

อุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลุก-ยืน  
A Device for Assessing Sit-to-Stand Test

สรिता ดวงโนแสน  
Sarida Duangnosan

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

อุปกรณ์ตรวจสอบประเมินการทดสอบลุก-ยืน  
A Device for Assessing Sit-to-Stand Test

โดย

สริดา ดวงโนแสน  
Sarida Duangnosan

อาจารย์ที่ปรึกษา  
สุรเดช ตรีไตรลักษณ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2560

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขา วิศวกรรมชีวการแพทย์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์


สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลุก-ยืน

A Device for Assessing Sit-to-Stand Test

ผู้จัดทำ นางสาวสรีดา ดวงโนแสน รหัสประจำตัว 57011320

ปริญญาานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบจากอาจารย์ที่ปรึกษาเรียบร้อยแล้ว



(ดร.สุรเดช ตรีไตรลักษณ์)

อาจารย์ที่ปรึกษา

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยีน
นักศึกษา	นางสาวสรีดา ดวงโนแสน
รหัสประจำตัว	57011320
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมชีวการแพทย์
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ดร.สุรเดช ตรีไตรลักษณะ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ถูกจัดทำขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจประเมินการทดสอบในการลูก-ยีน โดยเป็นคลิปหนีบสำหรับสวมใส่แบบไร้สายที่ใช้เซนเซอร์ IMU (Inertial Measurement Unit) ซึ่งข้อมูลที่ได้จะประกอบด้วย ความเร่ง 3 แกน, ไจโรสโคป และเวลาที่ใช้ในแต่ละครั้งของการลูก-ยีน หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกส่งผ่านแบบไร้สายผ่านบลูทูธแบบเรียลไทม์เพื่อไปประมวลผลและแสดงผลต่อไป

Thesis Title	A Device for Assessing Sit-to-Stand Test
Student	Sarida Duangnosan
Student ID	57011320
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Biomedical Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Dr.Suradej Tretriluxana

### Abstract

This thesis is design device to assess and storage data on the sit-to-stand test of the subjects. The device is a wearable clip with built-in battery by using wireless IMU (Inertial Measurement Unit) sensor on the waist. The data consists of 3-axis accelerometric data, gyroscopic data and time measured in each phase of sit-to-stand test. The device will send the data by using bluetooth to process and display in monitor.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์และรายงานฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้เนื่องจากได้รับคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ดร.สุรเดช ตรีไตรลักษณะ ซึ่งท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์รวมทั้ง ผศ.ดร.กิติพล ชิตสกุล ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ ผู้จัดทำกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบคุณ รศ.ดร.จารุกูล ตรีไตรลักษณะ คณะกายภาพบำบัด มหาวิทยาลัยมหิดลที่ ช่วยให้คำปรึกษาในด้านการใช้งานและการทำงานของนักกายภาพบำบัด

นอกจากนี้ ผู้จัดทำขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ทุกๆคนในห้องแล็บ BMCL ที่คอยให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น

สรिता ดวงโนแสน

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญรูป	vi
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 สมมติฐานของงานวิจัย	2
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6 โครงสร้างของรายงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ระบบกล้ามเนื้อ	3
2.2 กล้ามเนื้อในส่วนต่างๆของร่างกาย	10
2.3 Sit-to-Stand Movement	21
2.4 Five Times Sit-to-Stand Test	22
2.5 IMU (Inertial Measurement Unit)	23
2.6 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)	24
2.7 เครื่องวัดสภาพการเอียง (Gyroscope)	31
2.8 Arduino	34
2.9 Arduino Pro Mini	44

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.10 Bluetooth	46
2.11 HC-05 Bluetooth Module	52
บทที่ 3 การดำเนินการ	53
3.1 อุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยีน	53
3.2 การแสดงผลและการเก็บบันทึกข้อมูล	56
3.3 ออกแบบการทำการทดลอง	61
บทที่ 4 ผลการทดลอง	65
4.1 ทดลองในกรณีของผู้สูงอายุที่เป็นโรคเส้นเลือดในสมองตีบ	65
4.2 ทดลองในกรณีของผู้สูงอายุที่เป็นโรคข้อเข่าเสื่อม	67
4.3 ทดลองในกรณีของผู้สูงอายุที่แข็งแรงดี	69
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	71
5.1 สรุปผลการทดลอง	71
5.2 ปัญหาที่พบ	71
5.3 ข้อเสนอแนะ	72
บรรณานุกรม	73
ภาคผนวก	74

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1.1 กล้ามเนื้อในร่างกายมนุษย์	3
รูปที่ 2.1.2 กล้ามเนื้อเรียบ	4
รูปที่ 2.1.3 กล้ามเนื้อหัวใจ	5
รูปที่ 2.1.4 กล้ามเนื้อลาย	5
รูปที่ 2.1.5 การทำงานของกล้ามเนื้อ	6
รูปที่ 2.1.6 เส้นใยกล้ามเนื้อลาย	7
รูปที่ 2.2.1 กล้ามเนื้อใบหน้า	10
รูปที่ 2.2.2 กล้ามเนื้อคอ	11
รูปที่ 2.2.3 กล้ามเนื้อส่วนลำตัว	12
รูปที่ 2.2.4 กล้ามเนื้อส่วนลำตัวด้านหลัง	14
รูปที่ 2.2.5 กล้ามเนื้อส่วนหัวไหล่และแขน	15
รูปที่ 2.2.6 กล้ามเนื้อส่วนสะโพกและขา	18
รูปที่ 2.2.7 กล้ามเนื้อส่วนเท้า	20
รูปที่ 2.3.1 Main phases of Sit-to-Stand	21
รูปที่ 2.4.1 การประเมิน Five Times Sit-to-Stand Test	22
รูปที่ 2.5.1 ส่วนประกอบและลักษณะของ IMU	23
รูปที่ 2.6.1 หลักการของ Accelerometer	24
รูปที่ 2.6.2 โครงสร้างพื้นฐานของไมเตอร์วัดอัตราเร่งแบบโซซมิกแมส	25
รูปที่ 2.6.3 โครงสร้างพื้นฐานของไมเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ piezoelectric	27
รูปที่ 2.6.4 เซนเซอร์จับการเคลื่อนไหวด้วยความเร่งที่ใช้ในรถยนต์	28
รูปที่ 2.6.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในเซนเซอร์เมื่อเกิดการกระแทก	28
รูปที่ 2.6.6 การนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์กีฬา	29
รูปที่ 2.6.7 piezoelectric accelerometer ที่ติดในรองเท้า	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.6.8 หลักการทำงานของ accelerometer ในสมาร์ทโฟน	30
รูปที่ 2.7.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของไจโรสโคป	31
รูปที่ 2.7.2 Gyrostabilizer	32
รูปที่ 2.7.3 หลักการทำงานพื้นฐานของไจโรสโคป	32
รูปที่ 2.8.1 บอร์ด Arduino	34
รูปที่ 2.8.2 บอร์ด Arduino ที่ต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ผ่าน USB	35
รูปที่ 2.8.3 เลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload	35
รูปที่ 2.8.4 เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด	36
รูปที่ 2.8.5 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้อง	36
รูปที่ 2.8.6 Upload โค้ดโปรแกรม	37
รูปที่ 2.8.7 ส่วนประกอบของบอร์ด Arduino UNO R3	37
รูปที่ 2.8.8 บอร์ด Arduino UNO R3	38
รูปที่ 2.8.9 บอร์ด Arduino UNO SMID	39
รูปที่ 2.8.10 บอร์ด Arduino Mega 2560 R3	39
รูปที่ 2.8.11 บอร์ด Arduino Mega ADK	39
รูปที่ 2.8.12 บอร์ด Arduino Leonardo	40
รูปที่ 2.8.13 บอร์ด Arduino Mini 05	41
รูปที่ 2.8.14 บอร์ด Arduino Pro Mini 328 3.3V	41
รูปที่ 2.8.15 บอร์ด Arduino Arduino Pro Mini 328 5V	42
รูปที่ 2.8.16 บอร์ด Arduino Ethernet with PoE module	42
รูปที่ 2.8.17 บอร์ด Arduino Ethernet without PoE module	43
รูปที่ 2.8.18 บอร์ด Arduino Due	43
รูปที่ 2.9.1 บอร์ด Arduino Pro Mini	44

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.9.2 Pinout Diagram ของบอร์ด Arduino Pro Mini	44
รูปที่ 2.9.3 สายบอร์ด USB to UART	45
รูปที่ 2.10.1 โลโก้ Bluetooth	46
รูปที่ 2.10.2 กษัตริย์ Harald Bluetooth	47
รูปที่ 2.10.3 การเชื่อมต่อของบลูทูธ	48
รูปที่ 2.10.4 ตัวรับ Bluetooth แบบ USB	49
รูปที่ 2.10.5 การเชื่อมต่อBluetoothระหว่างคอมพิวเตอร์กับโทรศัพท์มือถือ	50
รูปที่ 2.10.6 หูฟัง Bluetooth	51
รูปที่ 2.11.1 โมดูล Bluetooth HC-05	52
รูปที่ 3.1.1 อุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยีน	53
รูปที่ 3.1.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยีน	55
รูปที่ 3.1.3 หลอดไฟ LED แสดงสถานะการทำงาน	56
รูปที่ 3.2.1 แสดงผลแบบ Realtime บน Arduino	57
รูปที่ 3.2.2 หน้าจอ Arduino แสดงผลแบบ Realtime	57
รูปที่ 3.2.3 แสดงผลแบบ Realtime บน Serial Oscilloscope	58
รูปที่ 3.2.4 หน้าจอ Serial Oscilloscope แสดงผลแบบ Realtime	58
รูปที่ 3.2.5 หน้าจอ Serial OscilloscopeสำหรับLog to File	59
รูปที่ 3.2.6 หน้าจอ Excel ข้อมูลSerial ที่ได้	59
รูปที่ 3.2.7 กราฟข้อมูลของข้อมูลทั้ง 7 ชุด	60
รูปที่ 3.3.1 ชี้แจงขั้นตอนการทดลอง	62
รูปที่ 3.3.2 ใส่อุปกรณ์ให้กับอาสาสมัคร	62
รูปที่ 3.3.3 ตำแหน่งของอุปกรณ์	63

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 3.3.4 อาสาสมัครทำการทดลอง	63
รูปที่ 3.3.5 นักกายภาพบำบัดสังเกตกราฟข้อมูล	64
รูปที่ 4.1.1 อาสาสมัครกรณีที่ 1	65
รูปที่ 4.1.2 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 1 ทั้ง 3 การทดลอง	66
รูปที่ 4.2.1 อาสาสมัครกรณีที่ 2	67
รูปที่ 4.2.2 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 2 การทดลองที่ 1	67
รูปที่ 4.2.3 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 2 การทดลองที่ 2	68
รูปที่ 4.2.4 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 2 การทดลองที่ 3	68
รูปที่ 4.3.1 อาสาสมัครกรณีที่ 3	69
รูปที่ 4.3.2 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 3 การทดลองที่ 1	69
รูปที่ 4.3.3 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 3 การทดลองที่ 2	70
รูปที่ 4.3.4 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 3 การทดลองที่ 3	70

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาของงานวิจัย

ในปัจจุบันจำนวนผู้สูงอายุมีแนวโน้มที่จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ทำให้สังคมได้ก้าวสู่สังคมผู้สูงอายุอย่างเต็มตัวเนื่องจากจำนวนผู้สูงอายุที่เพิ่มมากขึ้นนี้ เราจึงควรให้ความสำคัญถึงความเป็นอยู่และความปลอดภัยของผู้สูงอายุให้มากยิ่งขึ้น เมื่อสุขภาพพลานามัยก็จะถดถอยลง ทำให้การเคลื่อนไหวร่างกายเป็นไปได้อย่างยากลำบาก โดยเฉพาะอย่างการลุกยืนและการนั่งยองเป็นกิจวัตรที่ไม่ควรมองข้าม เนื่องจากมีการทำกิจวัตรนี้ในทุกๆ วันเป็นประจำและอย่างต่อเนื่อง

โดยทางด้านกายภาพบำบัดนั้น ได้มีการทดสอบลุก-ยืน เพื่อตรวจประเมินดูความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและความสามารถในการทรงตัวของผู้สูงอายุ เพื่อนำมาหาความเสี่ยงต่อการล้มในผู้สูงอายุ หรือตรวจประเมินดูความแข็งแรงของกล้ามเนื้อขาและความสามารถในการทรงตัวของผู้ที่เข้ารับการทำกายภาพบำบัด ซึ่งโดยในชั้นคลินิกนั้น ทำโดยการเฝ้าสังเกตลักษณะท่าทางและเวลาที่ใช้ในการลุก-ยืนจากสายตาของนักกายภาพบำบัดเพียงอย่างเดียว ไม่ได้มีเครื่องมืออุปกรณ์ช่วยในการตรวจประเมินร่วมด้วย หากมีอุปกรณ์ที่ช่วยในการตรวจประเมินและเก็บข้อมูลต่างๆไว้ ก็จะช่วยให้นักกายภาพบำบัดออกแบบวางแผนในการทำกายภาพบำบัดต่อไป หรือทราบถึงผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการทำกายภาพ ว่าผู้ป่วยมีสมรรถนะและความแข็งแรงของร่างกายที่เพิ่มขึ้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและความเอียงใน3แกน เมื่อทำการทดสอบลุก-ยืน
2. สร้างอุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลุก-ยืนเพื่อนำมาช่วยประเมินพฤติกรรมการลุก-ยืนของผู้ป่วยแทนการสังเกตด้วยสายตาของนักกายภาพบำบัด โดยมีขนาดพกพาและเป็นแบบไร้สาย
3. นำข้อมูลที่เก็บได้จากการทดสอบการลุก-ยืน มาเก็บบันทึก เพื่อให้ นักกายภาพบำบัดสามารถวางแผนการรักษาต่อไปได้

### 1.3 สมมติฐานของงานวิจัย

จะสามารถสร้างอุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยืนแบบไร้สายได้ โดยสามารถนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจประเมินอย่างเป็นทางการ เป็นที่ยอมรับ และได้รับความนิยมนสูง

### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยืนแบบไร้สายที่ส่งข้อมูลผ่าน Bluetooth

2. เก็บบันทึกและประเมินผลการทดสอบบนคอมพิวเตอร์

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำไปใช้ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยืนทางด้านกายภาพบำบัดได้จริง

2. นำไปใช้งานได้ง่ายและสะดวก

3. ประยุกต์ใช้งานทางด้านกายภาพบำบัดต่อไป

### 1.6 โครงสร้างของรายงาน

โครงสร้างของรายงานนี้ประกอบไปด้วย

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การดำเนินการ

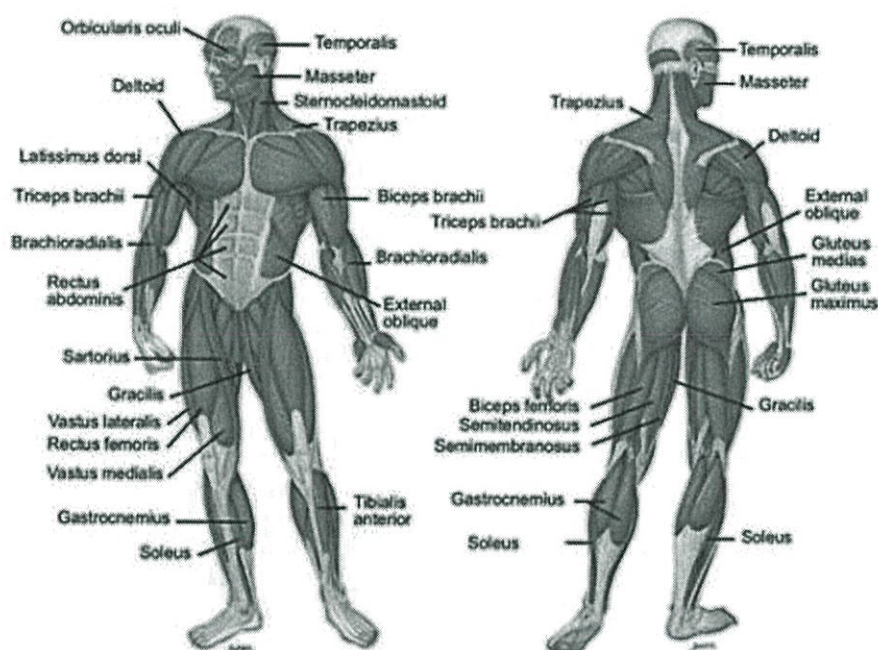
บทที่ 4 ผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ระบบกล้ามเนื้อ



รูปที่ 2.1.1 กล้ามเนื้อในร่างกายมนุษย์

กล้ามเนื้อ (Muscle) เป็นเนื้อเยื่อที่หดตัวได้ในร่างกาย เปลี่ยนแปลงมาจากเมโซเดิร์ม (mesoderm) ของชั้นเนื้อเยื่อในตัวอ่อน และเป็นระบบหนึ่งของร่างกายที่สำคัญต่อการเคลื่อนไหวทั้งหมดของร่างกาย แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ กล้ามเนื้อโครงร่าง (skeletal muscle) กล้ามเนื้อเรียบ (smooth muscle) และกล้ามเนื้อหัวใจ (cardiac muscle)

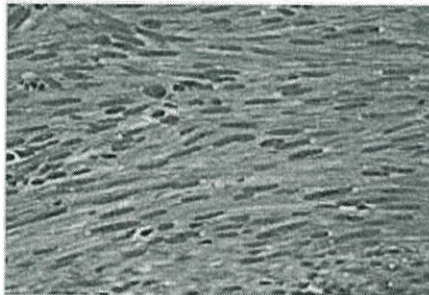
กล้ามเนื้อทำหน้าที่หดตัวเพื่อให้เกิดแรงและทำให้เกิดการเคลื่อนที่ (motion) รวมถึงการเคลื่อนที่และการหดตัวของอวัยวะภายใน กล้ามเนื้อจำนวนมากหดตัวได้นอกอำนาจจิตใจ และจำเป็นต่อการดำรงชีวิต เช่น การบีบตัวของหัวใจ หรือการบีบรัด (peristalsis) ทำให้เกิดการผลักดันอาหารเข้าไปภายในทางเดินอาหาร การหดตัวของกล้ามเนื้อที่อยู่ใต้อำนาจจิตใจมีประโยชน์ในการเคลื่อนที่ของร่างกาย และสามารถควบคุมการหดตัวได้ เช่นการกลอกตา หรือการหดตัวของกล้ามเนื้อคอควดริเซ็ป (quadriceps muscle) ที่ต้นขา

### หน้าที่สำคัญของกล้ามเนื้อ

1. คงรูปร่างท่าทางของร่างกาย (Maintain Body Posture)
2. ยึดข้อต่อไว้ด้วยกัน (Stabilize Joints)
3. ทำให้ร่างกายเคลื่อนไหว (Provide Movement) กล้ามเนื้อทำให้ให้เราเคลื่อนไหวในส่วนที่ต้องการได้ กิจกรรมทุกอย่างที่เราทำอยู่ทุกวันนี้เกิดขึ้นได้เพราะร่างกายเราสามารถเปลี่ยนเอาพลังงานที่ได้จากสารอาหารมาเป็นพลังงานกล (Mechanical Energy) หรือพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหว
4. รักษาระดับอุณหภูมิของร่างกาย (Maintain Body Temperature) โดยผลิตความร้อนออกมาตามที่ร่างกายต้องการ

### ประเภทของกล้ามเนื้อ

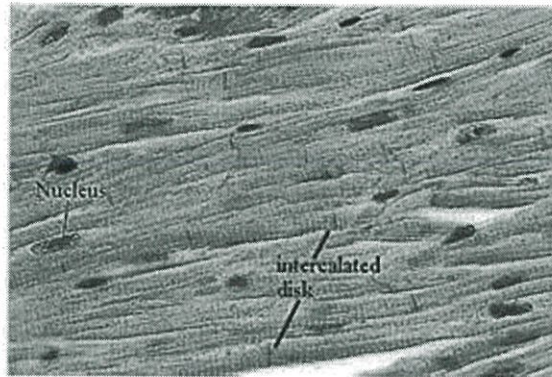
1. กล้ามเนื้อเรียบ (Smooth Muscle)



รูปที่ 2.1.2 กล้ามเนื้อเรียบ

พบได้ที่อวัยวะภายในของร่างกาย และเป็นกล้ามเนื้อที่ทำงานอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแบบนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า กล้ามเนื้อนอกอำนาจจิตใจ (Involuntary Muscle) เพราะเราไม่สามารถควบคุมกล้ามเนื้อชนิดนี้ได้ สมองและร่างกายจะสั่งให้กล้ามเนื้อเรียบทำงานด้วยตัวของมันเอง เช่น ในกระเพาะ (Stomach) และระบบการย่อยอาหาร (Digestive System) กล้ามเนื้อเหล่านี้จะหดตัวแน่นขึ้นและขยายตัวออก เพื่อให้อาหารเดินทางไปตามระบบย่อยอาหารส่วนอื่นๆ ของร่างกายได้

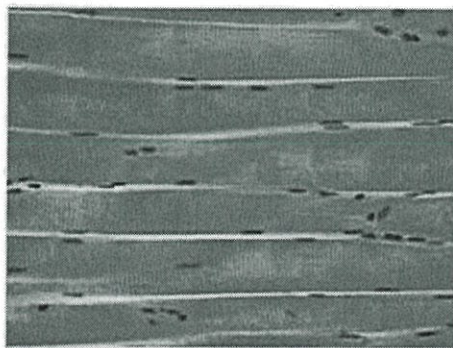
## 2.กล้ามเนื้อหัวใจ (Cardiac Muscle)



รูปที่ 2.1.3 กล้ามเนื้อหัวใจ

กล้ามเนื้อที่ประกอบขึ้นเป็นหัวใจมีชื่อเรียกว่ากล้ามเนื้อหัวใจ กล้ามเนื้อชนิดนี้เป็นกล้ามเนื้อนอกอำนาจจิตใจเหมือนกับกล้ามเนื้อเรียบ ทำให้เกิดการเต้นของหัวใจ (Heart Beat) อยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อหัวใจจะบีบตัว (Contract) เพื่อดันเลือดส่งออกไปยังส่วนต่างๆของร่างกาย และคลายตัว (Relax) เพื่อให้เลือดไหลกลับเข้ามาสู่หัวใจหลังจากที่ไหลวนไปสู่ส่วนอื่นๆของร่างกายแล้ว

## 3.กล้ามเนื้อลาย (Skeletal Muscle)

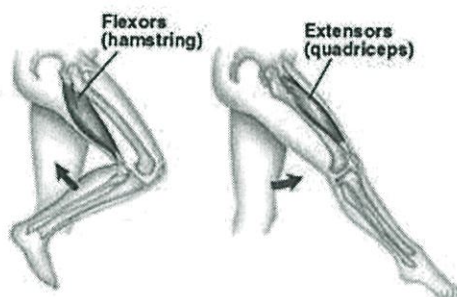


รูปที่ 2.1.4 กล้ามเนื้อลาย

กล้ามเนื้อลายเป็นกล้ามเนื้อภายใต้อำนาจจิตใจ (Voluntary Muscle) ชนิดเดียวในร่างกาย กล้ามเนื้อลายเป็นกล้ามเนื้อที่สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อชนิดนี้ได้ กล้ามเนื้อลายจะห่อหุ้มโครงกระดูกของเราไว้ และทั้งสองอย่างจะทำงานร่วมกัน ทำให้ร่างกายสามารถทำงาน กล้ามเนื้อลายมีรูปร่างและขนาดที่หลากหลาย จึงทำงานได้หลากหลายรูปแบบ

### การทำงานของกล้ามเนื้อ

เมื่อสมองสั่งให้ร่างกายเคลื่อนไหว กล้ามเนื้อจะเกิดการหดตัวและคลายตัว ทำงานประสานเป็นคู่ ๆ พร้อมกัน แต่ตรงข้ามกัน ในขณะที่กล้ามเนื้อมัดหนึ่งหดตัว กล้ามเนื้ออีกมัดหนึ่งจะคลายตัว การทำงานของกล้ามเนื้อในลักษณะนี้ เรียกว่า Antagonistic muscle



รูปที่ 2.1.5 การทำงานของกล้ามเนื้อ

### การรักษาให้ระบบกล้ามเนื้อแข็งแรง (Keeping the Muscular System Healthy)

#### 1. ออกกำลังกาย (Exercise)

การออกกำลังกายแบบแอโรบิก (Aerobics Exercise) จะช่วยทำให้หัวใจและปอดแข็งแรงขึ้น คุณจะเดิน จะขี่จักรยาน จะว่ายน้ำ หรือจะวิ่ง และการเดินขึ้นบันไดก็สนุกได้เหมือนกันนะ ทั้งการเดิน การวิ่งเหยาะๆ การขี่จักรยาน การว่ายน้ำ หรือการเดินขึ้นบันได เป็นแค่ตัวอย่างเล็กน้อยของการออกกำลังกายแบบแอโรบิก การออกกำลังกายที่ทำให้กล้ามเนื้อแข็งแรงและมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นเรียกว่า การออกกำลังกายแบบ แอนแอโรบิก (Anaerobics Exercise) ทั้งการเสริมสร้างความแข็งแรง การยกน้ำหนัก หรือการวิ่งระยะสั้น เมื่อนำไปรวมกับการออกกำลังกายแบบอื่นแล้วก็สามารถทำให้กล้ามเนื้อแข็งแรงขึ้นเช่นกัน

#### 2. โภชนาการที่เหมาะสม (Proper Nutrition)

การรับประทานผัก ธัญพืช และผลไม้ร่อยๆ รวมถึงการดื่มน้ำมากๆ ลดความเครียด ก็ช่วยได้เหมือนกัน

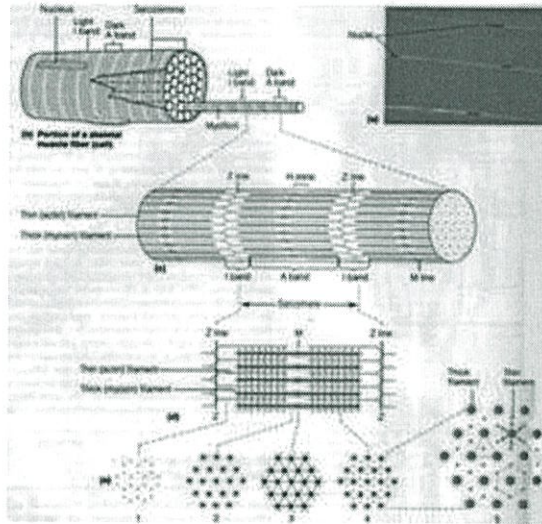
### กลไกการหดตัวของกล้ามเนื้อลาย

เส้นเยื่อไมโอไฟบริล ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการหดตัวของกล้ามเนื้อลาย ประกอบด้วยเส้นที่ประกอบด้วยโปรตีน (Protein filament) 2 ชนิด คือ

- 1.เส้นหนาประกอบด้วยโปรตีนหรือที่เรียกว่าเส้นใยไมโอซิน (Myosin filament)

## 2.เส้นบางประกอบด้วยโปรตีนหรือที่เรียกว่าเส้นใยแอกทิน (Actin filament)

เส้นใยทั้ง 2 เส้น ซึ่งมีจำนวนมากมายนี้ จะรวมตัวกันเป็นหน่วยเรียกว่า ซาร์โคเมียร์ (Sarcomere) และเส้นใยทั้ง 2 เส้น ซึ่งมีจำนวนมากมายในแต่ละซาร์โคเมียร์ จะทำให้กล้ามเนื้อลายมีลักษณะเป็นลายมืดและลายสว่างสลับกันไป



รูปที่ 2.1.6 เส้นใยกล้ามเนื้อลาย

เส้นใยไมโอซินตั้งอยู่ในเขตที่มีมืดซึ่งเรียกว่า เอแบนด์ หรือ อนิโซทรอปิกแบนด์ (A-Band or Anisotropic Bands) อย่างไรก็ตาม เส้นใยแอกทินจะยื่นเข้าไปในเขตเอแบนด์ด้วยและเมื่อเส้นใยกล้ามเนื้อลายหดตัว เส้นใยแอกทินจะเคลื่อนตัวไปซ้อนทับเส้นใยไมโอซินในเขตเอแบนด์มากขึ้น เส้นใยแอกทินจะอยู่ติดกับเส้นซีไลน์ (Z-line) ซึ่งอยู่ที่ปลายซาร์โคเมียร์แต่ละข้าง เนื่องจากเส้นซีไลน์ตั้งอยู่ตลอดความยาวของเส้นใยกล้ามเนื้อลาย ฉะนั้น ช่วงซาร์โคเมียร์มีเขตเอแบนด์และเขตไอแบนด์ (I-Band) บรรจุอยู่ จึงเป็นเหตุที่ทำให้เส้นใยกล้ามเนื้อลายมีลักษณะปรากฏเป็นลาย

