าที่เปลี่ยนไป 1 องศาจะใช้ความกว้างพัลซ์ต่างกัน (2000-1000)/180 เท่ากับ 5.55 us จากการหาค่าความกว้างพัลซ์ที่มุม 1 องศาข้างต้น หากต้องกำหนดให้ RC Servo Motor หมุนไปที่มุม 45 องศาจะหาค่าพัลซ์ที่ต้องการได้จาก 5.55 x 45 เท่ากับ 249.75 us แต่ที่มุม 0 องศาเราเริ่มที่ความกว้างพัลซ์ 1ms หรือ 1000 us เพราะฉะนั้นความกว้างพัลซ์ที่ใช้กำหนดให้ RC Servo Motor หมุนไปที่ 45 องศา คือ 1000 + 249.75 เท่ากับประมาณ 1250 us



รูปที่ 2.36 ความกว้างของพัลส์ที่ 1.250 ms. และองศาของเซอร์โวมอเตอร์ที่ 45 องศา

2.6.6 วิธีควบคุม RC Servo Motor ด้วย Arduino

Arduino มีไลบรารี่สำหรับสั่งงาน RC Servo Motor มาให้ใช้งานอยู่แล้วเป็นฟังก์ชั่นสำเร็จรูปและใช้งานได้ง่าย Servo Library ของ Arduino สามารถสั่งงาน RC Servo Motor ได้ทั้งแบบหมุนไป-กลับได้ 0-180 องศา) และแบบต่อเนื่องที่หมุนครบรอบได้เรียกว่าเป็น Continuous Rotation Servo โดยสามารถรองรับการเชื่อมต่อ RC Servo Motor ได้ถึง 12 ตัวกับบอร์ด Arduino UNO และรองรับสูงสุดถึง 48 ตัวหากใช้บอร์ด Arduino Mega

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.7 ฟังก์ชั่นภายใน Servo Library

- attach()
- write()
- writeMicroseconds()
- read()
- attached()
- detach()

- attach()

  Description

  คือฟังก์ชั่นที่ใช้ในการกำหนดขาสัญญาณที่ Servo Motor ต่อกับ Arduino และกำหนดความกว้างของพัลซ์ที่ 0 องศาและ 180 องศา

  Syntax

  Servo.attach(pin)

  Servo.attach(pin,min,max)

  Parameters

  - Pin: คือ ขาสัญญาณของ Arduino ที่ใช้เชื่อมต่อกับ Servo Motor
  - Min: คือ ความกว้างของพัลซ์ที่ 0 องศาของ Servo ตัวที่ใช้ในหน่วยไมโครวินาที (us) โดยปกติแล้วหากไม่มีการตั้งค่าโปรแกรมจะกำหนดค่าไว้ที่ 544 us
  - Max: คือ ความกว้างของพัลซ์ที่ 180 องศาของ Servo ตัวที่ใช้ในหน่วยไมโครวินาที (us) โดยปกติแล้วหากไม่มีการตั้งค่าโปรแกรมจะกำหนดค่าไว้ที่ 2400 us

- Write()

  Description

  คือฟังก์ชั่นที่ใช้ควบคุมตำแหน่งที่ต้องการให้ Servo Motor หมุนไปยังองศาที่กำหนดสามารถกำหนดเป็นค่าองศาได้เลย คือ 0-180 องศา แต่ใน Servo Motor ที่เป็น Full Rotation คำสั่ง write จะเป็นการกำหนดความเร็วในการหมุน โดย

  - ค่าเท่ากับ 90 คือคำสั่งให้ Servo Motor หยุดหมุน
  - ค่าเท่ากับ 0 คือการหมุนด้วยความเร็วสูงสุดในทิศทางหนึ่ง
  - ค่าเท่ากับ 180 คือการหมุนด้วยความเร็วสูงสุดในทิศทางตรงกันข้าม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Syntax

servo.write(angle)

Parameters

Angle: คือมุมที่ต้องการให้ RC Servo Motor แบบ 0-180 องศาหมุนไป แต่หากเป็น RC Servo Motor แบบ Full Rotation ค่า Angle คือ การกำหนดความเร็วและทิศทางในการหมุน

- **writeMicroseconds()**

Description

คือฟังก์ชั่นที่ใช้ควบคุมตำแหน่งที่ให้ Servo Motor หมุนไปยังตำแหน่งองศาที่กำหนดโดยกำหนดเป็นค่าความกว้างของพัลซ์ในหน่วย us ซึ่งปกติแล้ว RC Servo Motor จะใช้ความกว้างของพัลซ์อยู่ที่ 1000-2000 us ตามที่ได้กล่าวไปข้างต้นแล้ว แต่ RC Servo Motor บางรุ่นหรือบางยี่ห้อไม่ได้ใช้ ช่วงความกว้างของพัลซ์ตามที่ได้กล่าวเอาไว้นี้ อาจจะใช้ช่วง 700-2300 แทนก็สามารถใช้ฟังก์ชั่น writeMicroseconds นี้เพื่อกำหนดความกว้างพัลซ์ได้เอง

การใช้ฟังก์ชั่น writeMicroseconds สามารถกำหนดค่าได้อิสระ ตรงนี้ ”ต้องระวังในการใช้งาน” หากสั่งงาน RC Servo Motor (แบบ 0 - 180 องศา) จนหมุนไปเกินจุดสิ้นสุดคือเกินทั้งฝั่ง 0 หรือ 180 องศา จะทำให้เกิดเสียงครางดังจากการหมุนไปต่อไม่ได้และมอเตอร์จะกินกระแสสูงขึ้นด้วยในเวลาเดียวกันนั้น ซึ่งอาจทำให้ RC Servo Motor เกิดความเสียหายได้

Syntax

servo.writeMicroseconds(uS)

Parameters

uS : คือค่าความกว้างของพัลซ์ที่ต้องการ โดยกำหนดในหน่วยของไมโครวินาที (โดยตัวแปร int)

- **read()**

Description

คือฟังก์ชั่นอ่านค่าองศาที่สั่งเข้าไปด้วยฟังก์ชั่น write() เพื่อให้รู้ว่าตำแหน่งองศาสุดท้ายที่เราสั่งเข้าไปนั้นมีค่าเท่าไหร่ซึ่งค่าที่อ่านออกมานั้นจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 - 180

Syntax

servo.read()

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Parameters

ไม่มี: จะ Return ค่า 0-180

- **attached()**

Description

คือฟังก์ชั่นตรวจสอบว่า Servo ที่เราต้องการใช้กำลังต่ออยู่กับขสัญญาณของ Arduino หรือไม่

Syntax

servo.attached()

Parameters

ไม่มี: จะ Return ค่า True ออกมา หาก Servo Motor เชื่อมต่ออยู่กับ Arduino แต่ถ้าหาก Return ออกมาเป็นค่าอื่นถือว่าไม่เชื่อมต่อ

- **detach()**

Description

คือฟังก์ชั่นคืนสถานะของขาที่เรากำหนดให้เป็นขาควบคุม Servo Motor ด้วยคำสั่ง attached() ให้กลับคือสู่การใช่งานปกติ

Syntax

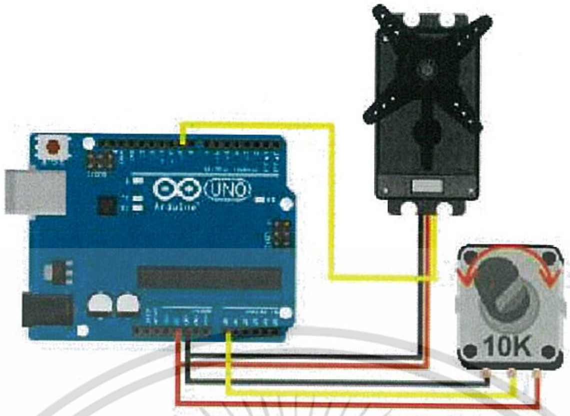
servo.detach()

Parameters

ไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการควบคุมตำแหน่ง RC Servo Motor โดยใช้ Potentiometer



รูปที่2.37 การต่อบอร์ด Arduino Uno เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ผ่าน Potentiometer

โค้ดตัวอย่างการควบคุมตำแหน่ง RC Servo Motor โดยใช้ Potentiometer

```
#include <Servo.h>
Servo myservo;
int potpin = 0;
int val;
 void setup(){
        myservo.attach(9);
}
void loop(){
        val = analogRead(potpin);
        val = map(val, 0, 1023, 0, 179);
        myservo.write(val);
        delay(15);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทำงานของโค้ด

val = analogRead(potpin);

อ่านค่า Analog จาก Potentiometer ที่ต่ออยู่ที่ขา A0 เก็บไว้ในตัวแปร val

val = map(val, 0, 1023, 0, 179);

เนื่องจาก ADC ภายใน Arduino เป็น ADC ขนาด 10-bit จึงอ่านค่า Analog ได้ตั้งแต่ 0 – 1023 แต่ RC Servo Motor สามารถหมุนได้เพียงแค่ 1-180 องศา จึงต้องใช้ Function map เพื่อทำการสเกลค่าลงจาก 0-1023 เป็น 0-179 แล้วนำไปเก็บไว้ในตัวแปร val

myservo.write(val);

เมื่อสเกลค่า จาก 0-1023 ลงเหลือ 0-179 แล้วก็นำมาสั่งให้ Servo Motor หมุนไปยังตำแหน่งในค่าตัวแปร val

delay(15);

หน่วงเวลา 15 ms

ผลของการทำงานทำให้สามารถปรับตำแหน่งองศาของ Servo Motor ได้โดยการหมุนปรับค่า Potentiometer

2.6.8 Continuous Rotation Servo

รูปที่2.38 Continuous Rotation Servo

Continuous Rotation Servo คือ RC Servo Motor แบบที่สามารถหมุนได้ 360 องศา ส่วนประกอบภายนอกนั้นจะมีหน้าตาคล้ายกับ RC Servo Motor แบบที่หมุนได้ 180 องศา เพียงแต่จะมี Potentiometer เพื่อใช้สำหรับปรับ ตำแหน่ง Center Stop Adjust ของตัว Servo

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการใช้งาน RC Servo Motor ชนิดนี้จะแตกต่างจากการใช้งาน RC Servo Motor แบบ 180 องศาตรงที่ Servo ชนิดนี้จะใช้ความกว้างของสัญญาณพัลซ์ในการกำหนดความเร็วและทิศทางในการหมุน ไม่ได้ใช้เพื่อกำหนดมุมจึงไม่สามารถกำหนดให้ Motor หมุนไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ ตามความต้องการได้ สัญญาณความกว้างของพัลซ์ที่ใช้ควบคุมจะอยู่ในช่วง 1000-2000 us

2.7 Kalman filter

โดยปกติ สิ่งที่เราต้องการรู้เมื่อวิเคราะห์ระบบก็คือ ณ เวลาหนึ่งๆ ระบบมีสถานะ (States) เป็นอย่างไร และสถานะของระบบเปลี่ยนแปลง ตามเวลาอย่างไร ในทางปฏิบัติบ่อยครั้ง การหาสถานะของระบบไม่ใช่ เรื่องง่าย เพราะมีข้อจำกัดหลายปัจจัย เช่น ความไม่สมบูรณ์ของ เซ็นเซอร์ที่ใช้วัดสถานะของระบบและความคลาดเคลื่อนในการวัด วิธี หนึ่งสำหรับหาสถานะของระบบคือใช้ Kalman Filter ซึ่งเป็นสูตรทาง คณิตศาสตร์ (Algorithm) พัฒนาโดย ดร. R. E. Kalman ในปี ค.ศ. 1960 Kalman Filter ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกเพื่อประมาณสถานะ ของระบบนำร่องของยาน Apollo ในการโคจรในอวกาศ ปัจจุบัน Kalman Filter ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อใช้ ประมวลข้อมูลจากเซ็นเซอร์หลายประเภท ภายใต้สัญญาณรบกวน

การศึกษาเกี่ยวกับระบบโดยทั่วไปมักตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า ความรู้ทุกอย่างเกี่ยวกับระบบถูกต้องแน่นอน 100 เปอร์เซ็นต์ (Deterministic) การใช้สมมุติฐานดังกล่าวมีข้อจำกัดในชีวิตจริงด้วยสาเหตุดังนี้

1. ไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดที่สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ในชีวิตจริงมีตัวแปรเป็นจำนวนมากที่มีผลต่อระบบซึ่งไม่สามารถนำมา เขียนเป็นสมการได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์

2. ไม่มีเซนเซอร์ใดที่วัดค่าได้สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ในทาง ปฏิบัติเซนเซอร์ทุกชนิดมีความคลาดเคลื่อน (Measurement Noise) จะ มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย นอกจากนี้ ในชีวิตจริงมีสถานะของ ระบบหลายประเภทที่เซนเซอร์ไม่สามารถวัดได้โดยตรง

3. ปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้

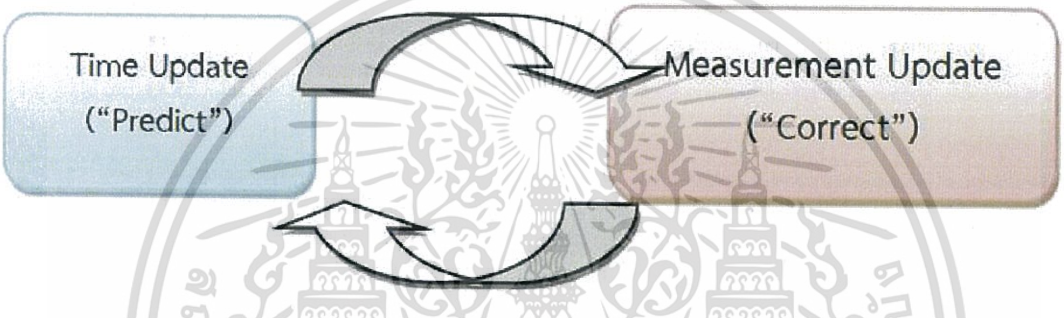
ด้วยข้อจำกัดของการวิเคราะห์แบบ Deterministic ข้างต้น จึงนำไปสู่ การวิเคราะห์แบบ Stochastic ซึ่งนำความไม่แน่นอน, ข้อมูลทางสถิติ และหลักการของความน่าจะเป็นมาร่วมพิจารณาด้วย อันเป็นที่มาของ การพัฒนา Kalman Filter Algorithm

2.7.1 Kalman Filter Algorithm

Kalman Filter ทำงานในลักษณะเป็นวงจร (Recursive) ของการคาดการณ์-ประมาณ (Predict-Estimate) ซึ่งเมื่อ เปรียบเทียบกับการหาค่าประมาณด้วยวิธีอื่นๆ ที่ต้องเก็บค่าไว้ส่วน หนึ่งในหน่วยความจำเพื่อประมวลผลพร้อมกันอย่างเช่นวิธี Simple Moving Average แต่ Kalman Filter มีข้อได้เปรียบในแง่ที่ไม่ต้องใช้ หน่วยความจำมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

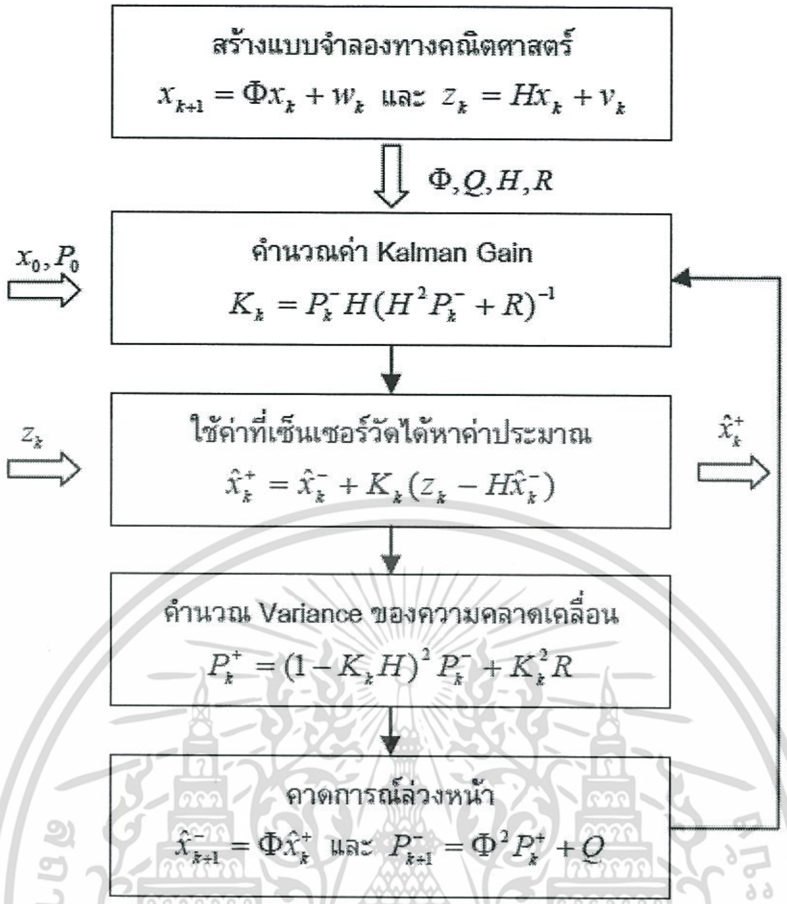
การทำงานของ Kalman filter มีรูปแบบการทำงานแบบควบคุมการป้อนกลับของสัญญาณ (Feedback control) ซึ่งก็คือการประมาณการสถานะของกระบวนการขณะใดขณะหนึ่ง หลังจากนั้นจะป้อนกลับไปในรูปแบบของการวัดสัญญาณรบกวนซึ่งสามารถแบบสมการออกเป็น 2 ส่วนคือ สมการปรับเวลา (Time update) และ สมการปรับการวัด (Measurement update) สมการปรับเวลาคือ ตัวที่ตอบสนองต่องานล่วงหน้าที่สถานะปัจจุบัน และโควาเรียนของการประมาณที่ผิดพลาดเพื่อให้ได้มาซึ่งการประมาณล่วงหน้าของช่วงเวลาต่อไป ส่วนสมการปรับการวัดจะตอบสนองต่อการป้อนกลับคือ การ วัดครั้งใหม่จะถูกรวมเข้ากับการประมาณ เพื่อให้ได้มาซึ่งการปรับปรุงการประมาณล่วงหน้า โดยสมการปรับเวลาสามารถเรียกได้ว่าเป็น สมการตัวทำนาย (Predictor) และสมการปรับการวัดจะเรียกว่าเป็น สมการตรวจแก้ (Corrector) ดังรูป



รูปที่2.39 รูปแบบของการทำงานของ Kalman Filter [13]

เราสามารถสรุปในภาพรวมเกี่ยวกับการประมาณค่า k_x ที่เวลา k_t ใดๆ โดยใช้ Kalman Filter Algorithm ได้ว่ามีขั้นตอนตามแสดงในภาพ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่2.40 ขั้นตอนของการประมวลผลด้วย Kalman Filter ที่เวลา t(k) ใดๆ[13]

1. เขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในรูปของ Process Mode $x_{k+1} = \Phi x_k + w_k$ Process Mode คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเรียกว่า Plant หรือ Process Model เพราะแสดงความสัมพันธ์ว่า x เปลี่ยนแปลง ตามเวลาอย่างไร ให้ w_k เป็น Gaussian White Noise มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ μ และ Variance เท่ากับ Q (ดังนั้น Standard Deviation ของ w_k คือ $\sigma = \sqrt{Q}$)*โดยปกติเราจะไม่สามารถบอกด้วย ความมั่นใจ 100% ได้ว่าตัวแปรสุ่มจะมีค่าเป็นเท่าไร แต่เนื่องจาก w_k เป็นตัวแปรสุ่มแบบ* Gaussian *เราจึงสามารถใช้ค่า* Mean *และ* Variance *อธิบายเกี่ยวกับ w_kในเชิงความน่าจะเป็นได้อย่างสมบูรณ์ ว่าถ้าสุ่มหลายๆ ครั้ง โดยเฉลี่ย w_k* และ เขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในรูปของ Measurement Model $z_k = Hx_k + v_k$ เพื่อบันทึกค่า Φ , Q , H และ R *โดย* สมการMeasurement Model จะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ เซ็นเซอร์วัดได้ *z_k กับสถานะของระบบ x_k* ซึ่งให้ *v_k* เป็น เป็น Gaussian White Noise มีค่า Mean เท่ากับศูนย์ และ Variance เท่ากับ R

2.หาค่าประมาณเริ่มต้นที่ดีที่สุดของสถานะของระบบ $\hat{x}_0$ และ Variance ของความคลาดเคลื่อน P_0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. คาดการณ์สถานะของระบบ $\hat{x}_k^-$ โดย เครื่องหมายลบใช้ระบุว่า เป็นการคาดการณ์ล่วงหน้าถึงค่าของ x_1โดยไม่มีค่าที่เซนเซอร์วัดได้มาประกอบการพิจารณา เราสามารถหาค่า Mean และ Variance ของความคลาดเคลื่อน (Error Variance) ในการคาดการณ์สถานะของระบบ $\hat{x}_k^-$ ที่เวลา t_k ล่วงหน้าจาก $\hat{x}_k^- = \Phi\hat{x}_{k-1}^+$และคำนวณ Variance ของความคลาดเคลื่อนของการ คาดการณ์จาก $P_k^- = \Phi^2 P_{k-1}^- + Q$

4. ณ เวลา t_kที่เซ็นเซอร์วัดค่า z_k ได้ คำนวณค่า Kalman Gain K_kจาก $K_k = P_k^- H(H^2 P_k^- + R)^{-1}$ ใช้ค่า Kalman Gain K_k เพื่อแก้ไขค่าที่คาดการณ์ไว้ล่วงหน้าจาก $\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k[z_k - H\hat{x}_k^-]$ โดยค่า Kalman Gain K_k ที่ดีที่สุดในเชิงของความน่าจะเป็น คือค่าที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนในการประมาณ $\hat{x}_k^+$ มีค่าต่ำที่สุด และคำนวณ Variance ของความคลาดเคลื่อนของการประมาณจาก $P_k^+ = (1 - K_k H)^2 P_k^- + K_k^2 R$

5. คาดการณ์สถานะของระบบ $\hat{x}_{k+1}^-$ ณ เวลา t_{k+1} ล่วงหน้าจาก $\hat{x}_k^- = \Phi\hat{x}_{k+1}^+$และคำนวณ Variance ของความคลาดเคลื่อนของ การคาดการณ์จาก $P_{k+1}^- = \Phi^2 P_k^- + Q$

6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 4 และ 5 ที่เวลา t_{k+1} , t_{k+2} , ... ไปเรื่อยๆ

การออกแบบระบบ Kalman filter เพื่อใช้งานนั้น จะมีการรบกวนของการวัด R (measurement error covariance) ซึ่งเป็นโควาเรียน ที่ได้มาจากการประมวลผลของการวัดก่อนหน้า สามารถหาค่าความผิดพลาดได้จริงเพราะได้มาจากกระบวนการวัด แต่อย่างไรก็ตามในการคำนวณหา Q (process noise covariance) สามารถทำได้ยากมาก ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการสุ่มหรือการประมาณค่า (try and error)

2.8 Low-pass filter

Low pass filter เป็น filter ที่ยอมให้สัญญาณที่มาค่าต่ำกว่าความถี่ cut-off ผ่านไปได้ และลดทอนความถี่สูงที่มีค่าต่ำกว่าความถี่ cut-off ปริมาณการลดทอนความถี่ขึ้นกับการออกแบบ filter บางครั้งเราอาจจะเรียกว่า high-cut filter หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า treble cut filter ในการใช้งานด้านประเภทสัญญาณเสียง Low pass filter นั้นจะมีลักษณะตรงกันข้ามกับ high pass filter นอกจากนี้ยังสามารถใช่ร่วมกับ High pass filter หรือที่เรียกกันในอีกชื่อหนึ่งว่า Band pass filter

Low pass filter นั้นมีลักษณะแตกต่างกันออกไปจนถึงอยู่ในรูปแบบจอง วงจรอิเล็กทรอนิกส์ (เช่น ตัวกรองเสียงรบกวนใน ไมโครโฟน) anti-aliasing filters ใช้อยู่ในตำแหน่งของการ filter ก่อนที่จะแปลงจาก อนาล็อกไปเป็นดิจิตอล (analog-to-digital conversion), digital filters ใช้สำหรับการปรับค่าให้เรียบของข้อมูล,การเบลอของภาพ เป็นต้น ค่า moving average , ใช้ในงานของการทำ moving average ของข้อมูลการเงิน และสามารถนำมาวิเคราะห์ ด้วยเทคนิคประมวลผลสัญญาณโดยใช้ Low pass filter

เอกสารนี้ถือเป็นลิขสิทธิ์ได้ใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Low pass filter สามารถปรับปรุง ให้สัญญาณให้มีความเรียบ, ลดการแกร่วงของสัญญาณ ของของมูลใน short-term และออกจากแนวโน้มใน longer-term

2.8.1 Ideal and real filters [15]

Low pass filter ในเชิงอุดมคติ จะขจัดสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ cut-off ได้อย่างสมบูรณ์ในขณะที่สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ cut-off สามารถผ่านได้โดยที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง การตอบสนองความถี่จะต้องมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม การเปลี่ยนแปลงของค่าสัญญาณ ณ เวลา ใดๆ ไม่สามารถนำมาใช้ในการปรับค่าของ filter ได้ filter ในเชิงอุดมคตินั้น จำเป็นที่จะต้องรู้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์(ซึ่งต้องเป็นไปตามทฤษฎี) อย่างไรก็ตามการกรองที่เหมาะสมนั้นเป็นไปไม่ได้ เพราะเนื่องจากสัญญาณรบกวนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ไม่คงที่ทั้งขนาด ปริมาณ และเวลา

Low pass filter ในความเป็นจริงนั้นมีใกล้เคียงกับเชิงอุดมคติ โดย ที่จะทำหน้าที่ในการตัดทอนสัญญาณรบกวน แต่ filter จะใช้เวลาในการหน่วง เพื่อชะลอการส่งสัญญาณเป็นระยะเวลาที่พอเหมาะเพื่อที่จะได้เห็นค่าถัดไปอีกเล็กน้อยเพื่อนำไปพิจาณาและทำการปรับค่าให้มีความถูกต้องมากขึ้น และเมื่อนำ filter มาใช้ทำให้ระบบมีความล่าช้าออกไปจากความเป็นจริง

2.8.2 การประยุกต์ใช้งาน low pass filter

ในงานด้าน hardware ที่มีการอ่านข้อมูลจาก sensor แน่นอนว่าข้อมูลที่ได้มาในแต่ละครั้งอาจจะมีข้อมูลที่ error หรือข้อมูลที่เพี้ยนไปจากความเป็นจริงบางช่วงเวลา ซึ่งเราไม่ต้องการข้อมูลพวกนั้นเช่น ถ้าเราต้องการวนลูปอ่านข้อมูลจาก Accelerometer เป็น sensor วัดความเร่ง ปกติแล้วเมื่อเราวนลูปอ่านข้อมูลจาก sensor พวกนี้จะได้ค่า error หรือสัญญานรบกวน ค่อนข้างสูง
เราสามารถเขียนโปรแกรมลดสัญญานรบกวนได้จากสมการนี้

$$y(now) = (k \times y[t]) + ((1-k) \times y[t-1]) \tag{2.4}$$

อธิบายสมการ

- y(now) คือ ค่าที่ถูก filter แล้ว ณ. เวลานั้น(รอบปัจจุบัน)
- k คือ ระดับการกรองตั้งแต่ 0-1 หากค่าเข้าใกล้ 0 มากจะยิ่งกรองมาก
- y[t] คือ ค่าที่อ่านได้จาก sensor ในรอบปัจจุบัน
- y[t-1] คือ ค่าที่ได้จาก sensor ในรอบก่อนหน้านี้ (ค่าจาก sensor ที่อ่านได้จากครั้งที่แล้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงาน

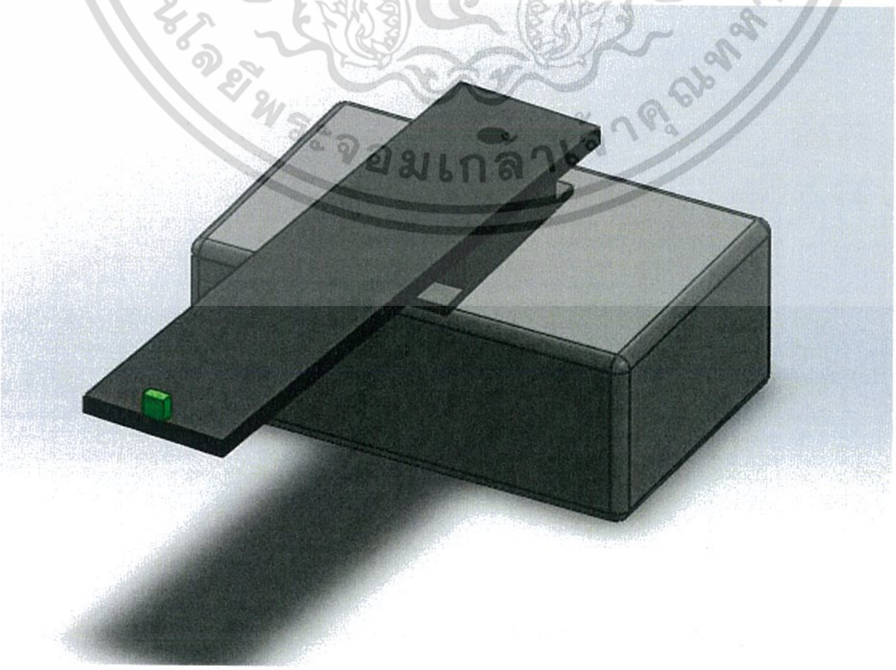
การศึกษาขาเทียมอัตโนมัติแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ การออกแบบชุดเก็บข้อมูลจากตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน เพื่อเก็บค่าข้อมูลจากตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน เพื่อนำไปใช้ในการปรับค่าคงที่ใน filter ส่วนต่อมาเป็นส่วนของการนำข้อมูลที่ได้จากการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้ filter และ สร้างสเตชั่นจำลองการเดินของมนุษย์ ขึ้นมาทำการทดสอบ การควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อหัวเข่าและข้อเท้า ให้เป็นไปตามลักษณะของวัฏจักรการเดินของมนุษย์มากที่สุด ซึ่งเป็นเพียงการจำลองเพื่อแสดงให้เห็นว่าเซอร์โวมอเตอร์มอเตอร์และตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน ที่นำมาใช้นั้นสามารถควบคุมลักษณะการเดินได้ถูกต้อง โดยยังไม่สามารถนำไปใช้งานกับผู้พิการได้จริงเป็นเพียงแค่แบบจำลองการเดินเพียงเท่านั้น

3.1 ออกแบบชุดเก็บข้อมูลและเก็บข้อมูลจากโมดูลตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน

การออกแบบชุดเก็บข้อมูลจากตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลจากตัวตรวจจับความเร่ง นั้นจำเป็นจะต้องมีความสามารถในการเก็บข้อมูลโดยที่มีคุณสมบัติดังนี้

- มีความสมดุลในระหว่างการทดสอบ ไม่เกิดการสั่น การขยับของตัวฐาน ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ส่งผลให้ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลคลาดเคลื่อน
- สามารถปรับเปลี่ยนองศาได้ขณะการเก็บข้อมูล

โครงสร้างของชุดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์ที่ออกแบบและจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเก็บค่าของข้อมูล



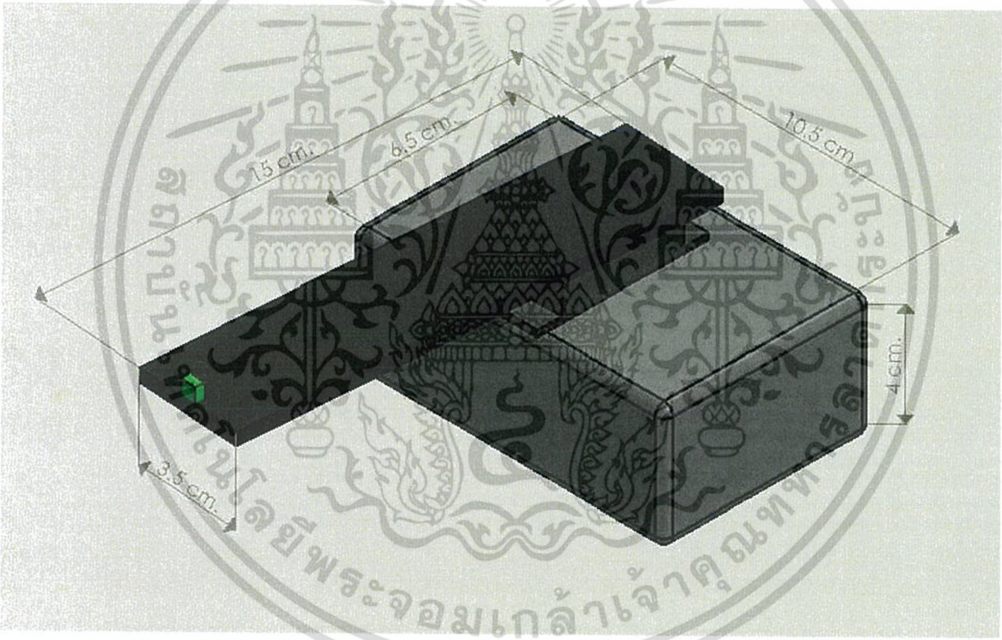
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของชุดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

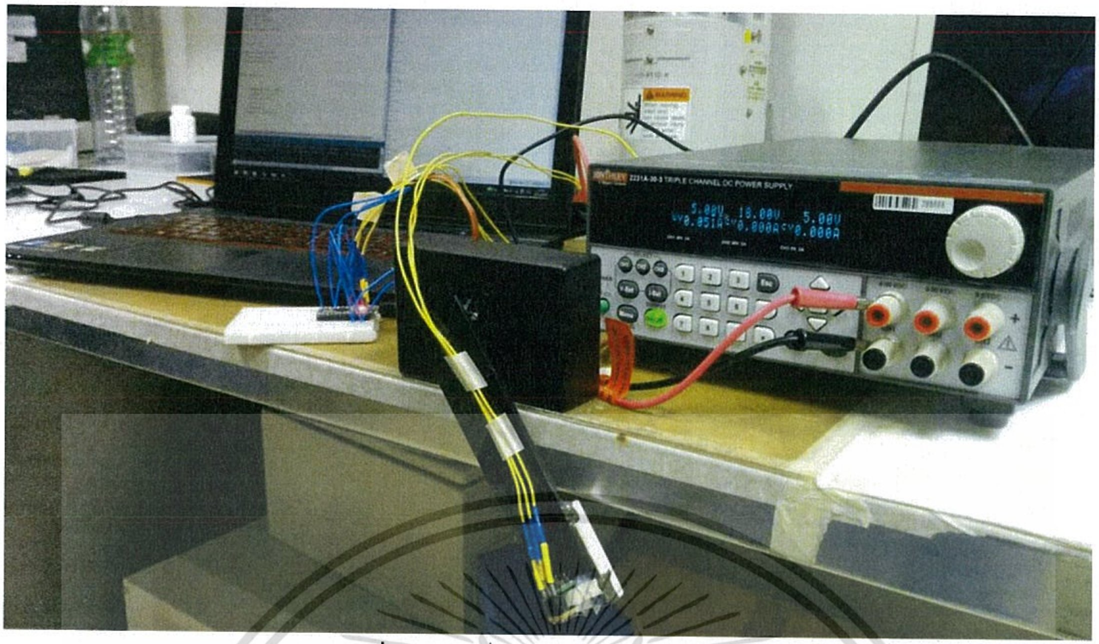
อุปกรณ์ที่ใช้นั้น ได้มีการเลือกใช้วัสดุที่หาได้ง่าย มีความสามารถในการใช้งานอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยอุปกรณ์ที่ใช้งานมีดังนี้

- เซอร์โวมอเตอร์
- ตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน
- โฟโต้บอร์ดขนาด 5.3x16.5 เซนติเมตร
- โฟโต้บอร์ดขนาด 4.5 x 3.5 เซนติเมตร
- แผ่นอคลิลิก ขนาด 3.5x4.5 เซนติเมตร
- กล่องพาสติก ขนาด 10.5x6.5x4 เซนติเมตร
- ไมโครคอนโทลเลอร์ Arduino Nano
- Power supply 5 V



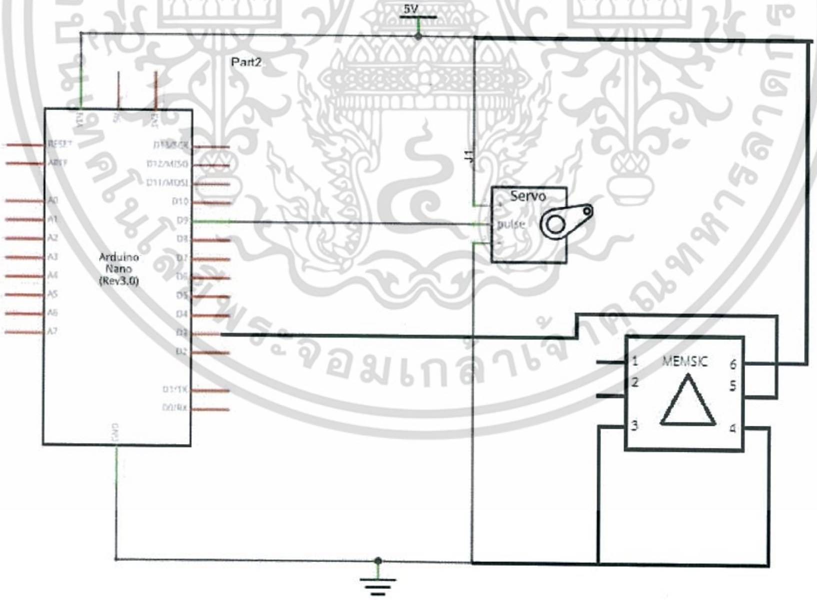
รูปที่3.2 องค์ประกอบและขนาดของสเตชั่นชุดเก็บค่าจากเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3.3 สเตชั่นชุดเก็บค่าจากเซนเซอร์

3.1.2 การต่อวงจร



รูปที่3.4 Schematic วงจรของชุดเก็บค่าจากเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ กับไมโครคอนโทรเลอร์มีรายละเอียดดังนี้

พอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่เป็นอินพุต ของการรับค่าเซนเซอร์

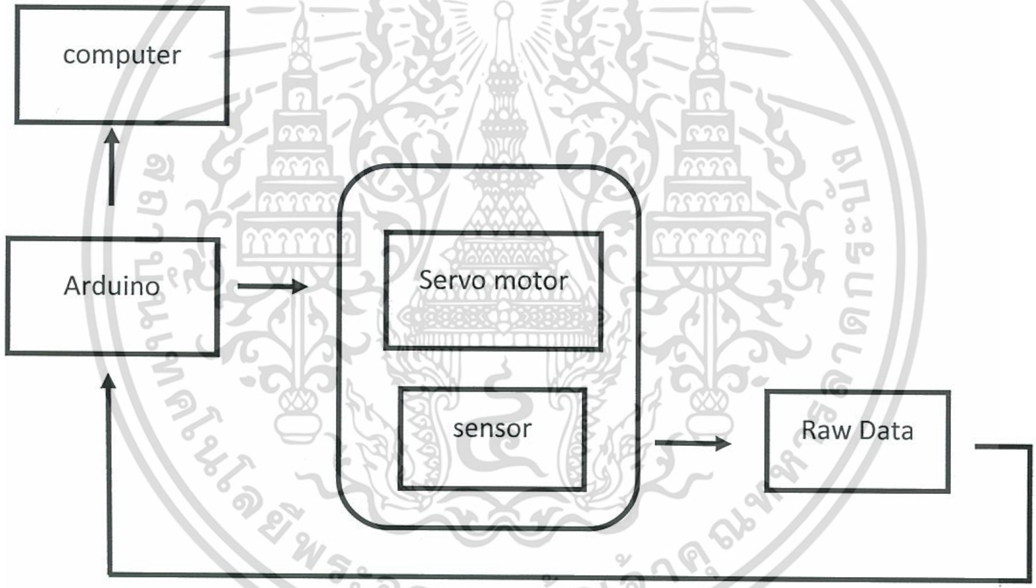
- Digital pin 3

พอร์ตไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่เป็นเอ้าพุต PWM ได้แก่

- Digital pin 9

3.1.3 ภาพรวมของระบบชุดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์

การเก็บค่าข้อมูลจากเซ็นเซเอร์นั้นจะใช้การส่งข้อมูลผ่าน Serial port ระหว่าง ไมโครคอนโทลเลอร์ Arduino Nano กับคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Matlab มีลักษณะการทำงานดังรูป

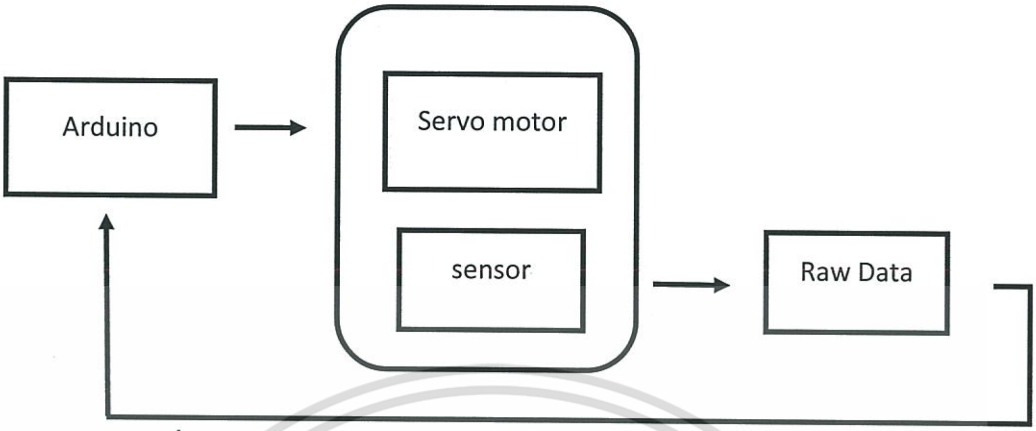


รูปที่3.5 ภาพรวมของระบบชุดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์

ระบบของการทำงานจะเริ่มต้นจาก Arduino โดยจะเป็นตัวสั่งการไปยัง เซอร์โวมอเตอร์ เพื่อหมุนไปตามองศาที่ต้องจากจากนั้นเซนเซอร์จะส่งค่าซึ่งเป็น ข้อมูล กลับไปที่ Arduino เมื่อ Arduino รับค่าแล้วจะส่งค่าผ่าน Serial port ไปยัง คอมพิวเตอร์ เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ส่วนของการควบคุมด้วยไมโครคอนโทลเลอร์



รูปที่3.6 ภาพรวมของระบบการควบคุมด้วยไมโครคอนโทลเลอร์

โปรแกรมของไมโครคอนโทลเลอร์ Arduino Nano ใช้คำสั่งโดยใช้ภาษาซี ในการสั่งการไมโครคอนโทลเลอร์ Arduino Nano โดยมี 2 โปรแกรมในลักษณะ ของการเก็บข้อมูลในองศาต่างๆ ในขณะที่หยุดนิ่ง โดยจะเก็บข้อมูลที่ 120, 90, 80 องศา และ โปรแกรมควบคุมให้เก็บข้อมูลในลักษณะ เคลื่อนที่ระหว่าง 80 องศา ถึง 120 องศาที่ ทั้งนี้ ใช้จำนวนอัตตราของการ sampling อยู่ที่ 15 มิลลิวินาที และจำนวนของการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 600 sampling

3.1.2.1 ฟังก์ชั่นสำหรับการอ่านค่าข้อมูลของเซนเซอร์ผ่านไมโครคอนโทลเลอร์

```
double sensor()
{
  Xraw = pulseIn (xPin, HIGH);
  xGForce = (( Xraw / 10 ) - 500) * 8;
  xGForce=xGForce/1000;
  double sensVal = constrain(xGForce,-0.55,0.5);
  double SenANS = mapdouble(sensVal,-0.51,0.5,-30,30);
  SenANS=SenANS+90;
  return SenANS;
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อธิบายการทำงานของโปรแกรม

โปรแกรมจะรับข้อมูลจาก เซนเซอร์ ที่ขา xPin จากนั้นจะนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพื่อให้ได้ค่าแรงโน้มถ่วงของแกน X ที่ทำกับแนวระดับ ค่าที่ได้จะอยู่ในหน่วยของ มิลลิG หรือ mG (1/1000 g) ทำค่าที่ได้ให้เป็น g โดยการหาร 1000 ค่าที่ได้จะเป็นค่า g จากนั้น นำค่า g ที่ได้ไปเทียบกับตารางมุมเอียงของ โมดูล วัดความลาดเอียง MXD2125 เมื่อได้องศาของการเอียงที่ผ่านการเทียบจากตารางมุมเอียงของ โมดูล วัดความลาดเอียง MXD2125 แล้วจากนั้นจะทำการ ชดเชยค่าองศาเพื่อกำหนดค่าองศาเริ่มต้น โดยสถานะเริ่มต้น เป็น 90 องศา ค่าที่เพิ่มเข้าไปจึงเป็น 90

อธิบายฟังก์ชั่นของโปรแกรม

- pulseIn : ฟังก์ชั่น pulseIn เป็นฟังก์ชั่นที่ใช้ในการรับสัญญาณ ที่มีลักษณะเป็น พัลส์ การทำงานคือเมื่อตรวจพบสัญญาณขาเข้าเป็น HIGH ฟังก์ชันนี้จะเริ่มนับเวลาในหน่วยไมโครวินาที (microsec, μs) และรอจนกว่าจะเจอสัญญาณ LOW ถึงจะหยุดนับเวลา ดังภาพ

รูปที่3.7 รูปแบบสัญญาณ Pulse

- constrain : ฟังก์ชั่น constrain จะเป็นการยอมรับค่าในช่วงๆที่กำหนด โดยโปรแกรมกำหนดอยู่ที่ช่วง -0.55 ถึง 0.5 จากค่าของ หากค่าที่ได้รับมีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าของช่วงดังกล่าว ฟังก์ชั่นจะทำการปรับค่าให้เหลือค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดที่อยู่ในช่วงที่กำหนดเอาไว้

- mapdouble : ฟังก์ชั่น mapdouble ของการเฉลี่ยค่าในช่วงที่กำหนดเอาไว้ให้มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามอีกช่วงที่ต้องการ โดย mapdouble มีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงช่วงของค่าได้ในระดับ ทศนิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.2 คำสั่งสำหรับการส่งข้อมูลผ่าน Serial port

ทำการกำหนดค่า baud rate ที่ใช้ในการสื่อสารที่ 9600 โดยประกาศใน ฟังก์ชั่นของ setup() ว่าSerial.begin(9600);

การส่งข้อมูลผ่าน Serial port ทำได้โดยการใช้คำสั่ง Serial.println();

3.1.2.3 การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ผ่าน library สำเร็จรูป

Arduino นั้นมี library สำเร็จรูปที่สามารถสั่งค่าองศาของ เซอร์โวมอเตอร์ โดยการเรียกใช้ library ผ่านการประกาศ #include <Servo.h> และประกาศกำหนดตัวแปร ที่ใช้ในการเรียกคำสั่ง ของการควบคุม เซอร์โวมอเตอร์ สามารถประกาศได้ดังนี้ Servo myservo;

เมื่อผ่านการประกาศในส่วนของการเรียกใช้ library สำเร็จรูปของ เซอร์โวมอเตอร์ แล้ว สามารถการควบคุม เซอร์โวมอเตอร์ ได้โดยใช้คำสั่งผ่านตัวแปรที่กำหนดในการเรียกใช้ชุดคำสั่งและ ระบุค่า องศาที่ต้องการควบคุมลงไป เช่น myservo.write(120); ควบคุม เซอร์โวมอเตอร์ ไปที่ 120 องศา

3.2 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Matlab เพื่อการปรับค่า filter

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Matlab จะทำในการวิเคราะห์ 2 filter ได้แก่ Low pass filter และ Kalman filter ซึ่งจะดูจากการนำข้อมูล ที่ได้มานั้น ผ่าน filter ทั้ง 2 เพื่อ เปรียบเทียบว่า filter ใดมีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในการ filter ค่าของ เซนเซอร์วัดความลาดเอียง ที่มีผลกระทบจากสัญญาณรบกวนได้ดีที่สุด โดยตัดสินจากการนำค่าข้อมูลที่ผ่านการ filter แล้วมา plot เป็นกราฟและพิจารณาว่าเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วที่สุดและสามารถ ลดสัญญาณรบกวนได้

3.2.1 การวิเคราะห์ Low pass filter

ลักษณะของ Low pass filter จะยอมให้สัญญาณที่มาค่าต่ำกว่าความถี่ cut-off ผ่านไปได้ และลดทอนความถี่สูงที่มีค่าต่ำกว่าความถี่ cut-off ปริมาณการลดทอนความถี่ขึ้นกับการออกแบบ filter โดยสมการที่ใช้เป็นการประยุกต์การใช้งานของ Low pass filter สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y(now) = (k \times y[t]) + ((1-k) \times y[t-1]) \quad (3.1)$$

โดย

- y(now) คือ ค่าที่ถูก filter แล้ว ณ. เวลานั้น(รอบปัจจุบัน)
- k คือ ระดับการกรองตั้งแต่ 0-1 หากค่าเข้าใกล้ 0 มากจะยิ่งกรองมาก
- y[t] คือ ค่าที่อ่านได้จาก เซนเซอร์ ในรอบปัจจุบัน
- y[t-1] คือ ค่าที่ได้จาก เซนเซอร์ ในรอบก่อนหน้านี้(ค่าจาก เซนเซอร์ ที่อ่านได้จากครั้งที่แล้ว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.1 การออกแบบ GUI วิเคราะห์ข้อมูล Low pass filter ผ่านโปรแกรม Matlab

การใช้ GUI เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์และแสดงผล จะช่วยให้มีความง่ายต่อการดูแนวโน้มของค่าคงที่ใช้ในการปรับค่า filter ซึ่งโดยปกติจะใช้วิธีการลองผิดลองถูก ซึ่งทำให้ใช้เวลาในการปรับค่าและ เกิดความผิดพลาดได้สูง การใช้ GUI จึงเป็นการช่วยอีกทีหนึ่งที่ทำให้การปรับค่าคงที่ของ filter นั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้น