ถ้าเส้นใยกล้ามเนื้อลายถูกดึงออกจากกันแรงมากผิดปกติ ปลายของเส้นใยแอกทินภายในเขตเอแบนด์จะถูกดึงออกจากกัน ซึ่งจะทำให้เขตเฮซโซน (H-zone) ปรากฏอยู่ตรงกลางของเขตเอแบนด์

กล้ามเนื้อลายจะหดตัวเมื่อเส้นใยไมโอซินและแอกตินเลื่อนเข้าหากัน ในขณะที่กล้ามเนื้อลายหดตัว เนื่องจากเส้นใยแอกตินยึดแน่นอยู่กับเส้นซีโพลี ดังนั้น เมื่อเส้นซีโพลีถูกดึงเข้าหากันก็จะทำให้ช่วงโอแบนด์และช่วงซาร์โคเมียหดตัวสั้นลงตามไปด้วย

ทฤษฎีการหดตัวของกล้ามเนื้อลายนี้เรียกว่า ทฤษฎีเส้นใยเลื่อนเข้าหากัน (Sliding over the filaments theory)

### ชนิดของเส้นใยกล้ามเนื้อลาย

ในสมัยก่อนนักกายวิภาคและสรีรวิทยาได้จำแนกเส้นใยกล้ามเนื้อลายออกเป็น 2 ชนิด คือ เส้นใยกล้ามเนื้อสีแดง และเส้นใยกล้ามเนื้อสีขาว การที่เส้นใยกล้ามเนื้อลายถูกจำแนกเป็นสีแดง และสีขาว เนื่องจากการสังเคราะห์ที่ประกอบเป็นส่วนใหญ่ของเส้นใยกล้ามเนื้อลายในการจำแนกเส้นใยกล้ามเนื้อลายประเภทนี้ เส้นใยกล้ามเนื้อลายสีแดง ถูกพิจารณาว่าเป็นเส้นใยกล้ามเนื้อลายที่หดตัวช้า (Slow twitch fiber) หรือที่เรียกย่อว่า เส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบเอสที (ST fiber) เส้นใยกล้ามเนื้อลายชนิดสีแดง เป็นเส้นใยกล้ามเนื้อลายที่เหมาะสมกับการทำงานระยะยาว ซึ่งมักจะพบมากในกล้ามเนื้อลายที่ช่วยในการทรงรูปร่าง และกล้ามเนื้อลายที่มีหน้าที่ต่อต้านแรงโน้มถ่วงของโลก ส่วนเส้นใยกล้ามเนื้อลายสีขาวถูกพิจารณาว่าเป็นเส้นใยกล้ามเนื้อลายที่หดตัวเร็ว (Fast twitch fiber) หรือเรียกย่อๆ ว่า เส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบเอฟที (Ft fiber) เส้นใยสีขาวมักจะพบมากในกล้ามเนื้อที่ทำหน้าที่เกี่ยวข้องการงอ

ในปัจจุบันการจำแนกเส้นใยกล้ามเนื้อลาย จึงได้เปลี่ยนแปลงไปจากระบบเก่า ซึ่งจำแนกเส้นใยกล้ามเนื้อลายตามสีเป็นการจำแนกออกตามลักษณะการทำงานของเส้นใยกล้ามเนื้อลาย มีการค้นพบว่า เส้นใยกล้ามเนื้อลายสีขาว ซึ่งเป็นเส้นใยกล้ามเนื้อลายที่หดตัวเร็ว ยังสามารถแบ่งย่อยออกไปได้อีก 2 ชนิด ซึ่งเส้นใยกล้ามเนื้อลายสีขาวทั้ง 2 ชนิด มีความแตกต่างกันในด้านการทำงานทางแง่สรีรวิทยา

ปีเตอร์ และคณะ (Peter et al., 1972) ได้จำแนกเส้นใยกล้ามเนื้อลายตามลักษณะการทำงานให้เห็นได้ชัดเจน 3 ชนิด คือ

1. เส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบหดตัวช้าและต้องใช้ออกซิเจนช่วยในการหดตัว (Slow, Oxidative fiber) หรือที่เรียกย่อๆ ว่า เส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบเอสโอ (SO Fiber)

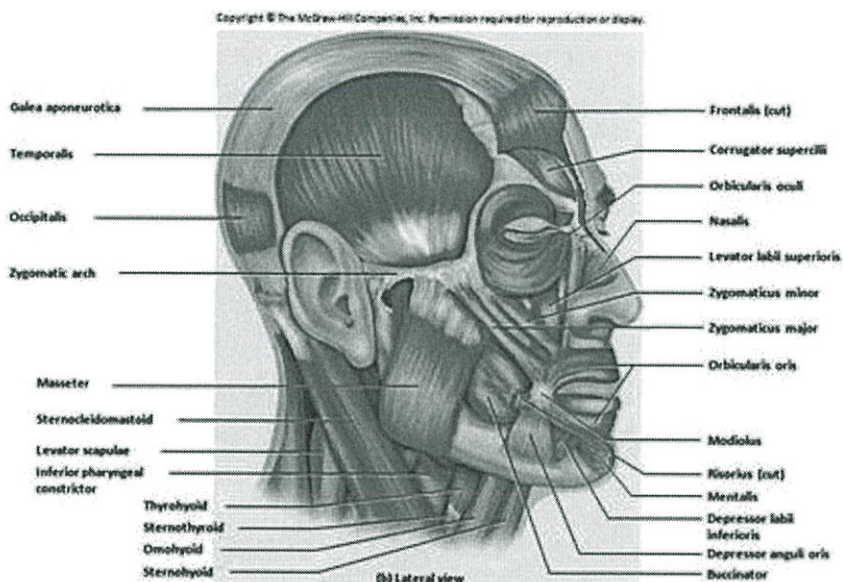
2. เส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบหดตัวเร็ว และต้องใช้ออกซิเจนตลอดจนกลูโคสช่วยในการหดตัว (Fast, Oxidative, Glycolytic fiber) หรือที่เรียกย่อๆ ว่า เส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบเอฟไอจี (FOG fiber)

3. เส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบหดตัวเร็ว และต้องใช้กลูโคสช่วยในการหดตัวเพียงชนิดเดียว (Fast glycolytic fiber) หรือที่เรียกย่อๆ ว่า เส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบเอฟจี (FG fiber)

ดูโบวิทซ์และบรู๊ค (Dubowitz and Brooke, 1973) ได้เรียกเส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบเอสไอว่า เส้นใยกล้ามเนื้อลายชนิดที่ 1 (Type I) และได้เรียกเส้นใยกล้ามเนื้อลายแบบเอฟไอจีและแบบเอฟจีว่า เส้นใยกล้ามเนื้อลายชนิด 2 เอ และชนิด 2 บี (Type IIa และ Type IIb) ตามลำดับ

## 2.2 กล้ามเนื้อในส่วนต่างๆ ของร่างกาย

### กล้ามเนื้อใบหน้า



รูปที่ 2.2.1 กล้ามเนื้อใบหน้า

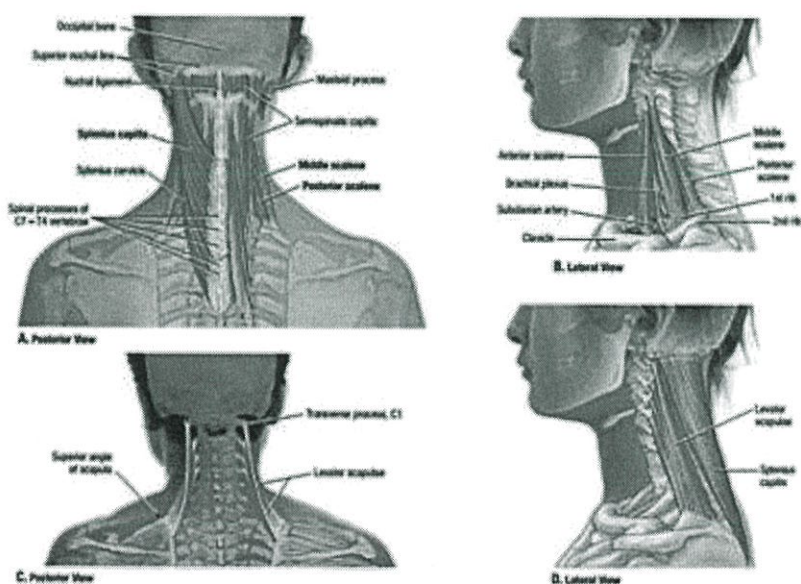
กล้ามเนื้อใบหน้าเป็นกล้ามเนื้อที่อยู่ตื้น คือ อยู่ใต้ผิวหนัง (Subcutaneous tissue) ด้านหนึ่ง เกาะกับกระดูกหน้า อีกด้านหนึ่งติดกับผิวหนังของใบหน้าทำหน้าที่แสดงความรู้สึกบนใบหน้าในลักษณะต่าง ๆ เช่น ดีใจ เสียใจ โกรธ และแสดงอาการทางสีหน้า เช่น ยิ้ม หัวเราะร้องไห้ เป็นกล้ามเนื้อที่เน้นบุคลิกภาพของแต่ละคนได้เป็นอย่างดี กล้ามเนื้อที่ใช้แสดงความรู้สึกของใบหน้า (Muscle of facial expression) ที่สำคัญ ได้แก่

- Frontalis อยู่ที่หน้าผาก ทำหน้าที่ ยกคิ้วขึ้นลง ทำหน้าผากย่น
- Nasalis อยู่ที่จมูก ทำหน้าที่ หุบปีกจมูก เวลาดมกลิ่น
- Corrugator อยู่บริเวณคิ้ว – เหนือคิ้ว ทำหน้าที่ ขมวดคิ้ว ครุ่นคิด
- Orbicularisocculi อยู่รอบดวงตา ทำหน้าที่ ปิดตา หรือหลับตา

- Zygomaticus major เกาะอยู่บริเวณโหนกแก้ม – ปากบน ทำหน้าที่ยกปาก
- Orbicularis oris อยู่บริเวณรอบปาก ทำหน้าที่ หุบปาก ทำริมฝีปากยื่น ทำปากจู๋
- Risorius อยู่ถัดออกมาทางด้านข้างของปาก ทำหน้าที่เวลาแสบะยิ้ม

กล้ามเนื้อเกี่ยวกับการเคี้ยว (Muscle of mastication) มี 4 มัด คือ Temporalis muscle อยู่ที่ขมับด้านข้างของกระดูกศรีษะ แม้เป็นรัศมีเต็มขมับทำหน้าที่อ้า หุบและยื่นปาก เวลาเคี้ยวอาหาร Masseter muscle อยู่ด้านนอกมุมขากรรไกรล่างของใบหน้ารูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าทำหน้าที่ยกกระดูกขากรรไกรล่างขึ้นเวลาเคี้ยวอาหาร Pterygoid muscle เป็นกล้ามเนื้อที่อยู่ลิ้นจากส่วนมาตรฐานของกระดูกศรีษะไปยังบริเวณขากรรไกรล่าง มี 2 คู่ คือ External และ Internal pterygoid muscle ช่วยในการอ้าปาก หุบปาก เคลื่อนกรามไปทางด้านข้าง

### กล้ามเนื้อคอ (Muscle of the neck)



รูปที่ 2.2.2 กล้ามเนื้อคอ

กล้ามเนื้อคอ (Muscle of the neck) ที่สำคัญในการเคลื่อนไหวของคอ มีอยู่ 3 มัด คือ

### 1.Sternomastoidหรือ Sternocleidomastoideus

เป็นกล้ามเนื้อที่ใหญ่ที่สุดของคอเกาะพาดจากกระดูกหน้าอกกับกระดูกไหปลาร้าไปยังด้านนอกของกระดูก Mastoid และกระดูกท้ายทอย ทำหน้าที่เอียงคอ หันและหมุนคอ

### 2.Splenius capitis

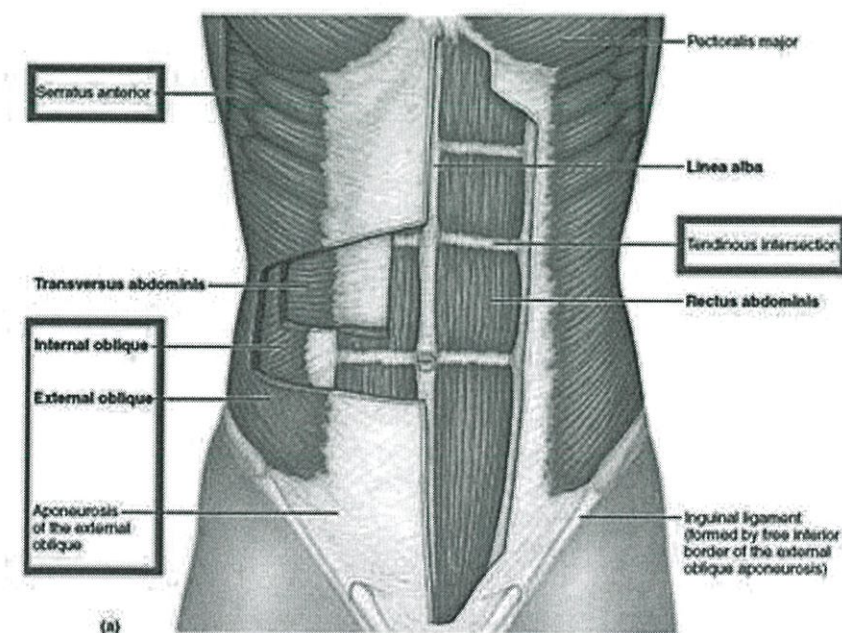
เป็นกล้ามเนื้อที่อยู่ด้านข้างของคอ มีจุดเกาะเริ่มจากกระดูกสันหลังส่วนลำตัว (thoracic spine) อันที่ 3 และ 4 ไปยังจุดเกาะปลายที่กระดูกท้ายทอย ทำหน้าที่ยืดคอ เอียงคอและเงยหน้า

### 3.Semispinaliscapitis

เป็นกล้ามเนื้อที่อยู่ด้านหน้าของคอ จุดเกาะต้นเริ่มจากกระดูกสันหลังส่วนคอ (cervical spine) อันที่ 4 และ 5 ไปยังจุดเกาะปลายที่กระดูกท้ายทอย ทำหน้าที่ยืดคอ เอียงคอและเงยหน้า

### กล้ามเนื้อส่วนลำตัว (Muscle of the trunk)

กล้ามเนื้อส่วนลำตัว (Muscle of the trunk) แบ่งเป็นกล้ามเนื้อส่วนลำตัวด้านหน้าและด้านหลัง ดังนี้



รูปที่ 2.2.3 กล้ามเนื้อส่วนลำตัว

1. กล้ามเนื้อส่วนลำตัวด้านหน้ากล้ามเนื้อส่วนลำตัวด้านหน้าที่เห็นเด่นชัด และมัดใหญ่ มีดังนี้

#### 1.1 Pectoralis minor

เป็นกล้ามเนื้อรูปสามเหลี่ยมแบนเล็กอยู่ภายใต้กล้ามเนื้อ Pectoralis major เกาะจากผิวนอกของกระดูกซี่โครงซี่ที่ 3 – 5 ไปยัง Coracoid process ของกระดูกสะบัก ทำหน้าที่ดึงหัวไหล่ไปทางด้านหน้าและลงล่าง และช่วยรับน้ำหนักตัวขณะที่ยืนเอามือยัน

#### 1.2 Pectoralis major

เป็นกล้ามเนื้อทรงอกมัดใหญ่รูปร่างคล้ายพัดคลุมอยู่บนอกและทับอยู่บนกล้ามเนื้อ Pectoralis minor และเป็นกล้ามเนื้อที่เกาะจากแนวกลางของกระดูกหน้าอกไปยังกระดูกต้นแขน เป็นกล้ามเนื้อที่เน้นลักษณะเพศชายได้ชัดเจนคือมีลักษณะอกผายไหล่ผึ่ง ทำหน้าที่หุบ งอ หมุนต้นแขนเข้าด้านใน ช่วยในการผลัก ขว้าง ปืนปาย การหายใจเข้ารั้งแขนให้มาทางด้านหน้าทำให้ไหล่คงรูปอยู่กับที่

#### 1.3 Rectus abdominis

เป็นกล้ามเนื้อหน้าท้องมีลักษณะเป็นแถบยาวเป็นปล้อง ๆ เมื่อออกแรงเกร็งมีจุดเกาะต้นจากกระดูกหัวเหน่า (Pubic bone) ทอดขึ้นบนและค่อย ๆ กว้างขึ้นไปเกาะที่ปลายผิวน้ำของกระดูก Xiphoid และกระดูกซี่โครงซี่ที่ 5, 6, 7 ทำหน้าที่เกร็งช่องท้องเวลายกของหนัก ช่วยในการขับถ่ายและคลอดบุตร

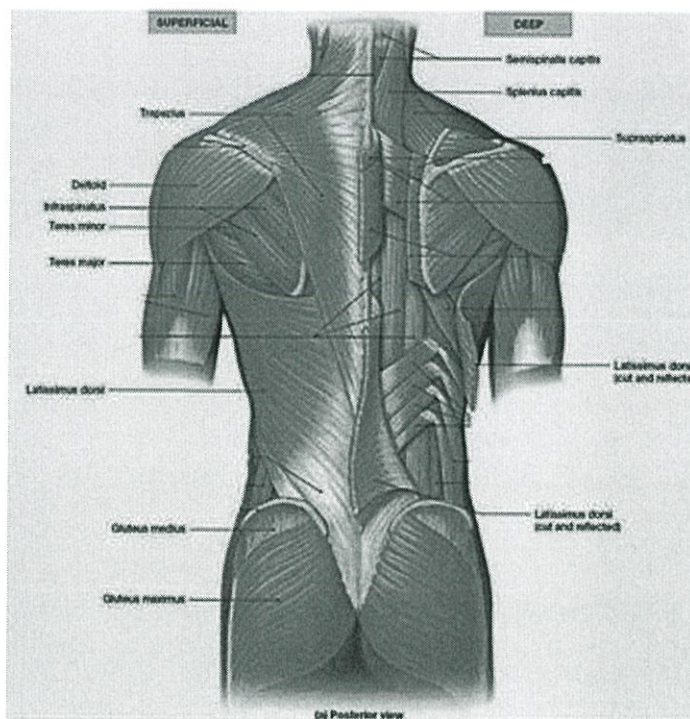
#### 1.4 Oblique externus หรือ External oblique

เป็นกล้ามเนื้อลำตัวด้านข้างตั้งต้นจากกระดูกซี่ที่ 4 -12 ทอดเฉียงจากบนมาล่าง ยึดเกาะที่ Iliac crest ของกระดูกเชิงกรานทำหน้าที่เหมือนกับกล้ามเนื้อ Rectus abdominis

#### 1.5 Serratus anterior

เป็นกล้ามเนื้อด้านในของรักแร้ อยู่ทางด้านข้างของอกมีรูปร่างเป็นแฉก ๆ ยึดติดกับกระดูกซี่โครงทางด้านหน้าไปยังกระดูกสะบัก ทำหน้าที่ยึดดึงกระดูกสะบักให้อยู่กับที่และช่วยการทำงานของกล้ามเนื้อ Deltoid เวลายกแขน

2. กล้ามเนื้อส่วนลำตัวด้านหลังใน ส่วนลำตัวด้านหลัง มีกล้ามเนื้อที่สำคัญดังนี้



รูปที่ 2.2.4 กล้ามเนื้อส่วนลำตัวด้านหลัง

## 2.1 Trapezius

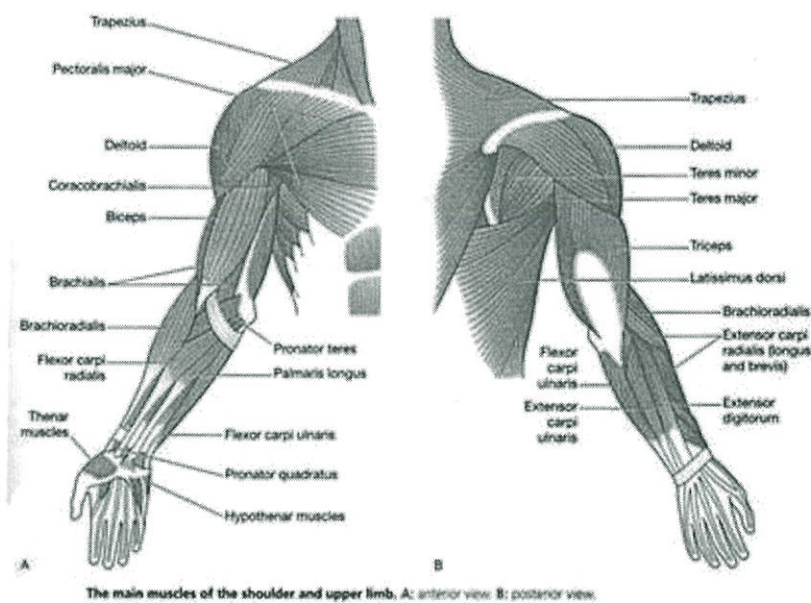
เป็นกล้ามเนื้อรูปสามเหลี่ยมคลุมบริเวณคอด้านหลังลงมาถึงหลังโดยยึดเกาะจากแนวกลางของแผ่นหลังส่วนบนไปเกาะที่กระดูกโหลบรา้งทั้งซ้ายและขวา ทำหน้าที่รั้งกระดูกสะบักมาข้างหลัง กล้ามเนื้อส่วนบนเมื่อหดตัวไหล่จะยกขึ้น ส่วนกลางหดตัวจะดึงสะบัก 2 ข้างเข้ามาหาส่วนกลางหดตัวจะทำให้ไหล่ถูกดึงลง

## 2.2 Latissimusdorsi

เป็นกล้ามเนื้อรูปสามเหลี่ยมแบนกว้าง คลุมอยู่ตอนล่างของแผ่นหลังและบั้นเอวทอดผ่านไปมุมล่างของกระดูกสะบัก ทำหน้าที่ดึงแขนเข้าชิดลำตัวดึง แขน ลงมาข้างล่าง ด้านหลังและหมุนแขนเข้าด้านใน กล้ามเนื้อนี้ใช้มากในการปีนป่าย ว่ายน้ำ และกรรเชียงเรือ จะหดตัวทันทีในขณะที่ยาม

## กล้ามเนื้อส่วนหัวไหล่และแขน (Muscle of the upper limb)

กล้ามเนื้อส่วนหัวไหล่และแขน (Muscle of the upper limb) ที่ช่วยในการทำงานของหัวไหล่และแขนที่สำคัญ คือ



รูปที่ 2.2.5 กล้ามเนื้อส่วนหัวไหล่และแขน

## 1. กล้ามเนื้อส่วนหัวไหล่

### 1.1 Deltoid

เป็นกล้ามเนื้อคลายขนนกหลาย ๆ อันมารวมกันเป็นมัดใหญ่หนารูปสามเหลี่ยมจุดเกาะอยู่ที่ไหปลาร้า และกระดูกสะบัก แล้วไปเกาะที่ตอนกลางของกระดูกต้นแขน ทำหน้าที่ยกไหล่และยกต้นแขน เป็นส่วนที่บ่งบอกลักษณะเพศชายได้อย่างชัดเจน

### 1.2 Supraspinatus

เริ่มเกาะจากกระดูกสะบักไปยังกระดูกต้นแขน ทำหน้าที่ช่วยกล้ามเนื้อ Deltoid ในการยก หรือกางแขน

### 1.3 Infraspinatus

เริ่มเกาะจากกระดูกสะบักไปยังกระดูกต้นแขน ทำหน้าที่หมุนต้นแขนออกด้านนอกและดึงแขนไปด้านหลัง

### 1.4 Teres minor และ Teres major

เกาะที่กระดูกสะบัก แล้วมาเกาะที่กระดูกต้นแขนโดย Teres minor ทำหน้าที่หมุนแขนออกด้านนอก Teres major ทำหน้าที่หมุนแขนเข้าด้านใน

### 1.5 Subscapularis

มีจุดเกาะที่กระดูกสะบักและกระดูกต้นแขน ทำหน้าที่หมุนต้นแขนเข้าด้านใน

## 2. กล้ามเนื้อแขนส่วนต้นที่สำคัญ ได้แก่

### 2.1 Biceps brachii

เป็นกล้ามเนื้อด้านหน้าของต้นแขน มีที่เกาะส่วนบนแยก 2 ทาง คือ เกาะจาก Coracoid process และ Supraglenoid tubercle ไปยัง Tuberosity ของกระดูกปลายแขนท่อนนอก (Radius) ทำหน้าที่งอต้นแขนและปลายแขน หมุนแขนเข้าและดึงออก

### 2.2 Brachialis

เป็นกล้ามเนื้อต้นแขนที่อยู่ตรงกลางค่อนข้างมาด้านล่าง เกาะจากกระดูกต้นแขนไปยัง Tuberosity ของกระดูกปลายแขนท่อนใน (Ulna) ทำหน้าที่งอข้อศอก

### 2.3 Coracobrachialis

เกาะจาก Coracoid process ของกระดูกสะบักไปยังกึ่งกลางของกระดูกต้นแขน ทำหน้าที่งอต้นแขน

### 2.4 Triceps brachii

เป็นกล้ามเนื้อด้านหลังของต้นแขน ปลายบนแยก 3 ทางเกาะที่กระดูกสะบักหนึ่งที และอีก 2 ทางเกาะที่กระดูกต้นแขน และมีจุดเกาะปลายที่กระดูกปลายแขนท่อนใน (Ulna) กล้ามเนื้อมัดนี้จะทำหน้าที่ตรงกันข้ามกับกล้ามเนื้อ Biceps brachii คือ ทำหน้าที่เหยียดปลายแขน

## 3. กล้ามเนื้อส่วนปลายแขน

### 3.1 Brachioradialis

เป็นกล้ามเนื้อด้านนอกของปลายแขน มีจุดเกาะต้นที่ตอนล่างของกระดูกแขน ไปเกาะที่ด้านนอกของกระดูกปลายแขนท่อนนอก (Radius) ทำหน้าที่งอปลายแขน

### 3.2 Flexor carpi radialis

เป็นกล้ามเนื้อที่อยู่ด้านหน้าของปลายแขน มีจุดเกาะที่กระดูกต้นแขนแล้วมาเกาะที่กระดูกฝ่ามือชิ้นที่ 2 และ 3 ทำหน้าที่งอข้อมือและกางมือ

### 3.3 Palmaris longus

เป็นกล้ามเนื้อที่อยู่ทางด้านหน้าของแขน จุดเกาะต้นเริ่มจากกระดูกต้นแขนไปยังกระดูกปลายแขน แล้วกลายเป็นเอ็น (Tendon) ไปเกาะที่ฝ่ามือทำหน้าที่งอข้อมือ

### 3.4 Flexor carpi ulnaris

เป็นกล้ามเนื้อที่อยู่ทางด้านหลังของกระดูกปลายแขนท่อนใน (Ulna) ผ่านมาที่ข้อมือ ทำหน้าที่งอข้อมือ

### 3.5 Extensor carpi radialis longus

เป็นกล้ามเนื้อที่มีจุดเกาะต้นจากกระดูกต้นแขนแล้วไปเกาะที่กระดูกฝ่ามือทางด้านหลัง ทำหน้าที่กางและเหยียดข้อมือ

### 3.6 Extensor digitorum

เป็นกล้ามเนื้อที่มีจุดเกาะต้นจากกระดูกต้นแขน และมีปลายเป็นเอ็น 4 อัน ไปเกาะยังกระดูกนิ้วมือทั้ง 4 นิ้ว ทำหน้าที่เหยียดนิ้วมือและข้อมือ

## 4. กล้ามเนื้อส่วนมือและนิ้ว

กล้ามเนื้อส่วนมือและนิ้วมือ เป็นกล้ามเนื้อขนาดเล็กและสั้น ส่วนมากจะเป็นเอ็นของกล้ามเนื้อซึ่งติดต่อมาจากแขนท่อนล่าง ทำหน้าที่ช่วยในการงอและเหยียดมือและข้อมือรวมทั้งช่วยให้นิ้วหัวแม่มือสามารถเคลื่อนไปแตะนิ้วอื่น ๆ ได้จึงเรียกว่า Opposition กล้ามเนื้อในกลุ่มนี้ที่สำคัญได้แก่