รูปที่3.8 หน้าต่าง GUI วิเคราะห์ข้อมูล Low pass filter ผ่านโปรแกรม Matlab

ความสามารถใน GUI ที่ออกแบบสามารถ สไลด์บาร์ เพื่อปรับค่า k ของ Low pass filter หรือสามารถใส่ค่า k ในช่อง text box ได้ ซึ่งเมื่อใส่ค่าหรือสไลด์บาร์ จะแสดงขึ้นบนหน้าจอทันที ทำให้ง่ายต่อการปรับค่า k และดูแนวโน้มได้ ของการตอบสนองของ filter ได้

3.2.2 การวิเคราะห์ Kalman filter

รูปแบบของการทำงานของ Kalman filter นั้นจะเป็นการทำงานเป็นสถานะ โดยมี 2 สถานะหลักได้แก่ การทำนาย (Predictor) และ การปรับการวัดจะเรียกว่าเป็น การตรวจแก้ (Corrector) โดยแต่ละสถานะการทำงานมีดังต่อไปนี้

1.สถานะการทำนาย มีกระบวนการดังต่อไปนี้

- Predict next state :

$$x(t) = F \times x(t-1) + B \times u \quad (3.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Predict next covariance :

$$P(t) = F \times P(t-1) \times F^T + Q \tag{3.3}$$

2.สถานะการปรับการตรวจวัด

- Compute the Kalman gain :

$$K = P(t) \times H^T / (H \times P(t) \times H^T + R) \tag{3.4}$$

- Update the state estimate :

$$x(t) = x(t) + K \times (measurement(t) - H \times x(t)) \tag{3.5}$$

- update covariance estimation :

$$\mathrm{P(t) = (I - K \times H) \times P(t)} \tag{3.6}$$

ในการประยุกต์การใช้งาน Kalman filter มีการปรับค่าคงที่ดังนี้

- F = 1 เนื่องจากค่าการเปลี่ยนแปลงขององศามีแปรปรวนที่น้อย ส่งผลให้ค่าที่ได้ในปัจจุบันมีความใกล้เคียงกับค่าก่อนหน้า
- B = 0 เนื่องจากไม่มีค่า input เข้าไปในระบบของการวัดองศา
- H = 1 เนื่องจากค่า output ที่ได้จากการวัดองศาไม่จำเป็นขยายค่าของข้อมูลที่ได้
- x(t) คือ ค่าที่วัดได้

เมื่อนำไปแทนค่าในสมการจะสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ดังนี้

$$x(t) = x(t-1) \tag{3.7}$$

$$P(t) = P(t-1) + Q \tag{3.8}$$

$$K = P(t)/(P(t) + R) \tag{3.9}$$

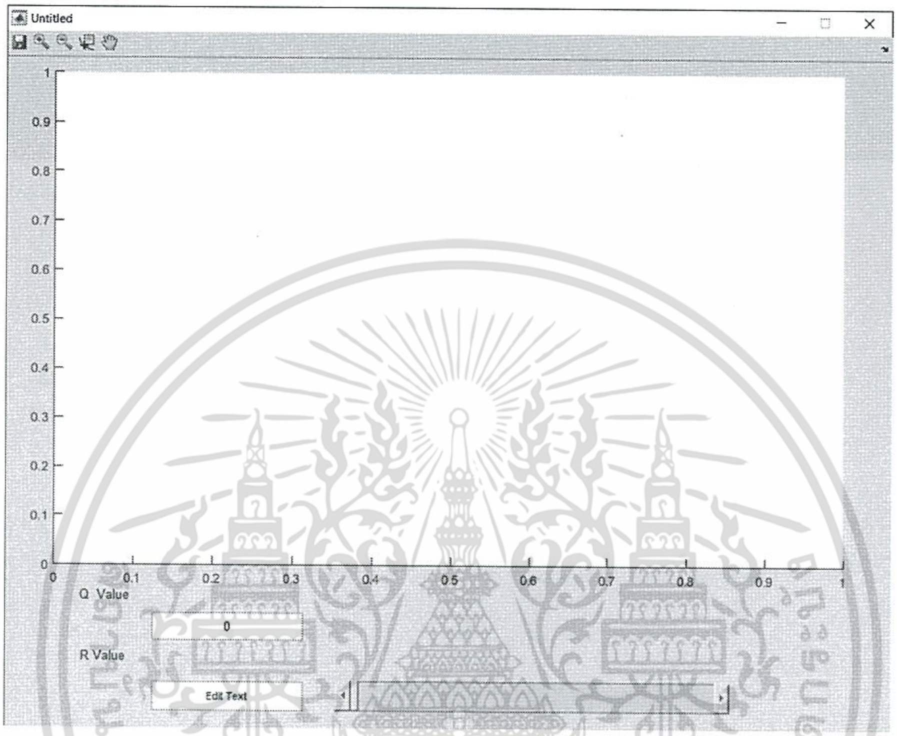
$$x(t) = x(t) + K \times (measurement(t) - x(t)) \tag{3.10}$$

$$\mathrm{P(t) = (I - K) \times P(t)} \tag{3.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.1 การออกแบบ GUI วิเคราะห์ข้อมูล Kalman filter ผ่านโปรแกรม Matlab

Kalman filter ในการปรับค่าคงที่ของ filter นั้นจะต้องปรับทั้งหมด 2 ค่า ได้แก่ ค่า Q เป็นค่าความแปรปรวนของข้อมูล (variance) และ ค่า R เป็นค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนในรูปแบบ เกาส์เซี่ยน (Variance of Gaussian White Noise)



รูปที่3.9 หน้าต่าง GUI วิเคราะห์ข้อมูล Kalman filter ผ่านโปรแกรม Matlab

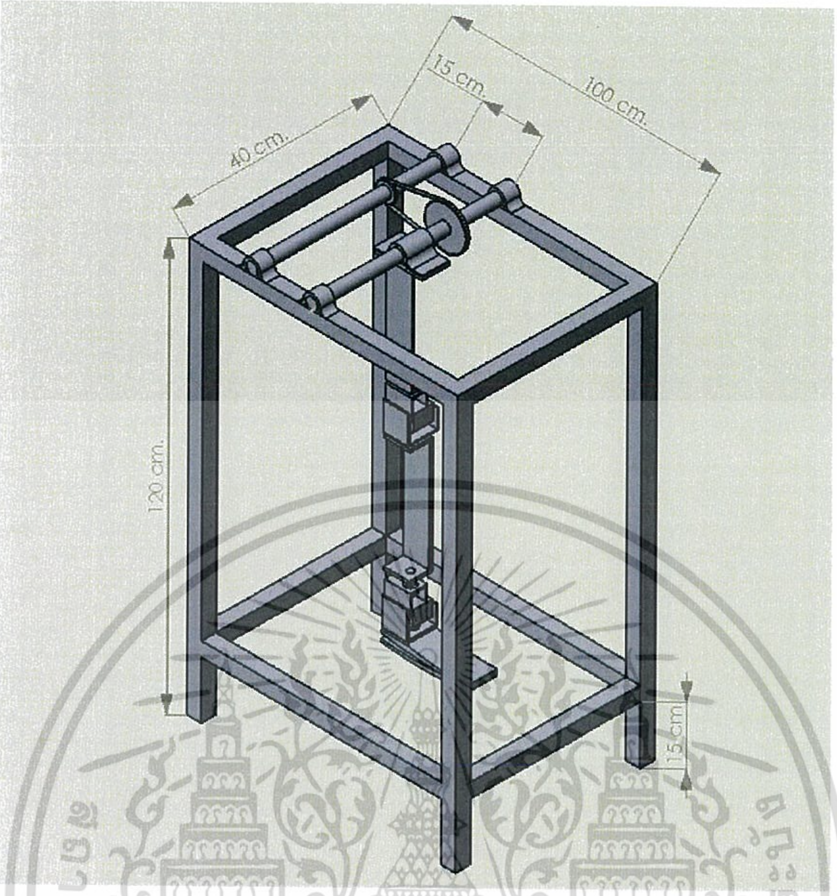
ความสามารถใน GUI ที่ออกแบบสามารถ สไลด์บาร์ เพื่อปรับค่า Q และ R ของ Kalman filter ซึ่งค่า Q จำเป็นที่จะต้องระบุค่าความแปรปวนของข้อมูล ก่อนที่จะปรับค่า R ทั้งนี้ ค่า R ที่จะใช้ในการดูแนวโน้มจะมีลักษณะเป็นจำนวนเท่าตัวของ Q เพื่อความสดวกในการใช้งานจึงได้ออกแบบเป็นรูปแบบของการ สไลด์บาร์

3.3 การออกแบบสเตชั่น

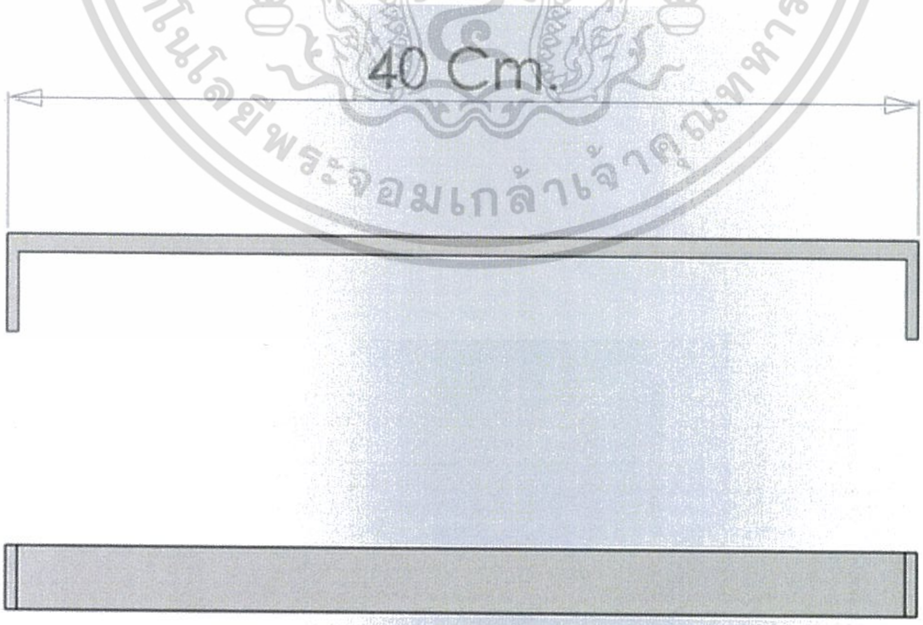
ในขั้นของการทดสอบลักษณะการเดินของมนุษย์ นั้นจำเป็นจะต้องสร้างสเตชั่นขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบ ให้ได้ตามลักษณะของวัฏจักรการเดินของมนุษย์มากที่สุด ซึ่งเป็นเพียงการจำลองเพื่อแสดงให้เห็นว่ามอเตอร์และเซนเซอร์ที่นำมาใช้นั้นสามารถควบคุมลักษณะการเดินได้ถูกต้อง โดยยังไม่สามารถนำไปใช้งานกับผู้พิการได้จริงเป็นเพียงแค่แบบจำลองการเดินเพียงเท่านั้น

สเตชั่นจะมีรูปแบบเป็นโครงสี่เหลี่ยมในส่วนด้านบนจะมีเพลาเพื่อใช้กระดูกเชิงกรานหรือสะโพก ของมนุษย์ และในส่วนของต้นขาและหน้าแข้งจะใช้อลูมิเนียมเบา ทำเป็นแกนกลางของขาและใช้เซอร์โวมอเตอร์เป็นข้อต่อเพื่อยึดจับทั้งสองส่วนได้แก่ ข้อต่อเท้า และ ข้อต่อเข่า ดังรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



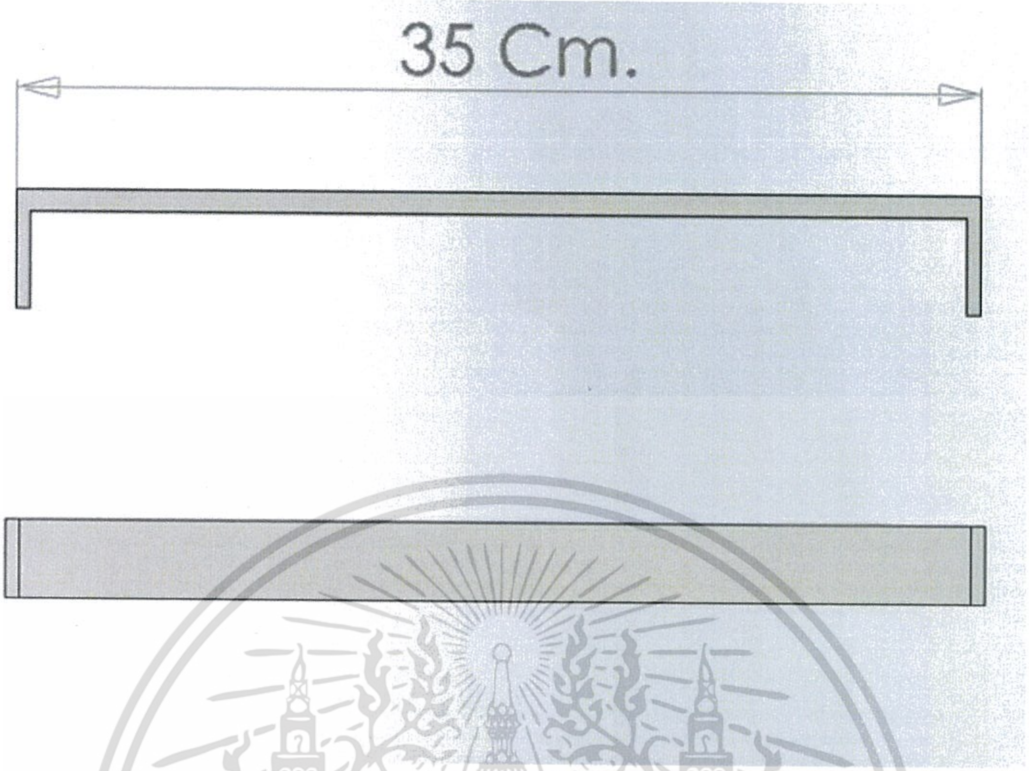
รูปที่3.10 การออกแบบสเตชั่นขาเทียมอัตโนมัติ



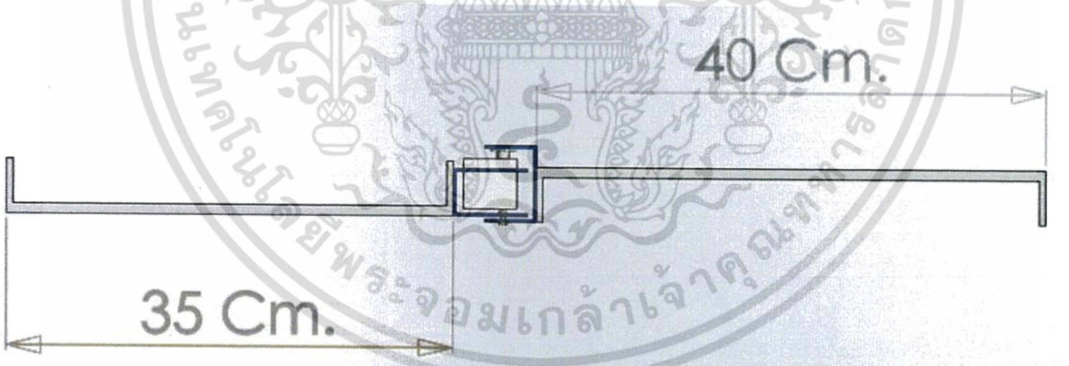
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.11 โครงสร้างขาส่วนบน (Upper Leg)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 โครงสร้างขาส่วนล่าง(Lower Leg)



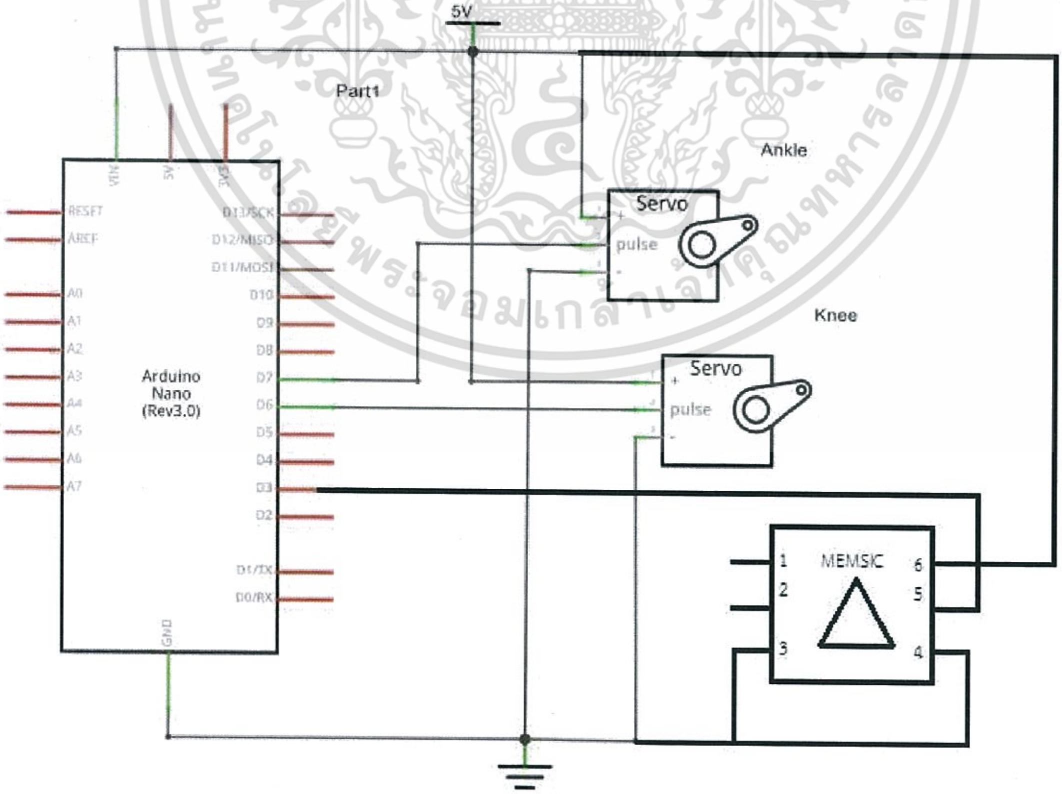
รูปที่ 3.13 การประกอบของ Lower Leg และ Upper Leg โดยใช้เซอร์โวมอเตอร์เป็นข้อต่อ

เซอร์โวมอเตอร์ จะถูกติดตั้งเข้าโดยเซอร์โวในสถานะปกติ(ขาเหยียดตรง)จะทำมุม 90 องศา ของการสั่งการด้วย Arduino และถูกติดเข้ากับเพลาตรงกลางของส่วนบนสเตชั่น และกำหนดจุดที่ขายืนตรงเป็น 90 องศา เมื่อก้าวขาไปข้างหน้าจะมีค่ามากกว่า 90 องศา และเมื่อขาเคลื่อนไปข้างหลังสะโพกจะทำองศากับแนวปกติน้อยกกว่า 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.14 สเตชั่นขาเทียมแบบอัติโนมัติ

3.3.1 การต่อวงจร



รูปที่ 3.15 การต่อวงจรของขาเทียมแบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 ภาพรวมของระบบชุดเก็บข้อมูลจากเซนเซอร์

ในการควบคุมนั้นใช้ ระบบสมองกลแบบฝังตัว หรือ Embedded Systems โดยใช้ Platfrom Arduino Nano ในการควบคุมและการสั่งการโดยการทำงานนั้นจะทำงานสอดคล้องกับเซนเซอร์ตรวจวัดความลาดเอียงโดยใช้ความเร่ง ซึ่งในการตรวจจับของเซนเซอร์นั้นได้ใช้ filter เพื่อให้ค่าที่ได้จาก เซนเซอร์ตรวจจับความลาดเอียงมีความเสถียรและมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยมีแผนผังการทำงานดังนี้

รูปที่ 3.16 แผนผังแสดงลักษณะการทำงานของสเตชั่นขาเทียม

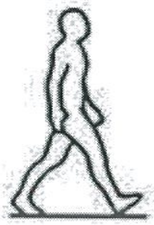
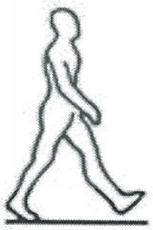
ลักษณะการทำงาน โดยที่เซนเซอร์ตรวจจับความลาดเอียงจะเป็นตัวบอกสถานะของตำแหน่งต้นขาและกำหนดส่วนของการเคลื่อนที่ว่า อยู่ในลำดับใดของวัฏจักรการเดินของมนุษย์ จากนั้นจะทำการส่งค่าต่อไปให้ Arduino เพื่อทำการประมวลผลว่าองศาของเซอร์โวมอเตอร์ที่เหมาะสมกับตำแหน่งของต้นขาที่เซนเซอร์ตรวจจับความลาดเอียงนั้นตรวจจับได้ ควรมีค่าอย่างไรและทำการสั่งการให้เซอร์โวมอเตอร์ทำงานตามองศาที่ควรจะเป็น

3.3.3 การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของมนุษย์เพื่อเพื่อใช้ในการควบคุม

จากค่าข้อมูลที่ได้รับจากเซนเซอร์ตรวจจับความลาดเอียง นั้นมีค่าความละเอียดของเซนเซอร์ 1 องศา เป็นผลมาจากการทำ Low Pass Filter นอกจากนี้ค่าที่ระบุไว้ตามลักษณะของการเดินของมนุษย์นั้น มีค่าเป็นช่วง ทำให้เมื่อนำมาทดสอบแล้วผลที่เกิดขึ้นคือมอเตอร์เซอร์โวที่อยู่ในส่วนของข้อต่อต่างๆ เช่น ข้อต่อเท้าและข้อเข่านั้น มีลักษณะการทำงานที่ไม่ต่อเนื่องและไม่มีความราบเรียบในการทำงาน โดยทางคณะผู้จัดทำจึงได้ใช้การเฉลี่ยค่าองศาในแต่ละช่วงของการเคลื่อนที่ของสโพกแบ่งการทำงานไว้ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงองศาของเซอร์โวมอเตอร์ในข้อต่อต่างๆในสถานะ Stance Phase [14]

ลักษณะการเดิน	ช่วงตำแหน่งของสะโพก	อัตราการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อเข่า	อัตราการเปลี่ยนแปลงของข้อเท้า
 Initial Contact	มากกว่า 120 องศา	สถานะปกติ 90 องศา	สถานะปกติ 90 องศา
Loading Response	119องศา ถึง 95 องศา	จากสถานะปกติ 90 องศา ลดครั้งละ 3 องศา ต่ออัตราการการลดลงของสะโพก 5 องศา	จากสถานะปกติ 90 องศา เพิ่มครั้งละ 3 องศา ต่ออัตราการลดลงของสะโพก 5 องศา
Mid-stance	94 องศา ถึง 90 องศา	จากสถานะปกติ 75 องศา เพิ่มครั้งละ 3 องศา ต่ออัตราการลดลงของสะโพก 1 องศา	จากสถานะ 105 องศา เพิ่มครั้งละ 3 องศา ต่ออัตราการลดลงของสะโพก 1 องศา
 Terminal stance	89 องศา ถึง 80 องศา	จากสถานะปกติ 90 องศา คงสถานะ 90 องศา	คงสถานะไว้ที่ สถานะปกติ 90 องศา
Pre-swing	80 องศา ถึง 89 องศา	จากสถานะ 90 องศา ลดครั้งละ 7 องศา ต่ออัตราการเพิ่มของสะโพก 3 องศา	-จากสถานะปกติ 90 องศา เพิ่มครั้งละ 4 องศา ต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของสะโพก 3องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงองศาของเซอร์โวมอเตอร์ในข้อต่อต่างๆในสถานะ Swing Phase [14]

ลักษณะการเดิน	ช่วงตำแหน่งของสะโพก	อัตราการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อเข่า	อัตราการเปลี่ยนแปลงของข้อเท้า
Initial swing	90 องศา ถึง 109 องศา	จากสถานะ 55 องศา ลดครั้งละ 5 องศา ต่ออัตราการเพิ่มของสะโพก 5 องศา	จากสถานะ 110 องศา ลดลงครั้งละ 4 องศา ต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของสะโพก 5 องศา
Mid-swing	110 องศา ถึง 119 องศา	จากสถานะ 55 องศา ลดครั้งละ 5 องศา ต่ออัตราการเพิ่มของสะโพก 5 องศา	คงสถานะไว้ที่ สถานะปกติ 90 องศา
Terminal swing	มากกว่า 120 องศา	จากสถานะ 30 องศา เพิ่มครั้งละ 6 องศา ต่ออัตราการเพิ่มของสะโพก 1 องศา	-คงสถานะไว้ที่ สถานะปกติ 90 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 การเก็บค่าข้อมูลองศาจากชุดเก็บข้อมูล