### 4.1 Thenar eminence

เป็นกล้ามเนื้อหัวแม่มือเกาะที่ฝ่ามือ โดยเฉพาะที่ได้ฐานหัวแม่มือจะเห็นเป็นเนินชัดเจน ทำหน้าที่งอนิ้วหัวแม่มือ

### 4.2 Hypothenar eminence

เป็นกล้ามเนื้อที่อยู่ใต้นิ้วก้อย มีรอยนูนเด่นชัด ทำหน้าที่งอนิ้วก้อย

### 4.3 Dorsal interosseous

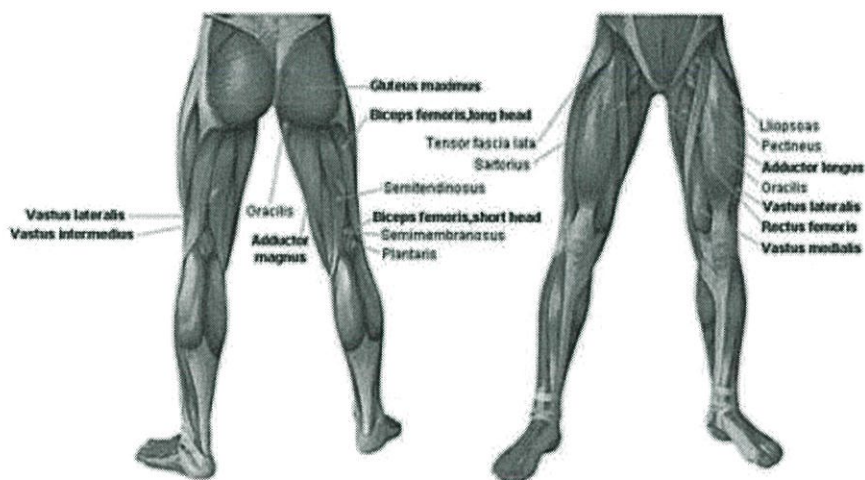
เป็นกล้ามเนื้อที่กระดูกฝ่ามือชั้นที่ 1 และ 2 ผ่านมาเกาะที่นิ้วชี้ ทำหน้าที่กางนิ้วชี้และหมุนหัวแม่มือ

### 4.4 Abductor pollicis

เกาะอยู่ที่ฐานของนิ้วหัวแม่มือ ทำหน้าที่งอนิ้วหัวแม่มือ

## กล้ามเนื้อส่วนสะโพกและขา (Muscle of the lower limb)

กล้ามเนื้อส่วนสะโพกและขา (Muscle of the lower limb) ที่สำคัญ ดังนี้



รูปที่ 2.2.6 กล้ามเนื้อส่วนสะโพกและขา

### 1. กล้ามเนื้อส่วนสะโพกและก้นกบ

#### 1.1 Gluteus maximus

เป็นกล้ามเนื้อมัดใหญ่ และหน้าที่สุดของส่วนสะโพก มีจุดเกาะที่ Ilium และ Sacrum ของกระดูกเชิงกราน แล้วไปเกาะยังกระดูกต้นขา ทำหน้าที่เหยียดขา กางต้นขา หมุนต้นขา ไปทางด้านข้าง

#### 1.2 Tensor fasciae latae

เป็นกล้ามเนื้อทางด้านข้างของสะโพก เกาะอยู่ที่ส่วนหน้าของกระดูกเชิงกรานทำหน้าที่กางและหมุนขาเข้าด้านใน

### 2. กล้ามเนื้อส่วนโคนขา

กล้ามเนื้อส่วนนี้แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ตามตำแหน่งหน้าที่ และประสาทที่มาเลี้ยง ด้านหลังของต้นขาเรียกว่า Flexor surface เป็นที่อยู่ของกล้ามเนื้อกลุ่มเอ็นหลังต้นขาด้านล่าง (Hamstring group) อีกกลุ่มหนึ่งคือ กล้ามเนื้อกลุ่มดิ่งข้อ (Adductor group) และยังมีกล้ามเนื้อกลุ่มด้านหน้าของต้นขา (Anterior group) กล้ามเนื้อส่วนโคนขามัดที่สำคัญ มีดังนี้

### 2.1 Biceps femoris

เป็นกล้ามเนื้อในกลุ่มเอ็นหลังต้นขาด้านล่าง จุดเกาะเริ่มจากกระดูก Ischium และกระดูกต้นขาไปยังส่วนหัวของกระดูกปลายขาท่อนเล็ก (Fibula) ทำหน้าที่เหยียดต้นขา และงอเข่า

### 2.2 Rectus femoris

เป็นกล้ามเนื้อในกลุ่มด้านหน้าของต้นขา (Anterior group) เป็นกล้ามเนื้อมัดใหญ่อยู่ทางด้านหน้าของต้นขา จุดเกาะเริ่มจากกระดูก Ilium ไปยังกระดูกปลายขาท่อนใหญ่ (Tibia) ทำหน้าที่งอต้นขาและเหยียดปลายขา

### 2.3 Satorius

เป็นกล้ามเนื้อในกลุ่มด้านหน้าของต้นขา มีลักษณะยาวแบนพาดเฉียงบนโคนขา จุดเกาะเริ่มจาก Iliac spine ไปยังส่วนบนของกระดูกปลายขาท่อนใหญ่ (Tibia) ทำหน้าที่งอต้นขา และปลายขา

## 3. กล้ามเนื้อส่วนปลายขา

กล้ามเนื้อส่วนปลายขาแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ กลุ่มด้านหน้าของปลายขา (Anterior compartment) กลุ่มด้านข้างของปลายขา (Lateral compartment) และกลุ่มด้านหลังของปลายขา (Posterior compartment) กล้ามเนื้อส่วนปลายขาที่สำคัญ ได้แก่

### 3.1 Tibialis anterior

เป็นกล้ามเนื้อในกลุ่มด้านหน้าของปลายขา เกาะจากด้านข้างของกระดูกปลายขาท่อนใหญ่ (Tibia) และจากผังผืด ซึ่งยึดระหว่างกระดูกปลายขาท่อนใหญ่และท่อนเล็ก และเกาะที่กระดูกฝ่าเท้าทำหน้าที่กระดกข้อเท้า และบิดข้อเท้าเข้าด้านใน

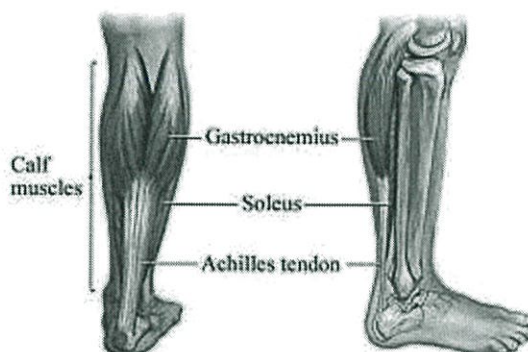
### 3.2 Gastrocnemius

เป็นกล้ามเนื้อในกลุ่มด้านหลังของปลายขา เป็นกล้ามเนื้อน่องเกาะจากส่วนปลายของกระดูกต้นขาทั้งสองด้าน ส่วนปลายกลายเป็นเอ็นเกาะที่กระดูกสันเท้า (Achilles tendon) ทำหน้าที่งอหลังเท้า เหยียดนิ้วเท้า ถีบฝ่าเท้าลงและช่วยงอเข่าด้วย

### 3.3 Soleus

เป็นกล้ามเนื้อใหญ่ รูปร่างคล้ายปลาอยู่ใน Gastrocnemius ทำหน้าที่งอฝ่าเท้า

#### 4. กล้ามเนื้อส่วนเท้า



รูปที่ 2.2.7 กล้ามเนื้อส่วนเท้า

เป็นกล้ามเนื้อที่เกาะคล้ายบริเวณมีข้อมือแตกต่างกันตรงที่เป็นกล้ามเนื้อที่ควบคุมสันเท้าระหว่างการเดิน กล้ามเนื้อส่วนเท้าที่สำคัญ มีดังนี้

##### 4.1 Flexor hallucis longus

เกาะจากด้านหลังของกระดูกช่วงล่าง ส่วนปลายเป็นเอ็นเกาะที่กระดูกหัวแม่เท้า ท่อนปลายทำหน้าที่อปลายนิ้วหัวแม่เท้า ทำหน้าที่กระดกข้อเท้าลง และบิดเท้าเข้าด้านใน

##### 4.2 Extensor digitorum brevis

เป็นกล้ามเนื้อด้านหลังเท้า ตรงปลายเป็นเอ็นไปเกาะที่นิ้วเท้าทั้ง 4 ยกเว้นนิ้วหัวแม่เท้า ทำหน้าที่เหยียดข้อของนิ้วเท้าทั้ง 4

##### 4.3 Adductor hallucis

เป็นกล้ามเนื้อที่อยู่ลึกสุด ทำหน้าที่เหยียดหัวแม่เท้า

##### 4.4 Flexor digitorum brevis

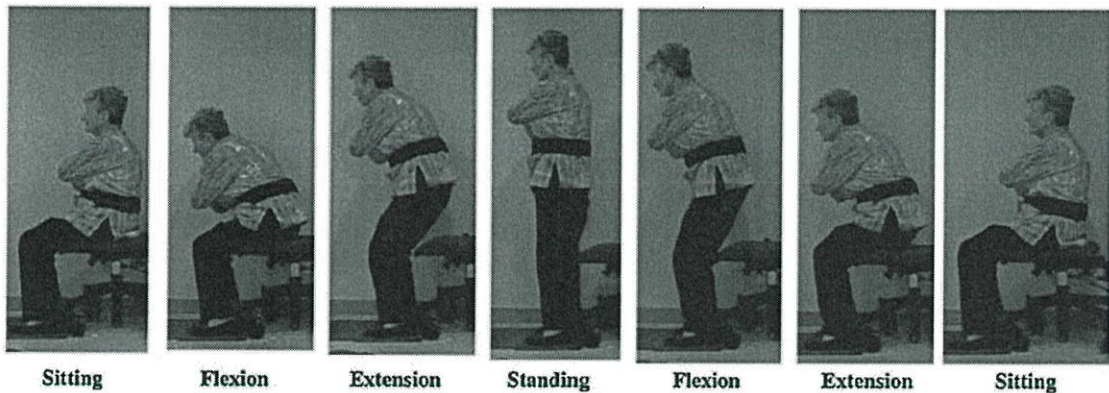
เป็นกล้ามเนื้อบริเวณอุ้งเท้า ทำหน้าที่ช่วยในการเคลื่อนไหว เป็นกล้ามเนื้อที่ควบคุมการเคลื่อนไหวของเท้าเวลาเดิน

### 2.3 Sit-to-Stand Movement

การลุกขึ้นยืนจากท่านั่งเป็นทักษะการเคลื่อนไหวพื้นฐานที่สำคัญในการทำกิจวัตรประจำวัน สามารถใช้บ่งชี้ถึงพัฒนาการในการช่วยเหลือตนเอง รวมไปถึงความสามารถด้านการเคลื่อนไหวและการทรงท่าได้ การลุกขึ้นยืนนั้นจุดศูนย์รวมมวลของร่างกายจะมีการเคลื่อนไหวไปในด้านหน้า (forward) และเคลื่อนขึ้นด้านบน (upward) ไปอยู่ในตำแหน่งที่สูงขึ้น นอกจากนี้การลุกขึ้นยืนยังเป็นการเปลี่ยนฐานรองรับน้ำหนักที่กว้างไปแคบ คือ จากสะโพก ต้นขา และเท้า ไปยังเท้าอย่างเดียว ซึ่งต้องอาศัยความแข็งแรง และความสามารถในการควบคุมการทรงตัว

โดยแบ่งเป็น 4 เฟสที่สำคัญ ดังนี้

- 1) Sitting
- 2) Flexion
- 3) Extension
- 4) Standing



รูปที่ 2.3.1 Main phases of Sit-to-Stand

## 2.4 Five Times Sit-to-Stand Test



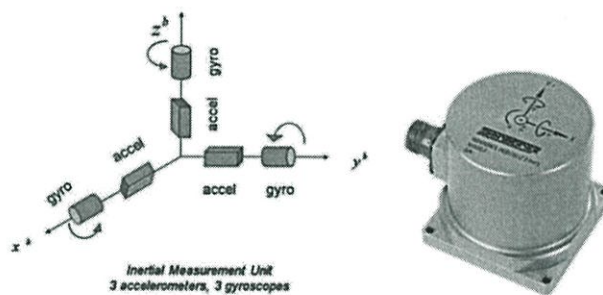
รูปที่ 2.4.1 การประเมิน Five Times Sit-to-Stand Test

การประเมิน Five Times Sit-to-Stand Test (FTSST) เป็นการประเมินโดยให้อาสาสมัครนั่งเก้าอี้ไม่มีที่พนักขนาดมาตรฐาน โดยมีความสูงของเบาะรองนั่ง 43 ซม. หลังตรง และวางเท้าอยู่หลังต่อข้อเข่าประมาณ 10 ซม. วางแขนข้างลำตัว จากนั้นให้อาสาสมัครลุกขึ้นยืนจากเก้าอี้จำนวน 5 ครั้งโดยเร็วที่สุดและปลอดภัย ผู้ประเมินเริ่มจับเวลา เมื่อกล่าวคำว่า “เริ่ม” และหยุดเวลาเมื่ออาสาสมัครกลับลงนั่งในครั้งที่ห้า หลังขีดพนักพิงขณะทำการทดสอบ อาสาสมัครต้องผูกสายรัดเอว (safety belt) และไม่ใส่รองเท้าเพื่อลดผลกระทบจากลักษณะของรองเท้าที่สวมใส่และความเสี่ยงต่อการล้ม โดยมีนักกายภาพบำบัดคอยอยู่หรือเดินตามด้านข้างอาสาสมัครตลอดเวลาที่ทำการทดสอบ เพื่อคอยระวังความปลอดภัยและให้ความช่วยเหลืออาสาสมัครตามความจำเป็นโดยไม่ขัดขวางการทดสอบ โดยระหว่างการทดสอบอาสาสมัครสามารถพักได้ตามต้องการหรือจนกว่าจะหายเหนื่อย

การประเมิน FTSST นี้เป็นการทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือสูงในการทำนายอัตราเสี่ยงของการล้มในผู้สูงอายุและประเมินความสามารถในการทรงท่าของผู้ป่วยที่มีความบกพร่องด้านการทรงท่าได้

## 2.5 IMU (Inertial Measurement Unit)

เป็นระบบหนึ่ง ซึ่งบรรจุในระบบนำหนด้วยแรงเฉื่อย (Inertial Navigation System : INS) มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ เครื่องวัดความเร็ว ซึ่งวัดทั้งความเร็วเชิงมุม และความเร็วเชิงเส้น (สำหรับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง) และ ไจโรสโคป (เพื่อรักษาให้อยู่ในแนวอ้างอิงที่ถูกต้อง) ซึ่งโดยปกติจะต้องมี sensor ตรวจวัดอย่างน้อยหนึ่งตัวในแต่ละแนวแกน ลักษณะการออกแบบโดยทั่วไป IMU จะมีลักษณะเป็นกล่อง ภายในบรรจุเครื่องวัดความเร็ว 3 ตัว และ ไจโรสโคป อีก 3 ตัว เครื่องวัดความเร็วจะถูกติดตั้งเข้าไปในแต่ละแนวแกนที่ต้องการวัดโดยที่แต่ละแนวแกนตั้งฉากกัน ไจโรสโคปอีก 3 ตัวจะถูกติดตั้งในลักษณะตั้งฉากเช่นเดียวกัน ทำการวัดอาการหมุน ที่เบี่ยงเบนไปจากแนวอ้างอิงในระบบพิกัดที่กำหนดไว้ จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่าเซนเซอร์ตรวจวัดหลักๆของระบบ IMU เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดความเร็ว และ เซนเซอร์สำหรับตรวจวัดอาการเอียงในแนวแกนต่างๆ ซึ่งก็คือ เครื่องวัดความเร็ว (Accelerometer) และไจโรสโคป(Gyroscope)



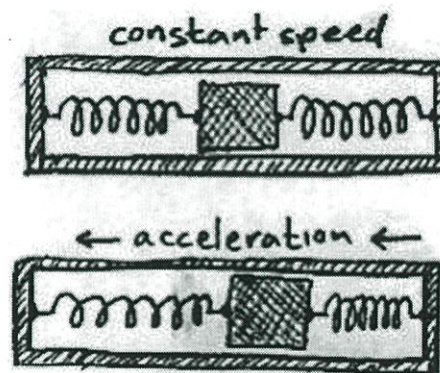
รูปที่ 2.5.1 ส่วนประกอบและลักษณะของ IMU

## 2.6 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

ในปัจจุบันอุปกรณ์ Sensor ต่างๆ เริ่มมีการติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ทั่วไป เช่น GPS ในรถยนต์ หรือโมดูล GPRS ใช้ทำโทรศัพท์ หรือว่าจะเป็น Ultrasonic ที่ใช้ทำ sensor จับวัตถุที่ท้ายรถยนต์ มี Sensor ชนิดหนึ่ง ที่ใช้วัดความเอียง นั่นก็คือ Accelerometer และ Gyroscope

### 1.1 หลักการทำงานโดยทั่วไปของ Accelerometer

หากแปลตามตัวอักษรแล้ว Accelerometer มาจาก Acceleration + Meter หรือมิเตอร์ ความเร่ง ตามนิยามก็คือ Sensor วัดความเร่งเพิ่มขึ้น หรือลดลง (ในหน่วย  $m/s^2$ ) ตย. ความเร่งของแรงโน้มถ่วงก็คือ  $9.8 m/s^2$  หรือ  $a$  (มาจาก Acceleration) นั่นเอง



รูปที่ 2.6.1 หลักการของ Accelerometer

โดย หลักการทำงาน ให้นึกถึงห้องสี่เหลี่ยมเล็กๆ ที่ทุกด้านของกำแพงจะมีสปริงติดอยู่ เวลาที่ห้องนี้เอียงไปทางใดทางหนึ่ง สปริงก็จะยุบไปด้านนั้นๆ โดยสมมติว่าแรงดันของสปริงมีน้อยกว่าแรงโน้มถ่วงของโลก และใช้วงจรไฟฟ้าในการดึง Output Analog ออกมาใช้งาน (หรือ Output Digital ซึ่งก็แล้วแต่ตัว Sensor เอง)

เราจะใช้ Accelerometer สำหรับเป็นตัวชี้ว่าอยู่ในสถานะ Static (นิ่งเฉย) หรือ Dynamic (เคลื่อนไหวทันทีทันใด หรือหยุดทันทีทันใด) นั่นทำให้ Accelerometer เป็น sensor สำหรับบอกสถานะการเอียงได้เป็นอย่างดี (Tilt Sensor) Sensor ยกตัวอย่างเช่นในโทรศัพท์สมาร์ทโฟนในปัจจุบัน ก่อนอื่นต้องทำความเข้าใจในเรื่องของอัตราเร่งกันก่อน

อัตราเร่งและการตรวจวัดอัตราเร่ง

อัตราเร่ง คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเทียบกับเวลา เครื่องมือที่ใช้วัดอัตราเร่งก็คือ มิเตอร์วัดอัตราเร่ง หรือ แอ็กเซเลอโรมิเตอร์ (accelerometer) โดยที่สามารถแบ่งลักษณะการตรวจวัดได้ 2 ลักษณะ

1. การตรวจวัดการช็อก (shock) และการสั่นสะเทือน (vibration) ซึ่งการช็อก คือ อัตราเร่งขนาดมหึมาที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ \*การสั่นสะเทือน คือ อัตราเร่งขนาดเล็กที่เกิดขึ้นซ้ำกันไปเรื่อยๆ

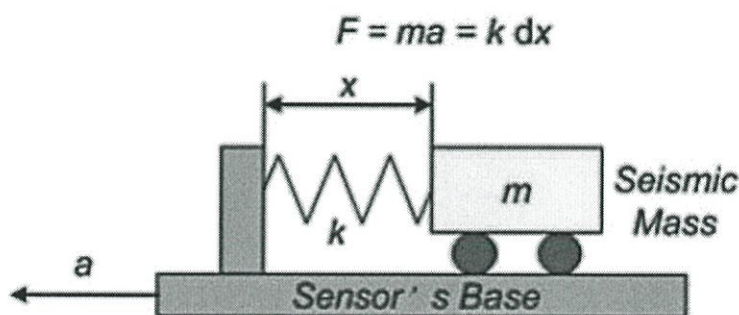
2. การตรวจวัดอัตราเร่งของวัตถุ เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการระบุตำแหน่ง ความเร็ว และระยะทางที่ได้จากการเคลื่อนที่

## 1.2 ประเภทของมิเตอร์วัดความเร่ง

โดยหลักๆแล้วจะแบ่งเป็น 2 ชนิด

### 1.2.1 มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซสมิกแมส (seismic mass accelerometer)

มิเตอร์ชนิดนี้อาศัยหลักการตรวจวัดระยะขจัดเชิงเส้นแล้วนำไปคำนวณหาอัตราเร่งที่เกิดขึ้น โดยเทคนิคดังกล่าวสามารถอธิบายง่ายๆ ได้ก็คือ วัตถุชิ้นหนึ่งจะมีความเร่งได้ ก็จะต้องมีแรงกระทำที่ยิ่งมีแรงกระทำมาก ก็จะมีมีความเร่งมาก ในขณะที่เดียวกันแรงต้านการเคลื่อนที่ก็จะมากด้วย นอกจากนี้เมื่อมีแรงมาทำให้วัตถุ เกิดการเคลื่อนที่ ก็จะมีระยะขจัด ซึ่งก็จะแปรผันตรงกับแรงที่กระทำที่วัตถุ ยิ่งแรงมากระยะขจัดยิ่งมาก จากความสัมพันธ์ดังกล่าวได้นำไป ใช้เป็นหลักการพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซสมิกแมสในการตรวจวัดอัตรา เร่งของวัตถุในเทอมของระยะขจัดที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.6.2 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบไซสมิกแมส

โครงสร้างนี้มีมวล  $m$  ที่เรียกว่ามวลตรวจการสั่นไหว (seismic mass) ยึดติดอยู่กับสปริงที่มีค่า spring constant เท่ากับ  $k$  และมวลนี้สามารถเคลื่อนที่ในแนวระดับได้ซึ่งหลักการทำงานก็ง่าย ๆ ไม่ได้ซับซ้อนอะไร เมื่อตัวเซนเซอร์ตัวนี้ถูกทำให้มีอัตราเร่งเกิดขึ้นจะส่งผลให้มวล  $m$  เคลื่อนที่ ซึ่งระยะที่เคลื่อนที่ออกไปจะเป็นระยะขจัดเท่ากับ  $x$  และมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของตัวมิเตอร์ ดังนั้นอัตราเร่ง  $a$  ของวัตถุสามารถคำนวณหาค่าได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$a = xk/m \text{ โดยที่}$$

$a$  คือ อัตราเร่งของวัตถุ หน่วย เมตร/วินาที

$x$  คือ ระยะขจัดของมวล  $m$  หน่วย เมตร

$k$  คือ ค่าคงที่ของสปริง หน่วย นิวตัน/เมตร

$m$  คือ น้ำหนักของมวล  $m$  หน่วย กิโลกรัม

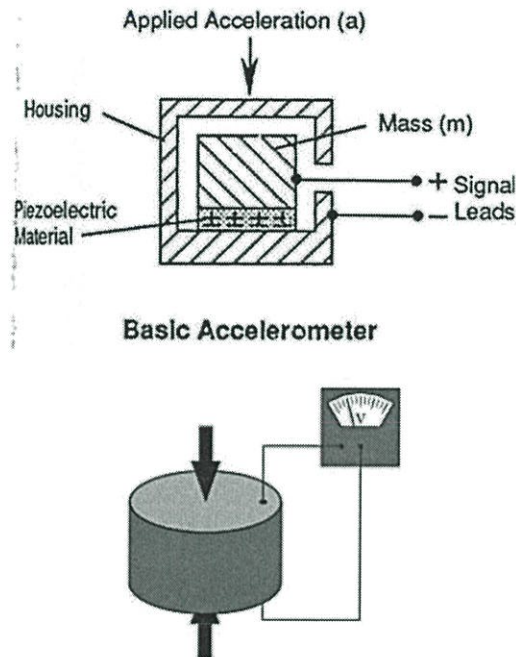
จากสมการดังกล่าวจะแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ระยะขจัดของมวล  $m$  มีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เมื่ออัตราเร่งของวัตถุมีค่าลดลง ทำให้มวล  $m$  เคลื่อนที่ไปดันสปริง เมื่ออัตราเร่งของวัตถุหยุดลง ก็จะทำให้มวล  $m$  เคลื่อนที่กลับมาอยู่ตำแหน่งเดิม (ตำแหน่งอ้างอิง) แต่ในทางปฏิบัติเราสามารถวัดระยะขจัดของมวล  $m$  ได้โดยอาศัยมิเตอร์อีกชนิดหนึ่ง คือ มิเตอร์วัด ระยะขจัดเชิงเส้น (LVDT, potentiometer) ส่วนการวิเคราะห์หาค่าอัตราเร่งที่เกิดขึ้นเราสามารถคำนวณหาได้โดยใช้คอมพิวเตอร์

มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบโซไซมิกแมส นี้จะนิยมใช้ในการตรวจวัดลักษณะการช็อกและลักษณะ การสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่ำมากๆ เช่น ในเครื่องมือตรวจวัดแผ่นดินไหว หรือในเครื่องมือตรวจวัด การปะทุใต้ดินของภูเขาไฟ ฯลฯ

### 1.2.2 มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer)

คุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของผลึกเพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric crystal) ถูกค้นพบโดย Pierre และ Jacques Curie ในราวปี ค.ศ.1880 ซึ่ง piezoelectric crystal นี้มีคุณสมบัติพิเศษคือ เมื่อถูกแรงทางกลมากระทำ จะสร้างประจุไฟฟ้าขึ้นมา โดยเป็นส่วนเดียวกับแรงกระทำนั้น ซึ่งจากคุณสมบัติพิเศษนี้ได้ถูกดัดแปลงนำไปใช้สร้างอุปกรณ์ต่างๆ มากมาย เช่น ใช้เป็นแบตเตอรี่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับนาฬิกาข้อมือดิจิตอลที่เราใช้ทั่วไป และยังใช้สร้างมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกอีกด้วย โครงสร้างของมิเตอร์วัดอัตราเร่ง แบบเพียโซอิเล็กทริกจะประกอบด้วย seismic mass ยึด

ติดกับ piezoelectric crystal และบรรจุอยู่ในตัวถังป้องกัน โดย piezoelectric crystal ที่นิยมนำมาใช้งาน ได้แก่ ผลึกควอตซ์ และผลึกโซเดียมโพแทสเซียมตาเตรต (sodium potassium tartrate) เพราะมีความทนทานต่อแรงกระทำ และราคาไม่แพงมากนัก

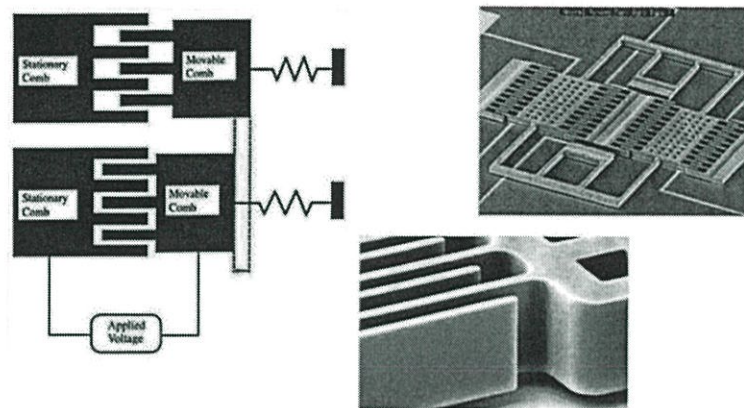


รูปที่ 2.6.3 โครงสร้างพื้นฐานของมิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบ piezoelectric