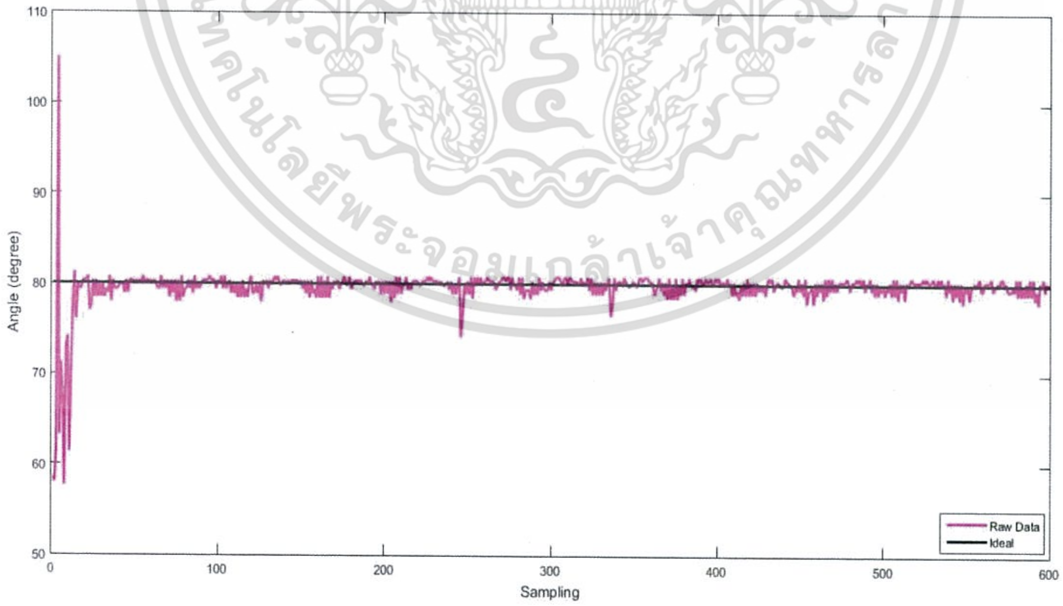
การเก็บค่าข้อมูลที่นำไปใช้ในการวิเคราะห์ค่าคงที่ ที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานของ filter จะเกิดขึ้นในกระบวนการนี้ โดยจะทำการเก็บค่าข้อมูลแต่ละชุดทั้งหมด ชุดละ 600 ค่า โดยช่วงเวลาของแต่ละ การเก็บตัวอย่างข้อมูลห่างกัน 15 มิลลิวินาที (ms) โดยแบ่งประเภทของการเก็บข้อมูล มี 3 ลักษณะ ได้แก่

1. การเก็บข้อมูลจากชุดเก็บข้อมูล โดยจำลองสถานะองศาคงที่ที่องศา 80, 90 และ 120 องศา

2. การเก็บข้อมูลจากชุดเก็บข้อมูล โดยโปรแกรมการแกว่งของชุดเก็บข้อมูล ให้มีการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา

3. การเก็บข้อมูลจากชุดเก็บข้อมูล โดยการสั่งการชุดเก็บข้อมูลให้แกว่งผ่าน Potentiometer ให้มีการเคลื่อนที่ ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา

4.1.1 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลคงที่ ที่ 80 องศา จำนวน 600 ค่า



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลคงที่ ที่ 80 องศา จำนวน 600 ค่า

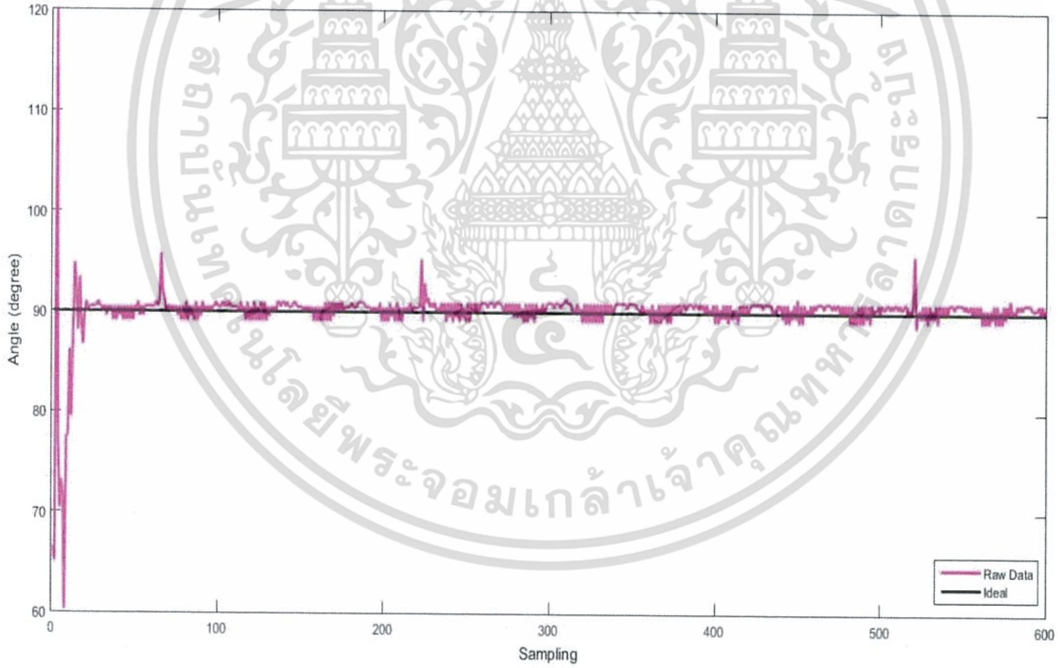
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลที่เก็บจำนวน 600 ค่าที่ตำแหน่ง 80 องศา สามารถสรุปลักษณะของข้อมูลได้ดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่4.1 ตารางสรุปค่า Raw Data ที่ 80 องศา

จำนวนข้อมูล	600
max	105.030
min	57.620
Mean	79.630
StDev	2.516
Variance	6.330

4.1.2 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลคงที่ ที่ 90 องศา จำนวน 600 ค่า



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลคงที่ ที่ 90 องศา จำนวน 600 ค่า

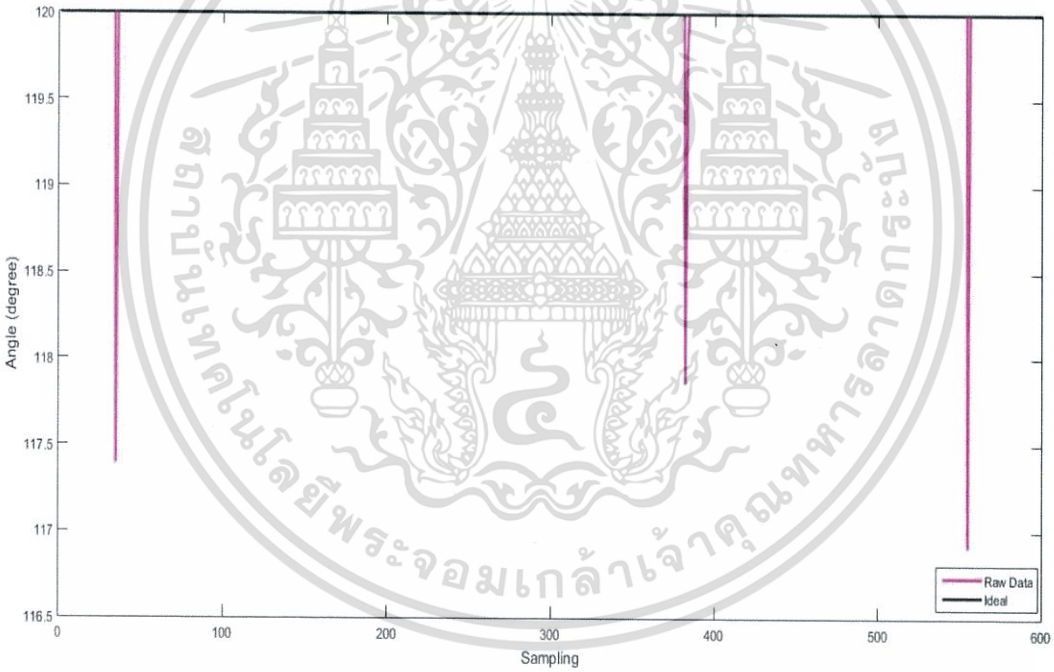
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลที่เก็บจำนวน 600 ค่าที่ตำแหน่ง 90 องศา สามารถสรุปลักษณะของข้อมูลได้ดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่4.2 ตารางสรุปค่า Raw Data ที่ 90 องศา

จำนวนข้อมูล	600
max	120.000
min	60.240
Mean	90.129
StDev	2.899
Variance	8.405

4.1.3 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลคงที่ ที่ 120 องศา จำนวน 600 ค่า



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลคงที่ ที่ 120 องศา จำนวน 600 ค่า

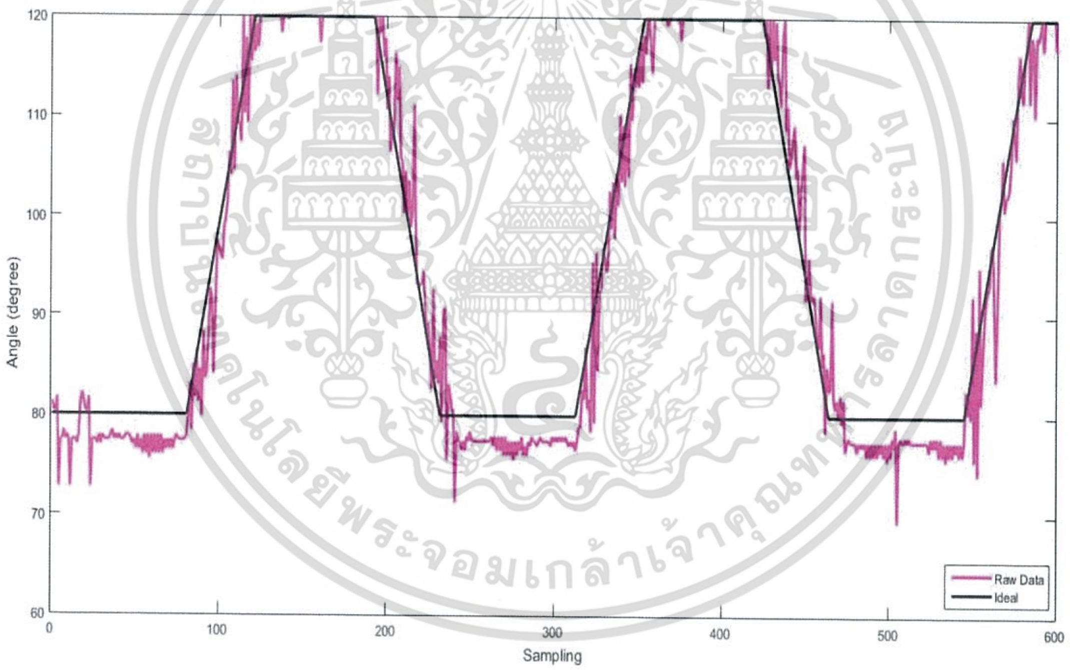
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลที่เก็บจำนวน 600 ค่าที่ตำแหน่ง 120 องศา สามารถสรุปลักษณะของข้อมูลได้ดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่4.3 ตารางสรุปค่า Raw Data ที่ 120 องศา

จำนวนข้อมูล	600
max	120
min	116.91
Mean	119.99
StDev	0.19
Variance	0.034

4.1.4 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลของการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า

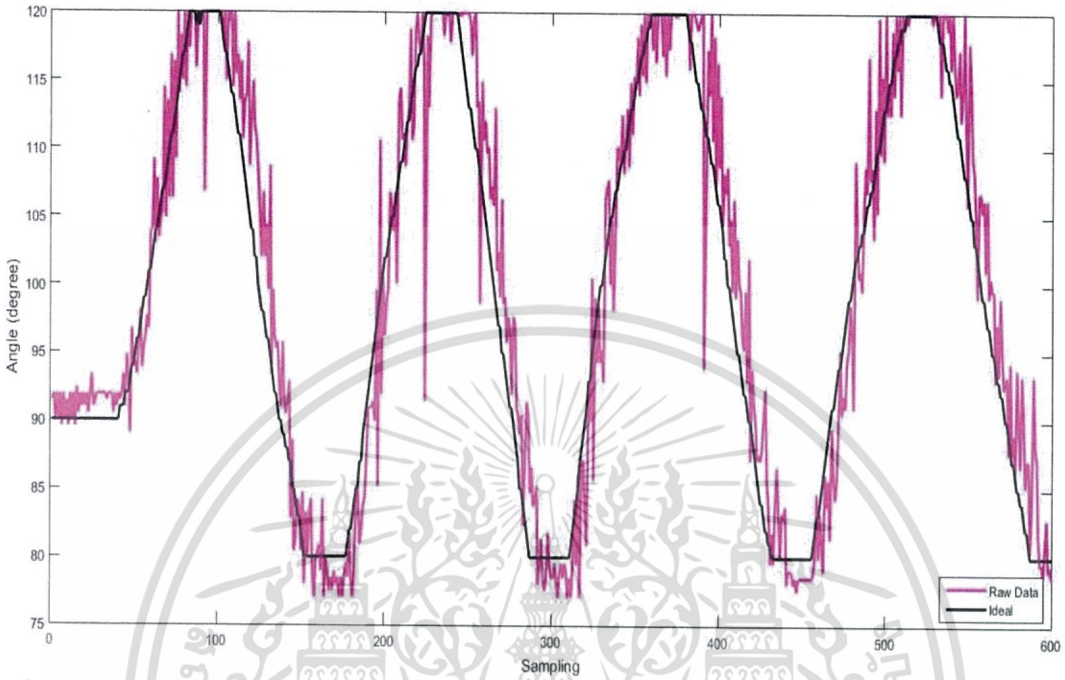


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลของการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า

การเก็บข้อมูลมีการเคลื่อนที่ของชุดเก็บข้อมูลระหว่าง 80 องศา และ 120 องศา ทั้งหมด 600 ค่า โดย ทำการกำหนดให้มีการ หยุดที่ตำแหน่ง 80 องศา เป็นเวลา 1200 มิลลิวินาที (80 ของการสุ่มตังอย่าง x 15 มิลลิวินาที) และ 120 องศา เป็นเวลา 1050 มิลลิวินาที (70 ของการสุ่มตังอย่าง x 15 มิลลิวินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.5 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลของการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการปรับ Potentiometer



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการเก็บข้อมูลของการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการ Potentiometer

การเก็บข้อมูลมีการเคลื่อนที่ของชุดเก็บข้อมูลระหว่าง 80 องศา และ 120 องศา มีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการปรับ Potentiometer ส่งผลให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่โดยจุดประสงค์ของการเก็บข้อมูลในรูปแบบนี้ เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบ filter ว่ามีผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร

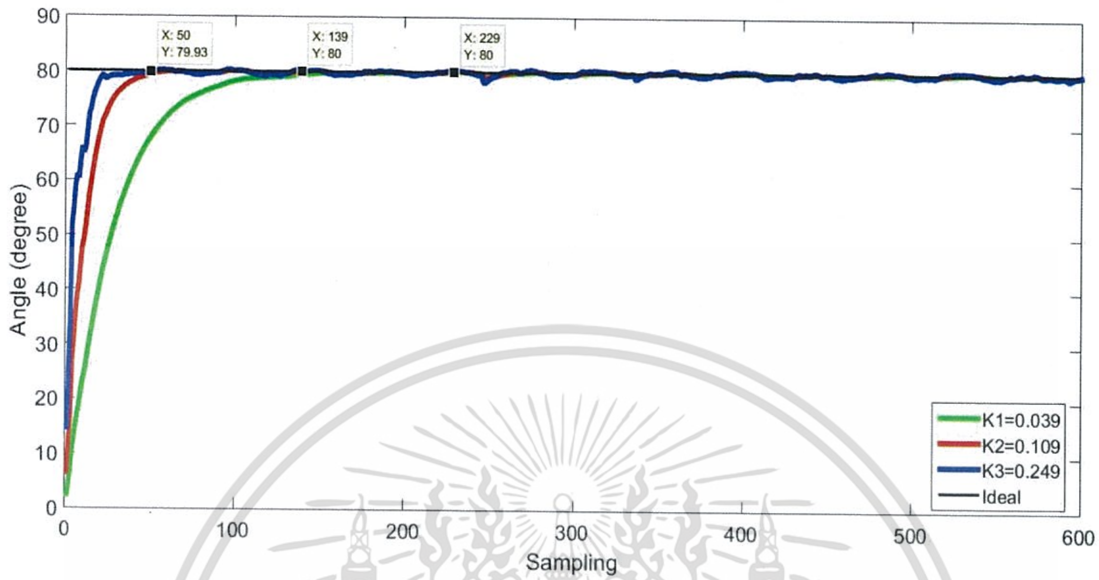
4.2 การนำค่าข้อมูลที่ได้มาผ่านกระบวนการ filter

หลังจากทำการเก็บข้อมูลองศาต่างๆ พบว่ามีสัญญาณรบกวนในระบบ ซึ่งเกิดจากปัจจัยภายนอกและภายในต่างๆ การลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวน สามารถทำได้โดยใช้การ filter โดย filter ที่ใช้ มีจำนวน 2 filter ได้แก่ Low pass filter และ Kalman filter ซึ่งการใช้ filter เหล่านี้จำเป็นจะต้องปรับค่าคงที่ ต่างๆ ให้เหมาะสม โดยผลของการปรับค่าคงที่ของทั้ง 2 filter มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การปรับค่าคงที่ Low pass filter

1. กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 80 องศา



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา

ค่าคงที่	จำนวนยูนิตที่ทำให้มุมเข้าสู่สภาวะสมดุล	ค่าความคาดเคลื่อนหลังเข้าสู่สมดุล
K1=0.039	229	±0
K2=0.109	139	±1
K3=0.249	50	±2

จากตารางคือการปรับค่าคงที่ของ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา แทนด้วยค่า K1, K2, K3 ตามลำดับโดยค่า K แต่ละค่า จะให้ผลตอบสนองที่ต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

K1 = 0.039 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±0 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 229 (หรือที่เวลา 3435 ms)

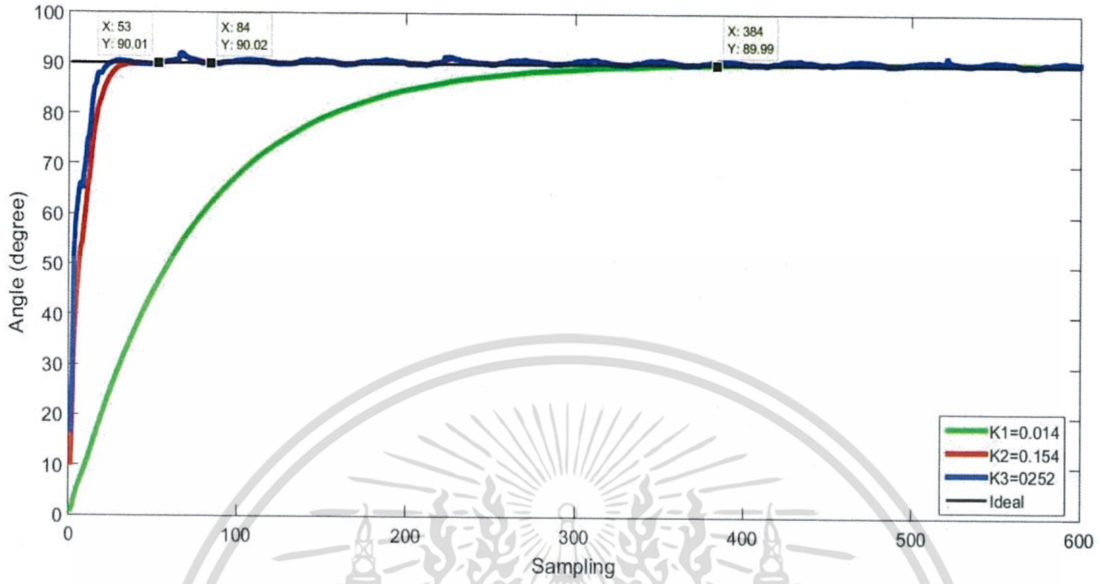
K2 = 0.109 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±1 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 139 (หรือที่เวลา 2085 ms)

K3 = 0.249 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±2 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 50 (หรือที่เวลา 750 ms)

โดยจะเลือกค่าที่ดีที่สุดที่ตำแหน่ง 80 องศา คือ K2 = 0.109 เพราะมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 90 องศา



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา

ค่างคงที่	จำนวนยูนิตที่ทำให้มุมเข้าสู่สภาวะสมดุล	ค่าความคาดเคลื่อนหลังเข้าสู่สมดุล
K1=0.014	384	±0
K2=0.154	84	±1
K3=0.274	53	±2

จากตารางคือการปรับค่าคงที่ของ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา แทนด้วยค่า K1, K2, K3 ตามลำดับโดยค่า K แต่ละค่า จะให้ผลตอบสนองที่ต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

K1 = 0.014 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±0 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 384 (หรือที่เวลา 5760 ms)

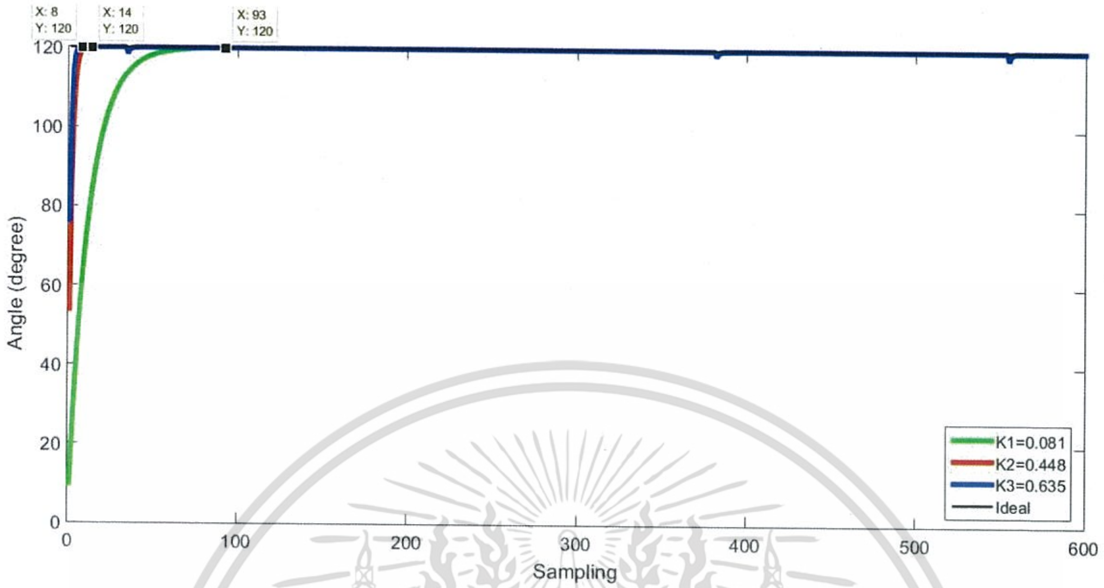
K2 = 0.154 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±1 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 84 (หรือที่เวลา 1260 ms)

K3 = 0.252 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±2 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 53 (หรือที่เวลา 795 ms)

โดยจะเลือกค่าที่ดีที่สุดที่ตำแหน่ง 90 องศา คือ K2 = 0.154 เพราะมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 120 องศา



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา

ค่าคงที่	จำนวนยูนิตที่ทำให้มุมเข้าสู่สภาวะสมดุล	ค่าความคาดเคลื่อนหลังเข้าสู่สมดุล
K1=0.081	93	±0
K2 =0.448	14	±1
K3 =0.635	8	±2

จากตารางคือการปรับค่าคงที่ของ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา แทนด้วยค่า K1, K2, K3 ตามลำดับโดยค่า K แต่ละค่า จะให้ผลตอบสนองที่ต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

K1 = 0.081จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±0 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 93 (หรือที่เวลา 1395 ms)

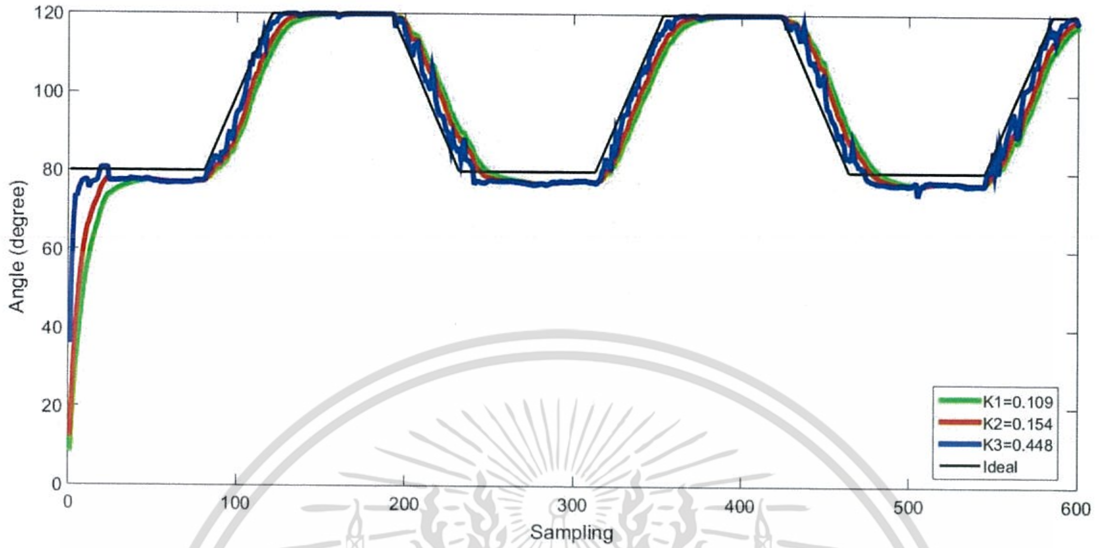
K2 = 0.448 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±1 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 14 (หรือที่เวลา 210 ms)

K3 = 0.635 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±2 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 8 (หรือที่เวลา 120 ms)

โดยจะเลือกค่าที่ดีที่สุดที่ตำแหน่ง 120 องศา คือ K2 = 0.448 เพราะมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา



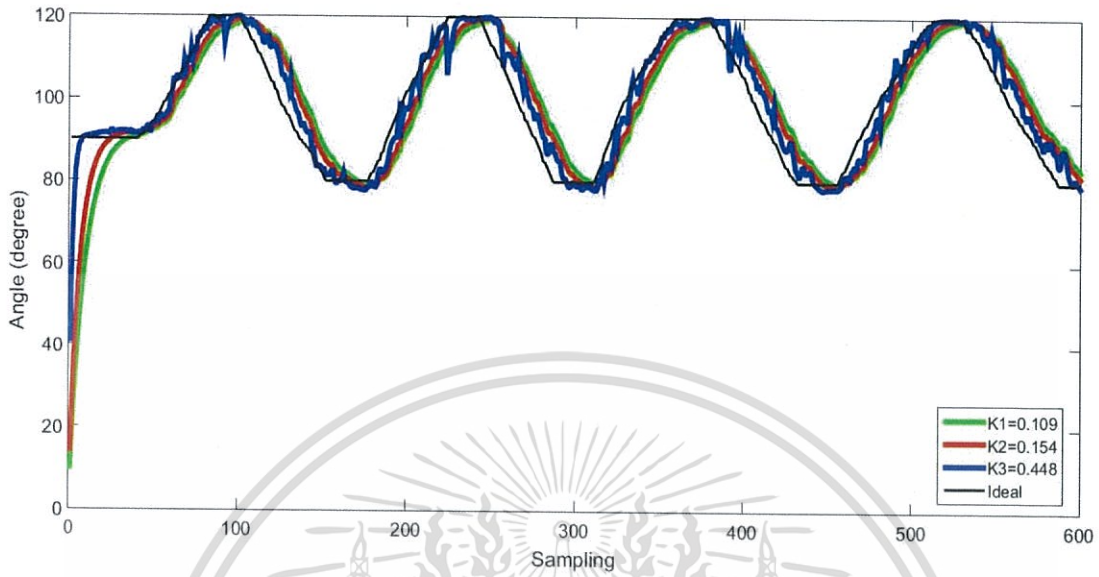
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา

ทำเคลื่อนที่ชุดทดสอบเคลื่อนที่ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา และกำหนดให้มีการหยุดที่ตำแหน่ง 80 องศา เป็นเวลา 1200 มิลลิวินาที (80 ของการสุ่มตังอย่าง x 15 มิลลิวินาที) และ 120 องศา เป็นเวลา 1050 มิลลิวินาที (70 ของการสุ่มตังอย่าง x 15 มิลลิวินาที) เพื่อเป็นการทดสอบความเร็วในการเข้าสู่สถานะสมดุลที่ 80 องศา หรือ 120 องศา โดยใช้ค่า K ต่างๆที่ดีที่สุดในแต่ละการทดสอบของการทดสอบ filter ที่สถานะคงที่ ที่ 80 องศาให้เป็น K1 90 องศา ให้เป็น K2 และ 120 องศา ให้เป็น K3

จากกราฟในรูปที่ 4.8 ค่าที่เหมาะสมของการใช้ Low pass filter นั้นเป็น ค่า K2 ซึ่งมีค่าคงที่เท่ากับ 0.154 เนื่องจากมีการผลการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ และมีค่าที่ได้ออกมา มีความใกล้เคียงกับเส้น Ideal มากกว่า ค่า K1 และมีความเรียบของค่าข้อมูลมากกว่าค่า K3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา โดยใช้ Potentiometer



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการ Potentiometer

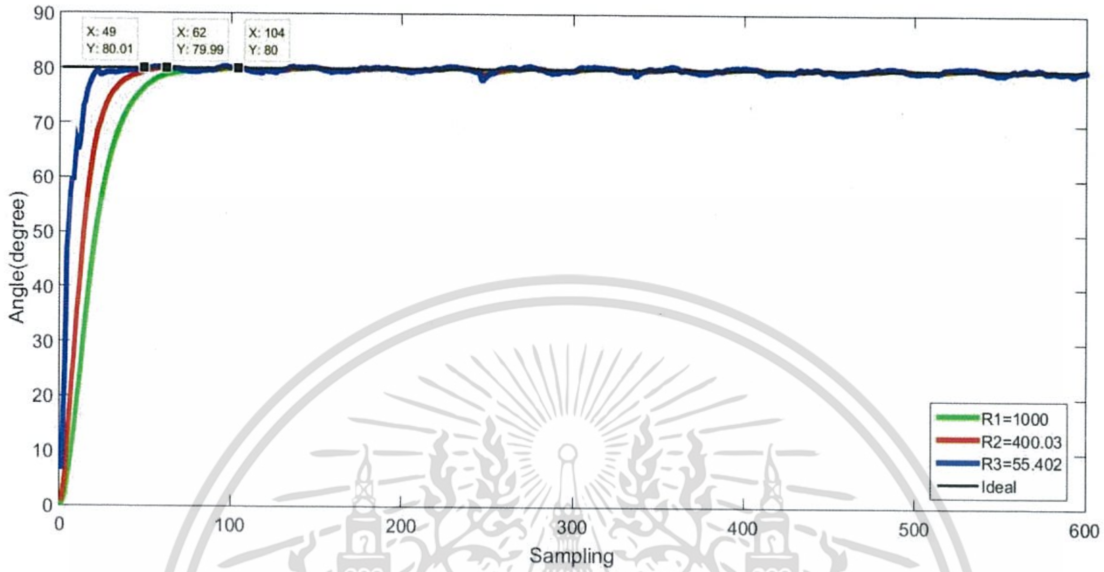
รูปที่ 4.10 กราฟแสดง การเก็บข้อมูลมีการเคลื่อนที่ของชุดเก็บข้อมูลระหว่าง 80 องศา และ 120 องศาโดยสั่งการผ่านการปรับ Potentiometer ส่งผลให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ เป็นไปตามจังหวะของการหมุนของผู้ทดลอง ซึ่งจะนำเข้าไปทดสอบกับค่าคงที่โดยใช้ค่า K ต่างๆที่ดีที่สุดในแต่ละการทดสอบของการทดสอบ filter ที่สถานะคงที่ ที่ 80 องศาให้เป็น K1 90 องศา ให้เป็น K2 และ 120 องศา ให้เป็น K3

ค่าที่เหมาะสมของการใช้ Low pass filter นั้นเป็น ค่า K2 ที่ได้ผ่านการทดสอบในค่าช่วง 80 องศา ถึง 120 องศา โดยใช้โปรแกรมสั่งให้เคลื่อนที่ ซึ่งค่า K2 ที่ใช้ใน filter นั้นมีความเหมาะสมที่สุด และผลการทดสอบจากกราฟใน รูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงว่า การเปลี่ยนแปลงที่ไม่คงที่ในช่วง 80 องศา ถึง 120 องศา ผ่านการสั่งการด้วย Potentiometer นั้น ค่า K2 สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ มีความใกล้เคียงกับเส้น Ideal ดังนั้น ค่า K2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.154 เหมาะสมต่อการใช้กับค่า Low pass filter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การปรับค่าคงที่ Kalman filter

1. กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 80 องศา (ความแปรปรวน (Q) = 6.33 คิดจากการเก็บตัวอย่างข้อมูลจำนวน 600 ข้อมูล)



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา

ค่าคงที่	จำนวนยูนิตที่ทำให้มุมเข้าสู่สภาวะสมดุล	ค่าความคาดเคลื่อนหลังเข้าสู่สมดุล
R1= 1000	104	±0.7
R2 = 400.03	62	±1
R3 = 55.402	49	±2

จากตารางคือการปรับค่าคงที่ของ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 องศา แทนด้วยค่า R1, R2, R3 ตามลำดับโดยค่า R แต่ละค่า จะให้ผลตอบสนองที่ต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

R1 = 1000 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±0.7 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 104 (หรือที่เวลา 1560 ms)

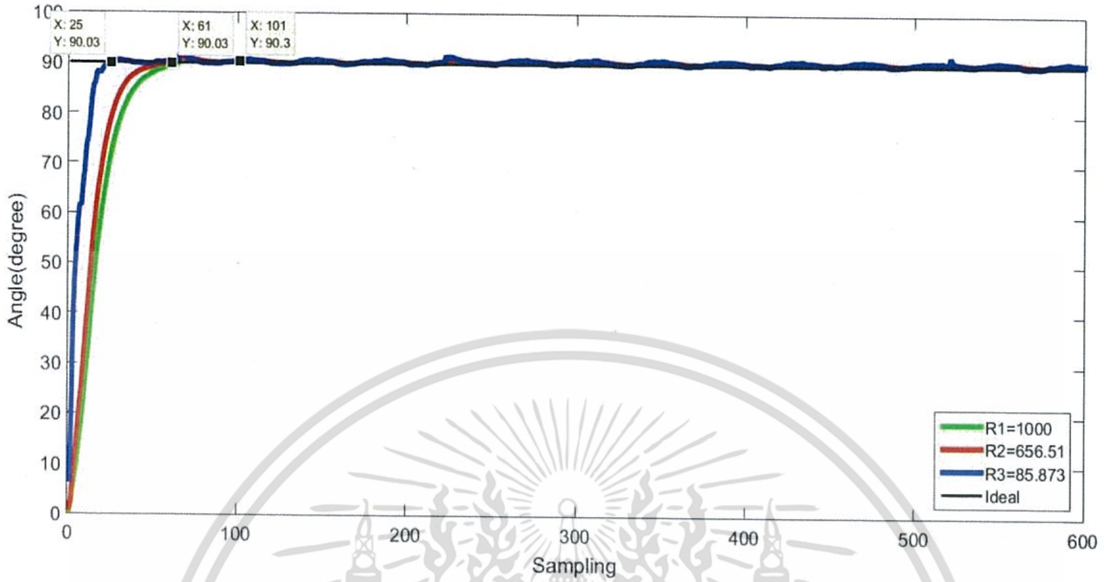
R2 = 400.03 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±1 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 62 (หรือที่เวลา 930 ms)

R3 = 55.402 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±2 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 49 (หรือที่เวลา 735 ms)

โดยจะเลือกค่าที่ดีที่สุดที่ตำแหน่ง 80 องศา คือ R2 = 400.03 เพราะมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 90 องศา (ความแปรปรวน (Q) = 8.405 คิดจากการเก็บตัวอย่างข้อมูลจำนวน 600 ข้อมูล)



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา

ค่างคงที่	จำนวนยูนิตที่ทำให้มุมเข้าสู่สภาวะสมดุล	ค่าความคาดเคลื่อนหลังเข้าสู่สมดุล
R1 = 1000	101	±0.5
R2 = 656.51	61	±1
R3 = 85.873	25	±2

จากตารางคือการปรับค่าคงที่ของ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 90 องศา แทนด้วยค่า R1, R2, R3 ตามลำดับโดยค่า R แต่ละค่า จะให้ผลตอบสนองที่ต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

R1 = 1000 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±0.5 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 101 (หรือที่เวลา 1515 ms)

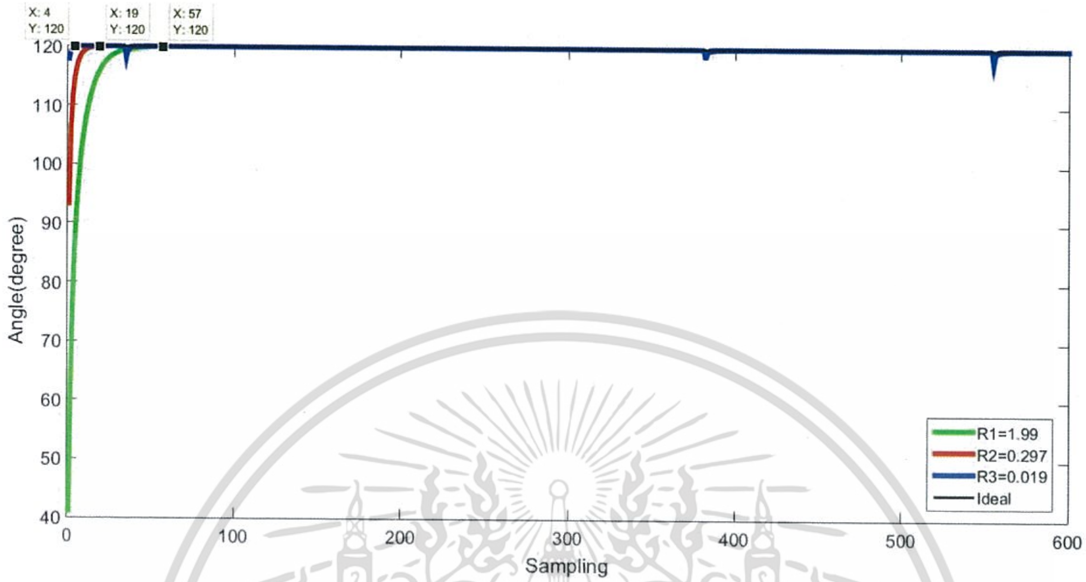
R2 = 656.51 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±1 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 61 (หรือที่เวลา 915 ms)

R3 = 85.873 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±2 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 25 (หรือที่เวลา 375 ms)

โดยจะเลือกค่าที่ดีที่สุดที่ตำแหน่ง 90 องศา คือ R2 = 656.51 เพราะมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 120 องศา (ความแปรปรวน (Q) = 0.034 คิดจากการเก็บตัวอย่างข้อมูลจำนวน 600 ข้อมูล)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา

ค่าคงที่	จำนวนยูนิตที่ทำให้มุมเข้าสู่สภาวะสมดุล	ค่าความคาดเคลื่อนหลังเข้าสู่สมดุล
R1 = 1.99	57	±0
R2 = 0.297	19	±1
R3 = 0.019	4	±2

จากตารางคือการปรับค่าคงที่ของ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 120 องศา แทนด้วยค่า R1, R2, R3 ตามลำดับโดยค่า R แต่ละค่า จะให้ผลตอบสนองที่ต่างกันซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

R1 = 1.99 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±0.5 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 57 (หรือที่เวลา 855 ms)

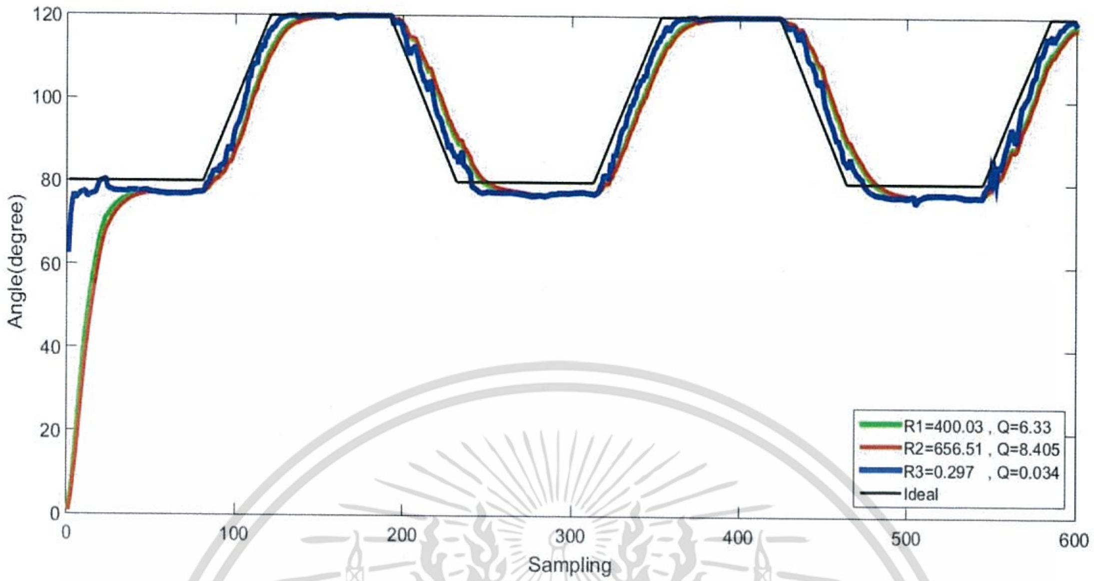
R2 = 0.297 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±1 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 19 (หรือที่เวลา 285 ms)

R3 = 0.019 จะมีค่าความคาดเคลื่อนที่ ±2 องศา และจะเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ Sampling ที่ 4 (หรือที่เวลา 60 ms)

โดยจะเลือกค่าที่ดีที่สุดที่ตำแหน่ง 120 องศา คือ R2 = 0.297 เพราะมีค่าความคาดเคลื่อนอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้และเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็ว

เอกสารนี้...ได้...ให้...การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา



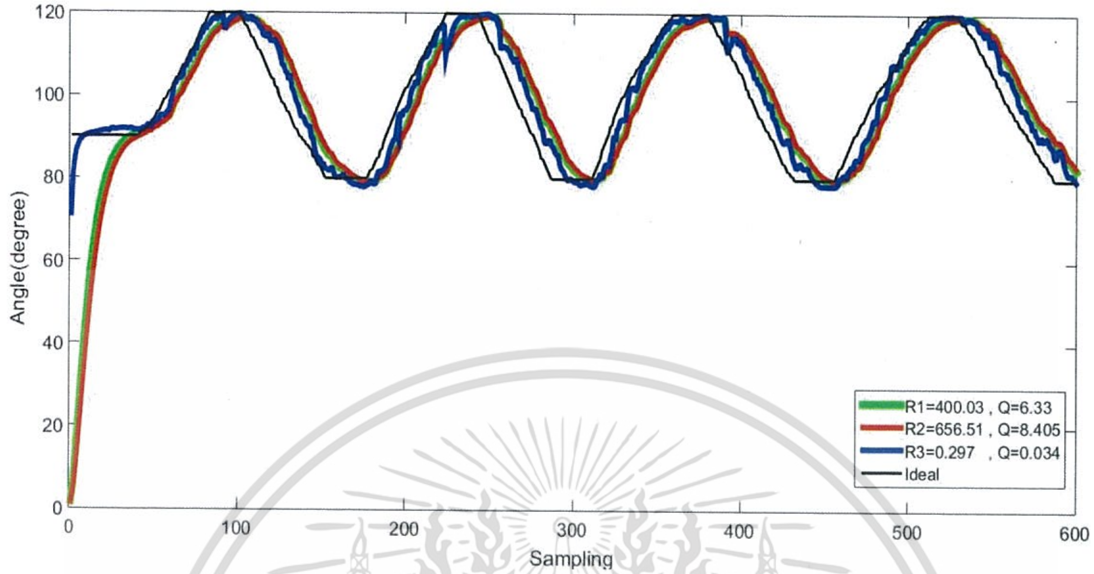
รูปที่ 4.14 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา

จากกราฟในรูปที่ 4.12 เป็นนำค่าความแปรปรวนของ Input และ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน(ค่า Q, ค่า R) ที่ดีที่สุดของการทดสอบค่าความแปรปรวน ที่สถานะคงที่ ที่ 80 องศา 90 องศา และ 120 องศา โดยใช้ค่าที่ดีที่สุดของสถานะคงที่ ที่ 80 องศา คือ R = 400.03, Q = 6.33 ที่สถานะคงที่ ที่ 90 องศา R = 656.51, Q = 8.405 และ ที่สถานะคงที่ ที่ 120 องศา R = 0.297, Q = 0.034 เนื่องจาก ในการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 องศา ถึง 120 องศานั้น ไม่สามารถหาค่าความแปรปรวนของระบบได้เนื่องจาก ค่ามีการเปลี่ยนแปลง

จากกราฟในรูปที่ 4.12 ค่าที่เหมาะสมของการใช้ Kalman filter นั้นมีอยู่ 2 ชุดข้อมูล ที่ ค่า คือ R = 400.03, Q = 6.33 และ R = 656.51, Q = 8.405 ซึ่งมีความใกล้เคียงกันมากแต่เส้นสีเขียว หรือที่ค่า R = 400.03, Q = 6.33 ตอบสนองไวกว่าเพียงเล็กน้อย ดังนั้น ที่ค่า R = 400.03, Q = 6.33 นั้นเหมาะสมต่อการนำไปใช้กับ Kalman filter ของระบบวัดความเร่งแบบ 2 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.กราฟแสดงการปรับค่า ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา โดยใช้ Potentiometer



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงการปรับค่าคงที่ Low pass filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการ Potentiometer

รูปที่ 4.13 กราฟแสดง การเก็บข้อมูลมีการเคลื่อนที่ของชุดเก็บข้อมูลระหว่าง 80 องศา และ 120 องศาโดยสั่งการผ่านการปรับ Potentiometer ส่งผลให้ช่วงการเปลี่ยนแปลงของค่าข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ เป็นไปตามจังหวะของการหมุนของผู้ทดลอง ซึ่งจะนำเข้าไปทดสอบกับค่าคงที่โดยใช้ค่า ความแปรปรวนของ Input และ สัญญาณรบกวน ที่ดีที่สุดในแต่ละการทดสอบของการทดสอบ filter โดยใช้ค่าที่ดีที่สุดของสถานะคงที่ ที่ 80 องศา คือ R = 400.03 ,Q = 6.33 ที่สถานะคงที่ ที่ 90 องศา R = 656.51, Q = 8.405 และ ที่สถานะคงที่ ที่ 120 องศา R = 0.297, Q = 0.034

จากการทดสอบผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าที่ค่าความแปรปรวน R = 400.03, Q = 6.33 มีประสิทธิภาพในการทดสอบของการ filter ค่าในการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 องศา ถึง 120 องศา โดยใช้การสั่งการด้วย Potentiometer โดยมีความไวในการตอบสนองอยู่ในระดับที่น่าพอใจ และมีความสามารถในการปรับให้ค่าของข้อมูลมีความเรียบได้ แต่อย่างไรก็ตาม หากใช้ค่า R = 656.51, Q = 8.405 นั้นก็จะมีความสามารถใกล้เคียงกันซึ่งตอบสนองช้ากว่าเพียงเล็กน้อย ซึ่งในการประยุกต์ใช้ในแอพพลิเคชั่นนี้ ต้องการความเร็วในการตอบสนองเป็นหลักและการปรับค่าให้มีความเรียบ ดังนั้นที่ค่าความแปรปรวน R = 400.03, Q = 6.33 จึงเหมาะสมแก่การนำไปประยุกต์ใช้

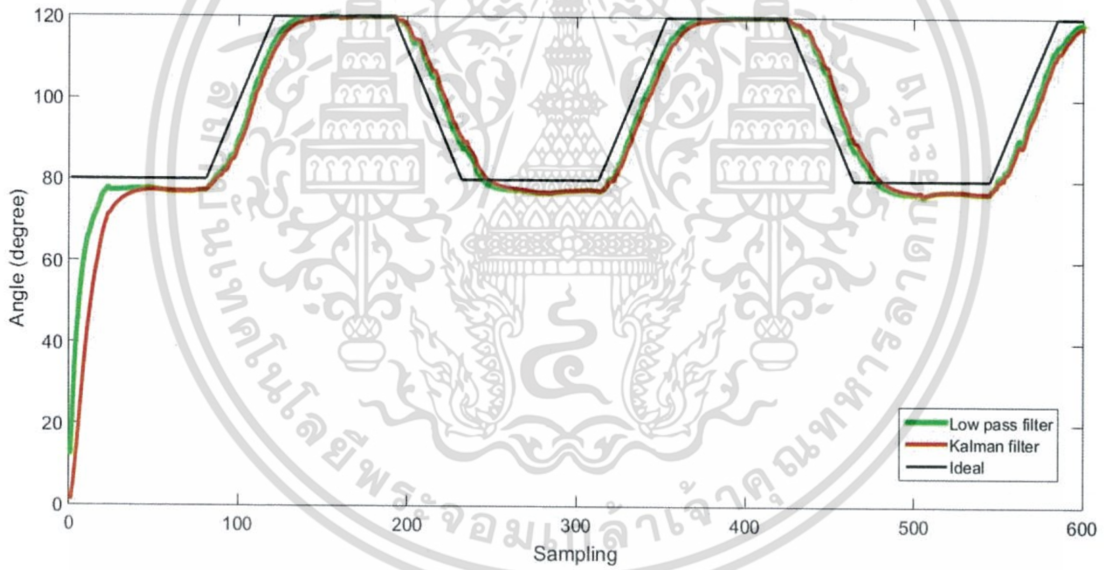
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การเปรียบเทียบ Low pass filter กับ Kalman filter

หลังจากการทดสอบผลของ Low pass filter กับ Kalman filter ด้วยข้อมูลชุดเดียวกัน ผลของการกรองด้วย filter ที่ลักษณะการหยุดนิ่งที่องศาต่างๆ หรือเคลื่อนที่ระหว่าง 80 ถึง 120 องศา ผลจากการทดสอบสรุปค่าคงที่ที่เหมาะสมแก่การนำไปใช้ใน Low pass filter และ Kalman filter ได้ดังนี้

- Low pass filter ค่าคงที่ที่เหมาะผสมได้คือ 0.154
- Kalman filter ค่าความแปรปรวนของ Input และ สัญญาณรบกวนที่เหมาะสมที่สุด คือ R = 400.03, Q = 6.33