สามารถอธิบายการทำงานง่ายๆ ได้ดังนี้เมื่อ seismic mass ( $m$ ) ถูกทำให้เกิดอัตราเร่งขึ้น (ถูกกด) มันจะส่งผ่านแรงกดไปกระทำกับ piezoelectric crystal ที่ถูกยึดติดอยู่ด้วยกัน ด้วยคุณสมบัติพิเศษของมันจะทำให้ประจุไฟฟ้าถูกสร้างขึ้น และถูกสายนำสัญญาณออกไปยังเอาต์พุตของวงจร โดยที่ด้านเอาต์พุตจะต้องมีวงจร ขยายประจุไฟฟ้า (charge amplifier) เพื่อขยายค่าประจุไฟฟ้าที่ได้ให้เป็นแรงดันเอาต์พุตตามสัดส่วนของอัตราเร่ง ที่เกิด จะได้สามารถแสดงผลได้ด้วยโวลต์มิเตอร์ มิเตอร์วัดอัตราเร่งแบบเพียโซอิเล็กทริกตอบสนองต่อทางด้านความถี่สูงได้ดีแต่ในทางกลับกันก็จะมีผล ตอบสนองทางด้านความถี่ต่ำที่ไม่ดีนัก มีขนาดค่อนข้างเล็ก น้ำหนักเบา และสามารถใช้งานที่มีอัตราเร่งได้สูงถึง  $250,000 \text{ m.s}^{-2}$  ส่วนการประยุกต์ใช้งานที่น่าสนใจและกำลังเป็นที่นิยมอยู่ในขณะนี้เห็นจะเป็นเทคโนโลยี ทัชสกรีน (Touch Screen) ที่ใช้ accelerometer ตรวจจับ การเคลื่อนไหวนิ้วมือของผู้ใช้ เวลาเราใช้นิ้วลากเร็วๆ มิเตอร์วัดความเร่งจะจับความเร่งที่นิ้วเราเคลื่อนไหวแล้วสั่งให้หน้าจอเลื่อนไปตามความเร่งนั้น ถ้าเราเลื่อนนิ้วเร็วหน้าจอก็เลื่อนเร็ว แต่ถ้าเลื่อนนิ้วช้าหน้าจอก็จะค่อยๆเลื่อนไป

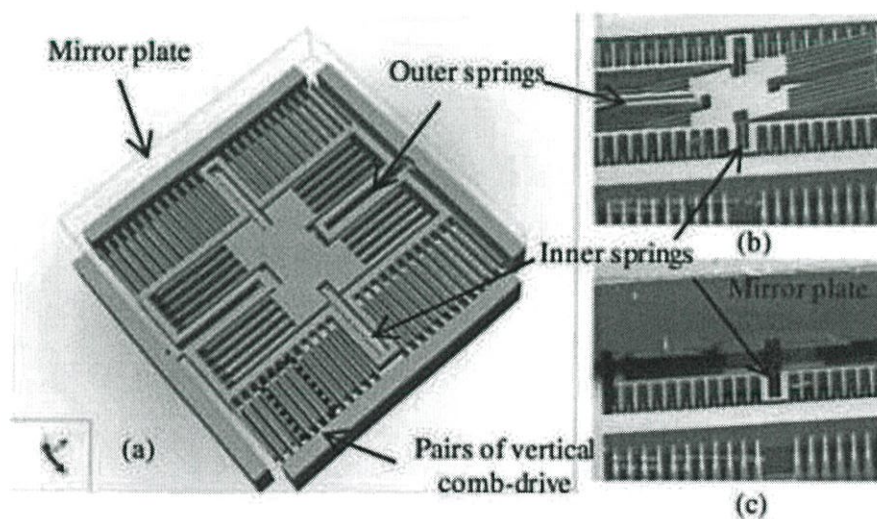
### 1.3 การนำเซนเซอร์วัดความเร่งมาประยุกต์ใช้งาน

1) ในระบบถ่วงมวลนิรภัยในรถยนต์ถ่วงมวลนิรภัยนั้นจะใช้เซนเซอร์จับการเคลื่อนไหวด้วยความเร่งที่กำหนดไว้ในช่วงๆหนึ่ง ซึ่ง accelerometer นี้จะทำจากซิลิกอนรูปร่างเหมือนหวีสับหว่างกันสองอัน (เรียกว่า Comb drive เล็กมากต้องส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์)



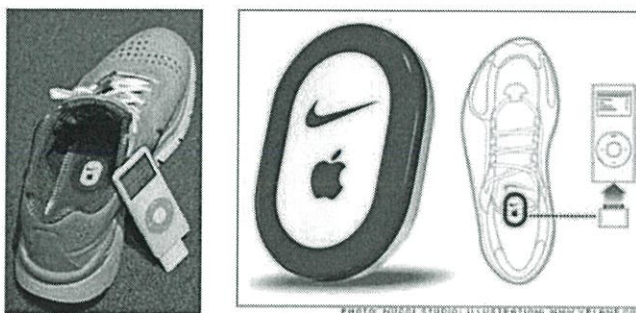
รูปที่ 2.6.4 เซนเซอร์จับการเคลื่อนไหวด้วยความเร่งที่ใช้ในรถยนต์

ซึ่ง comb drive นี้จะเคลื่อนเข้าหาและออกจากกันตามความเร็วที่คงที่และทำหน้าที่เป็นตัวเก็บประจุ เมื่อเอาหวีนี้ไปติดไว้กับรถ เวลารถเคลื่อนที่ในแนวราบ ไม่ว่าจะความเร็วใดๆ ก็ตามมันจะทำงานปกติ แต่ถ้าเกิดการกระแทกหรือรถคว่ำหวีนี้จะไม่เคลื่อนเข้าออกอย่างเดี๋ยวยีกแล้วแต่จะแกว่งขึ้นลงด้วยทำให้ประจุไฟฟ้าระหว่างหวีทั้งสองเปลี่ยนแปลงไปหรือเกิดการช็อตเซนเซอร์ จะรีพอร์ตให้ปล่อยถ่วงออกมา



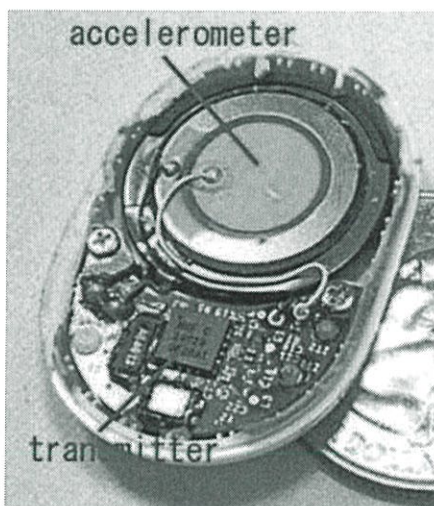
รูปที่ 2.6.5 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงในเซนเซอร์เมื่อเกิดการกระแทก

2) ในอุปกรณ์วัดระยะทางและความเร็วในขณะวิ่ง (ที่ Nike ทำร่วมกับ iPod)



รูปที่ 2.6.6 การนำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์กีฬา

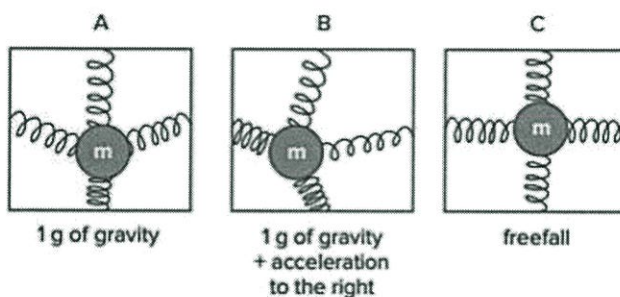
อุปกรณ์ตัวนี้ที่เห็นในภาพสีส้มคือ piezoelectric accelerometer ซึ่งเมื่อแกว่งออกมาหน้าตาก็จะ เป็นดังภาพด้านล่าง



รูปที่ 2.6.7 piezoelectric accelerometer ที่ติดในรองเท้า

ในการใช้งานผู้ใช้จะต้องมีเซนเซอร์ตัวนี้ใส่ไว้ตรงพื้นรองเท้า (Nike ทำช่องไว้ให้ใส่) ทุกครั้งที่มีการวิ่ง ในช่วงที่เท้าตกลงบนพื้นรองเท้านี้จะไปกด piezoelectric crystal ด้วย จะทำให้มี ประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น เซนเซอร์ก็จะรีพอร์ทไปที่ Transmitter เพื่อส่งสัญญาณกระแสไฟฟ้าไปที่ receiver ที่ต่อกับ iPod แล้วแสดงผลออกมาทางมอนิเตอร์ของ iPod โดยการส่งสัญญาณจาก ตัวเซนเซอร์ไปที่ iPod จะ ใช้คลื่นวิทยุที่มีความถี่ 2.4 GHz ซึ่งจะไม่รบกวนอุปกรณ์สื่อสารพวก โทรศัพท์มือถือ wireless หรือแม้กระทั่งบนเครื่องบิน

3) สมาร์ทโฟนทั่วไป เช่น iPhone ตัวอย่างการใช้งานเช่น การเขย่าเพื่อเปลี่ยนเพลง หรือ การเขย่าตัวเครื่องเพื่อใช้ในการควบคุมการเล่นเกมนั้น ล้วนเป็นคุณสมบัติของ accelerometer ที่ติดตั้งในเครื่องโครงสร้างของ accelerometer จะประกอบด้วยสปริงและลูกตุ้มน้ำหนัก เมื่อมีการเคลื่อนที่ ด้วยความเร่งลูกตุ้มน้ำหนักจะถูกกดไปอีกฝั่งตรงข้ามกับ การเคลื่อนที่ สปริงก็ทำหน้าที่ดึงกลับเข้าที่ อีกครั้งเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่คือความเร่งเท่ากับศูนย์ค่าที่วัดได้ก็จะไม่ เปลี่ยนแปลง accelerometer ที่อยู่ในมือถือเป็นชิพซิลิคอนเล็กๆที่เรียกว่า MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) การทำงานจะมีหลักการคล้ายๆกับการนำลูกเหล็กมาผูกกับสปริงไว้ภาพด้านล่าง



รูปที่ 2.6.8 หลักการทำงานของ accelerometer ในสมาร์ทโฟน

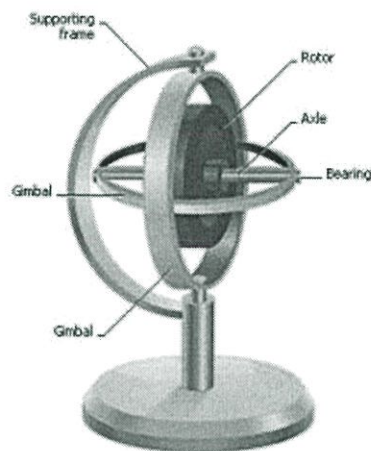
ภาพ A : เมื่อเราวางมือถือเราไว้เฉยๆ บนโต๊ะ ก็มีแรงดึงดูดของโลกกระทำต่อมือถือของเราเพียงอย่างเดียว

ภาพ B : เมื่อเราแกว่งมือถือไปทางขวา ก็จะมี ความเร่งไปทางขวาและค่าแรงดึงดูดของโลกกระทำพร้อมกัน

ภาพ C : เมื่อเราปล่อยมือถือตกแบบ freefall ก็จะไม่มีความเร่งใดๆ มากระทำ

## 2.7 เครื่องวัดสภาพการเอียง (Gyroscope)

ไจโรสโคปเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยความเฉื่อยของล้อหมุน เพื่อช่วยรักษาทิศทางของแกนหมุน ประกอบด้วยล้อหมุนเร็วบรรจุอยู่ในกรอบอีกทีหนึ่ง ทำให้เอียงในทิศทางต่าง ๆ ได้โดยอิสระ โดยจะชี้ทิศทางเดิมถ้าไม่มีทอร์กมากระทำ นำเอามาใช้สำหรับตรวจเช็คสภาพการเอียง ของวัตถุที่ติดตั้งตัวมันอยู่ เช่น เครื่องบิน เรือ หุ่นยนต์ จรวด จานดาวเทียม ซึ่งของเหล่านี้ล้วนแต่ต้องการที่จะทราบสถานะ ความสมดุลของมันอยู่ตลอดเวลา



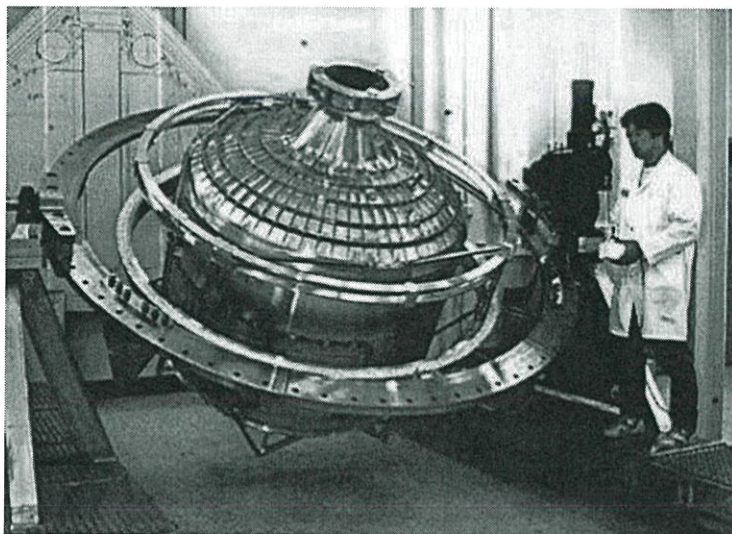
รูปที่ 2.7.1 ส่วนประกอบพื้นฐานของไจโรสโคป

Gyroscope ได้กำเนิดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1852 โดย นักวิทยาศาสตร์ ชาวฝรั่งเศสที่ชื่อ ฌอง โบนาปาร์ต เลอง ฟูโกสต์ ( Leon Foucault) ได้คิดประดิษฐ์ ล้อที่ติดตั้ง อยู่ในวงแหวนที่หมุนได้เมื่อหมุนล้อหรือโรเตอร์แล้วเจ้าล้อมันจะหมุนในทิศทางเดิมของมันในอากาศ โดยไม่ขึ้นกับการเอียงไปเอียงมาของกรอบหรือวงแหวนที่ล้อมรอบมัน ซึ่งเค้าได้ตั้งชื่อ อุปกรณ์ตัวนี้ว่า Gyroscope ซึ่งจากคุณสมบัติในข้อนี้เอง ทำให้ มันสามารถที่จะเป็นเครื่องบ่งชี้ทิศทางได้นั่นเอง

ไจโรสโคปนั้นมีประโยชน์อย่างมากมาใช้ในการใช้ไจโรสโคปครั้งแรกนั้น เกิดขึ้น ในปี ค.ศ. 1910 ได้นำไปติดตั้งในเรือรบของเยอรมนี ต่อมาในปี ค.ศ. 1909 นายเอลเมอร์ เอ. สเปนอร์รี่ (Elmer A. Sperry) ได้สร้างเครื่องบินที่บินอัตโนมัติ ที่ใช้คุณสมบัติการรักษาทิศทาง ของไจโรสโคปเพื่อให้เครื่องบิน บินได้ตรงทิศทาง

สำหรับการติดตั้งบนเรือนั้นเริ่มขึ้นในปี ค.ศ.1915 บริษัท อันซิซซ ตั้งอยู่ที่ เมืองคิล ประเทศเยอรมนี ได้ติดตั้งบนเรือโดยสาร ของเดนมาร์ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เอาไว้อักษา เสถียรภาพการของเรือ เพื่อให้ลดการโคลง ของเรือ ซึ่งทำให้สินค้ามีความเสียหายน้อยลง และทำให้ผู้โดยสารรู้สึกสบายขึ้น

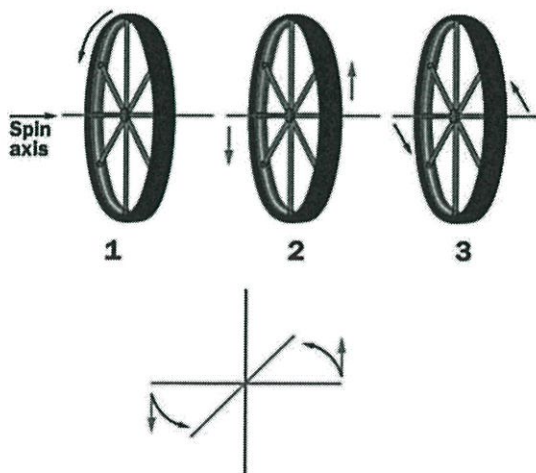
ซึ่งระบบตรงนี้ เรียกว่า Gyrostabilizer แต่ใช้วิธีนี้มีข้อเสียมากมาย คือ เรือนั้นมีน้ำหนักมาก และเสียเนื้อที่มาก เพราะต้องสร้างไจโรสโคปขนาดใหญ่



รูปที่ 2.7.2 Gyrostabilizer

ต่อมาในปี 1916 มีผู้นำหลักการของไจโรสโคปนี้ไปทำอุปกรณ์ที่เรียกว่า ขอบฟ้าประดิษฐ์ เพื่อใช้ในเครื่องบินสำหรับบอก ระดับการโคลงเคลง ไปซ้ายขวา หน้าหลัง ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่ง ในเวลาที่สภาพอากาศไม่ดีเวลาที่มองไม่เห็นขอบฟ้า หลังจากนั้นวิศวกรก็ได้มีการนำไจโรสโคปไปใช้ อย่างมากมายแพร่หลาย เช่น นำไปใช้กับจรวดนำวิถีเพื่อบังคับทิศทางโดยอัตโนมัติ หรือนำไปใช้ในเครื่องบิน เป็นต้น

## 2.1 หลักการทำงานของไจโรสโคป



รูปที่ 2.7.3 หลักการทำงานพื้นฐานของไจโรสโคป

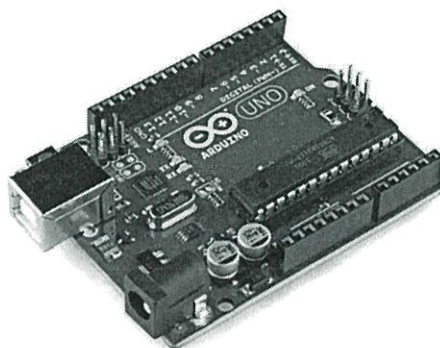
จากภาพ ล้อที่แขวนไว้อยู่บนเชือกนั้นเมื่อยังไม่ได้หมุนล้อ จะทำให้ล้อที่แขวนอยู่นั้นห้อยลงตามลักษณะที่ผูกเชือกไว้ แต่เมื่อทำการหมุนล้อแล้ว จะทำให้ล้อสามารถตั้งได้ดูเหมือนกับอยู่ในสภาวะไร้น้ำหนักทั้งนี้เป็นการทำงานของ Gyroscope นั้น จะเป็นไปตามกฎ ของนิวตันคือมวลจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่ ถ้าไม่มีแรงภายนอกมากระทำ เมื่อตัวโรหมุนไป 90 องศา จุดบนจะหมุนเปลี่ยนตำแหน่งไป 90 องศา และยังเคลื่อนที่ไปทางซ้าย เช่นเดียวกับจุดล่าง เมื่อหมุนขึ้นมา 90 องศา มันยังคงเคลื่อนที่ไปทางขวา ทำให้ล้อเกิดการหมุนควง ขณะที่จุดบนและจุดล่างเปลี่ยนตำแหน่งไป 90 องศา การเคลื่อนที่ในครั้งแรก จะถูกยกเลิกไป ไม่เกิดการพลิกของล้อ ดังนั้นแกนหมุนของโรจะเหมือนกับห้อยอยู่กับที่ตลอดเวลา

ดังนั้นเมื่อเอาคุณสมบัติแบบนี้ไปสร้าง อุปกรณ์วัดระดับเราก็จะสามารถรู้ได้เลยว่าอุปกรณ์ที่ติดตั้ง Gyro มันเอียงไปจากเดิมเท่าไร ซึ่งเมื่อ โรเตอร์หมุนแล้ว มันก็จะคงตำแหน่งอยู่แบบนั้น กรอบที่เป็นแหวนซึ่งอยู่ล้อมรอบเมื่อเราได้ติดตั้งตัววัดระยะ วัดการหมุนก็สามารถเชื่อมุมที่เปลี่ยนไปได้เลย ในปัจจุบันก็มีโรสโคปขายอยู่อย่างมากมาย ซึ่งมีขนาดเล็ก และยังสามารถใช้งานง่ายอีกด้วย

## 2.8 Arduino

Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือ มีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัว บอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอด ทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย

ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจร อิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด (ดูตัวอย่างรูปที่ 1) หรือเพื่อความ สะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ (ดูตัวอย่างรูปที่ 2) เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรม พัฒนาต่อได้เลย

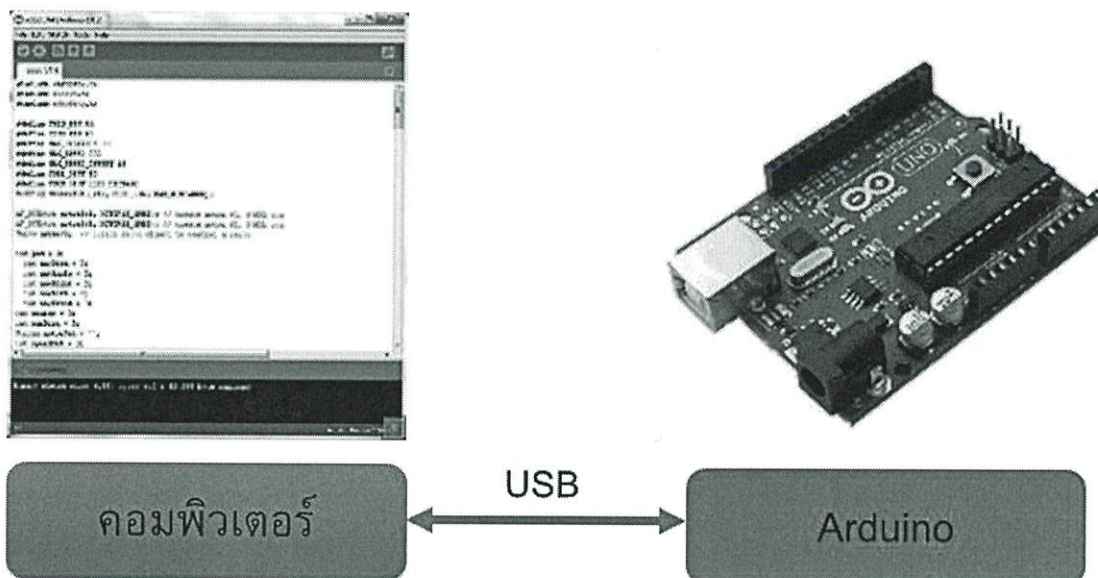


รูปที่ 2.8.1 บอร์ด Arduino

### จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม

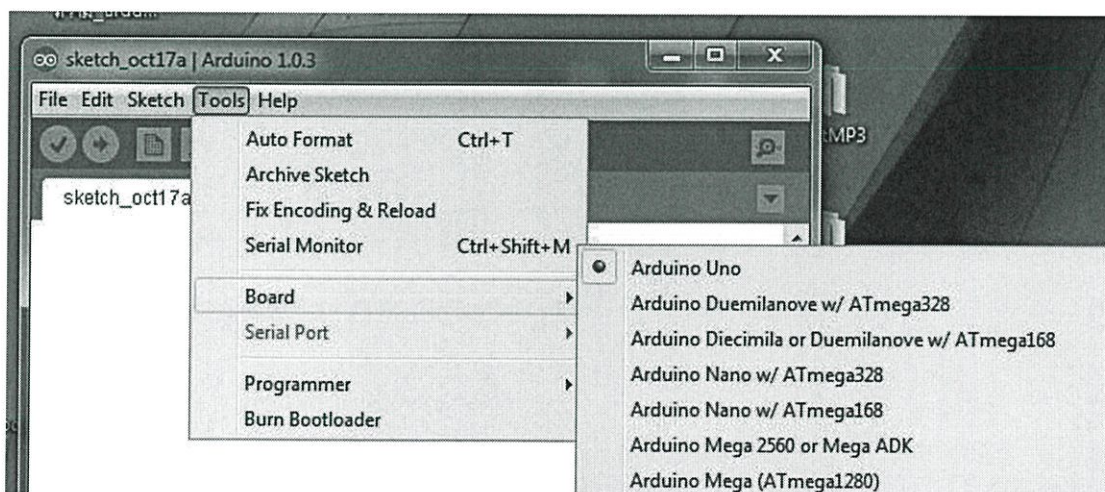
- ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
  - มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแรง
  - Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- ราคาไม่แพง
- Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

## รูปแบบการเขียนโปรแกรมบน Arduino

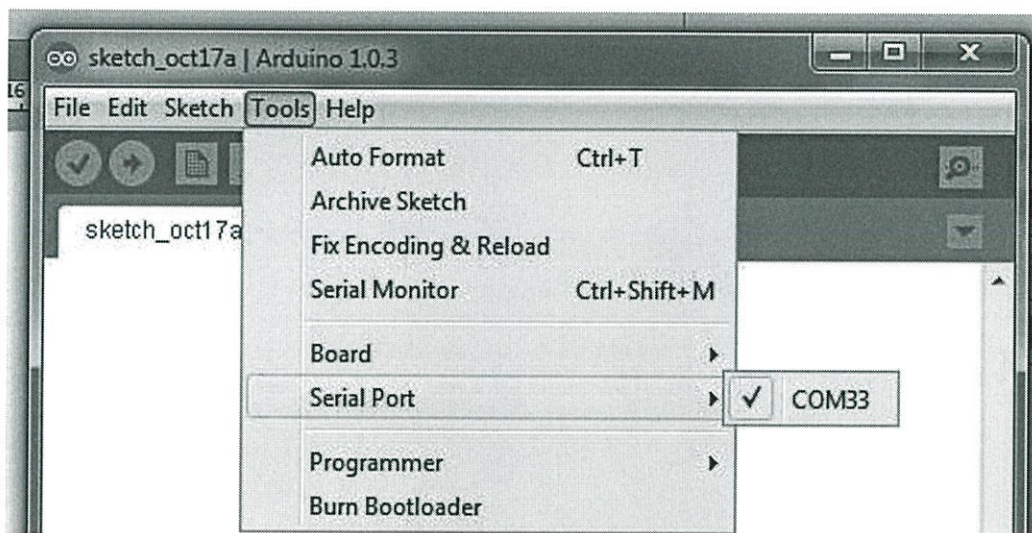


รูปที่ 2.8.2 บอร์ด Arduino ที่ต่อเชื่อมกับคอมพิวเตอร์ผ่าน USB

1. เขียนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ ผ่านทางโปรแกรม ArduinoIDE ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก [Arduino.cc/en/main/software](http://Arduino.cc/en/main/software)
2. หลังจากเขียนโค้ดโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้ใช้งานเลือกรุ่นบอร์ด Arduino ที่ใช้และหมายเลข Com port

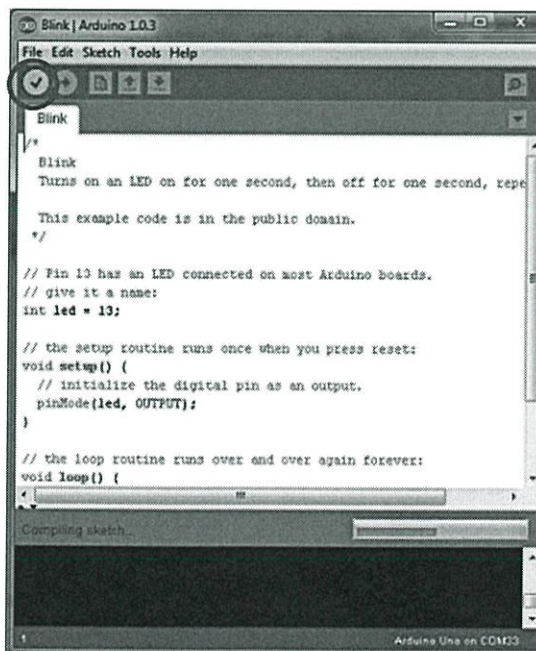


รูปที่ 2.8.3 เลือกุ่นบอร์ด Arduino ที่ต้องการ upload



รูปที่ 2.8.4 เลือกหมายเลข Comport ของบอร์ด

3. กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม จากนั้นกดปุ่ม Upload โค้ด โปรแกรมไปยังบอร์ด Arduino ผ่านทางสาย USB เมื่ออัปโหลดเรียบร้อยแล้ว จะแสดงข้อความ แถบข้างล่าง “Done uploading” และบอร์ดจะเริ่มทำงานตามที่เขียนโปรแกรมไว้ได้ทันที