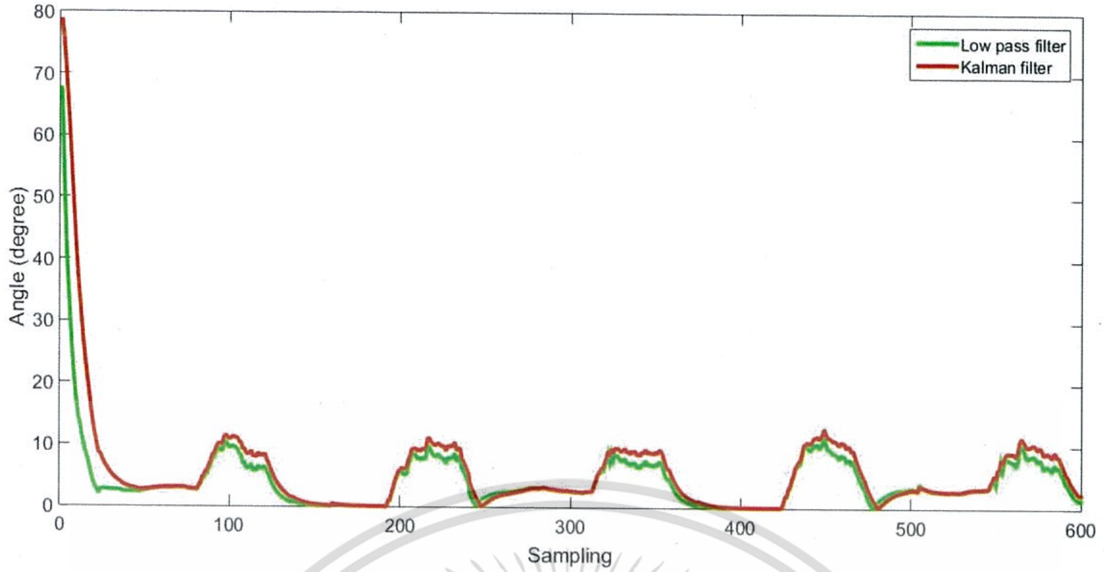
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของ filter ด้วยการนำค่าคงที่ที่เหมาะสมของ Low pass filter กับ ค่าความแปรปรวนของ Input และ สัญญาณรบกวนที่เหมาะสมที่สุดของ Kalman filter นำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อนำมาเลือกใช้เป็น filter ช่วยในการอ่านค่าองศาจาก โมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน ของขาเทียมอัตโนมัติ



รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบ Low pass filter กับ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 จำนวน 600 ค่า

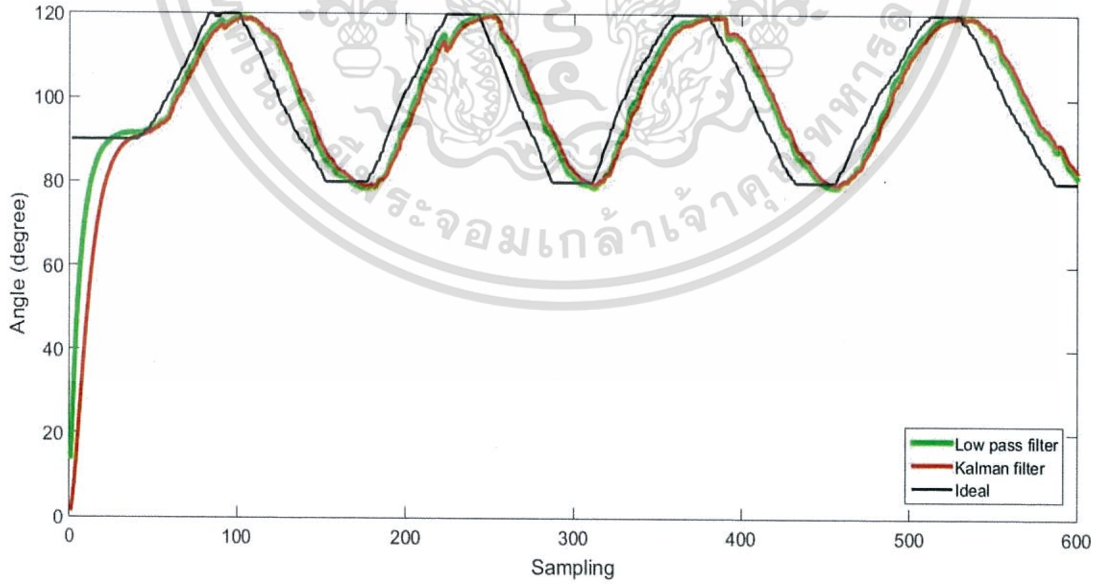
จากรูปที่ 4.16 เป็นผลของการ filter เปรียบเทียบกันระหว่าง Low pass filter กับ Kalman filter ในข้อมูลที่มีการเคลื่อนที่แบบ 80 องศา ถึง 120 องศาซึ่งสั่งการโดยโปรแกรม โดย Low pass filter มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ Input ได้รวจเร็วกว่า Kalman filter ส่วนความเรียบของสัญญาณที่ออกหลังจาก filter นั้น มีความใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากในการใช้งานประยุกต์ใช้เข้ากับการอ่านค่า โมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน นั้นจำเป็นจะต้องใช้ความรวจเร็วในการอ่านค่าดังนั้น Low pass filter มีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่า kalman filter โดยสามารถแสดงผลของความผิดพลาดเทียบกันระหว่าง Low pass filter และ Kalman filter เป็นกราฟดังรูปต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ค่าความคาดเคลื่อนที่ตำแหน่ง 80-120ค่าความคาดเคลื่อนที่ตำแหน่ง 80-120 จำนวน 600 ค่า โดยผ่าน Low pass และ Kalmanfilter

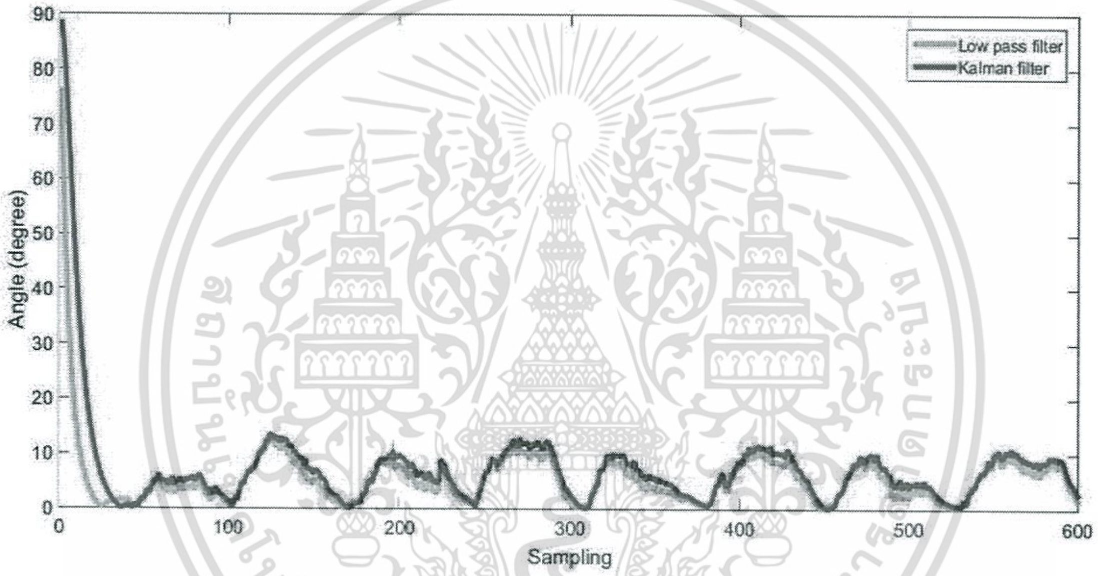
จากกราฟ ในรูปที่ 4.17 ให้เห็น ค่า error ที่เกิดขึ้นจากผลของ filter ตามที่ Sampling ต่างๆจะสังเกตได้ว่า Low pass filter มี error น้อยกว่า Kalman filter ซึ่งเป็นผลดีต่อการนำไปใช้ในการอ่านค่า ของโมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน ทำให้ค่าที่อ่านได้มีค่าความถูกต้อง มากกว่าการใช้ Kalman filter ดังนั้น Low pass filter มีความเหมาะสมแก่การนำไปใช้ในขาเทียมอัตโนมัติ



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบ Low pass filter กับ Kalman filter ที่ตำแหน่ง 80 ถึง 120 องศา จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการ Potentiometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟในรูปที่ 4.18 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพระหว่าง Low pass filter กับ Kalman filter โดยทดสอบผ่านการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 องศา ถึง 120 องศา โดยใช้ Potentiometer ในการสั่งการเคลื่อนที่ ซึ่งผลจากการใช้ Potentiometer ในการสั่งการเคลื่อนที่ระหว่าง 80 องศา ถึง 120 องศา ทำให้ทุกจังหวะการเคลื่อนที่มีความไม่คงที่ทั้งความเร็วและระยะเวลาในการหยุดค้าง จะเห็นได้ว่า Low pass filter มีความสามารถในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้ดีกว่า Kalman filter เช่นเดิมตามการทดสอบในก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ในการปรับค่าการเคลื่อนที่ด้วย Potentiometer มีความไวในการเปลี่ยนแปลงมากกว่าทุกการทดสอบที่ผ่านมาผลจาก error ที่เกิดขึ้นจึงทำให้มีค่าสูงกว่าการทดสอบประเภทการเคลื่อนที่ 80 องศา ถึง 120 องศา ที่สั่งการด้วยโปรแกรม โดยแสดงให้เห็นได้จากรูปภาพต่อไปนี้



รูปที่ 4.19 1 การเปรียบเทียบ ค่าความคาดเคลื่อนที่ตำแหน่ง 80-120 จำนวน 600 ค่า โดยสั่งการผ่านการPotentiometer โดยผ่าน Low pass และ Kalmanfilter

จากรูปที่ 4.19 เนื่องจากมีการทดสอบนี้มีการค้างไว้ที่ 80 องศา หรือ 120 องศาเพียงไม่นานก่อนที่จะเคลื่อที่ออกจากตำแหน่ง ผลที่ตามมาคือ filter ที่มีความช้า จะทำให้ค่าที่ได้ที่จังหวะของการเคลื่อนที่ตรงจุด 80 องศา หรือ 120 องศานั้นมีจำนวนน้อยลงเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่จริงและหากเกิดการเคลื่อนเร็วมากจะส่งผลต่อ filter ที่มีความล่าช้า ซึ่งจะทำให้มีค่า error สูงขึ้น หากมีค่า error สูงกว่านี้จะส่งผลให้ระบบในส่วนของการควบคุมทำงานได้ไม่ครบตามสถานะการเดิน ยกตัวอย่างเช่นที่ 120 องศา เป็นการบ่งบอกว่าขาได้ก้าวไปข้างหน้าสุดแล้ว ให้ทำการยืดข้อเข่าให้สุดที่ตำแหน่ง 90 องศา เพื่อเตรียมที่จะรับน้ำหนักของผู้พิการ หากผลของ filter ช้าเกินไปส่งผลให้อ่านค่าได้ไม่ถึงตำแหน่งที่ถูกต้อง ซึ่งจะให้ระบบเกิดการผิดพลาดทำให้ผู้พิการบาดเจ็บได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

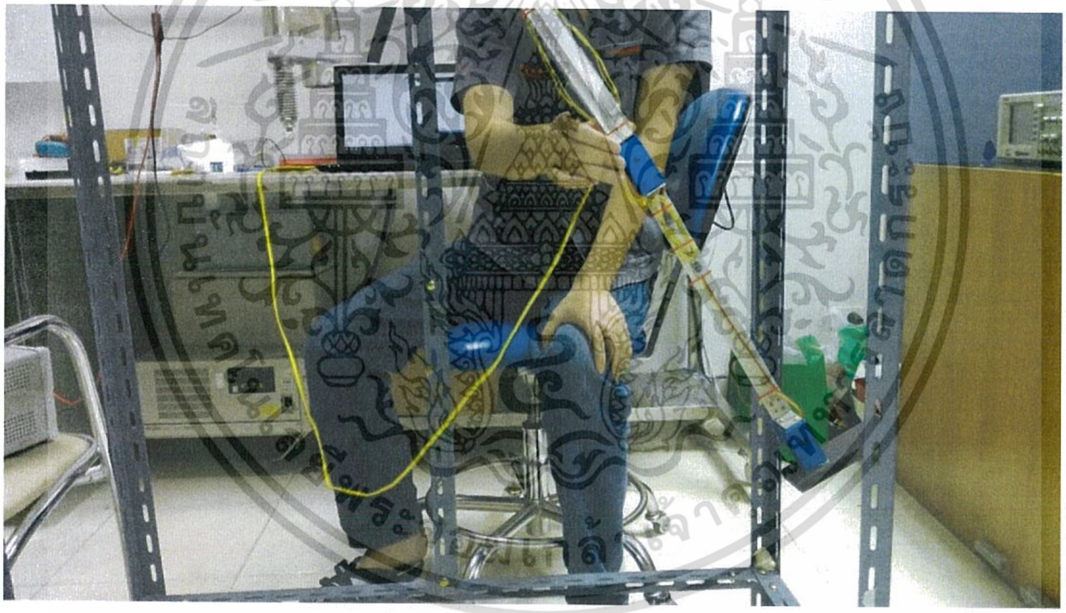
การการทดลองวิเคราะห์ผลจาก filter ด้วย โปรแกรม Matlab พบว่า filter ที่เหมาะสมคือ Low pass filter ที่ใช้ค่าคงที่ ที่ 0.154 เนื่องจากผลการวิเคราะห์ ค่าที่ได้มีความไวต่อการตอบสนอง และมีความสามารถในการลดสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างที่น่าพอใจ

4.3 การประยุกต์ใช้ filter เข้ากับสเตชั่นทดสอบการเดินของมนุษย์

เนื่องจากการปรับค่าคงที่ของ filter มีผลตอบสนองดีที่สุด และมีความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวนได้อยู่ในระดับที่พอใจ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการใช้ Low pass filter เข้ากับสเตชั่นการเดินของมนุษย์เพื่อทดสอบการอ่านค่าองศาและการสั่งการ Servo motor ว่าเคลื่อนที่ได้ถูกต้องตามที่โปรแกรมตามวัฏจักรการเดินของมนุษย์หรือไม่

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ตามวัฏจักรการเดินของมนุษย์ทั้งหมด 8 Phase มีดังต่อไปนี้

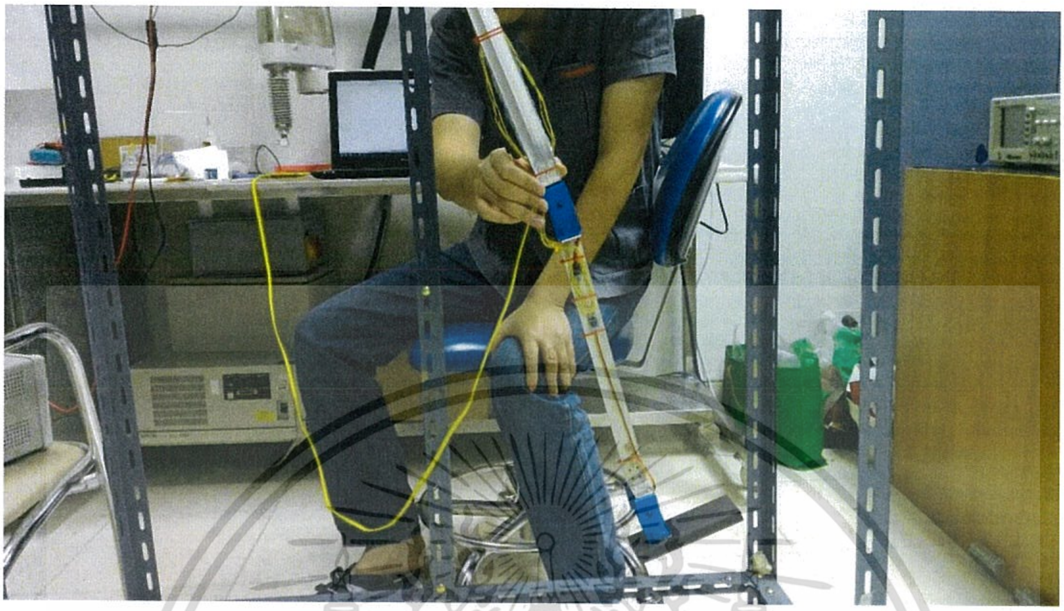
1. Initial contact และ Terminal swing



รูปที่ 4.20 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 1 และ Phase 8

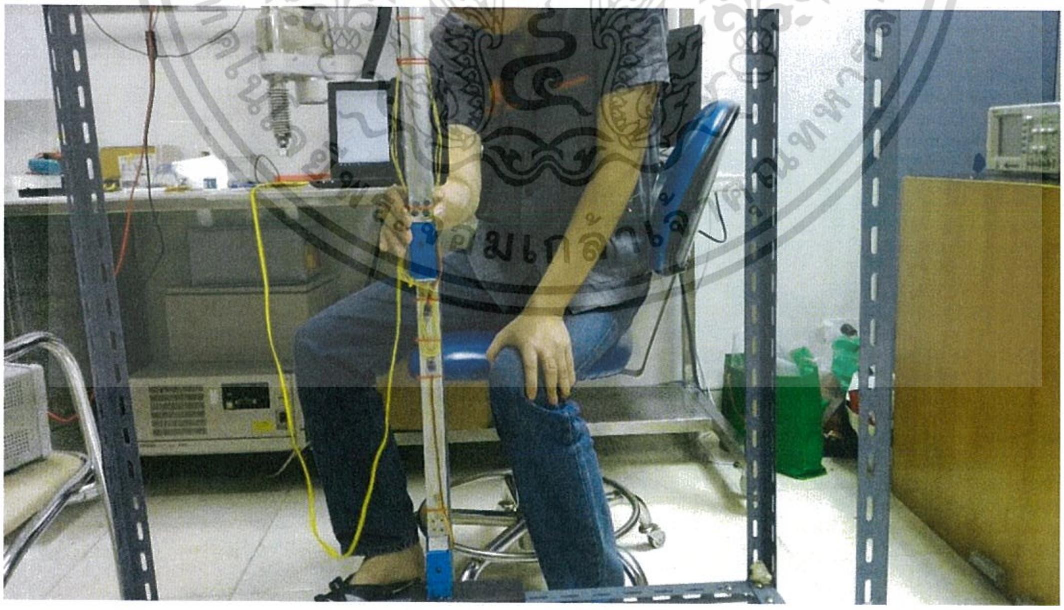
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Loading Response



รูปที่ 4.21 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 2

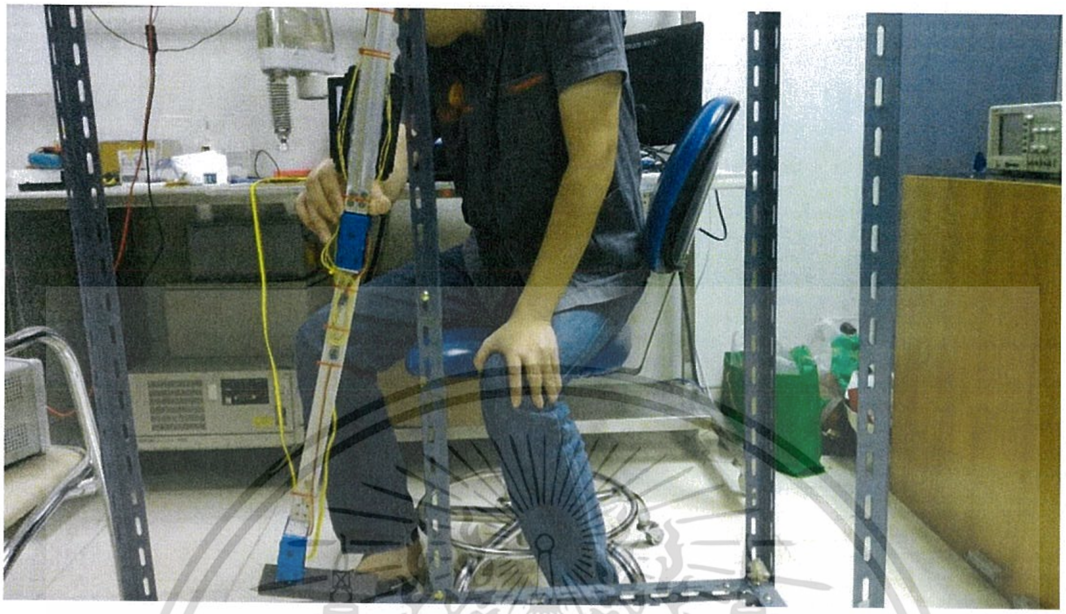
3. Mid-Stance



รูปที่ 4.22 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. Terminal Stance



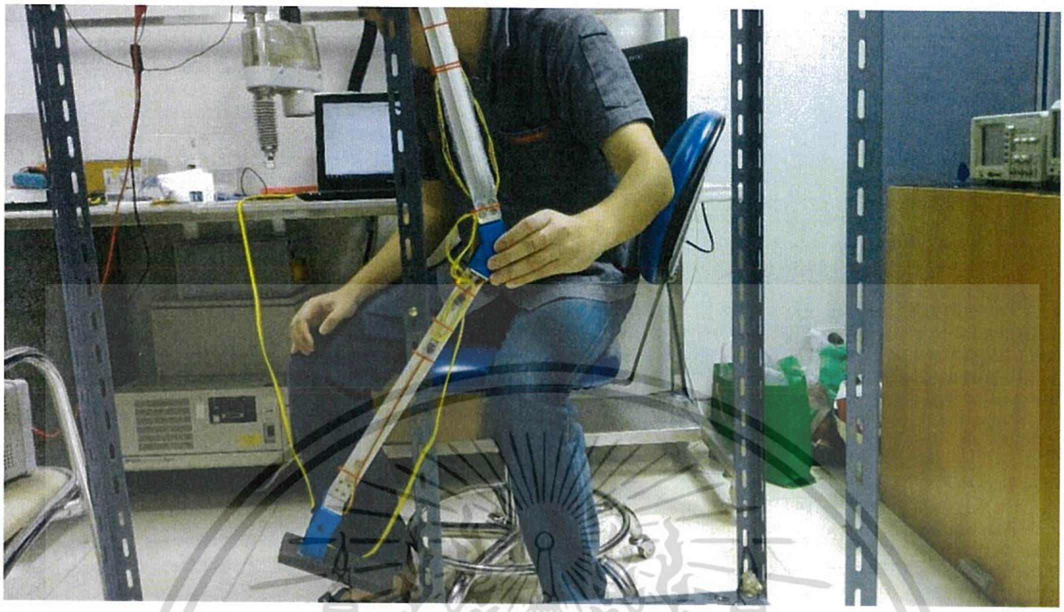
รูปที่ 4.23 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 4

5. Pre-Swing

รูปที่ 4.24 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 5

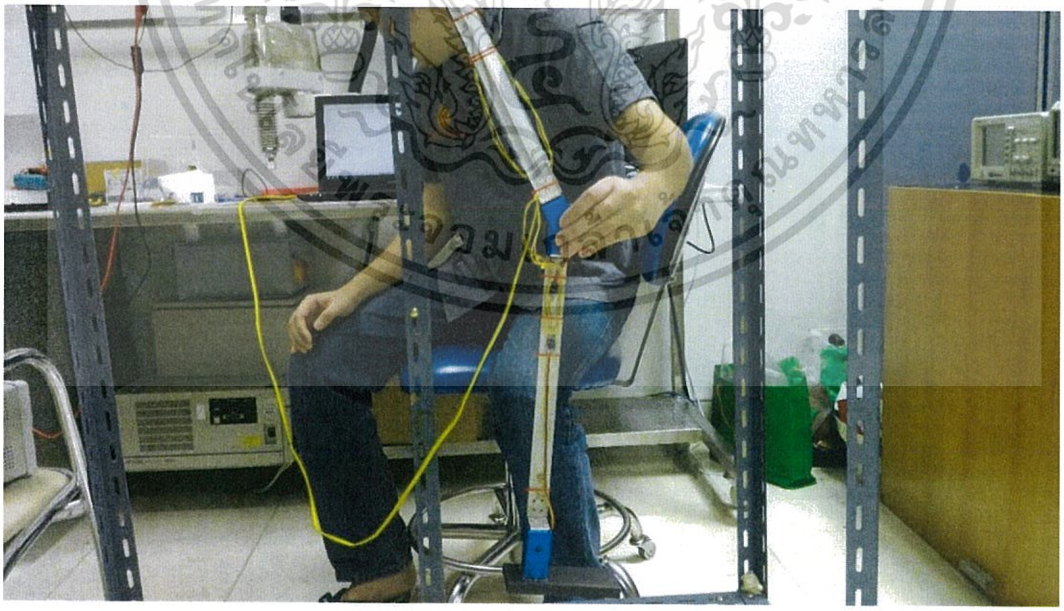
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Initial swing



รูปที่ 4.25 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 6

7. Mid-swing



รูปที่ 4.26 การทำงานของสเตชั่นใน Phase 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