รูปที่ 2.8.5 กดปุ่ม Verify เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและ Compile โค้ดโปรแกรม

```

Blink
/*
  Blink
  Turns on an LED on for one second, then off for one second, repeats.

  This example code is in the public domain.
  */

// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.
// give it a name:
int led = 13;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(led, OUTPUT);
}

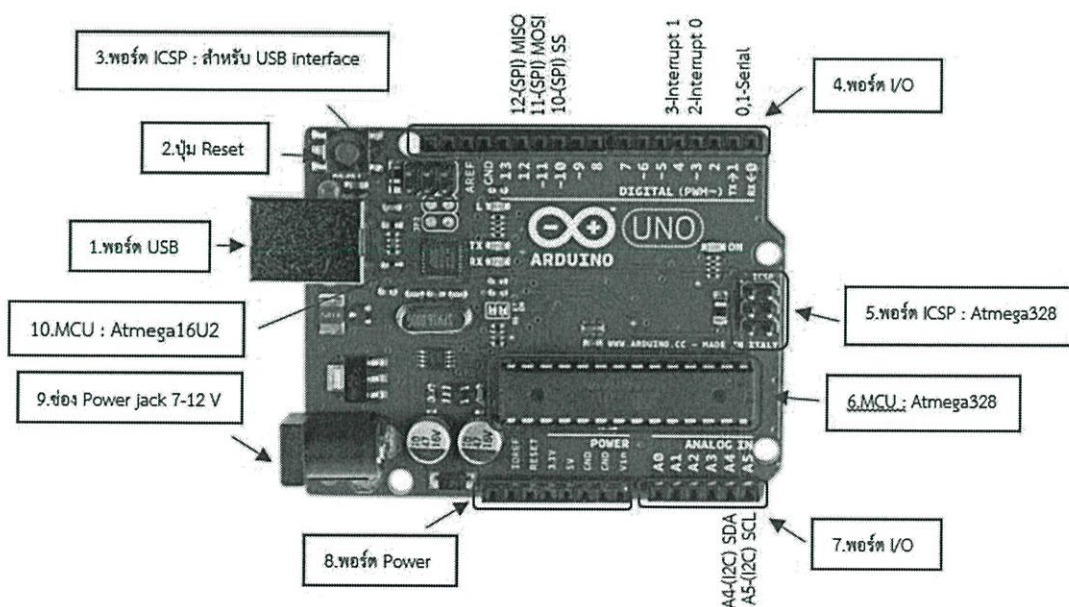
// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {

```

Done uploading  
Binary sketch size: 1,632 bytes (of a 255,048 byte maximum)

รูปที่ 2.8.6 Uplode โค้ดโปรแกรม

### Layout & Pin out Arduino Board (Model: Arduino UNO R3)



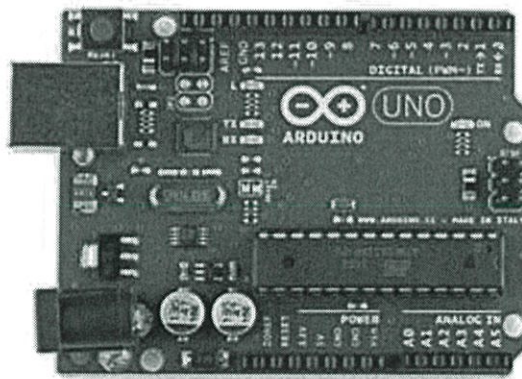
รูปที่ 2.8.7 ส่วนประกอบของบอร์ด Arduino UNO R3

1. USB Port: ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button: เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่

3. ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
4. I/O Port: 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/O Port: นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง + 3.3 V, +5V, GND,  $V_{in}$
9. Power Jack: รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2

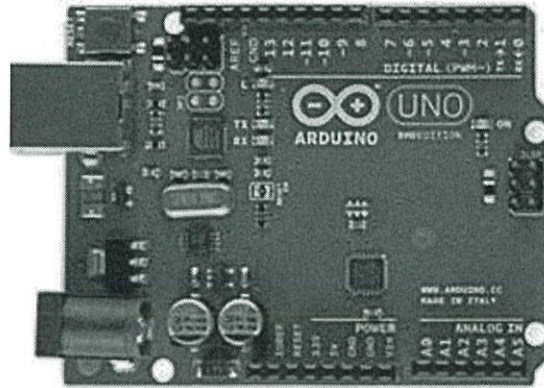
### Arduino รุ่นต่างๆกัน

1. Arduino UNO R3 : เป็นบอร์ด Arduino ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากราคาไม่แพง ส่วนใหญ่โปรเจกต์และ Library ต่างๆ ที่พัฒนาขึ้นมา Support จะอ้างอิงกับบอร์ดนี้เป็นหลัก และข้อดีอีกอย่างคือ กรณีที่ MCU เสีย ผู้ใช้งานสามารถซื้อมาเปลี่ยนเองได้ง่าย



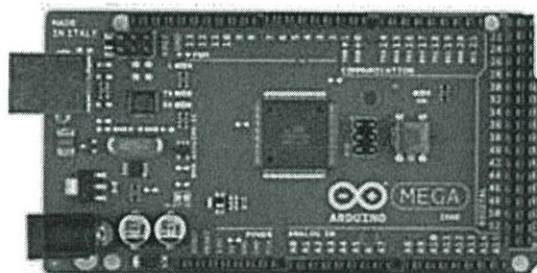
รูปที่ 2.8.8 บอร์ด Arduino UNO R3

2. Arduino UNO SMD : เป็นบอร์ดที่มีคุณสมบัติและการทำงานเหมือนกับบอร์ด Arduino UNO R3 ทุกประการ แต่จะแตกต่างกับที่ Package ของ MCU ซึ่งบอร์ดนี้จะมี MCU ที่เป็น Package SMD (Arduino UNO R3 มี MCU ที่เป็น Package DIP)



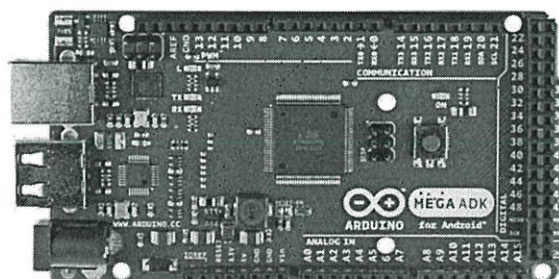
รูปที่ 2.8.9 บอร์ด Arduino UNO SMID

3. Arduino Mega 2560 R3 : เป็นบอร์ด Arduino ที่ออกแบบมาสำหรับงานที่ต้องใช้ I/O มากกว่า Arduino Uno R3 เช่น งานที่ต้องการรับสัญญาณจาก Sensor หรือควบคุมมอเตอร์ Servo หลายๆ ตัว ทำให้ Pin I/O ของบอร์ด Arduino Uno R3 ไม่สามารถรองรับได้ ทั้งนี้ บอร์ด Mega 2560 R3 ยังมีความหน่วยความจำแบบ Flash มากกว่า Arduino Uno R3 ทำให้สามารถเขียนโค้ดโปรแกรมเข้าไปได้มากกว่า ในความเร็วของ MCU ที่เท่ากัน



รูปที่ 2.8.10 บอร์ด Arduino Mega 2560 R3

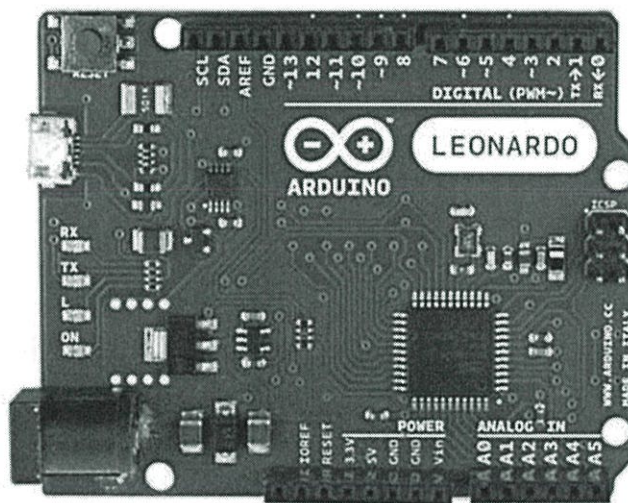
4. Arduino Mega ADK : เป็นบอร์ดที่ออกแบบมาให้บอร์ด Mega 2560 R3 สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ Android Device ผ่านพอร์ต USB Host ของบอร์ดได้



รูปที่ 2.8.11 บอร์ด Arduino Mega ADK

5. Arduino Leonardo : การทำงานจะคล้ายกับบอร์ด Arduino Uno R3 แต่มีการเปลี่ยน MCU ตัวใหม่เป็น ATmega32U4 ซึ่งมีโมดูลพอร์ต USB มาด้วยบนชิป (แตกต่างจากบอร์ด Arduino UNO R3 หรือ Arduino Mega 2560 ที่ต้องใช้ชิป ATmega16U2 ร่วมกับ Atmega328 ในการเชื่อมต่อกับพอร์ต USB)

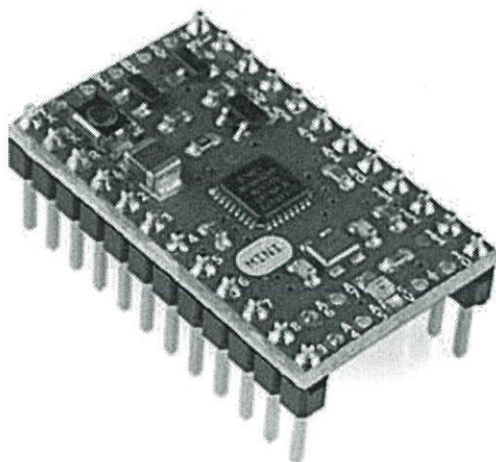
ข้อควรระวัง: เนื่องจาก MCU เป็นคนละเบอร์กับ Arduino Uno R3 อาจทำให้บอร์ด Shield บางตัวหรือ Library ใช้ร่วมกันกับบอร์ด Arduino Leonardo ไม่ได้ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องตรวจสอบก่อนใช้งาน



รูปที่ 2.8.12 บอร์ด Arduino Leonardo

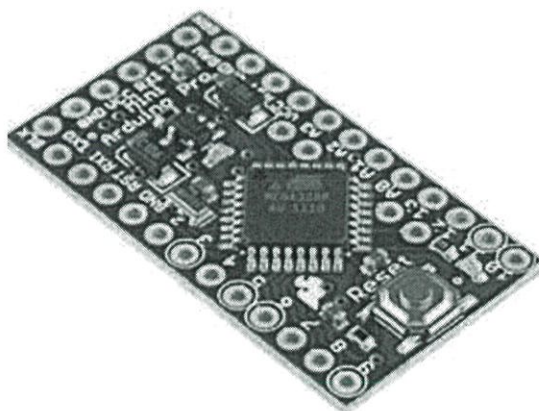
6. Arduino Mini 05 : เป็นบอร์ด Arduino ขนาดเล็กที่ใช้ MCU เบอร์ ATmega328 เบอร์เดียวกับบอร์ด Arduino UNO R3

ข้อแตกต่าง: บอร์ด Arduino Mini 05 จะไม่มีพอร์ต USB มาให้ ผู้ใช้งานต้องต่อกับบอร์ด USB to Serial Converter เพิ่มเมื่อต้องการโปรแกรมบอร์ด



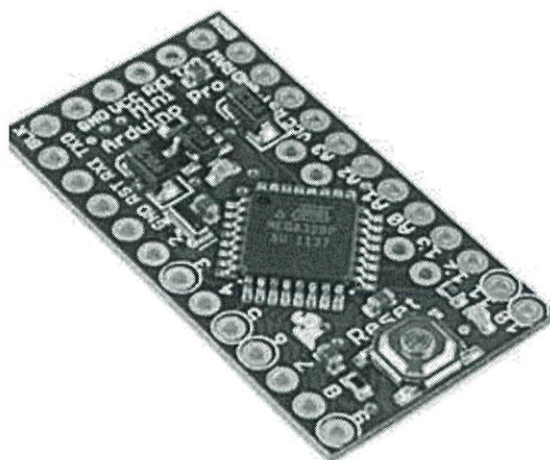
รูปที่ 2.8.13 บอร์ด Arduino Mini 05

7. Arduino Pro Mini 328 3.3V : เป็นบอร์ด Arduino ขนาดเล็ก ที่ใช้ MCU เบอร์ ATmega328 ซึ่งจะคล้ายกับบอร์ด Arduino Mini 05 แต่บนบอร์ดจะมี Regulator 3.3 V ชุดเดียวเท่านั้น ระดับแรงดันไฟที่ขา I/O คือ 3.3V



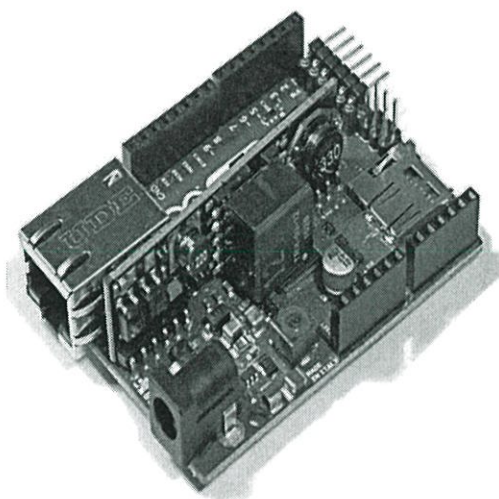
รูปที่ 2.8.14 บอร์ด Arduino Pro Mini 328 3.3V

8. Arduino Pro Mini 328 5V : เป็นบอร์ด Arduino ขนาดเล็ก ที่ใช้ MCU เบอร์ ATmega328 เช่นเดียวกับบอร์ด Arduino Mini 05 แต่บนบอร์ดจะมี Regulator 5V ชุดเดียวเท่านั้น ระดับแรงดันไฟที่ขา I/O คือ 5V



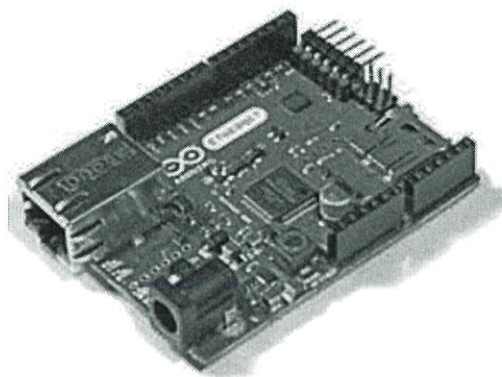
รูปที่ 2.8.15 บอร์ด Arduino Arduino Pro Mini 328 5V

9. Arduino Ethernet with PoE module : เป็นบอร์ด Arduino ที่ใช้ MCU เบอร์เดียวกับ Arduino Uno SMD ในบอร์ดมีชิป Ethernet และช่องสำหรับเสียบ SD Card รวมทั้งโมดูล POE ทำให้บอร์ดนี้สามารถใช้แหล่งจ่ายไฟจากสาย LAN ได้โดยตรง โดยไม่ต้องต่อ Adapter เพิ่ม แต่บอร์ด Arduino Ethernet with PoE module นี้จะไม่มีพอร์ต USB ทำให้เวลาโปรแกรมต้องต่อบอร์ด USB toSerial Converter เพิ่มเติม



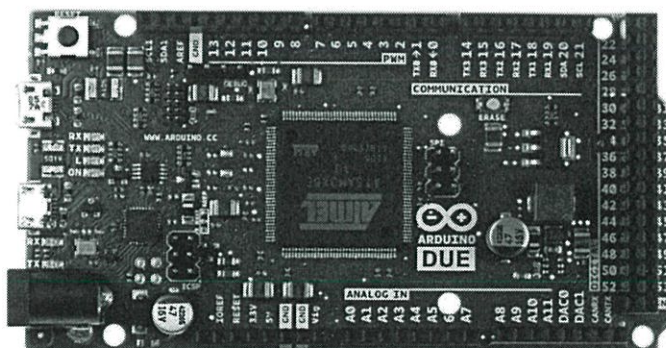
รูปที่ 2.8.16 บอร์ด Arduino Ethernet with PoE module

10. Arduino Ethernet without PoE module : บอร์ดนี้จะตัดโมดูล POE ออกไป ต้องใช้ไฟจากพอร์ต Power Jack เท่านั้น คุณสมบัติอื่นๆ จะเหมือนกับบอร์ด Arduino Ethernet with PoE module



รูปที่ 2.8.17 บอร์ด Arduino Ethernet without PoE module

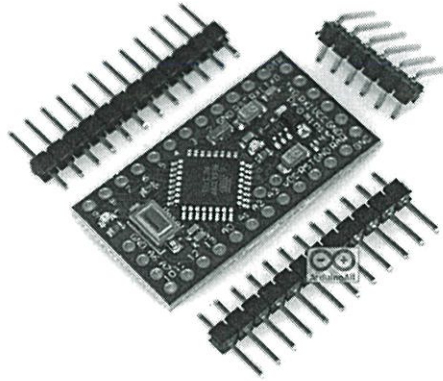
11. Arduino Due : เป็นบอร์ด Arduino ที่เปลี่ยนชิป MCU ใหม่ ซึ่งจากเดิมเป็นตระกูล AVR เปลี่ยนเป็นเบอร์ AT91SAM3X8E(ตระกูล ARM Cortex-M3) แทน ทำให้การประมวลผลเร็วขึ้น แต่ยังคงรูปแบบโค้ดโปรแกรมของ Arduino ที่ง่ายอยู่ ข้อควรระวัง: เนื่องจาก MCU เป็นคนละเบอร์กับ Arduino Uno R3 อาจจะทำให้บอร์ด Shield บางตัว หรือ Library ใช้ร่วมกันกับบอร์ด Arduino Leonardo ไม่ได้ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องตรวจสอบก่อนใช้งาน



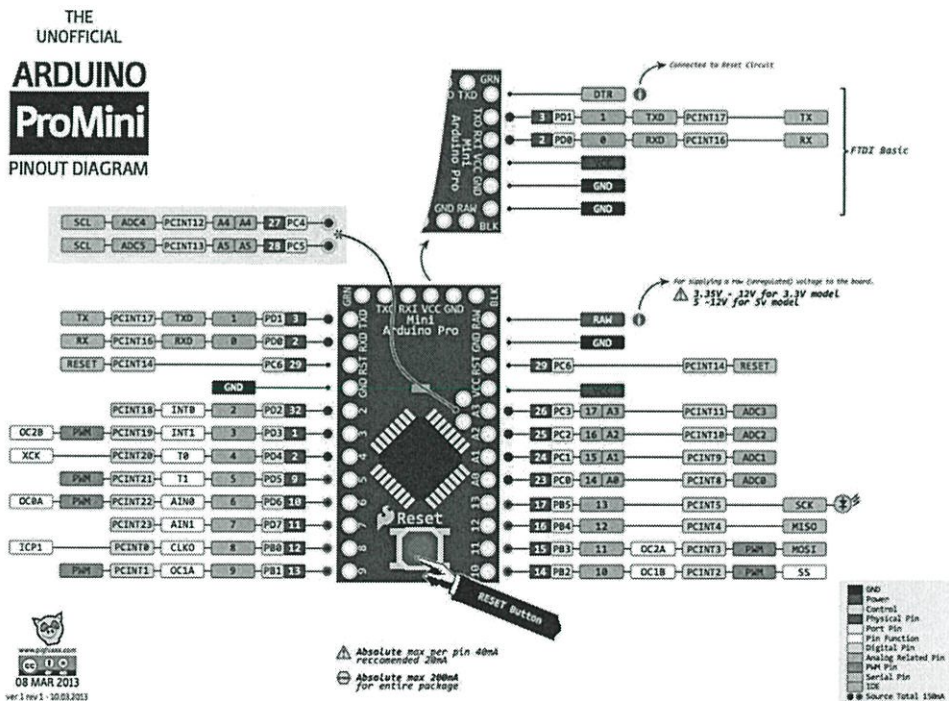
รูปที่ 2.8.18 บอร์ด Arduino Due

## 2.9 Arduino Pro Mini

Arduino Pro Mini ATmega328 - 5V/16MHz

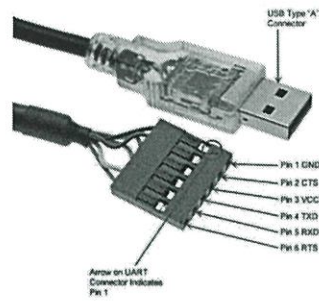


รูปที่ 2.9.1 บอร์ด Arduino Pro Mini



รูปที่ 2.9.2 Pinout Diagram ของบอร์ด Arduino Pro Mini

Arduino Pro Mini เป็น Arduino ขนาดเล็ก แต่มีความสามารถเท่ากับ Arduino Uno R3 ตัวใหญ่เลย เพราะใช้ IC ATmega328 เหมือนกัน เพียงแต่ตัดฟังก์ชันที่เชื่อมต่อ USB ออกเวลาจะโปรแกรมจึงต้องใช้ บอร์ด USB to UART ช่วยเบิร์นโปรแกรมลงบอร์ด Arduino Pro Mini



รูปที่ 2.9.3 สายบอร์ด USB to UART

ถ้าลักษณะงานไม่ได้ติดต่อกับ USB หรือ shield อื่น ๆ และต้องการใช้ Arduino ขนาดเล็ก ราคาถูก บอร์ด Arduino Pro Mini 328 ตัวนี้เป็นอีกตัวเลือกที่น่าสนใจ เพราะความสามารถ Arduino Pro Mini มีความเทียบเท่า Arduino Uno R3

#### รายละเอียด Arduino Pro Mini 328 - 5V/16MHz

Arduino Pro Mini ATmega328 รั้นที่ 16 MHz พร้อม resonator (0.5% tolerance)

PCB ขนาดบาง 0.8mm

Arduino Pro Mini ขนาด 33.3 \* 18.0mm

Arduino Pro Mini ไม่มีพอร์ท USB

Arduino Pro Mini รองรับ auto-reset เวลาโปรแกรมไม่ต้องกดรีเซตเอง

Arduino Pro Mini ใช้ไฟ 5 โวลต์

กระแสเอาต์พุตสูงสุด 150mA

มีวงจรป้องกันกระแสเกิน

น้ำหนักน้อยกว่า 2 กรัม

DC อินพุต สูงสุด 12V

มีไฟบอกสถานะบนบอร์ด Arduino Pro Mini

ขาอนุบาล็อก 8 ขา

ขาดิจิตอล I/O 14 ขา

Flash Memory ขนาด 32 KB

SRAM 2 KB

EEPROM 1 KB

## 2.10 Bluetooth



# Bluetooth®

รูปที่ 2.10.1 โลโก้ Bluetooth

Bluetooth คือ ระบบสื่อสารของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสองทาง ด้วยคลื่นวิทยุระยะสั้น (Short-Range Radio Links) โดยปราศจากการใช้สายเคเบิล หรือ สายสัญญาณเชื่อมต่อ และไม่จำเป็นต้องใช้การเดินทางแบบเส้นตรงเหมือนกับอินฟราเรด ซึ่งถือว่าเพิ่มความสะดวกมากกว่าการเชื่อมต่อแบบอินฟราเรด ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างโทรศัพท์มือถือ กับอุปกรณ์ ในโทรศัพท์เคลื่อนที่รุ่นก่อนๆ และในการวิจัย ไม่ได้มุ่งเฉพาะการส่งข้อมูลเพียงอย่างเดียว แต่ยังคงศึกษาถึงการส่งข้อมูลที่เป็นเสียง เพื่อใช้สำหรับ Headset บนโทรศัพท์มือถือด้วยเทคโนโลยี บลูทูธ เป็นเทคโนโลยีสำหรับการเชื่อมต่ออุปกรณ์แบบไร้สายที่น่าจับตามองเป็นอย่างยิ่งในปัจจุบัน ทั้งในเรื่องความสะดวกในการใช้งานสำหรับผู้ทั่วไป และประสิทธิภาพในการทำงาน เนื่องจาก เทคโนโลยี บลูทูธ มีราคาถูก ใช้พลังงานน้อย และใช้เทคโนโลยี short – range ซึ่งในอนาคต จะถูกนำมาใช้ในการพัฒนา เพื่อนำไปสู่การแทนที่อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้สาย เคเบิล เช่น Headset สำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น

เทคโนโลยีการเชื่อมโยงหรือการสื่อสารแบบใหม่ที่ถูกคิดค้นขึ้น เป็นเทคโนโลยีของอินเทอร์เน็ตเฟซทางคลื่นวิทยุ ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการสื่อสารระยะใกล้ที่ปลอดภัยผ่านช่องสัญญาณความถี่ 2.4 Ghz โดยที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของการใช้สายเคเบิลในการเชื่อมโยงโดยมีความเร็วในการเชื่อมโยงสูงสุดที่ 1 mbp ระยะเวลาครอบคลุม 10 เมตร เทคโนโลยีการส่งคลื่นวิทยุของบลูทูธจะใช้การกระโดดเปลี่ยนความถี่ (Frequency hop) เพราะว่าเทคโนโลยีนี้เหมาะที่จะใช้กับการส่งคลื่นวิทยุที่มีกำลังส่งต่ำและราคาถูก โดยจะแบ่งออกเป็นหลายช่องความถี่ขนาดเล็ก ในระหว่างที่มีการเปลี่ยนช่องความถี่ที่ไม่แน่นอนทำให้สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เข้ามาแทรกแซงได้ ซึ่งอุปกรณ์ที่จะได้รับการยอมรับว่าเป็นเทคโนโลยีบลูทูธ ต้องผ่านการทดสอบจาก Bluetooth SIG (Special Interest

Group) เสียก่อนเพื่อยืนยันว่ามันสามารถที่จะทำงานร่วมกับอุปกรณ์บลูทูธตัวอื่นๆ และอินเตอร์เน็ตได้

### ความเป็นมาของบลูทูธ

คำว่า Bluetooth หรือ ฟินสีฟ้า ความจริงแล้วเป็นนามของกษัตริย์ประเทศเดนมาร์ก ที่มีชื่อว่า "Harald Bluetooth" (ภาษาเดนมาร์ก Harald Blåtand) ในช่วงปี ค.ศ. 940-981 หรือประมาณ 1,000 กว่าปีก่อนหน้า กษัตริย์องค์นี้ได้ปกครองประเทศเดนมาร์กและนอร์เวย์ในยุคของไวกิงค์ และต้องการรวมประเทศให้เป็นหนึ่งเดียว นอกจากนั้น ยังทรงเป็นผู้นำเอาศาสนาคริสต์เข้าสู่ประเทศเดนมาร์กอีกด้วย



รูปที่ 2.10.2 กษัตริย์ Harald Bluetooth

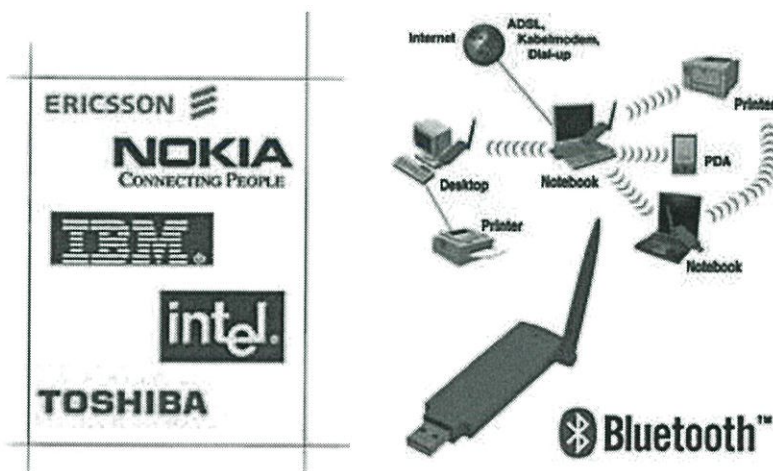
และเพื่อเป็นการรำลึกถึงกษัตริย์ Bluetooth ผู้ปกครองประเทศกลุ่มสแกนดิเนเวีย ซึ่งในปัจจุบันเป็นกลุ่มผู้นำในด้านการผลิตโทรศัพท์มือถือป้อนสู่ตลาดโลก และระบบ Bluetooth นี้ ก็ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อใช้กับโทรศัพท์มือถือ และเริ่มต้นจากประเทศในแถบนี้ด้วยเช่นกัน

### กำเนิด Bluetooth

ปี 1994 บริษัท อีริคสัน โมบาย คอมมูนิเคชั่น เริ่มต้นที่จะค้นคว้าวิจัยความเป็นไปได้ในการนำคลื่นสัญญาณวิทยุ มาใช้ระหว่างโทรศัพท์มือถือและอุปกรณ์ต่างๆ และเป็นผู้นำชื่อ Bluetooth มาใช้