โครงงานนี้เป็นโครงงานศึกษาเพื่อพัฒนาระบบขาเทียมอัตโนมัติให้มีราคาที่ถูกและมีความสามารถในการช่วยเหลือให้ผู้พิการสามารถเคลื่อนที่ได้ ซึ่งได้ประยุกต์ใช้โมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน มาอ่านค่าองศาที่ตำแหน่งต้นขาของผู้พิการเพื่อทำการวัดองศาการก้าวขาของผู้พิการ โดยจะนำค่าองศาที่วัดได้นั้นมาควบคุม เนื่องจากเป็นเซนเซอร์ที่มีราคาไม่สูงและผู้พิการที่ใช้ไม่จำเป็นต้องเข้ารับการผ่าตัดเป็นเพียงอุปกรณ์ช่วยเหลือผู้พิการแบบสวนใส่ เซอร์โวมอเตอร์ที่อยู่บริเวณข้อเข่า และข้อเท้าเพื่อให้ข้อเข่าและข้อเท้าสามารถเคลื่อนที่ไปยังองศาที่ถูกต้องตามลักษณะของการก้าวขาของผู้ป่วยที่สามารถรับรู้ได้โดย โมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน โดยทั้งหมดนั้นใช้การควบคุมการอ่านค่าและการสั่งการผ่าน ไมโครคอนโทลเลอร์ ตระกูล AVR หรือ Arduino ซึ่งมีขนาดเล็ก สามารถพัฒนาและนำไปต่อยอดระบบได้

การใช้ filter เข้ามาร่วมกับการอ่านค่าของ เซนเซอร์โมดูลวัดคงามเร่งแบบ 2 แกนนั้น filter สามารถลดสัญญาณรบกวนได้เป็นอย่างที่น่าพอใจ แต่มีข้อเสียของการใช้ filter คือ การใช้ filter ที่ลดค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้มาก ก็จะส่งผลให้ค่าที่ได้จาก เซนเซอร์มีความล่าช้าออกไป filter โดยในโครงงานนี้ Low pass filter นั้น มีความสามารถในการ fitler สูงกว่า Kalman filter เนื่องจาก Low pass filter นั้นมีความง่ายในการใช้งานและการปรับค่าคงที่ของ filter ซึ่งต่างจาก Kalman filter เพราะ Kalman filter จำเป็นที่จะต้องใช้ความรู้และความเข้าใจในการใช้งานสูง รวมถึงต้องใช้ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนเข้ามาในการ ปรับค่าของ filter เนื่องจากไม่สามารถรู้ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนได้จึงทำให้ ประสิทธิ์ภาพของการใช้งาน Kalman filter ลดลง ในโครงงานนี้จึงได้ใช้ Low pass filter มาประยุกต์ใช้เข้ากับระบบขาเทียมอัตโนมัติ

ในส่วนของการทดลองติดตั้งสเตชั่นทดลองการแกว่งเท้าการเดินของมนุษย์นั้น การสั่งการด้วย เซนเซอร์โมดูลวัดความเร่ง แบบ 2 แกน โดยผ่าน Low pass filter นั้นเป็นที่น่าพอใจโดยมีการตอบสนองที่เร็ว มีอาการหน่วงของการอ่านค่าองศาเล็กน้อย แต่เนื่องจากการใช้เซอร์โวมอ เตอร์ที่มีกำลังน้อยและความละเอียดน้อย ส่งผลให้การเคลื่อนที่มีอาการกระตุก และเวลาหยุดการเคลื่อนที่โดยกระทันหัน ขามีลักษณะการแกว่งเล็กน้อยอันเนื่องมาจากมอเตอร์ไม่มาความสามารถในการต้านทานโมเมนตั้มที่เกิดขึ้นจากแรงเหวี่ยงของต้นขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินงาน

ปัญหาและอุปสรรคในการทำงานได้แก่

- หนึ่งในปัญหาของการใช้งานของการควบคุมโดยการใช้งานเซนเซอร์อ่านค่าประเภทความเร่ง คือความไม่สเถียรของสัญญาณ รวมถึงสัญญาณรบกวนทำให้ผลจากการค่าของเซอนเซอร์มีความไม่ถูกต้อง
- การใช้ Low pass filter หรือ Kalman filter ต้องใช้วิธี try and error ทำให้การปรับค่าคงที่ของ filter ที่นำไปใช้กับระบบนั้น มีโอกาสที่จะผิดพลาดได้
- Kalman filter จะต้องใช้ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนซึ่งในทางปฏิบัติเราไม่สามารถรู้ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนได้ ค่าที่ใช้จึงไม่ใช่ค่าที่ถูกต้องแต่เป็นเพียงค่าที่ผ่านประบวนการ การ try and error แล้วผลออกมามีความถูกต้องในระดับที่ยอมรับได้
- เซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้มีกำลังน้อยและมีความละเอียดเพียง 1 องศา ทำให้การเคลื่อนที่เกิดการกระตุกของการเคลื่อนที่ ที่เกิดมาจากนำหนักของตัวอุปกรณ์และการแบ่งช่วงองศาจากวัฏจักรการเดิน
- ชุดสเตชั่นที่ใช้ในการทดสอบมีความสามารถเพียงการหมุนเพื่อแกว่งตามองศาที่กำหนดด้วยการใช้มือผลักเท่านั้น

5.3 แนวทางการแก้ไข

- พยายามลดสัญญาณรบกวนแก่ เซนเซอร์โมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน เช่น บริเวณที่ติดตั้งเซนเซอร์ ติดตั้งเข้ากับวัสดุที่เป็นฉนวนป้องกันการเกิดสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า และ สถนามแม่เหล็ก ซึ่งส่งผลต่อเซนเซอร์
- ออกแบบ GUI หรือเครื่องมือช่วย ที่มีความละเอียดสูงในการช่วยวิเคราะห์ค่าคงที่ที่เหมาะสมกับ filter
- หาสมการทางคณิศาสตร์มาช่วยอธิบายลักษณะของสัญญาณรบกวน เพื่อทำให้ค่าที่ใช้ใน Kalman filter นั้นมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- ใช้เซอร์โวมอเตอร์ทีมีความละเอียดมากกว่า 1 องศา รวมถึงกำลังของมอเตอร์ที่สูงขึ้น
- ออกแบบชุดสเตชั่นตรงส่วนแกนกลางของการแกว่ง ในลักษณะติดเข้ากับลูกเบี้ยว เพื่อจำลองการเดินจองมนุษย์ได้ถูกต้องมายิ่งขึ้น

5.4 แนวทางในการพัฒนา

- ใช้คอนโทรเลอร์ที่มีความสามารถในการรองรับการทำงานแบบ multithreading เพื่อแยกส่วนการทำงานระหว่างการควบคุม กับการอ่านค่าจากเซนเซอร์ เช่น raspberry pi
- ใช้เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมในการเข้ามาช่วยในการอ่านค่าองศา เพื่อแก้จุดอ่อนในช่วง short term ซึ่งทำให้สามารถใช้ Kalman filter ได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] เฉลิมพล คงเขียว. 2553. "ระบบการเคลื่อนไหวสำหรับการวิเคราะห์การเดินของมนุษย์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

[2] Reproduced, with permission, from American Academy of Orthropaedic Surgeons: Home study syllabus. In: Orthopaedic Knowledge Update, I.American Academy of Orthopaedic Surgeons, 1984.

[3] สารานุกรมเสรี. 2559. **กายอุปกรณ์.** [Online].Avaliable: https://th.wikipedia.org/wiki/กายอุปกรณ์.

[4] สถาบันวิศวกรรมฟื้นฟูสมรรถภาพและเทคโนโลยีสิ่งอำนวยความสะดวก. 2553. **สถานการณ์ของผู้พิการ.** [Online].Avaliable:http://oneleg-poymumj.blogspot.com/2010/01/blog-post_31.html.

[5] สถาบันสิริธรเพื่อการฟื้นฟูสมรรถภาพทางการแพทย์แห่งชาติ. 2559. **กายอุปกรณ์เสริมสำหรับเท้า**. [Online].Avaliable: http://www.snmrc.go.th/index.php/th/service-th/84-medical service/po/prosthesis/71-prosthetics.

[6] สถาบันวิศวกรรมฟื้นฟูสมรรถภาพและเทคโนโลยีสิ่งอำนวยความสะดวก. 2553. **หน่วยงานที่ให้บริการขาเทียมแก่คนพิการ.** [Online].Avaliable: http://oneleg-poymumj.blogspot.com/2010/01/blog-post_31.html.

[7] สุเจน กรรพฤทธิ์. 2554. "วิวัฒนาการขาเทียม" (เอียง)สารคดี. 7(312).

[8] ชิต เหล่าวัฒนา. 2553. **ขาเทียมยุคใหม่.** [Online].Avaliable: http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=57 &bookID=123&read=true&count=true.

[9] Arduitronics. 2557. **Arduino.** [Online].Avaliable:http://www.arduitronics.com/

[10] ณรงค์ บวบทอง. 2559. **การสื่อสารแบบอนุกรม Serial Communication.** [Online]. Avaliable:_http://teacher.aru.ac.th/sawita/images/stories/file/ PDF_Presentation/3503103_Networking.

[11] MEMSIC2125.Inc. 2559. **MEMSIC2125 โมดูลวัดความเร่งแบบ 2 แกน.** [Online].Avaliable: www.inventor-3d.com/store/manual/ memsic2125_sheet.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

[12] ThaiEasyElec. 2559. **ตัวอย่างการควบคุม RC Servo Motor ด้วย Arduino.** [Online].Avaliable: http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article.

[13] กฤษฎา แสงเพ็ชรส่อง . 2547. **"แนะนำ Kalman Filter Algorithm.** สมุทรปราการ โรงเรียนนายเรือ.

[14] เชิดพงษ์ บุญสอง 2553. "การรักษาสมดุลอากาศยาน 4 ใบพัดโดยใช้Kalman filterและการควบคุมแบบ PID" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

[15] The free encyclopedia. 2559. **Low pass filter.** [Online].Avaliable: https://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter.

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

Code Arduino ส่วนการควบคุมขาเทียมอัตโนมัติ

```
#include <Servo.h>
Servo myKnee;
Servo myAnkle;
const int yPin = 3;
int accelerationX_Old=0;
int count=0;
int ANS_old=0;
////////
int stoped=1;
int count_stand=0;
unsigned long start_time;
//int sensorValueA2 = 0;
/////////////////////////

int Xraw;
double xGForce,Xangle;
/////////////////////////
void setup()
{
  pinMode(yPin, INPUT);
  Serial.begin(9600);
  myKnee.attach(6);
  myAnkle.attach(7);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ลงทะเบียนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  /////////
  start_time = millis();
  /////////
  pinMode(15, OUTPUT);
}
void loop()
{
  /*int x;
  x=analogRead(A2);
  x=map(x,0,1023,80,120);
  Serial.println(x);*/
  int x;
  x=sensor();
  Serial.print("real = ");
  Serial.println(x);

/////////////Phase Stand  to start ///////////////////
  if(x>=88 && x<=92 && stoped == 1)
  {
    myKnee.write(90);
    myAnkle.write(90);
    Serial.println("Phase Stand");
    start_time=millis();
    analogWrite(A0,150);
    digitalWrite(15, LOW);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
}
/////// start  walk Backward ///////////
if(x<88 && stoped ==1 )
{
  stoped = 0;
  count=0;
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
  // go to phase 4
}
/////// start walk Forward //////
if(x>92 && stoped == 1)
{
  stoped=0;
  count=10;
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
  // go to phase 6
}


//Phase 1
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if(x>=120 && count==0 && stoped==0)
{
  myKnee.write(90);
  myAnkle.write(90);
  Serial.println("Phase 1");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}

//phase 2
else if(95<=x && x<=119 && count==0 && stoped==0)
{
  if(115<=x && x<=119)
  {
    myKnee.write(87);
    myAnkle.write(93);
    Serial.println("Phase 2");
    start_time=millis();
    analogWrite(A0,0);
    digitalWrite(15, LOW);
  }
  else if(110<=x&& x<=114)
  {
    myKnee.write(84);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  myAnkle.write(96);
  Serial.println("Phase 2");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
else if(105<=x&&x<=109)
{
  myKnee.write(81);
  myAnkle.write(99);
  Serial.println("Phase 2");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
else if(100<=x&&x<=104)
{
  myKnee.write(78);
  myAnkle.write(102);
  Serial.println("Phase 2");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
else if(95<=x&&x<=99)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  {
    myKnee.write(75);
    myAnkle.write(105);
    Serial.println("Phase 2");
    start_time=millis();
    analogWrite(A0,0);
    digitalWrite(15, LOW);
  }
}

//phase 3
else if(90<=x && x<=94 && count==0 && stoped==0)
{
  if(x==94)
  {
    myKnee.write(78);
    myAnkle.write(102);
    Serial.println("Phase 3");
    start_time=millis();
    analogWrite(A0,0);
    digitalWrite(15, LOW);
  }
  else if(x==93)
  {
    myKnee.write(81);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  myAnkle.write(99);
  Serial.println("Phase 3");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
else if(x==92)
{
  myKnee.write(84);
  myAnkle.write(96);
  Serial.println("Phase 3");
  analogWrite(A0,150);
  digitalWrite(15, LOW);
  if((millis() - start_time)>1998)
  {
    stoped = 1;
    start_time=millis();
  }
}
else if(x==91)
{
  myKnee.write(87);
  myAnkle.write(93);
  Serial.println("Phase 3");
  analogWrite(A0,150);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    digitalWrite(15, LOW);
    if((millis() - start_time)>1998)
    {
      stoped = 1;
      start_time=millis();
    }
  }
  else if(x==90)
  {
    myKnee.write(90);
    myAnkle.write(90);
    Serial.println("Phase 3");
    analogWrite(A0,150);
    digitalWrite(15, LOW);
    if((millis() - start_time)>1998)
    {
      stoped = 1;
      start_time=millis();
    }
  }
}

// Phase 4
else if(80<=x&&x<=89 && count==0 && stoped==0)
{
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if(x == 89)
{
  myKnee.write(90);
  myAnkle.write(90);
  analogWrite(A0,150);
  digitalWrite(15, LOW);
  if((millis() - start_time)>1998)
  {
    stoped = 1;
    start_time=millis();
  }
  Serial.println("Phase 4");
}
else if(x == 88)
{
  myKnee.write(90);
  myAnkle.write(90);
  analogWrite(A0,150);
  digitalWrite(15, LOW);
  if((millis() - start_time)>1998)
  {
    stoped = 1;
    start_time=millis();
  }
  Serial.println("Phase 4");
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  }
  else if(x < 88 && x > 80)
  {
    myKnee.write(90);
    myAnkle.write(90);
    Serial.println("Phase 4");
    start_time=millis();
    analogWrite(A0,0);
    digitalWrite(15, LOW);
  }



  if(x==80)
  {
    count=10;
    myKnee.write(90);
    myAnkle.write(90);
    Serial.println("Phase 4");
    start_time=millis();
    analogWrite(A0,0);
    digitalWrite(15, LOW);
  }
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
// Phase 5
else if(80<=x&&x<=89 && count==10 && stoped==0)
{
 //myKnee.write(55);
 if (80<=x&&x<82)
 {
  myKnee.write(83);
  myAnkle.write(94);
  Serial.println("Phase 5");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
 }
 else if (82<=x&&x<84)
 {
  myKnee.write(76);
  myAnkle.write(98);
  Serial.println("Phase 5");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
 }
 else if (84<=x&&x<86)
 {
  myKnee.write(69);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  myAnkle.write(102);
  Serial.println("Phase 5");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
else if (86<=x&&x<88)
{
  myKnee.write(62);
  myAnkle.write(106);
  Serial.println("Phase 5");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
else if (87<=x&&x<89)
{
  myKnee.write(55);
  myAnkle.write(110);
  Serial.println("Phase 5");
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
else if (x == 88)
{
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  myKnee.write(55);
  myAnkle.write(110);
  Serial.println("Phase 5");
  analogWrite(A0,150);
  digitalWrite(15, LOW);
  if((millis() - start_time)>1998)
  {
    stoped = 1;
    start_time=millis();
  }
}
else if (x == 89)
{
  myKnee.write(55);
  myAnkle.write(110);
  Serial.println("Phase 5");
  analogWrite(A0,150);
  digitalWrite(15, LOW);
  if((millis() - start_time)>1998)
  {
    stoped = 1;
    start_time=millis();
  }
}
else if (x == 90)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 {
   myKnee.write(55);
   myAnkle.write(110);
   Serial.println("Phase 5");
   analogWrite(A0,150);
   digitalWrite(15, LOW);
   if((millis() - start_time)>1998)
   {
     stoped = 1;
     start_time=millis();
   }
 }
}

// Phase 6
else if(90<=x&&x<=109 && count==10 && stoped==0)
{
 if(x==93)
 {
   myKnee.write(50);
   myAnkle.write(106);
   Serial.println("Phase 6");
   start_time=millis();
   analogWrite(A0,0);
   digitalWrite(15, LOW);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
}
else if(x==90)
{
  myKnee.write(50);
  myAnkle.write(106);
  Serial.println("Phase 6");
  analogWrite(A0,150);
  digitalWrite(15, LOW);
  if((millis() - start_time)>1998)
  {
    stoped = 1;
    start_time=millis();
  }
}
else if(x==91)
{
  myKnee.write(50);
  myAnkle.write(106);
  Serial.println("Phase 6");
  analogWrite(A0,150);
  digitalWrite(15, LOW);
  if((millis() - start_time)>1998)
  {
    stoped = 1;
    start_time=millis();
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  }
 }
 else if(x==92)
 {
   myKnee.write(50);
   myAnkle.write(106);
   Serial.println("Phase 6");


   digitalWrite(15, LOW);
   if((millis() - start_time)>1998)
   {
     stoped = 1;
     start_time=millis();
   }
 }
 else if(94<=x&&x<=97)
 {
   myKnee.write(45);
   myAnkle.write(102);
   Serial.println("Phase 6");
   start_time=millis();
   analogWrite(A0,0);
   digitalWrite(15, LOW);
 }
 else if(98<=x&&x<=101)
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
{
  myKnee.write(40);
  myAnkle.write(98);
  Serial.println("Phase 6");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
else if(102<=x&&x<=105)
{
  myKnee.write(35);
  myAnkle.write(94);
  Serial.println("Phase 6");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
else if(106<=x&&x<=109)
{
  myKnee.write(30);
  myAnkle.write(90);
  Serial.println("Phase 6");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
 }
}
//Phsae 7
else if(110<=x&&x<=119 && count==10 && stoped==0)
{
  if(x==110)
  {
    myKnee.write(36);
    myAnkle.write(90);
    Serial.println("Phase 7");
    start_time=millis();
    analogWrite(A0,0);
    digitalWrite(15, LOW);
  }
  if(x==111)
  {
    myKnee.write(42);
    myAnkle.write(90);
    Serial.println("Phase 7");
    start_time=millis();
    analogWrite(A0,0);
    digitalWrite(15, LOW);
  }
  if(x==112)
  {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  myKnee.write(48);
  myAnkle.write(90);
  Serial.println("Phase 7");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
if(x==113)
{
  myKnee.write(54);
  myAnkle.write(90);
  Serial.println("Phase 7");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
if(x==114)
{
  myKnee.write(60);
  myAnkle.write(90);
  Serial.println("Phase 7");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if(x==115)
{
  myKnee.write(66);
  myAnkle.write(90);
  Serial.println("Phase 7");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
if(x==116)
{
  myKnee.write(72);
  myAnkle.write(90);
  Serial.println("Phase 7");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
  digitalWrite(15, LOW);
}
if(x==117)
{
  myKnee.write(78);
  myAnkle.write(90);
  Serial.println("Phase 7");
  start_time=millis();
  analogWrite(A0,0);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
      digitalWrite(15, LOW);
    }
    if(x==118)
    {
      myKnee.write(84);
      myAnkle.write(90);
      Serial.println("Phase 7");
      start_time=millis();
      analogWrite(A0,0);
      digitalWrite(15, LOW);
    }
    if(x==119)
    {
      myKnee.write(90);
      myAnkle.write(90);
      Serial.println("Phase 7");
      start_time=millis();
      analogWrite(A0,0);
      digitalWrite(15, LOW);
      if(x==119){count=0;}
    }
  }

}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
double mapdouble(double x, double in_min, double in_max, double out_min,
double out_max)

{

  return (x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min;

}


int sensor()

{

  Xraw = pulseIn (yPin, HIGH);

  xGForce = (( Xraw / 10 ) - 500) * 8;

  xGForce=xGForce/1000;

  Serial.print("xGForce = ");

  Serial.println(xGForce);

  double sensVal = constrain(xGForce,-0.5,0.5);

  int SenANS = mapdouble(sensVal,-0.5,0.5,-30,30);

  SenANS=SenANS+90;

  Serial.print("SenANS +90  = ");

  Serial.println(SenANS);

  // LOW pass

   int accelerationX = (0.115*SenANS)+((1-0.115)*accelerationX_Old);

   int ANS60 =accelerationX+8;

   accelerationX_Old=accelerationX;

    return ANS60;

}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Code MATLAB Serial Communication with Arduino

```
close;
clear all;
clc;
comport = serial ('COM11','BaudRate',9600);
fopen(comport);
x=0;
while (x<600)
    x=x+1;
    y1(x)=fscanf(comport,'%f');
    y2(x)=fscanf(comport,'%f');
end

fclose(comport);
delete(comport);
drawnow;
plot(y1,'r','linewidth',3)
grid on;
hold on;
plot(y2,'b','linewidth',3)

T=table(y1',y2','VariableNames',{'sensor','real'});
writetable(T,'SenserValue.xls');
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 80 องศา

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	58.46
80	57.98
80	61.31
80	105.03
80	63.21
80	71.29
80	67.49
80	57.62
80	73.19
80	74.14
80	61.31
80	69.86
80	77.94
80	81.27
80	76.04
80	79.84
80	79.37
80	79.37
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.79
80	76.99
80	77.47
80	80.32
80	78.42
80	80.32
80	78.42
80	79.84
80	78.42
80	79.84
80	78.42

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	79.37
80	78.89
80	80.79
80	77.94
80	80.32
80	79.37
80	79.37
80	79.37
80	79.84
80	79.84
80	79.84
80	78.89
80	80.32
80	78.89
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	79.84
80	80.32
80	79.84
80	80.32
80	79.84
80	80.79
80	79.84
80	80.32
80	80.32
80	79.84
80	80.32
80	79.84
80	80.32
80	79.84
80	79.37

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	79.37
80	80.79
80	79.37
80	80.32
80	79.37
80	80.32
80	78.42
80	80.32
80	78.89
80	80.32
80	77.94
80	80.32
80	77.94
80	80.79
80	78.42
80	79.37
80	79.37
80	80.32
80	79.37
80	80.32
80	78.89
80	80.79
80	79.37
80	79.84
80	79.37
80	79.84
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.79
80	80.32