ปี 1998 กลุ่มผู้พัฒนาวิจัยระบบ Bluetooth ได้ถูกก่อตั้งขึ้น โดยเกิดจากการรวมตัวของบริษัทยักษ์ใหญ่อย่าง Ericsson, Nokia, IBM, Toshiba และ Intel ในกลุ่มที่ใช้ชื่อว่า Special Interest Group (SIG) ซึ่งในกลุ่มจะประกอบด้วย กลุ่มผู้นำทางด้านโทรศัพท์มือถือ, คอมพิวเตอร์

ฯลฯ ซึ่งกลุ่มเหล่านี้ได้ประเมินว่า ภายในปี 2002 ในอุปกรณ์การสื่อสาร, เครื่องใช้, คอมพิวเตอร์ จะ ถูกติดตั้ง Bluetooth ที่จะใช้เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย



รูปที่ 2.10.3 การเชื่อมต่อของบลูทูธ

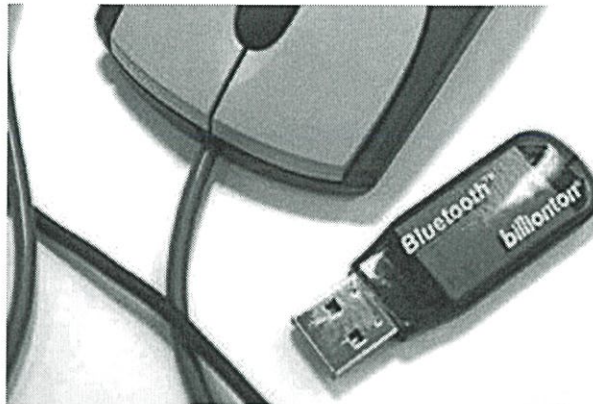
โดยในปีเดียวกัน บริษัทเหล่านี้ ได้ประกาศ การรวมตัวกัน และเชิญชวนบริษัทอื่นๆ ให้เข้าร่วม ในลักษณะของการนำเทคโนโลยีนี้ไปใช้ โดยในปี 1999 ได้ทำการเผยแพร่ Bluetooth specification Version 1.0 และได้สมาชิกเพิ่มขึ้น ดังนี้ Microsoft, Lucent, 3Com, Motorola

#### ระบบการทำงานของ Bluetooth

Bluetooth จะใช้สัญญาณวิทยุความถี่สูง 2.4 GHz. แต่จะแยกย่อยออกไป ตามแต่ละประเทศ อย่างในแถบยุโรปและอเมริกา จะใช้ช่วง 2.400 ถึง 2.4835 GHz. แบ่งออกเป็น 79 ช่องสัญญาณ และจะใช้ช่องสัญญาณที่แบ่งนี้ เพื่อส่งข้อมูลสลับช่องไปมา 1,600 ครั้งต่อ 1 วินาที ส่วนที่ญี่ปุ่นจะใช้ความถี่ 2.402 ถึง 2.480 GHz. แบ่งออกเป็น 23 ช่อง ระยะทำการของ Bluetooth จะอยู่ที่ 5-10 เมตร โดยมีระบบป้องกันโดยใช้การป้อนรหัสก่อนการเชื่อมต่อ และ ป้องกันการดักสัญญาณระหว่างสื่อสาร โดยระบบจะสลับช่องสัญญาณไปมา จะมีความสามารถในการเลือกเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ในการติดต่อเองอัตโนมัติ โดยที่ไม่จำเป็นต้องเรียงตามหมายเลขช่อง ทำให้การดักฟังหรือลักลอบขโมยข้อมูลทำได้ยากขึ้น

โดยหลักของบลูทูธจะถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากใช้การขนส่งข้อมูลในจำนวนที่ไม่มาก อย่างเช่น ไฟล์ภาพ, เสียง, แอปพลิเคชันต่างๆ และสามารถเคลื่อนย้ายได้

ง่าย ขอให้อยู่ในระยะที่กำหนดไว้เท่านั้น (ประมาณ 5-10 เมตร) นอกจากนี้ยังใช้พลังงานต่ำ กินไฟน้อย และสามารถใช้งานได้นาน โดยไม่ต้องนำไปชาร์จไฟบ่อยๆ ด้วย



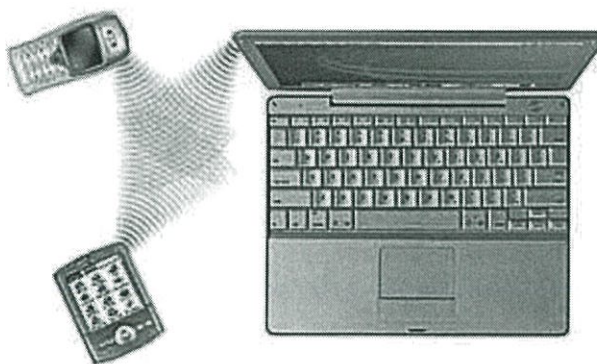
รูปที่ 2.10.4 ตัวรับ Bluetooth แบบ USB

ส่วนความสามารถการส่งถ่ายข้อมูลของ Bluetooth จะอยู่ที่ 1 Mbps (1 เมกกะบิตต่อวินาที) และคงจะไม่มีปัญหาอะไรมากกับขนาดของไฟล์ที่ใช้กันบนโทรศัพท์มือถือ หรือ การใช้งานแบบทั่วไป ซึ่งถือว่าเหลือเฟือมาก แต่ถ้าเป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ล่ะก็ คงจะช้าเกินไป และถ้าถูกนำไปเปรียบเทียบกับ Wireless LAN (WLAN) แล้ว ความสามารถของ Bluetooth คงจะห่างชั้นกันเยอะ ซึ่งในส่วนของ WLAN ก็ยังมีระยะการรับ-ส่งที่ไกลกว่า แต่ขอได้เปรียบของ Bluetooth จะอยู่ที่ขนาดเล็กกว่า การติดตั้งทำได้ง่ายกว่า และที่สำคัญ การใช้พลังงานก็น้อยกว่ามาก อยู่ที่ 0.1 วัตต์

### ประโยชน์ของ Bluetooth

- คอมพิวเตอร์ กับ โทรศัพท์มือถือ

หากเราต้องเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น ปริ้นเตอร์ คีย์บอร์ด เมาส์ หรือลำโพง การเชื่อมต่อในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะใช้สายเคเบิลเป็นตัวเชื่อมต่อทั้งหมด (Serial และ USB) ซึ่งอาจจะไม่สะดวกทั้งในด้านการใช้สอย เคลื่อนย้าย และความเรียบร้อยต่างๆ แต่หากเครื่อง PC มีอุปกรณ์ Bluetooth ก็สามารถติดต่อเข้าหากันได้โดยใช้คลื่นแทนการใช้สายไฟเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ทั้งหมด ทั้งการส่งไฟล์ภาพ, เสียง, ข้อมูล อีกทั้งระบบเชื่อมต่อผ่าน CSD และ GPRS บนโทรศัพท์มือถือ ก็สามารถทำได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้สาย ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยาก อีกทั้งยังเพิ่มความสะดวกสบายในการทำงานมากขึ้นด้วย

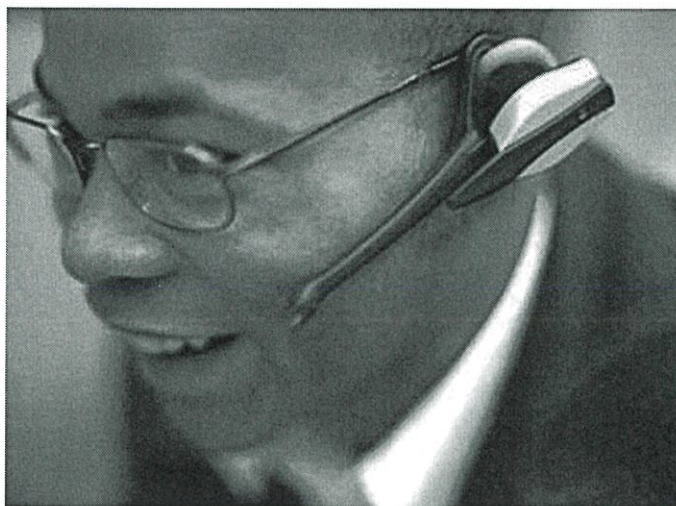


รูปที่ 2.10.5 การเชื่อมต่อ Bluetooth ระหว่างคอมพิวเตอร์กับโทรศัพท์มือถือ

แต่ข้อจำกัดการใช้งานก็มีเช่นกัน การเชื่อมต่ออุปกรณ์พกพาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นคอมพิวเตอร์ โน้ตบุ๊ก หรือ พ็อกเก็ต พีซี เข้ากับอินเทอร์เน็ต จะสามารถใช้งานได้เพียง 1 อุปกรณ์ ต่อ 1 ชั้นเท่านั้น ซึ่งบางทีอาจจะต้องสลับการใช้งานกันบ่อยๆ (สำหรับผู้ใช้อุปกรณ์ไร้สายขนาดใหญ่) แต่ก็ถือว่าให้ความสะดวกมากกว่าการใช้สายเคเบิล

- โทรศัพท์มือถือ กับ ชุดหูฟัง (Smalltalk)

ชุดหูฟัง หรือ Smalltalk อุปกรณ์โทรศัพท์มือถือที่ผู้ใช้เกือบทุกคนต้องมีใช้กัน ซึ่งราคาเดี๋ยวนี้มีตั้งแต่ 30-300 บาท ในด้านการใช้งานบนเครื่องโทรศัพท์มือถือ หากเป็นชุดหูฟังแบบมีสาย ข้อจำกัดจะอยู่ที่ เราไม่สามารถเคลื่อนตัวไปไหนได้ไกลกว่าที่สายจะยาวถึง แล้วก็ต้องคอยระวังสายไม่ให้ไปเกี่ยวกับสิ่งของต่างๆ บางทีอาจจะทำให้สายหลุดออกจากเครื่องด้วย แต่เมื่อนำ Bluetooth มาแทนที่การใช้งาน ก็น่าจะเพิ่มความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้มือทั้งสองข้างทำงานอย่างอื่นไปพร้อมๆ กันด้วย ทั้งในเวลาขับรถ (ตอนนี้กฎหมายก็มีออกมาแล้ว เกี่ยวกับการใช้โทรศัพท์มือถือบนรถ) ขณะออกกำลังกาย หรือ ขณะปฏิบัติกิจต่างๆ ก็สามารถขยับตัวไปไหนได้อย่างสะดวก แค่นำชุดหูฟังมาแนบหูแล้วเอาโทรศัพท์เหน็บเอว เท่านั้นก็คุยได้แล้ว



รูปที่ 2.10.6 หูฟัง Bluetooth

จากประโยชน์ต่างๆ จะเห็นได้ว่า เทคโนโลยี Bluetooth สามารถนำมาใช้ให้เข้ากับชีวิตประจำวันได้เป็นอย่างดี และยังเพิ่มความสะดวกในการใช้งานกับอุปกรณ์ต่างๆ และนอกเหนือจากที่กล่าวไป Bluetooth ยังถูกพัฒนามาใช้งานกับอุปกรณ์อื่นๆ อีกด้วย ทั้งหูฟังสเตอริโอ เครื่องเล่นซีดี รีโมทวิทยุ แม้กระทั่งในรถยนต์ ซึ่งปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยี Bluetooth ไปใช้กันแล้ว ทั้งชุด Handsfree, หรือ รีโมทเปิด-ปิดประตู หรือระบบ Keyless แต่เราไม่ต้องกดปุ่มที่กุญแจอีกต่อไป เพียงแค่ออยู่ในระยะการทำงาน ประตูก็จะเปิดล็อคให้ทันที ส่วนเวลาจอดรถก็สามารถเดินตัวปลิวออกจากรถได้เลย เมื่อการเชื่อมต่อระหว่างตัวรถกับกุญแจขาดจากกัน ก็จะล็อคให้เองอัตโนมัติ (รถบางรุ่นเริ่มมีใช้กันแล้ว Mercedes-Benz SLR)

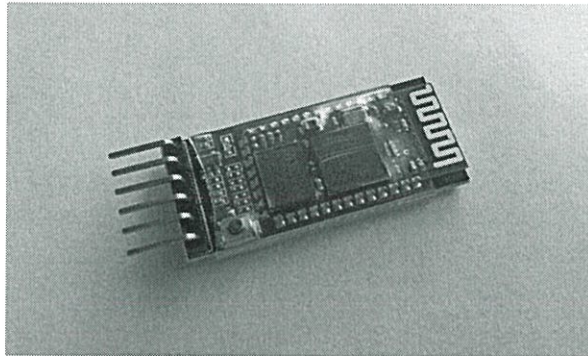
### บลูทูธในอนาคต

ปัจจุบัน การแทนที่สายเคเบิลด้วย Bluetooth อาจยังมีปัญหาอยู่บ้าง เช่น ในด้านของราคาที่สูงกว่าแบบใช้สายเคเบิลอยู่พอสมควร ดังนั้นหากอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยี Bluetooth เหล่านี้สามารถลดระดับราคาลง (แต่ก็ขึ้นอยู่กับปัจจัยได้หลายๆ ด้าน) เทคโนโลยีบลูทูธ ก็น่าจะถูกนำมาใช้แทนที่การติดต่อสื่อสารแบบที่ใช้สายได้อย่างแพร่หลายค่อนข้างแน่นอนครับ

ในอนาคตใกล้ Bluetooth จะกลายเป็นระบบไร้สายมาตรฐานบนเครื่องโทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ PDA โน้ตบุ๊ก รวมไปถึงเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ และจะทำให้ตลาดการสื่อสารเปลี่ยนรูปแบบใหม่ จะมีการค้นคว้าวิจัยเพิ่มมากขึ้นในการพัฒนาสินค้า-บริการ รวมถึงการติดต่อสื่อสารที่สามารถทำได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น ซึ่งดูเหมือนว่าทุกอย่างน่าจะไปได้สวย ดังนั้น Bluetooth จึงเป็นเทคโนโลยีอนาคตที่น่าสนใจ และ น่าจับตามอง

## 2.11 HC-05 Bluetooth Module

HC-05 เป็นโมดูล Bluetooth ที่ใช้งานในการเชื่อมต่อกับสมาร์ตโฟนต่างๆ ให้สมาร์ตโฟนสามารถสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino AVR PIC etc.) ได้ ผ่าน Serial port โมดูลรุ่น HC-05 สามารถตั้งให้ใช้งานเป็นได้ทั้งโหมด Master (ให้อุปกรณ์อื่นมาเชื่อมต่อ) และโหมด Slave (เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น) การตั้งค่าต่างๆ เช่น ชื่ออุปกรณ์ รหัสผ่าน ทำได้ผ่าน AT Command ซึ่งจะต้องมีการต่อขาพิเศษเพื่อให้โมดูลเข้าโหมดการตั้งค่า หรือกดปุ่มบนโมดูลค้างไว้



รูปที่ 2.11.1 โมดูล Bluetooth HC-05

## บทที่ 3

### การดำเนินงาน

#### 3.1 อุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยีน



รูปที่ 3.1.1 อุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยีน

#### Arduino Code

```
#include<Wire.h>

unsigned long time;

const int MPU_addr=0x68; // I2C address of the MPU-6050

int16_t AcX,AcY,AcZ,GyX,GyY,GyZ;

void setup(){

  Wire.begin();

  Wire.beginTransmission(MPU_addr);

  Wire.write(0x6B);

  Wire.write(0);

  Wire.endTransmission(true);

  Serial.begin(57600);
```

```
{  
Serial.begin(57600);  
pinMode(8, OUTPUT);  
}  
  
void loop(){  
  // Serial.print("Time: ");  
  time = millis();  
  Wire.beginTransmission(MPU_addr);  
  Wire.write(0x3B);  
  Wire.endTransmission(false);  
  Wire.requestFrom(MPU_addr,14,true);  
  AcX=Wire.read()<<8|Wire.read();  
  AcY=Wire.read()<<8|Wire.read();  
  AcZ=Wire.read()<<8|Wire.read();  
  GyX=Wire.read()<<8|Wire.read();  
  GyY=Wire.read()<<8|Wire.read();  
  GyZ=Wire.read()<<8|Wire.read();  
  
  Serial.println(time);  
  Serial.print(AcX); Serial.print(" ,");  
  Serial.print(AcY); Serial.print(" ,");  
  Serial.print(AcZ); Serial.print(" ,");  
  Serial.print(GyX); Serial.print(" ,");  
  Serial.print(GyY); Serial.print(" ,");  
  Serial.print(GyZ); Serial.print(" ,");  
  
  delay(0);  
}
```

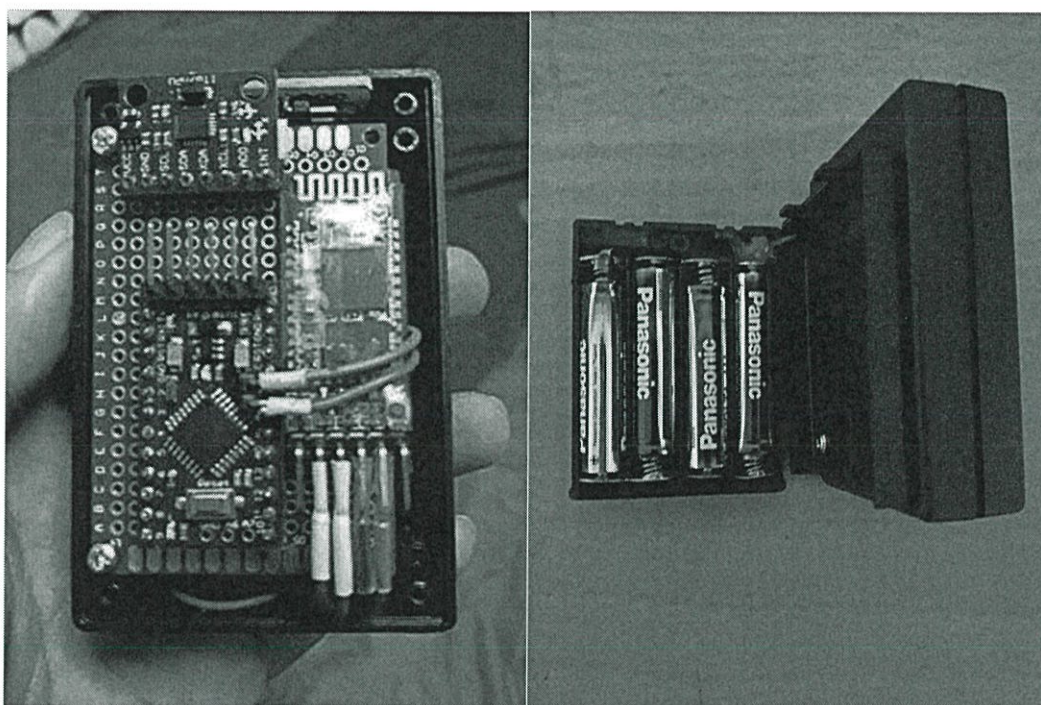
ซึ่งจากโค้ดด้านบน

มี Buadrate = 57600,

Sample Rate อยู่ที่ประมาณ 125 sample/second

### ส่วนประกอบ

1. Arduino Pro Mini 328 5V
2. GY-521 IMU ssnsor
3. HC-05 Bluetooth Module
4. 4 AAA Battery



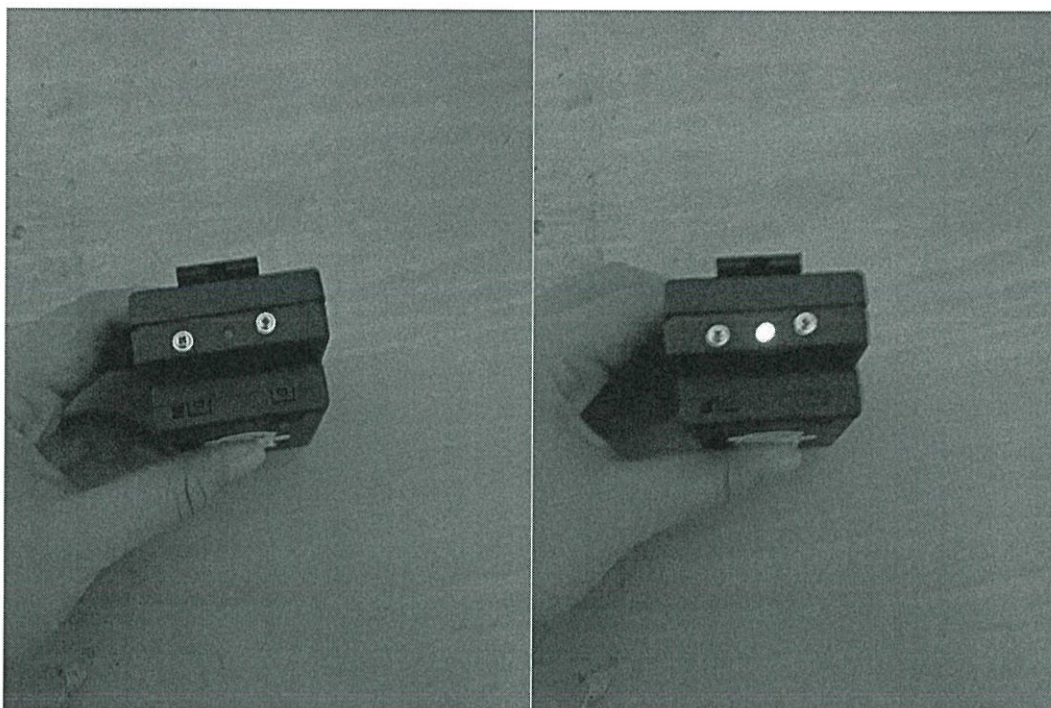
รูปที่ 3.1.2 ส่วนประกอบของอุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลูก-ยี่น

### หลักการทำงานของอุปกรณ์

เมื่อเปิดสวิทช์ของเครื่อง หลอดไฟ LED ด้านบน จะแสดงสถานการณ์ทำงานของอุปกรณ์

โดยที่ ไฟสว่าง = ON

ไฟดับ = OFF



รูปที่ 3.1.3 หลอดไฟ LED แสดงสถานะการทำงาน

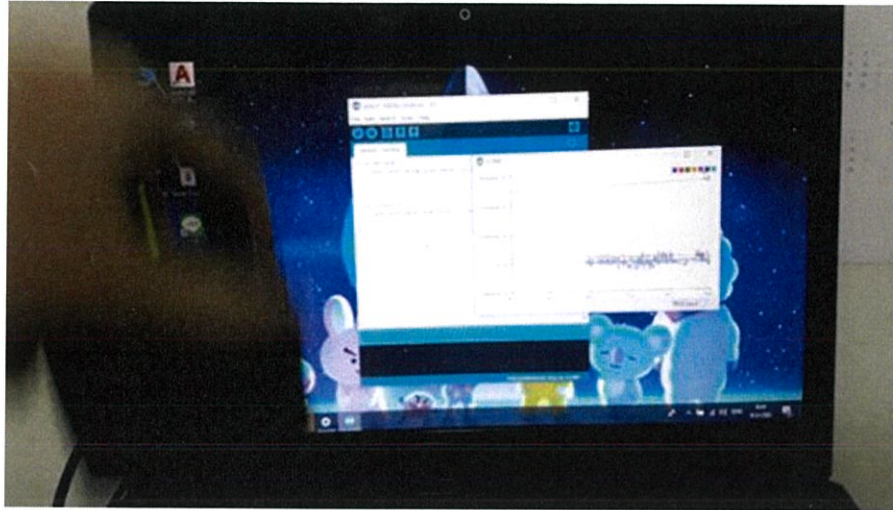
เมื่อหลอดไฟ LED ด้านบนสว่าง ก็พร้อมที่จะเชื่อมต่อบลูทูธกับเครื่องคอมพิวเตอร์ จากนั้นก็สามารถเข้าโปรแกรมต่างๆ เช่น Arduino หรือ Serial Oscilloscope เพื่อดูผลแบบ realtime ต่อได้

### 3.2 การแสดงผลและการเก็บบันทึกข้อมูล

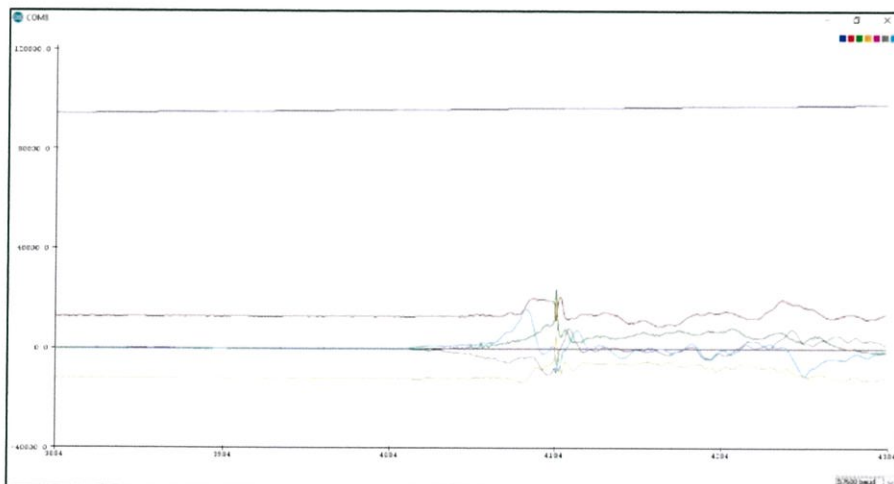
เมื่อเชื่อมต่อบลูทูธไปยังคอมพิวเตอร์แล้ว สามารถเปิดโปรแกรมต่างๆ เช่น Arduino หรือ Serial Oscilloscope เพื่อดูผลแบบ realtime ได้ทันที โดยเลือกที่ Baudrate = 57,600

## การแสดงผลบนโปรแกรมต่างๆ

- บนโปรแกรม Arduino

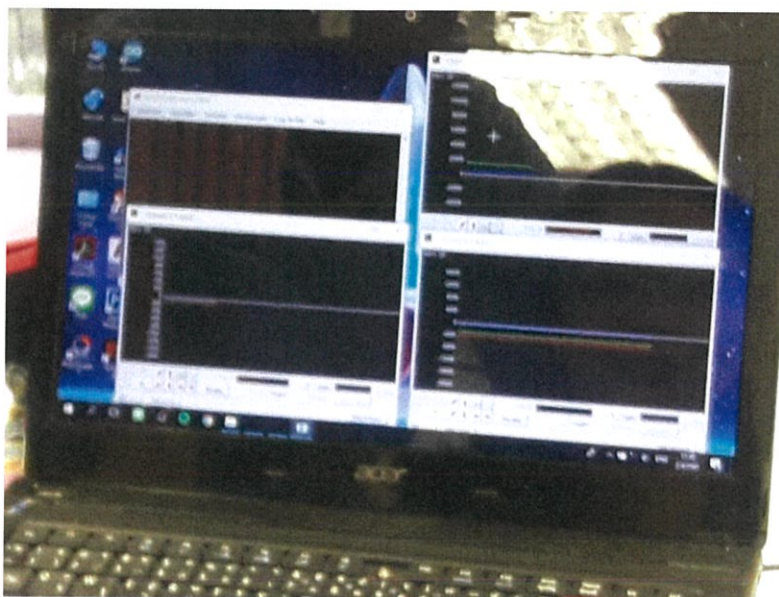


รูปที่ 3.2.1 แสดงผลแบบ Realtime บน Arduino

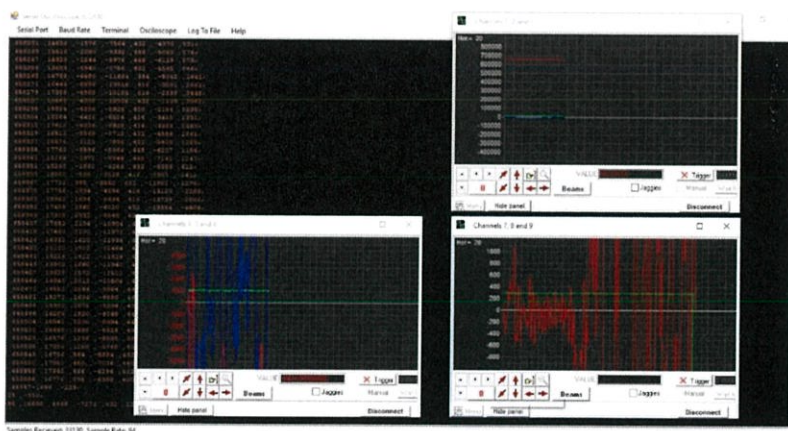


รูปที่ 3.2.2 หน้าจอ Arduino แสดงผลแบบ Realtime

- โปรแกรม Serial Oscilloscope



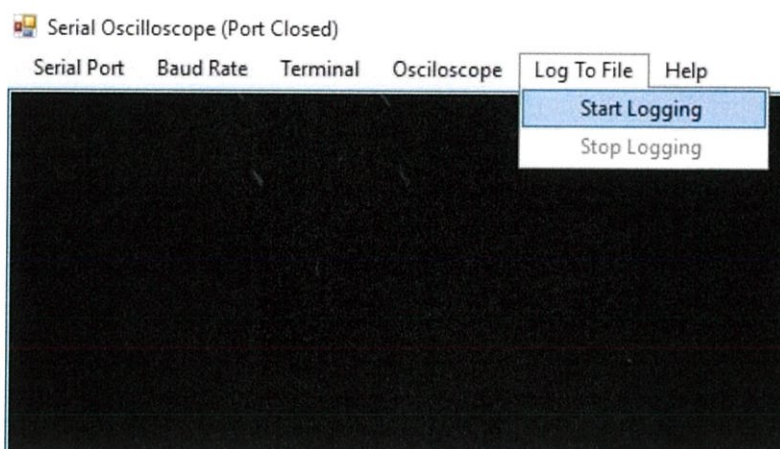
รูปที่ 3.2.3 แสดงผลแบบ Realtime บน Serial Oscilloscope