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	80.32
80	80.32
80	79.37
80	80.32
80	79.84
80	80.79
80	79.37
80	80.79
80	79.37
80	79.84
80	80.32
80	78.89
80	79.84
80	78.89
80	79.84
80	78.42
80	79.84
80	78.42
80	80.32
80	78.42
80	79.37
80	78.42
80	80.32
80	80.79
80	78.89
80	78.89
80	79.84
80	78.89
80	79.84
80	77.94
80	80.32
80	79.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 80 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	80.32	80	78.42	80	79.84	80	80.32
80	79.37	80	80.79	80	79.37	80	80.79
80	80.32	80	78.42	80	80.32	80	80.32
80	79.84	80	80.32	80	79.84	80	80.79
80	80.32	80	78.42	80	80.32	80	80.32
80	80.79	80	80.79	80	78.89	80	80.32
80	80.32	80	78.42	80	80.32	80	80.32
80	80.79	80	79.84	80	78.89	80	80.32
80	79.84	80	79.37	80	80.32	80	79.84
80	79.84	80	80.32	80	78.89	80	80.32
80	80.32	80	79.84	80	80.32	80	79.84
80	80.32	80	80.32	80	77.94	80	79.84
80	79.84	80	79.37	80	80.32	80	79.84
80	80.32	80	79.84	80	78.42	80	80.32
80	79.84	80	80.32	80	80.79	80	79.37
80	80.32	80	80.79	80	78.89	80	80.32
80	80.32	80	79.84	80	80.79	80	78.89
80	80.32	80	79.84	80	78.89	80	79.84
80	80.32	80	80.79	80	79.84	80	78.89
80	80.32	80	79.37	80	79.84	80	79.84
80	79.84	80	79.84	80	80.79	80	80.79
80	80.32	80	80.32	80	79.37	80	74.14
80	79.37	80	80.32	80	79.84	80	76.51
80	80.32	80	80.32	80	79.37	80	79.84
80	78.89	80	80.32	80	80.32	80	78.89
80	80.32	80	80.32	80	80.32	80	80.32
80	78.42	80	79.84	80	80.32	80	78.89
80	80.32	80	79.84	80	80.32	80	80.79
80	78.89	80	80.32	80	79.84	80	78.42
80	79.37	80	79.84	80	79.84	80	80.79
80	78.42	80	80.79	80	80.32	80	79.84
80	80.79	80	79.84	80	80.32	80	80.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 80 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	79.84	80	80.32	80	79.84	80	80.79
80	80.79	80	78.89	80	80.79	80	80.79
80	79.84	80	79.84	80	79.37	80	80.32
80	80.32	80	78.89	80	80.79	80	80.79
80	80.32	80	80.79	80	78.89	80	80.79
80	80.79	80	79.37	80	80.32	80	80.79
80	80.32	80	80.32	80	78.89	80	80.32
80	80.32	80	79.37	80	80.32	80	80.32
80	80.32	80	79.37	80	78.89	80	80.32
80	80.32	80	79.37	80	80.32	80	78.89
80	79.37	80	80.32	80	78.89	80	79.37
80	79.84	80	79.37	80	80.32	80	79.84
80	80.32	80	80.32	80	79.37	80	80.79
80	80.32	80	80.32	80	80.32	80	79.37
80	80.79	80	80.79	80	80.79	80	80.32
80	80.79	80	80.79	80	76.51	80	78.89
80	80.32	80	80.79	80	77.94	80	80.32
80	80.79	80	80.32	80	80.79	80	78.42
80	80.79	80	79.84	80	79.37	80	80.79
80	79.37	80	80.79	80	80.32	80	78.42
80	80.79	80	80.79	80	80.32	80	79.84
80	79.84	80	79.84	80	80.32	80	78.42
80	79.84	80	80.79	80	79.84	80	80.79
80	79.37	80	80.79	80	80.79	80	78.42
80	80.79	80	80.32	80	80.32	80	79.84
80	78.89	80	80.32	80	79.84	80	78.89
80	80.79	80	80.32	80	79.84	80	80.79
80	78.42	80	80.32	80	79.84	80	78.89
80	79.37	80	79.84	80	80.32	80	80.32
80	79.37	80	80.79	80	80.32	80	79.84
80	79.37	80	79.84	80	79.84	80	80.79
80	78.42	80	80.32	80	79.84	80	79.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 80 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	79.84	80	78.89	80	80.79	80	80.32
80	79.84	80	80.79	80	79.37	80	80.32
80	79.37	80	78.89	80	80.32	80	80.32
80	80.79	80	80.32	80	78.89	80	80.79
80	80.32	80	78.89	80	80.79	80	80.32
80	80.79	80	80.32	80	77.94	80	80.79
80	79.84	80	78.89	80	79.37	80	79.84
80	80.32	80	80.32	80	79.37	80	80.79
80	80.79	80	79.37	80	79.84	80	79.37
80	80.32	80	79.84	80	77.94	80	80.32
80	80.32	80	79.37	80	80.32	80	79.84
80	80.79	80	79.84	80	78.89	80	80.79
80	79.84	80	78.89	80	80.32	80	79.37
80	80.32	80	80.32	80	79.37	80	80.32
80	80.79	80	80.79	80	80.32	80	78.89
80	80.32	80	80.32	80	78.42	80	80.32
80	80.79	80	80.79	80	80.79	80	78.89
80	79.84	80	79.37	80	78.89	80	79.84
80	80.32	80	79.84	80	80.79	80	79.37
80	80.32	80	80.32	80	79.37	80	79.84
80	79.84	80	80.32	80	80.79	80	78.89
80	80.79	80	79.84	80	79.37	80	79.84
80	79.84	80	79.84	80	80.32	80	79.37
80	80.32	80	79.84	80	79.37	80	80.32
80	78.89	80	80.79	80	80.32	80	78.89
80	80.32	80	80.32	80	80.32	80	80.79
80	78.89	80	80.32	80	80.32	80	78.89
80	79.37	80	79.84	80	80.32	80	80.79
80	78.42	80	79.84	80	80.32	80	78.42
80	79.84	80	78.89	80	80.79	80	80.32
80	78.89	80	79.84	80	80.32	80	79.37
80	80.32	80	79.37	80	79.37	80	80.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 80 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	78.42
80	80.32
80	79.84
80	80.32
80	80.79
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.79
80	80.32
80	80.79
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.79
80	80.32
80	79.84
80	80.79
80	79.84
80	80.79
80	79.84
80	80.32
80	78.89
80	80.79
80	79.37
80	80.32
80	78.42
80	80.32
80	78.89

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	80.32
80	78.42
80	80.32
80	77.94
80	79.84
80	79.37
80	79.84
80	78.42
80	79.84
80	79.84
80	80.32
80	79.84
80	80.32
80	80.79
80	79.37
80	79.37
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.32
80	80.79
80	79.37
80	79.84
80	79.84
80	80.32
80	79.84
80	80.79
80	80.79
80	79.84
80	80.32
80	79.37
80	79.37

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	79.37
80	79.84
80	79.37
80	80.79
80	78.89
80	80.79
80	78.89
80	79.84
80	78.89
80	80.32
80	78.89
80	80.79
80	78.89
80	80.79
80	78.42
80	79.37
80	77.94
80	80.32
80	79.84
80	80.79
80	79.37
80	80.32
80	79.84
80	80.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 90 องศา

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	66.48
90	65.04
90	120
90	78
90	70.32
90	73.2
90	71.76
90	60.24
90	77.52
90	77.52
90	86.16
90	79.44
90	87.12
90	94.8
90	92.4
90	88.08
90	93.36
90	89.04
90	86.64
90	90
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.48
90	90
90	90.48

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	89.52
90	90.48
90	90
90	90.48
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.48
90	89.52
90	90.48
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.48
90	90
90	90.96
90	89.52
90	90.48
90	89.52
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.96
90	90.48

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.96
90	95.76
90	91.92
90	91.44
90	90
90	90.48
90	90.48
90	90
90	90.48
90	90
90	90.48
90	89.52
90	90.48
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.52
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.52
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90
90	90.48
90	90

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.48
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90
90	90.96
90	90
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 90 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	89.04	90	90.48	90	90	90	92.88
90	90.48	90	89.04	90	90.48	90	90.96
90	89.52	90	90.48	90	90	90	91.44
90	90.48	90	89.04	90	90.48	90	90.48
90	90	90	90.96	90	90	90	90.96
90	90.48	90	89.04	90	90.96	90	90.48
90	90	90	90.96	90	89.04	90	90.96
90	90.96	90	89.04	90	90.48	90	90
90	90.96	90	90.96	90	89.04	90	90.48
90	90.48	90	89.52	90	90.48	90	90
90	90.96	90	90.96	90	89.04	90	90.96
90	90.96	90	90	90	90.96	90	90
90	90.48	90	90.96	90	89.52	90	90.96
90	90.96	90	90	90	90.48	90	89.04
90	90.48	90	90.96	90	89.04	90	90.96
90	90.48	90	90	90	90.96	90	89.52
90	90.48	90	90.48	90	89.04	90	90.96
90	90.96	90	90.48	90	90.48	90	89.04
90	90.96	90	90.48	90	89.04	90	90.96
90	90.48	90	90.48	90	90.48	90	89.52
90	90.48	90	90.96	90	90	90	90.96
90	90.48	90	90.48	90	90.48	90	89.04
90	90.48	90	90.48	90	90	90	90.96
90	90	90	90.48	90	90.96	90	89.52
90	90.48	90	90.96	90	90	90	90.48
90	90	90	90.96	90	90.48	90	89.04
90	90.48	90	90.96	90	90.48	90	90.96
90	90	90	90.96	90	90.48	90	89.04
90	90.48	90	90.48	90	90.48	90	90.96
90	89.04	90	90.48	90	90.48	90	90
90	90.48	90	90.48	90	95.28	90	90.96
90	89.04	90	90.48	90	89.04	90	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 90 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	89.52
90	90.96
90	89.52
90	90.96
90	89.52
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	89.52
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	91.44
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90
90	90.96
90	90
90	90.48
90	89.04

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.48
90	90.48
90	90
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.52
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.48
90	90.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 90 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.52
90	90.96
90	89.52
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.52
90	90.48
90	89.52
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	90

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	89.52
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.52
90	90.96

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	89.52
90	91.44
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.52
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90.48
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90.48
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 90 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.48
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90
90	90.48
90	90
90	90.96
90	95.76
90	88.56
90	90
90	90.48
90	89.52
90	90.96
90	89.52
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.52
90	90.48
90	89.52
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90.96
90	90.96

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.48
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.48
90	89.52
90	90.96
90	89.04
90	90.96
90	89.04
90	90.48
90	89.04
90	90.96
90	89.52

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	90.96
90	90
90	91.44
90	90
90	90.48
90	90
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.48
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.96
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.48
90	90.96
90	90
90	90.96
90	90
90	90.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 120 องศา

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	117.39	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 120 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 120 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	117.86
120	119.76
120	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 120 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120
120	120	120	120	120	120	120	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่ 120 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	116.91
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	81.27
80	80.32
80	80.32
80	81.74
80	72.71
80	77.47
80	77.47
80	78.42
80	77.47
80	77.94
80	77.47
80	72.71
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	76.99
80	77.94
80	81.27
80	82.22
80	81.27
80	80.32
80	80.32
80	81.74
80	72.71
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	76.99
80	77.94
80	76.99
80	77.94
80	77.47

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.94
80	78.42
80	77.47
80	77.94
80	77.47
80	77.94
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.94
80	77.94
80	77.94
80	77.47
80	76.99
80	77.47
80	76.51
80	77.94
80	76.51
80	77.47
80	76.04
80	77.94
80	76.04
80	77.94
80	75.56
80	77.94
80	76.04
80	77.94
80	76.04
80	77.94

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	76.04
80	77.94
80	76.04
80	77.47
80	76.51
80	77.47
80	76.51
80	77.47
80	76.51
80	77.47
80	77.94
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.94
81	79.84
82	83.17
83	78.42
84	85.07
85	81.74
86	86.5
87	81.27
88	84.59
89	79.84
90	88.4
91	83.64
92	84.12
93	87.92
94	92.67
95	91.72

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
96	84.12
97	90.3
98	97.43
99	96.95
100	96
101	95.52
102	98.85
103	99.8
104	101.7
105	106.46
106	104.08
107	113.58
108	104.55
109	114.06
110	109.31
111	109.31
112	107.41
113	120
114	110.26
115	117.86
116	109.31
117	120
118	115.49
119	120
120	116.44
120	119.29
120	116.91
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120	120	120	119	120	87	89.35
120	120	120	120	118	112.16	86	86.5
120	120	120	120	117	120	85	82.69
120	120	120	120	116	118.34	84	92.67
120	120	120	120	115	120	83	83.64
120	120	120	120	114	115.96	82	85.54
120	120	120	120	113	117.86	81	83.17
120	120	120	120	112	110.73	80	87.92
120	118.34	120	120	111	114.06	80	79.37
120	120	120	120	110	106.46	80	90.77
120	120	120	120	109	108.36	80	90.77
120	120	120	120	108	108.36	80	75.56
120	119.76	120	120	107	116.44	80	83.17
120	120	120	120	106	111.68	80	82.22
120	120	120	120	105	115.01	80	80.79
120	120	120	120	104	105.98	80	80.32
120	120	120	120	103	105.5	80	71.29
120	120	120	120	102	100.28	80	78.42
120	120	120	120	101	104.55	80	77.47
120	120	120	120	100	100.28	80	77.47
120	120	120	120	99	103.6	80	76.51
120	120	120	120	98	98.85	80	77.47
120	120	120	120	97	100.28	80	76.51
120	120	120	120	96	111.21	80	77.94
120	120	120	120	95	99.33	80	77.47
120	120	120	120	94	93.15	80	78.42
120	120	120	120	93	93.15	80	77.47
120	120	120	120	92	93.15	80	77.47
120	120	120	120	91	93.15	80	77.47
120	120	120	120	90	94.57	80	77.47
120	120	120	120	89	91.25	80	77.47
120	117.39	120	120	88	87.92	80	77.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	77.47	80	77.47	88	81.74	120	118.34
80	77.47	80	76.99	89	78.42	120	116.44
80	77.47	80	77.47	90	95.52	120	120
80	77.47	80	77.94	91	79.37	120	120
80	77.47	80	77.47	92	96.48	120	116.91
80	77.47	80	77.47	93	84.59	120	114.53
80	77.94	80	77.47	94	92.67	120	120
80	76.99	80	77.47	95	92.67	120	120
80	77.94	80	77.47	96	96.95	120	120
80	76.51	80	76.99	97	96	120	120
80	77.94	80	77.94	98	94.57	120	120
80	76.51	80	77.47	99	95.05	120	120
80	77.94	80	77.94	100	102.65	120	120
80	76.04	80	77.47	101	98.85	120	120
80	77.94	80	77.94	102	103.6	120	119.29
80	76.04	80	77.47	103	97.9	120	120
80	77.47	80	77.94	104	104.55	120	120
80	76.04	80	77.47	105	101.23	120	120
80	77.47	80	77.94	106	110.26	120	120
80	75.56	80	77.47	107	103.6	120	120
80	77.47	80	76.99	108	109.31	120	120
80	76.04	80	77.47	109	103.13	120	120
80	77.47	80	76.99	110	110.26	120	117.86
80	76.51	80	77.47	111	104.08	120	120
80	77.94	80	76.51	112	115.49	120	120
80	76.04	81	77.47	113	109.78	120	120
80	76.99	82	78.89	114	114.53	120	120
80	76.04	83	78.89	115	113.11	120	120
80	77.47	84	82.69	116	115.96	120	120
80	76.99	85	81.74	117	113.11	120	120
80	77.94	86	86.97	118	118.34	120	120
80	77.47	87	80.79	119	113.58	120	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120	120	120	95	107.41	80	76.51
120	120	120	120	94	91.72	80	77.47
120	120	120	120	93	92.2	80	76.99
120	120	120	120	92	96	80	77.47
120	120	120	120	91	92.67	80	76.99
120	120	120	120	90	91.72	80	77.47
120	120	120	120	89	92.2	80	76.04
120	120	120	120	88	90.3	80	77.47
120	120	119	118.34	87	87.45	80	76.04
120	120	118	120	86	86.97	80	77.47
120	120	117	113.11	85	92.2	80	76.04
120	120	116	120	84	85.07	80	77.47
120	120	115	114.06	83	86.5	80	76.04
120	120	114	120	82	78.42	80	77.47
120	120	113	115.96	81	85.07	80	76.51
120	120	112	119.76	80	82.69	80	77.47
120	120	111	114.06	80	82.69	80	76.04
120	120	110	113.58	80	91.72	80	77.47
120	120	109	111.21	80	81.74	80	75.56
120	120	108	118.34	80	80.79	80	77.47
120	120	107	120	80	81.74	80	76.04
120	120	106	108.83	80	79.84	80	77.94
120	120	105	111.21	80	82.22	80	76.99
120	120	104	105.03	80	79.37	80	78.89
120	120	103	105.98	80	81.74	80	69.39
120	120	102	107.88	80	76.51	80	77.47
120	120	101	109.31	80	77.47	80	77.94
120	120	100	104.08	80	77.94	80	77.47
120	120	99	105.03	80	77.47	80	77.47
120	120	98	98.38	80	77.47	80	77.94
120	120	97	102.65	80	77.47	80	77.47
120	120	96	105.03	80	77.47	80	77.94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	77.47
80	76.51
80	77.94
80	76.99
80	77.94
80	76.99
80	77.94
80	76.04
80	77.94
80	76.04
80	77.47
80	75.56
80	77.47
80	76.04
80	77.47
80	76.04
80	77.47
80	76.51
80	77.47
80	76.04
80	77.47
80	76.04

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	77.47
81	82.69
82	80.32
83	82.22
84	79.84
85	92.2
86	75.56
87	88.87
88	74.14
89	95.05
90	81.27
91	85.54
92	89.82
93	91.72
94	92.67
95	93.15
96	96.95
97	97.43
98	90.77
99	83.64
100	91.25
101	100.28
102	101.7
103	105.98
104	100.75
105	102.18
106	102.18
107	103.13
108	105.98
109	110.26
110	108.36
111	105.98

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
112	114.06
113	116.44
114	112.63
115	111.68
116	115.96
117	117.39
118	120
119	111.68
120	118.34
120	117.39
120	110.26
120	118.34
120	117.86
120	118.81
120	120
120	116.91
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	116.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา โดยควบคุมผ่าน Potentiometer

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	91.44
90	91.92
90	90
90	91.92
90	90
90	91.92
90	89.52
90	91.92
90	90
90	91.44
90	89.52
90	91.92
90	90
90	91.92
90	89.52
90	92.4
90	90.48
90	91.92
90	90.96
90	91.92
90	90.96
90	91.92
90	90.48
90	91.92
90	93.36
90	90.96
90	91.44
90	91.92
90	91.92
90	91.92
90	91.92

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
90	91.92
90	91.92
90	91.44
90	91.92
90	91.92
90	91.92
90	90.48
90	91.92
90	90.96
90	91.92
91	91.44
91	91.92
91	93.36
92	90.96
92	94.8
92	93.36
93	89.04
94	96.72
94	93.84
95	94.32
96	93.36
96	95.76
97	98.16
98	93.84
99	95.28
99	96.24
100	97.68
101	96.72
101	103.92
102	103.92
103	109.2

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
104	102.96
104	107.76
105	103.44
106	104.88
107	105.36
107	114.48
108	104.88
109	113.52
110	106.32
111	116.88
111	106.32
112	116.4
113	109.2
114	120
115	114
116	118.32
117	114.96
117	120
118	114.48
119	120
120	117.36
120	120
120	120
120	120
119	115.92
120	120
119	120
120	119.76
120	120
120	106.8
120	120

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
119	120
118	117.84
117	120
117	114.96
116	120
115	119.28
114	120
114	114.48
113	120
112	115.44
111	116.88
111	113.52
110	116.4
109	110.64
108	113.52
107	114
106	117.84
105	108.72
104	112.08
104	114.96
102	111.6
102	110.64
100	108.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา โดยควบคุมผ่าน Potentiometer (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
99	105.2
98	102
98	106.8
97	102
96	104.4
96	99.6
95	108.72
94	93.36
93	99.6
92	96.24
92	95.28
91	95.76
90	92.4
90	90.96
89	95.76
89	91.44
88	90.48
88	91.44
87	92.88
87	82.8
85	88.56
85	80.4
84	81.36
83	84.24
83	83.76
82	80.4
81	84.72
80	78
80	83.28
80	79.92
80	83.28

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	84.24
80	78.64
80	77
80	80
80	80.4
80	80.88
80	78.96
80	84.24
80	77.04
80	79.92
80	78.96
80	77.52
80	78.48
80	77.52
80	78.96
80	78
80	78.48
80	77.04
80	78.48
80	77.04
80	78.48
80	79.56
81	78.48
82	81.84
82	78.48
83	77.04
84	79.44
85	85.2
85	85.2
87	80.88
87	81.84

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
89	83.76
90	84.24
91	87.12
92	90.96
93	91
94	90.96
95	91.44
96	90
97	99.6
98	85.2
99	110.64
100	91.92
101	100.56
102	96.24
102	98.64
103	99.6
104	106.8
105	105.84
105	103.92
106	106.8
107	100.08
108	113.52
109	114.48
109	110.64
110	111.12
111	108.72
112	111.6
112	113.04
113	118.8
114	110.64
115	111.6

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
116	118.8
116	120
117	117.84
117	116.88
118	120
119	116.4
120	91.44
120	118.32
120	113.04
120	119.76
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	118.32
120	120
120	119.76
120	120
120	117.84
120	120
120	120
120	120
120	119.76
119	120
118	119.76
117	120
116	120
115	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา โดยควบคุมผ่าน Potentiometer (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)	องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
114	120	87	90.48	80	78.48	109	112.56
113	120	85	89.04	81	77.04	110	108.24
113	119.28	85	90.48	82	79.44	110	110.64
112	116.88	84	82.32	83	84.24	111	113.04
111	119.76	83	86.64	84	79.44	112	108.72
110	120	82	91.44	85	86.16	113	114.96
110	113.04	81	90.48	87	77.04	113	111.12
109	113.52	80	84.72	88	87.12	114	115.44
108	98.64	80	86.64	89	87.12	115	114.48
107	114.96	80	83.76	90	83.28	115	118.32
106	110.64	80	84.24	91	80.88	116	114
105	112.08	80	85.2	93	92.4	117	119.28
104	109.68	80	78	93	90.14	117	115.44
103	110.16	80	79.44	95	100.56	118	120
102	106.32	80	81.36	96	85.68	118	114.96
101	107.28	80	78.48	97	99.12	119	120
100	105.84	80	77.52	98	94.32	119	120
99	113.04	80	78.48	99	98.64	120	120
98	101.04	80	81.84	100	94.32	120	117.36
97	102.48	80	79.44	100	95.28	120	120
97	99.12	80	78.48	101	92.88	120	116.4
95	106.32	80	78.48	102	106.32	120	120
95	98.64	80	79.56	103	107.28	120	120
94	99.12	80	78.48	104	107.76	120	120
93	95.76	80	77.04	105	100.08	120	116.88
92	97.68	80	78.96	105	104.88	120	120
91	96.72	80	79.56	106	98.16	120	115.44
91	91.92	80	78.48	107	103.92	120	120
90	97.68	80	79.56	107	110.16	120	117.36
89	97.2	80	78.96	108	110.16	120	120
88	90.96	80	77.04	109	108.72	120	120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา โดยควบคุมผ่าน Potentiometer (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	120
120	119.76
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
119	120
118	115.92
118	120
117	120
116	120
115	119.28
115	118.8
114	119.28
113	120
113	120
112	93.84
111	106.32
111	117.36
110	114
109	120
109	110.64
108	118.32
107	107.28
106	116.4
106	108.72
105	114
104	104.4
102	108.24

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
102	106.8
100	108.72
100	102.96
99	104.88
98	99.6
97	106.32
96	99.12
95	103.44
95	100.08
94	99.6
93	96.24
92	95.28
92	99.6
91	92.88
90	102
90	87.12
89	93.84
88	91.44
87	90
86	87.12
85	87.6
84	87.12
84	88.08
83	90.48
82	92.4
82	85.68
81	83.76
81	79.56
80	81.84
80	79.56
80	83.76

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	86.64
80	83.28
80	79.92
80	83.28
80	82.8
80	83.76
80	78.02
80	79.08
80	78.96
80	78.96
80	78
80	78.48
80	77.52
80	78.48
80	78.48
80	78.48
80	78.48
80	78.48
80	78.48
80	78.48
80	78.48
80	78.48
81	78.96
82	80.4
83	84.72
83	79.92
84	83.28
85	80.88
86	78.96
87	86.16
88	83.76

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
89	85.68
90	81.36
91	89.52
91	86.16
92	84.24
93	85.68
94	90
94	95.28
95	90.48
96	91.92
97	90.96
98	94.32
99	95.28
99	98.64
100	96.24
101	90.96
102	109.2
102	103.92
103	100.56
103	101.04
104	99.6
104	105.36
105	108.72
106	106.8
106	116.88
107	107.76
107	108.72
108	103.44
109	113.04
110	105.36
110	119.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางแสดงการเก็บข้อมูลจากชุดทดสอบเซนเซอร์ ที่เคลื่อนที่ 80-120 องศา โดยควบคุมผ่าน Potentiometer (ต่อ)

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
111	109.68
112	115.44
113	109.2
113	120
114	112.56
115	114.96
115	112.56
116	118.8
117	114
117	120
118	115.92
118	120
119	112.56
119	120
119	118.8
120	120
120	119.28
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120
120	120

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
120	119.28
120	120
120	120
119	120
118	120
118	114
118	120
117	120
116	120
116	118.8
115	120
115	115.92
114	120
113	116.4
112	114
111	114.48
111	117.36
110	112.08
109	114
108	120
108	111.6
107	105.84
106	117.84
105	114.48
105	109.2
103	108.24
103	104.88
102	99.12
101	106.8
100	106.8
99	105.36

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
99	106.32
98	101.04
97	106.32
97	99.12
96	100.56
95	99.6
95	99.6
94	92.88
93	97.2
93	93.36
92	99.12
92	95.28
91	92.4
90	92.88
90	93.36
89	87.6
88	94.32
87	87.6
87	89.04
86	86.16
85	93.84
85	90
84	86.64
84	93.36
83	90
82	85.2
82	87.12
81	87.12
80	80.4
80	84
80	93.36

องศาการทำมุม (องศา)	ค่าที่วัดได้ (องศา)
80	88.08
80	87.12
80	81.36
80	79.44
80	79.56
80	78.55
80	80.88
80	82.8
80	78.96
80	79.4
80	78.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ-นามสกุล	นายพิสุทธิ์ เต็มจิตต์ภักดี
วัน เดือน ปีเกิด	9 สิงหาคม 2536
ที่อยู่	บ้านเลขที่ 345 หมู่บ้านอยู่เจริญ ซอยลาดพร้าว101 ถนนลาดพร้าว แขวงคลองเจ้าคุณสิงห์ เขตวังทองหลาง กรุงเทพมหานครฯ รหัสไปรษณีย์ 10310 โทรศัพท์ 082-951-8446 E-mail : pisut.temjitpakdee@gmail.com
ประวัติการศึกษา	2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย สาขาวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ โรงเรียนมัธยมวัดบึงทองหลาง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้จัดทำ

ชื่อ-นามสกุล นายอุกฤษฎ บุญปกครอง

วัน เดือน ปีเกิด 17 กุมภาพันธ์ 2537

ที่อยู่ 140/5 หมู่ที่3 ซอยสุขสวัสดิ์ 74 ซอย2 ถนนสุขสวัสดิ์ ตำบลบางจาก อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ รหัสไปรษณีย์ 10130
โทรศัพท์ 0816228658
E-mail : ukrit.tycoon.007@gmail.com

ประวัติการศึกษา 2558 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต
วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

2554 มัธยมศึกษาตอนปลาย สาขาวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์
โรงเรียนราชประชาสมาสัย ฝ่ายมัธยม รัชดาภิเษก ในพระบรมราชูปถัมภ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้