รูปที่ 3.2.4 หน้าจอ Serial Oscilloscope แสดงผลแบบ Realtime

## การเก็บบันทึกข้อมูล

ใช้โปรแกรม Serial Oscilloscope ในการเก็บข้อมูล โดยคลิกที่ Log To File >> Start Logging ซึ่งไฟล์ที่ได้จะเป็นไฟล์ .csv



รูปที่ 3.2.5 หน้าจอ Serial Oscilloscope สำหรับ Log to File

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	149818	13204	-4392	-10860	-1104	-356	118	0	0		
2	149826	13076	-4332	-10868	-1120	-309	134	0	0		
3	149834	13092	-4480	-10976	-1120	-224	134	0	0		
4	149842	13172	-4420	-10872	-1088	-186	147	0	0		
5	149851	13096	-4416	-10964	-1088	-93	180	0	0		
6	149859	13128	-4356	-10760	-1120	-60	160	0	0		
7	149867	13256	-4328	-10736	-1088	-20	176	0	0		
8	149875	13052	-4348	-10816	-1088	-3	161	0	0		
9	149882	13164	-4372	-10684	-1072	24	165	0	0		
10	149891	13232	-4396	-10704	-1088	3	153	0	0		
11	149899	13196	-4432	-10620	-1120	71	113	0	0		
12	149906	13296	-4396	-10708	-1120	40	114	0	0		
13	149914	13200	-4408	-10508	-1072	13	99	0	0		
14	149921	13252	-4348	-10672	-1072	29	90	0	0		
15	149929	13240	-4428	-10504	-1120	17	71	0	0		
16	149937	13268	-4416	-10556	-1088	-1	46	0	0		
17	149945	13288	-4416	-10540	-1136	-42	19	0	0		
18	149952	13260	-4404	-10548	-1120	-72	14	0	0		
19	149960	13196	-4456	-10532	-1104	-116	-8	0	0		
20	149968	13240	-4468	-10524	-1104	-132	-22	0	0		
21	149977	13312	-4452	-10436	-1072	-158	-64	0	0		
22	149985	13272	-4440	-10520	-1104	-188	-69	0	0		
23	149993	13192	-4428	-10636	-1120	-206	-80	0	0		

รูปที่ 3.2.6 หน้าจอ Excel ข้อมูล Serial ที่ได้

### ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

โดยจะได้ข้อมูลทั้งหมด 7 ชุดข้อมูล

ชุดที่ 1 คือ เวลาแบบ millisec ที่Arduinoนับได้

ชุดที่ 2 คือ ความเร่งในแกน Z (ความสูงเมื่อลูกขึ้น)

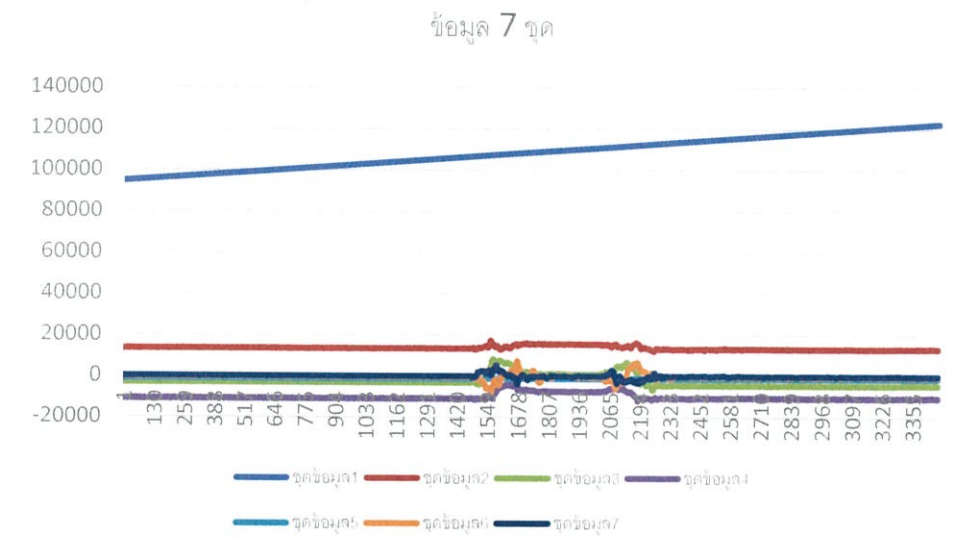
ชุดที่ 3 คือ ความเร่งในแกน Y (ด้านข้างเมื่อลูกขึ้น)

ชุดที่ 4 คือ ความเร่งในแกน X (ด้านหน้าเมื่อลูกขึ้น)

ชุดที่ 5 คือ ความเร็วเชิงมุมในแกน Z (ความสูงเมื่อลูกขึ้น)

ชุดที่ 6 คือ ความเร็วเชิงมุมในแกน Y (ด้านข้างเมื่อลูกขึ้น)

ชุดที่ 7 คือ ความเร็วเชิงมุมในแกน X (ด้านหน้าเมื่อลูกขึ้น)



รูปที่ 3.2.7 กราฟข้อมูลของข้อมูลทั้ง 7 ชุด

### 3.3 ออกแบบการทำการทดลอง

#### อุปกรณ์ที่ใช้

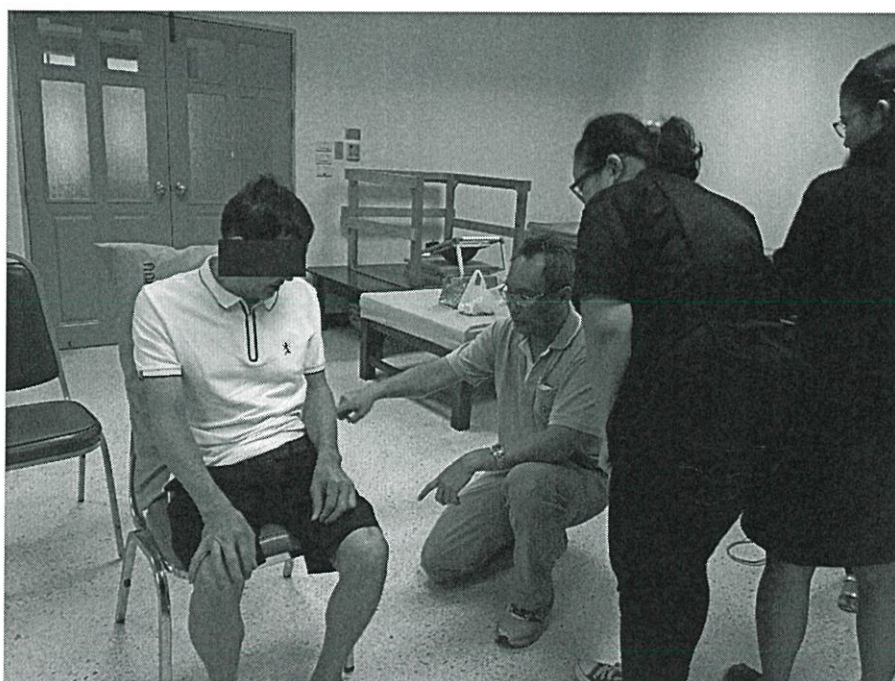
- อุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลุก-ยืน 1 เครื่อง
- นาฬิกาสำหรับจับเวลา 1 เครื่อง
- แก้วอีกที่ไม่มีที่פקแขน 1 ตัว

#### ขั้นตอนการทดลอง

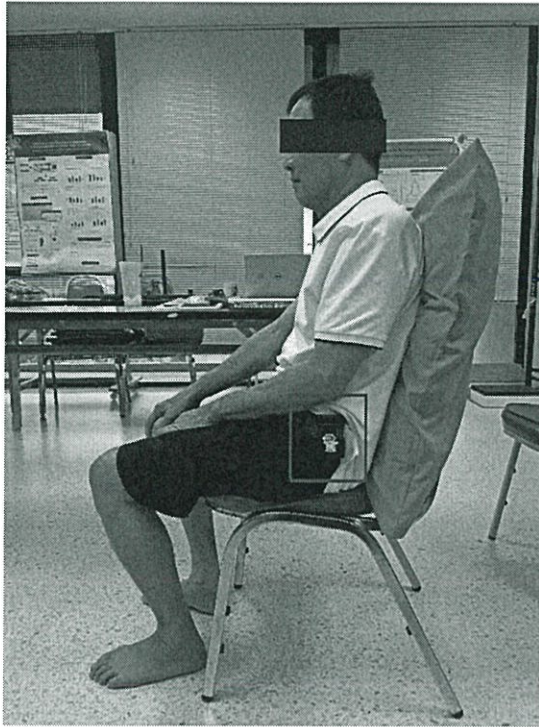
1. ชี้แจงขั้นตอนการทดสอบลุก-ยืนแก้อาสาสมัคร โดยให้อาสาสมัครลุกขึ้นยืน(Sit-to-stand : SiSt) และยืนแล้วนั่งลง(Stand-to-sit : StSi) ถือเป็นหนึ่งรอบ ต่อการทดสอบ 1 ครั้ง แล้วจะทำการทดสอบทั้งหมด 3 ครั้ง ต่อคน โดยใช้เวลาเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้
2. ให้อาสาสมัครนั่งหลังตรงบนเก้าอี้ที่ไม่มีที่פקแขน พร้อมใส่อุปกรณ์สำหรับตรวจประเมินการทดสอบลุก-ยืนไว้ที่เอวทางด้านซ้าย
3. ผู้ทำการทดลองบอกว่า “เริ่ม” แล้วให้อาสาสมัครลุกขึ้นยืน โดยพยายามไม่ใช้มือในการลุกขึ้นยืน ใช้เวลาเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ เมื่ออาสาสมัครยืนขึ้นสุดแล้ว ให้บอกว่า “จบ” เพื่อจับเวลาที่ใช้ในการลุกขึ้นยืน
4. ผู้ทำการทดลองบอกว่า “เริ่ม” แล้วให้อาสาสมัครยืนแล้วนั่งลง โดยใช้เวลาเร็วที่สุดเท่าที่จะทำได้ เมื่ออาสาสมัครนั่งลงจนสุดแล้ว ให้บอกว่า “จบ” เพื่อจับเวลาที่ใช้ในการยืนแล้วนั่งลง



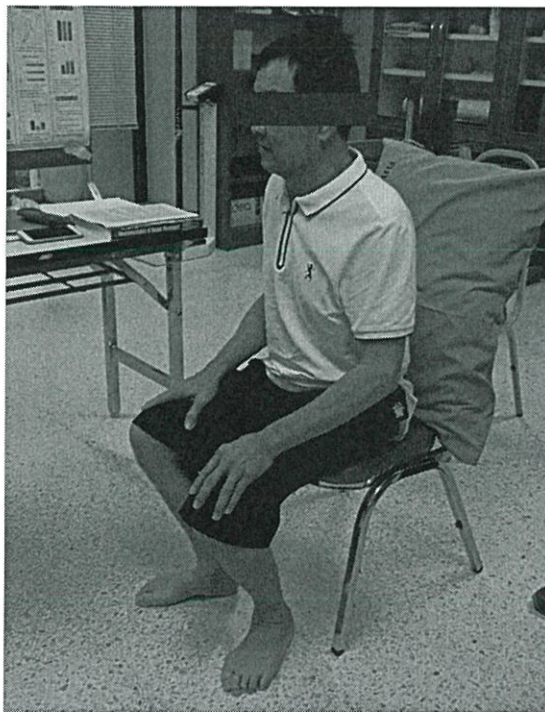
รูปที่ 3.3.1 ซี่แจงขั้นตอนการทดลอง



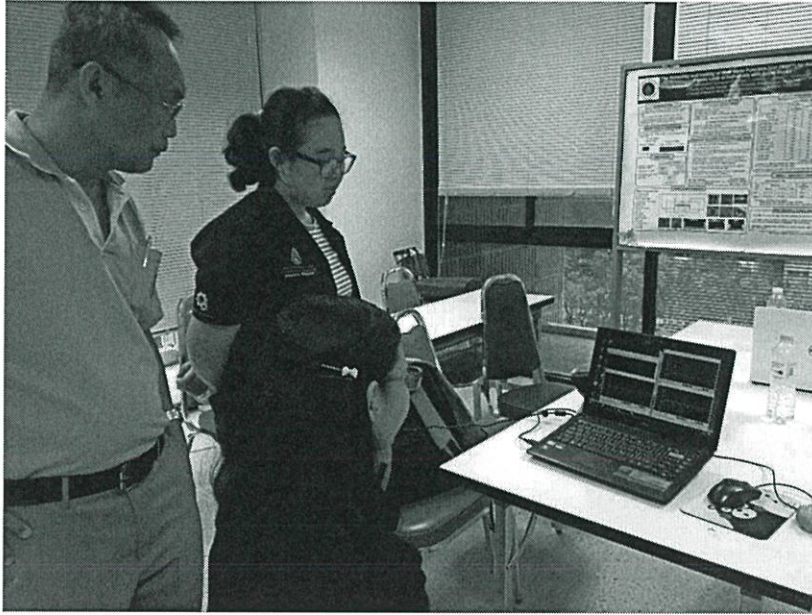
รูปที่ 3.3.2 ใส่อุปกรณ์ให้กับอาสาสมัคร



รูปที่ 3.3.3 ตำแหน่งของอุปกรณ์



รูปที่ 3.3.4 อาสาสมัครทำการทดลอง



รูปที่ 3.3.5 นักกายภาพบำบัดสังเกตกราฟข้อมูล

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

โดยที่กราฟข้อมูลที่ได้ จะนำมาพล็อตเพียง 6 ชุดข้อมูลเท่านั้น คือ

ชุดที่ 2 คือ ความเร่งในแกน Z (ความสูงเมื่อลูกขึ้น)

ชุดที่ 3 คือ ความเร่งในแกน Y (ด้านข้างเมื่อลูกขึ้น)

ชุดที่ 4 คือ ความเร่งในแกน X (ด้านหน้าเมื่อลูกขึ้น)

ชุดที่ 5 คือ ความเร็วเชิงมุมในแกน Z (ความสูงเมื่อลูกขึ้น)

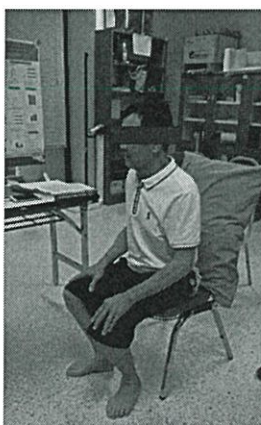
ชุดที่ 6 คือ ความเร็วเชิงมุมในแกน Y (ด้านข้างเมื่อลูกขึ้น)

และ ชุดที่ 7 คือ ความเร็วเชิงมุมในแกน X (ด้านหน้าเมื่อลูกขึ้น)

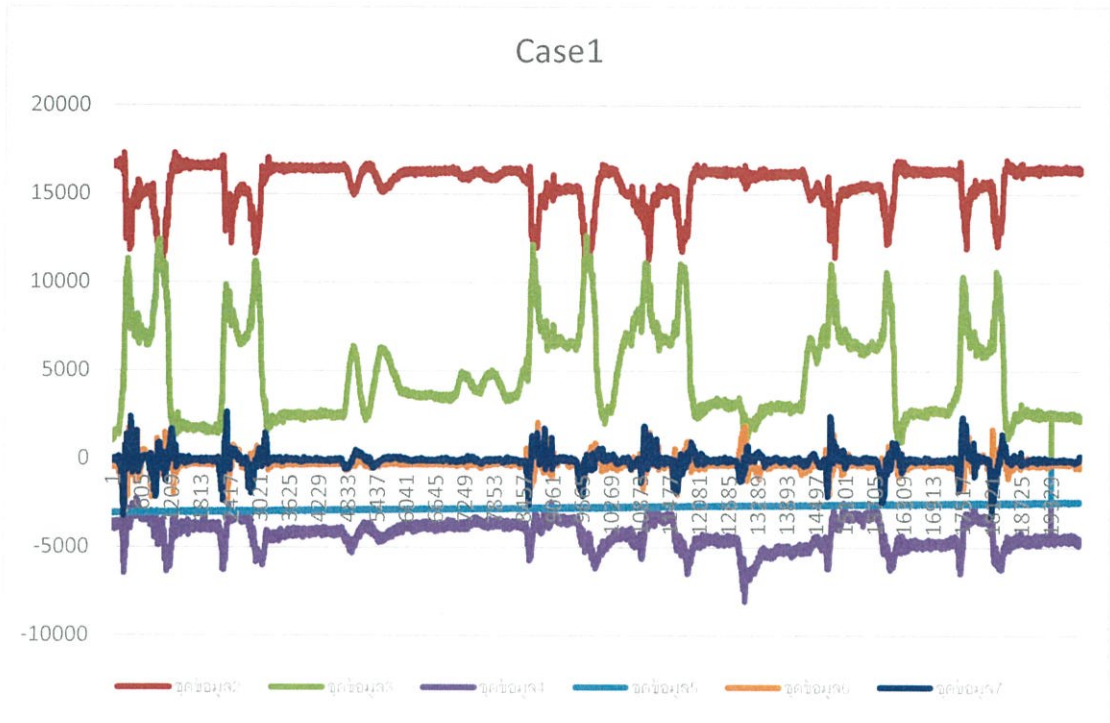
ที่ไม่ได้นำ ชุดที่ 1 คือ ข้อมูลเวลาแบบ millisec ที่Arduinoนับได้ มาพล็อตด้วย เนื่องจากจะทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลชุดอื่นๆได้น้อย เพราะเมื่อพล็อตแล้วชุดข้อมูลที่ 1 จะมีขนาดใหญ่จนบังกราฟของชุดข้อมูลอื่นๆ

#### 4.1 ทดลองในกรณีของผู้สูงอายุที่เป็นโรคเส้นเลือดในสมองตีบ

อาสาสมัครเป็นผู้สูงอายุ เพศชาย อายุ 60 ปี ที่เป็นโรคเส้นเลือดในสมองตีบ ทำให้ไม่สามารถเคลื่อนไหวร่างกายได้โดยสะดวก มีปัญหาในการลุก-ยืน ต้องใช้มือช่วยพยุงในการลุก



รูปที่ 4.1.1 อาสาสมัครกรณีที่ 1



รูปที่ 4.1.2 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 1 ทั้ง 3 การทดลอง

#### 4.2 ทดลองในกรณีของผู้สูงอายุที่เป็นโรคข้อเข่าเสื่อม

อาสาสมัครเป็นผู้สูงอายุ เพศหญิง อายุ 65 ปี เป็นโรคข้อเข่าเสื่อม แต่ไม่ต้องใช้มือช่วยพยุงในการลุก



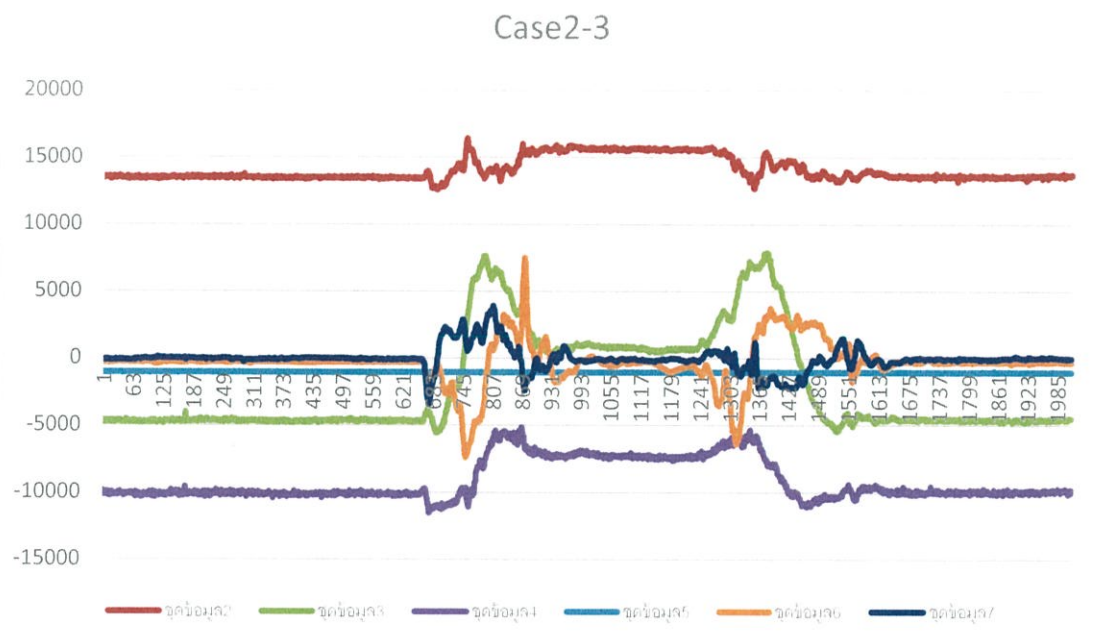
รูปที่ 4.2.1 อาสาสมัครกรณีที่ 2



รูปที่ 4.2.2 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 2 การทดลองที่ 1



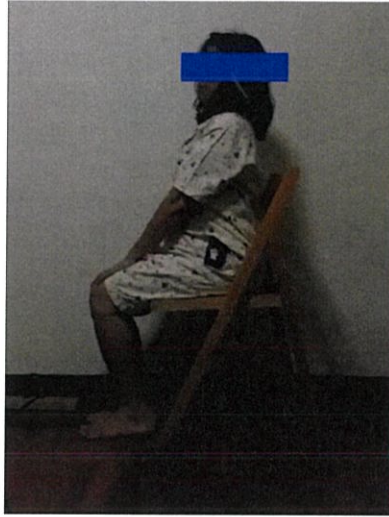
รูปที่ 4.2.3 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 2 การทดลองที่ 2



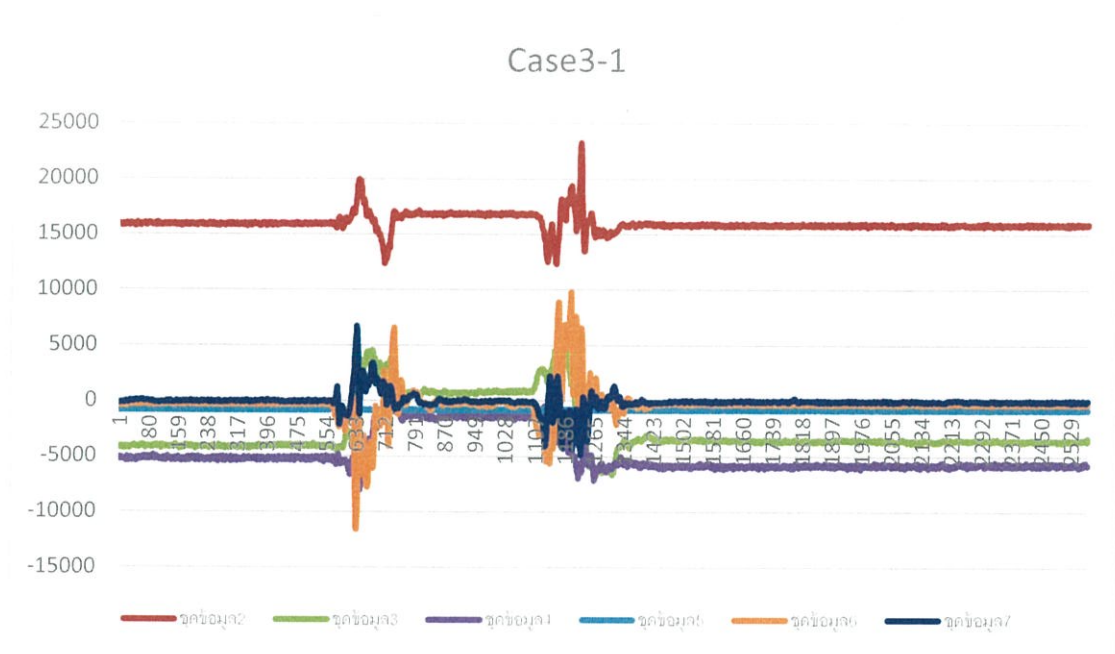
รูปที่ 4.2.4 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 2 การทดลองที่ 3

#### 4.3 ทดลองในกรณีของผู้สูงอายุที่แข็งแรงดี

อาสาสมัครเป็นผู้สูงอายุ เพศหญิง อายุ 53 ปี ไม่มีโรคที่เกี่ยวกับร่างกายส่วนล่างและไม่ต้องใช้มือช่วยพยุงในการลุก



รูปที่ 4.3.1 อาสาสมัครกรณีที่ 3



รูปที่ 4.3.2 กราฟข้อมูลของอาสาสมัครกรณีที่ 3 การทดลองที่ 1



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

1. จากศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความเร่งและความเร็วเชิงมุมใน 3 แกน เมื่อทำการทดลอง โดยแบ่งเป็น 3 กรณี คือ

- 1) กรณีของผู้สูงอายุที่เป็นโรคเส้นเลือดในสมองตีบ มีปัญหาในการลุก-ยืน ต้องใช้มือช่วยพยุงในการลุก ใช้เวลาในการลุก-ยืนที่มากที่สุด ทำให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงความเร่งและความเร็วเชิงมุมใน 3 แกนมีระยะกว้างกว่ากรณีอื่นๆ ทั้งช่วงที่ยืนค้ำไว้หรือนั่งเฉยๆยังมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอยู่
- 2) กรณีของผู้สูงอายุที่เป็นโรคข้อเข่าเสื่อม แต่ไม่ต้องใช้มือช่วยพยุงในการลุก ใช้เวลานานกว่ากรณีของผู้สูงอายุที่ไม่มีปัญหาสุขภาพร่างกายส่วนล่างในการลุก-ยืน
- 3) กรณีของผู้สูงอายุที่แข็งแรงดี ไม่มีโรคที่เกี่ยวกับร่างกายส่วนล่างและไม่ต้องใช้มือช่วยพยุงในการลุก ใช้เวลาในการลุก-ยืนสั้นที่สุด ทำให้ช่วงของการเปลี่ยนแปลงความเร่งและความเร็วเชิงมุมใน 3 แกนมีระยะแคบกว่ากรณีอื่นๆ

2. อุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลุก-ยืน สามารถเพื่อนำมาช่วยประเมินพฤติกรรมการลุก ขึ้นยืนและยืนแล้วนั่งลงของอาสาสมัครได้ โดยที่ตัวอุปกรณ์มีขนาดพกพา และส่งข้อมูลเป็นแบบไร้สายผ่านบลูทูธไปยังคอมพิวเตอร์ได้แบบRealtime

3. ข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลุก-ยืน สามารถเก็บบันทึกเป็นไฟล์ .csv ที่สามารถเป็นดูข้อมูลและพล็อตกราฟในโปรแกรมMicrosoft Office Excelได้ ช่วยให้ นักกายภาพบำบัดสามารถทราบถึงข้อแตกต่างของผู้ป่วยกรณีต่างๆ และช่วยให้วางแผนการรักษาต่อไปได้

#### 5.2 ปัญหาที่พบ

1. ในการเขียนโค้ด ผู้จัดทำไม่มีความเชี่ยวชาญในการเขียนโค้ด Arduino มากนัก ทำให้ช่วงแรกๆ ติดปัญหาในการส่งค่าข้อมูลมาเป็นซีเรียลเพื่อพล็อตกราฟ คือสามารถทราบข้อมูลซีเรียลได้ แต่ไม่สามารถพล็อตเป็นกราฟได้ พอได้รับความช่วยเหลือจากเพื่อนร่วมห้องแล็บก็สามารถแก้ไขได้

2. ยังไม่สามารถทำการสอบเทียบ imu ให้เป็นค่าความเร่งและค่าความเร็วเชิงมุมจริงๆ ยังคงเป็น Raw Data แต่ยังสามารถดูความเปลี่ยนแปลงของกราฟได้

3. ในตอนแรก ได้วางแผนทำแอปพลิเคชันแอนดรอยด์สำหรับแสดงผลไว้ เพื่อเป็นอินเตอร์เฟซสำหรับผู้รับการทดลองหรือนักกายภาพบำบัดจะได้ทราบข้อมูลที่เป็นตัวเลขได้ง่ายๆ แต่เนื่องจากปัญหาในข้อก่อนหน้า ทำให้ยังไม่สามารถบอกค่าความเร่งและค่าความเร็วเชิงมุมจริงๆ จึงได้ตัดการทำแอปพลิเคชันแอนดรอยด์ออกจากการดำเนินการ

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับอุปกรณ์ตรวจประเมินการทดสอบลุก-ยืนนี้ สามารถเชื่อมต่อแบบไร้สายได้เพียง 1 เครื่องต่อคอมพิวเตอร์ 1 เครื่องเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของเทคโนโลยีบลูทูธ หากในอนาคตใช้เทคโนโลยีที่สามารถทำให้เชื่อมต่อแบบไร้สายได้หลายเครื่องต่อคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง ก็จะสามารถติดที่ส่วนต่างๆ ของร่างกาย เช่น หน้าแข้ง เข่า ต้นขา เอว และหลัง เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่าความเร่งและค่าความเร็วเชิงมุมในส่วนต่างๆ จะได้ทราบปัญหาได้ตรงจุดมากยิ่งขึ้น

2. ในการทดลองนี้ ยังมีจำนวนอาสาสมัครที่น้อย และไม่หลากหลายเท่าที่ควร อยากทำให้แยกความแตกต่างของอาสาสมัครได้น้อย ซึ่งในประเทศไทยยังไม่มี การหาค่ามาตรฐานต่างๆ รวมทั้งเวลาที่ใช้ในการลุก-ยืนของผู้สูงอายุไทย หากมีอาสาสมัครที่จำนวนมากกว่านี้ ก็อาจจะทราบถึงค่ามาตรฐานสำหรับผู้สูงอายุไทยได้

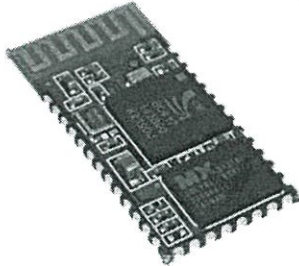
## บรรณานุกรม

- [1] กฤษณ์ เตตานนทร์สกุล. 2547. บลูทูธ "ฟันสีฟ้า" เทคโนโลยีไร้สายสำหรับอนาคต. [Online].  
Available : <http://www.siamphone.com/news/bluetooth/page.htm>
- [2] กิตยวดี ศรีสีม, สุภัลยา อมตฉายา. 2556. ความตรงของการประเมินลูกนั่ง 5 ครั้ง เปรียบเทียบกับการประเมิน Timed "Up & GO" Test ในผู้ป่วยบาดเจ็บไขสันหลังที่สามารถเดินได้เอง. [Online].  
Available : <https://www.tcithaijo.org/index.php/ams/article/viewFile/66335>
- [3] ภิญโญ วรเกษตร และคณะ. ม.ป.ป.. INERTIAL MEASUREMENT UNIT. [Online].  
Available : <https://www.rtsd.mi.th/school/images/knowledge/KM/INERTIALMEASUREMENTUNIT.pdf>
- [4] วรณิศา คุ่มบ้าน, สุภัลยา อมตฉายา, พรรณี ปิงสุวรรณ, วัฒนนา ศิริธราธิวัตร. 2553. ผลของการฝึกลูกขึ้นยืนต่อความสมดุลในขณะที่เคลื่อนไหวของเด็กกสมองพิการ. [Online].  
Available : <https://www.researchgate.net/>
- [5] สายน้ำผึ้ง ชินเขียว และคณะ. 2559. บทที่ 4 ระบบกล้ามเนื้อ . [Online].  
Available : <https://anatomyfivelife.wordpress.com/>
- [6] ArduinoAll. 2558. Arduino Pro Mini 328 - 5V. [Online].  
Available : <https://www.arduinoall.com/product/15/arduino-pro-mini-328-5v>
- [7] IOXhop. 2559.การใช้งาน Bluetooth module HC05 แบบละเอียด. [Online].  
Available : <https://www.ioxhop.com/article/26>
- [8] ThaiEasyElec. ม.ป.ป.. ตอนที่1 แนะนำเพื่อนใหม่ที่ชื่อ Arduino. [Online].  
Available : <https://www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics>
- [9] ThaiEasyElec. ม.ป.ป.. ตอนที่2 มาทำความรู้จักกับ Arduino รุ่นต่างๆกัน. [Online].  
Available : <https://thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/>

ภาคผนวก

## HC-05-Bluetooth to Serial Port Module

### Overview



HC-05 module is an easy to use Bluetooth SPP (Serial Port Protocol) module, designed for transparent wireless serial connection setup. Serial port Bluetooth module is fully qualified Bluetooth V2.0+EDR (Enhanced Data Rate) 3Mbps Modulation with complete 2.4GHz radio transceiver and baseband. It uses CSR Bluecore 04-External single chip Bluetooth system with CMOS technology and with AFH(Adaptive Frequency Hopping Feature). It has the footprint as small as 12.7mmx27mm. Hope it will simplify your overall design/development cycle.

### Specifications

#### Hardware features

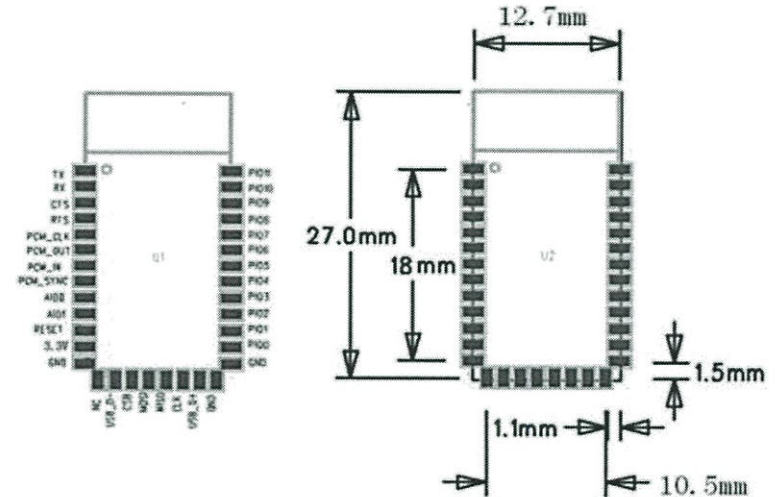
- Typical -80dBm sensitivity
- Up to +4dBm RF transmit power
- Low Power 1.8V Operation ,1.8 to 3.6V I/O
- PIO control
- UART interface with programmable baud rate
- With integrated antenna
- With edge connector

#### Software features

- Default Baud rate: 38400, Data bits:8, Stop bit:1,Parity:No parity, Data control: has.
- Supported baud rate: 9600,19200,38400,57600,115200,230400,460800.
- Given a rising pulse in PIO0, device will be disconnected.
  - Status instruction port PIO1: low-disconnected, high-connected;
  - PIO10 and PIO11 can be connected to red and blue led separately. When master and slave are paired, red and blue led blinks 1time/2s in interval, while disconnected only blue led blinks 2times/s.
  - Auto-connect to the last device on power as default.
  - Permit pairing device to connect as default.

- Auto-pairing PINCODE:"0000" as default
- Auto-reconnect in 30 min when disconnected as a result of beyond the range of connection.

### Hardware



PIN Name	PIN #	Pad type	Description	Note
GND	13	VSS	Ground pot	
	21			
	22			
3.3 VCC	12	3.3V	Integrated 3.3V (+) supply with On-chip linear regulator output within 3.15-3.3V	
AIO0	9	Bi-Directional	Programmable input/output line	
AIO1	10	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO0	23	Bi-Directional RX EN	Programmable input/output line, control output for LNA(if fitted)	
PIO1	24	Bi-Directional TX EN	Programmable input/output line, control output for PA(if fitted)	
PIO2	25	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO3	26	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO4	27	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO5	28	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO6	29	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO7	30	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO8	31	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO9	32	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO10	33	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO11	34	Bi-Directional	Programmable input/output line	
USB_+	20	Bi-Directional		
NC	14			
PCM_CLK	5	Bi-Directional	Synchronous PCM data clock	
PCM_OUT	6	CMOS output	Synchronous PCM data output	
PCM_IN	7	CMOS Input	Synchronous PCM data input	
PCM_SYNC	8	Bi-Directional	Synchronous PCM data strobe	

RESETB	11	CMOS input with weak internal pull-up	Reset if low.input debounced so must be low for >5MS to cause a reset	
UART_RTS	4	CMOS output, tri-stable with weak internal pull-up	UART request to send, active low	
UART_CTS	3	CMOS input with weak internal pull-down	UART clear to send, active low	
UART_RX	2	CMOS input with weak internal pull-down	UART Data input	
UART_TX	1	CMOS output, Tri-stable with weak internal pull-up	UART Data output	
SPI_MOSI	17	CMOS input with weak internal pull-down	Serial peripheral interface data input	
SPI_CSB	16	CMOS input with weak internal pull-up	Chip select for serial peripheral interface, active low	
SPI_CLK	19	CMOS input with weak internal pull-down	Serial peripheral interface clock	
SPI_MISO	18	CMOS input with weak internal pull-down	Serial peripheral interface data Output	
USB_-	15	Bi-Directional		

AT command Default:

How to set the mode to server (master):

1. Connect PIO11 to high level.
2. Power on, module into command state.
3. Using baud rate 38400, sent the "AT+ROLE=1\r\n" to module, with "OK\r\n" means setting successes.
4. Connect the PIO11 to low level, repower the module, the module work as server (master).

**AT commands: (all end with \r\n)**

1. Test command:

Command	Response	Parameter
AT	OK	-

2. Reset:

Command	Response	Parameter
AT+RESET	OK	-

3. Get Firmware Version

Command	Response	Parameter
AT+VERSION?	+VERSION:<Param> OK	Param : firmware version

Example:

```
AT+VERSION?\r\n
+VERSION: 2.0-20100601
OK
```

4. Restore default

Command	Response	Parameter
AT+ORGL	OK	-

Default state:

Slave mode, pin code: 1234, device name: H-C-2010-06-01, Baud 38400bits/s.

5. Get module address

Command	Response	Parameter
AT+ADDR?	+ADDR:<Param> OK	Param: address of Bluetooth module

Bluetooth address: NAP: UAP: LAP

Example:

```
AT+ADDR?\r\n
+ADDR:1234:56:abcdef
OK
```

6. Set/Check module name:

Command	Response	Parameter
AT+NAME=<Param>	OK	Param: Bluetooth module name
AT+NAME?	+NAME:<Param> OK (/FAIL)	(Default:HC-05)

Example:

```
AT+NAME=HC-\r\n      set the module name to "HC-05"
OK
AT+NAME=Synes\r\n
OK
AT+NAME?\r\n
+NAME: Synes
OK
```

7. Get the Bluetooth device name:

Command	Response	Parameter
AT+RNAME?<Param1>	1. +RNAME:<Param2> OK 2. FAIL	Param1: the address of Bluetooth device Param2: Bluetooth Device name

Example: (Device address 00:02:72:0d:22:24, name : syn)

```
AT+RNAME? 0002, 72, 0d2224\r\n
+RNAME:syn
OK
```

8. Set/Check module mode:

Command	Response	Parameter
AT+ROLE=<Param>	OK	Param:
AT+ ROLE?	+ROLE:<Param> OK	0-Slave 1-Master 2-Slave-Loop

9. Set/Check device class

Command	Response	Parameter
AT+CLASS=<Param>	OK	Param: Device Class
AT+ CLASS?	1. +CLASS:<Param> OK 2. FAIL	

You can get details of any AT Command from <http://synes.co.th/nicupload/20130121093745.pdf>

# MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4

**CONTENTS**

- 1 REVISION HISTORY .....5
- 2 PURPOSE AND SCOPE .....6
- 3 PRODUCT OVERVIEW .....7
  - 3.1 MPU-60X0 OVERVIEW .....7
- 4 APPLICATIONS.....9
- 5 FEATURES .....10
  - 5.1 GYROSCOPE FEATURES.....10
  - 5.2 ACCELEROMETER FEATURES .....10
  - 5.3 ADDITIONAL FEATURES .....10
  - 5.4 MOTIONPROCESSING.....11
  - 5.5 CLOCKING.....11
- 6 ELECTRICAL CHARACTERISTICS .....12
  - 6.1 GYROSCOPE SPECIFICATIONS .....12
  - 6.2 ACCELEROMETER SPECIFICATIONS.....13
  - 6.3 ELECTRICAL AND OTHER COMMON SPECIFICATIONS.....14
  - 6.4 ELECTRICAL SPECIFICATIONS, CONTINUED .....15
  - 6.5 ELECTRICAL SPECIFICATIONS, CONTINUED .....16
  - 6.6 ELECTRICAL SPECIFICATIONS, CONTINUED .....17
  - 6.7 I<sup>2</sup>C TIMING CHARACTERIZATION.....18
  - 6.8 SPI TIMING CHARACTERIZATION (MPU-6000 ONLY) .....19
  - 6.9 ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS .....20
- 7 APPLICATIONS INFORMATION .....21
  - 7.1 PIN OUT AND SIGNAL DESCRIPTION .....21
  - 7.2 TYPICAL OPERATING CIRCUIT.....22
  - 7.3 BILL OF MATERIALS FOR EXTERNAL COMPONENTS .....22
  - 7.4 RECOMMENDED POWER-ON PROCEDURE .....23
  - 7.5 BLOCK DIAGRAM .....24
  - 7.6 OVERVIEW .....24
  - 7.7 THREE-AXIS MEMS GYROSCOPE WITH 16-BIT ADCs AND SIGNAL CONDITIONING.....25
  - 7.8 THREE-AXIS MEMS ACCELEROMETER WITH 16-BIT ADCs AND SIGNAL CONDITIONING .....25
  - 7.9 DIGITAL MOTION PROCESSOR .....25
  - 7.10 PRIMARY I<sup>2</sup>C AND SPI SERIAL COMMUNICATIONS INTERFACES .....25
  - 7.11 AUXILIARY I<sup>2</sup>C SERIAL INTERFACE .....26

7.12	SELF-TEST .....	27
7.13	MPU-60X0 SOLUTION FOR 9-AXIS SENSOR FUSION USING I <sup>2</sup> C INTERFACE .....	28
7.14	MPU-6000 USING SPI INTERFACE .....	29
7.15	INTERNAL CLOCK GENERATION .....	30
7.16	SENSOR DATA REGISTERS .....	30
7.17	FIFO .....	30
7.18	INTERRUPTS .....	30
7.19	DIGITAL-OUTPUT TEMPERATURE SENSOR .....	31
7.20	BIAS AND LDO .....	31
7.21	CHARGE PUMP .....	31
<b>8</b>	<b>PROGRAMMABLE INTERRUPTS.....</b>	<b>32</b>
<b>9</b>	<b>DIGITAL INTERFACE .....</b>	<b>33</b>
9.1	I <sup>2</sup> C AND SPI (MPU-6000 ONLY) SERIAL INTERFACES .....	33
9.2	I <sup>2</sup> C INTERFACE .....	33
9.3	I <sup>2</sup> C COMMUNICATIONS PROTOCOL .....	33
9.4	I <sup>2</sup> C TERMS .....	36
9.5	SPI INTERFACE (MPU-6000 ONLY) .....	37
<b>10</b>	<b>SERIAL INTERFACE CONSIDERATIONS (MPU-6050).....</b>	<b>38</b>
10.1	MPU-6050 SUPPORTED INTERFACES.....	38
10.2	LOGIC LEVELS .....	38
10.3	LOGIC LEVELS DIAGRAM FOR AUX_VDDIO = 0.....	39
<b>11</b>	<b>ASSEMBLY .....</b>	<b>40</b>
11.1	ORIENTATION OF AXES .....	40
11.2	PACKAGE DIMENSIONS .....	41
11.3	PCB DESIGN GUIDELINES .....	42
11.4	ASSEMBLY PRECAUTIONS .....	43
11.5	STORAGE SPECIFICATIONS.....	46
11.6	PACKAGE MARKING SPECIFICATION.....	46
11.7	TAPE & REEL SPECIFICATION .....	47
11.8	LABEL .....	48
11.9	PACKAGING.....	49
11.10	REPRESENTATIVE SHIPPING CARTON LABEL.....	50
<b>12</b>	<b>RELIABILITY .....</b>	<b>51</b>
12.1	QUALIFICATION TEST POLICY .....	51

12.2	QUALIFICATION TEST PLAN .....	51
<b>13</b>	<b>ENVIRONMENTAL COMPLIANCE.....</b>	<b>52</b>

## 1 Revision History

Revision Date	Revision	Description
11/24/2010	1.0	Initial Release
05/19/2011	2.0	For Rev C parts. Clarified wording in sections (3.2, 5.1, 5.2, 6.1-6.4, 6.6, 6.9, 7, 7.1-7.6, 7.11, 7.12, 7.14, 8, 8.2-8.4, 10.3, 10.4, 11, 12.2)
07/28/2011	2.1	Edited supply current numbers for different modes (section 6.4)
08/05/2011	2.2	Unit of measure for accelerometer sensitivity changed from LSB/mg to LSB/g
10/12/2011	2.3	Updated accelerometer self test specifications in Table 6.2. Updated package dimensions (section 11.2). Updated PCB design guidelines (section 11.3)
10/18/2011	3.0	For Rev D parts. Updated accelerometer specifications in Table 6.2. Updated accelerometer specification note (sections 8.2, 8.3, & 8.4). Updated qualification test plan (section 12.2).
10/24/2011	3.1	Edits for clarity Changed operating voltage range to 2.375V-3.46V Added accelerometer Intelligence Function increment value of 1mg/LSB (Section 6.2) Updated absolute maximum rating for acceleration (any axis, unpowered) from 0.3ms to 0.2ms (Section 6.9) Modified absolute maximum rating for Latch-up to Level A and $\pm 100$ mA (Section 6.9, 12.2)
11/16/2011	3.2	Updated self-test response specifications for Revision D parts dated with date code 1147 (YYWW) or later. Edits for clarity Added Gyro self-test (sections 5.1, 6.1, 7.6, 7.12) Added Min/Max limits to Accel self-test response (section 6.2) Updated Accelerometer low power mode operating currents (Section 6.3) Added gyro self test to block diagram (section 7.5) Updated packaging labels and descriptions (sections 11.8 & 11.9)
5/16/2012	3.3	Updated Gyro and Accelerometer self test information (sections 6.1, 6.2, 7.12) Updated latch-up information (Section 6.9) Updated programmable interrupts information (Section 8) Changed shipment information from maximum of 3 reels (15K units) per shipper box to 5 reels (25K units) per shipper box (Section 11.7) Updated packing shipping and label information (Sections 11.8, 11.9) Updated reliability references (Section 12.2)
8/19/2013	3.4	Updates section 4

## 2 Purpose and Scope

This product specification provides advanced information regarding the electrical specification and design related information for the MPU-6000™ and MPU-6050™ MotionTracking™ devices, collectively called the MPU-60X0™ or MPU™.

Electrical characteristics are based upon design analysis and simulation results only. Specifications are subject to change without notice. Final specifications will be updated based upon characterization of production silicon. For references to register map and descriptions of individual registers, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document.

The self-test response specifications provided in this document pertain to Revision D parts with date codes of 1147 (YYWW) or later. Please see Section 11.6 for package marking description details.

### 3 Product Overview

#### 3.1 MPU-60X0 Overview

MotionInterface™ is becoming a “must-have” function being adopted by smartphone and tablet manufacturers due to the enormous value it adds to the end user experience. In smartphones, it finds use in applications such as gesture commands for applications and phone control, enhanced gaming, augmented reality, panoramic photo capture and viewing, and pedestrian and vehicle navigation. With its ability to precisely and accurately track user motions, MotionTracking technology can convert handsets and tablets into powerful 3D intelligent devices that can be used in applications ranging from health and fitness monitoring to location-based services. Key requirements for MotionInterface enabled devices are small package size, low power consumption, high accuracy and repeatability, high shock tolerance, and application specific performance programmability – all at a low consumer price point.

The MPU-60X0 is the world’s first integrated 6-axis MotionTracking device that combines a 3-axis gyroscope, 3-axis accelerometer, and a Digital Motion Processor™ (DMP) all in a small 4x4x0.9mm package. With its dedicated I<sup>2</sup>C sensor bus, it directly accepts inputs from an external 3-axis compass to provide a complete 9-axis MotionFusion™ output. The MPU-60X0 MotionTracking device, with its 6-axis integration, on-board MotionFusion™, and run-time calibration firmware, enables manufacturers to eliminate the costly and complex selection, qualification, and system level integration of discrete devices, guaranteeing optimal motion performance for consumers. The MPU-60X0 is also designed to interface with multiple non-inertial digital sensors, such as pressure sensors, on its auxiliary I<sup>2</sup>C port. The MPU-60X0 is footprint compatible with the MPU-30X0 family.

The MPU-60X0 features three 16-bit analog-to-digital converters (ADCs) for digitizing the gyroscope outputs and three 16-bit ADCs for digitizing the accelerometer outputs. For precision tracking of both fast and slow motions, the parts feature a user-programmable gyroscope full-scale range of ±250, ±500, ±1000, and ±2000°/sec (dps) and a user-programmable accelerometer full-scale range of ±2g, ±4g, ±8g, and ±16g.

An on-chip 1024 Byte FIFO buffer helps lower system power consumption by allowing the system processor to read the sensor data in bursts and then enter a low-power mode as the MPU collects more data. With all the necessary on-chip processing and sensor components required to support many motion-based use cases, the MPU-60X0 uniquely enables low-power MotionInterface applications in portable applications with reduced processing requirements for the system processor. By providing an integrated MotionFusion output, the DMP in the MPU-60X0 offloads the intensive MotionProcessing computation requirements from the system processor, minimizing the need for frequent polling of the motion sensor output.

Communication with all registers of the device is performed using either I<sup>2</sup>C at 400kHz or SPI at 1MHz (MPU-6000 only). For applications requiring faster communications, the sensor and interrupt registers may be read using SPI at 20MHz (MPU-6000 only). Additional features include an embedded temperature sensor and an on-chip oscillator with ±1% variation over the operating temperature range.

By leveraging its patented and volume-proven Nasiri-Fabrication platform, which integrates MEMS wafers with companion CMOS electronics through wafer-level bonding, InvenSense has driven the MPU-60X0 package size down to a revolutionary footprint of 4x4x0.9mm (QFN), while providing the highest performance, lowest noise, and the lowest cost semiconductor packaging required for handheld consumer electronic devices. The part features a robust 10,000g shock tolerance, and has programmable low-pass filters for the gyroscopes, accelerometers, and the on-chip temperature sensor.

For power supply flexibility, the MPU-60X0 operates from VDD power supply voltage range of 2.375V-3.46V. Additionally, the MPU-6050 provides a VLOGIC reference pin (in addition to its analog supply pin: VDD), which sets the logic levels of its I<sup>2</sup>C interface. The VLOGIC voltage may be 1.8V±5% or VDD.

The MPU-6000 and MPU-6050 are identical, except that the MPU-6050 supports the I<sup>2</sup>C serial interface only, and has a separate VLOGIC reference pin. The MPU-6000 supports both I<sup>2</sup>C and SPI interfaces and has a single supply pin, VDD, which is both the device’s logic reference supply and the analog supply for the part. The table below outlines these differences:

#### Primary Differences between MPU-6000 and MPU-6050

Part / Item	MPU-6000	MPU-6050
VDD	2.375V-3.46V	2.375V-3.46V
VLOGIC	n/a	1.71V to VDD
Serial Interfaces Supported	I <sup>2</sup> C, SPI	I <sup>2</sup> C
Pin 8	/CS	VLOGIC
Pin 9	AD0/SDO	AD0
Pin 23	SCL/SCLK	SCL
Pin 24	SDA/SDI	SDA

	<b>MPU-6000/MPU-6050 Product Specification</b>	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	--	---

#### 4 Applications

- *BlurFree™* technology (for Video/Still Image Stabilization)
- *AirSign™* technology (for Security/Authentication)
- *TouchAnywhere™* technology (for "no touch" UI Application Control/Navigation)
- *MotionCommand™* technology (for Gesture Short-cuts)
- Motion-enabled game and application framework
- InstantGesture™ iG™ gesture recognition
- Location based services, points of interest, and dead reckoning
- Handset and portable gaming
- Motion-based game controllers
- 3D remote controls for Internet connected DTVs and set top boxes, 3D mice
- Wearable sensors for health, fitness and sports
- Toys

	<b>MPU-6000/MPU-6050 Product Specification</b>	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	--	---

#### 5 Features

##### 5.1 Gyroscope Features

The triple-axis MEMS gyroscope in the MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output X-, Y-, and Z-Axis angular rate sensors (gyroscopes) with a user-programmable full-scale range of  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ , and  $\pm 2000^\circ/\text{sec}$
- External sync signal connected to the FSYNC pin supports image, video and GPS synchronization
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of gyros
- Enhanced bias and sensitivity temperature stability reduces the need for user calibration
- Improved low-frequency noise performance
- Digitally-programmable low-pass filter
- Gyroscope operating current: 3.6mA
- Standby current: 5 $\mu$ A
- Factory calibrated sensitivity scale factor
- User self-test

##### 5.2 Accelerometer Features

The triple-axis MEMS accelerometer in MPU-60X0 includes a wide range of features:

- Digital-output triple-axis accelerometer with a programmable full scale range of  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  and  $\pm 16g$
- Integrated 16-bit ADCs enable simultaneous sampling of accelerometers while requiring no external multiplexer
- Accelerometer normal operating current: 500 $\mu$ A
- Low power accelerometer mode current: 10 $\mu$ A at 1.25Hz, 20 $\mu$ A at 5Hz, 60 $\mu$ A at 20Hz, 110 $\mu$ A at 40Hz
- Orientation detection and signaling
- Tap detection
- User-programmable interrupts
- High-G interrupt
- User self-test

##### 5.3 Additional Features

The MPU-60X0 includes the following additional features:

- 9-Axis MotionFusion by the on-chip Digital Motion Processor (DMP)
- Auxiliary master I<sup>2</sup>C bus for reading data from external sensors (e.g., magnetometer)
- 3.9mA operating current when all 6 motion sensing axes and the DMP are enabled
- VDD supply voltage range of 2.375V-3.46V
- Flexible VLOGIC reference voltage supports multiple I<sup>2</sup>C interface voltages (MPU-6050 only)
- Smallest and thinnest QFN package for portable devices: 4x4x0.9mm
- Minimal cross-axis sensitivity between the accelerometer and gyroscope axes
- 1024 byte FIFO buffer reduces power consumption by allowing host processor to read the data in bursts and then go into a low-power mode as the MPU collects more data
- Digital-output temperature sensor
- User-programmable digital filters for gyroscope, accelerometer, and temp sensor
- 10,000 g shock tolerant
- 400kHz Fast Mode I<sup>2</sup>C for communicating with all registers
- 1MHz SPI serial interface for communicating with all registers (MPU-6000 only)
- 20MHz SPI serial interface for reading sensor and interrupt registers (MPU-6000 only)

- MEMS structure hermetically sealed and bonded at wafer level
- RoHS and Green compliant

#### 5.4 MotionProcessing

- Internal Digital Motion Processing™ (DMP™) engine supports 3D MotionProcessing and gesture recognition algorithms
- The MPU-60X0 collects gyroscope and accelerometer data while synchronizing data sampling at a user defined rate. The total dataset obtained by the MPU-60X0 includes 3-Axis gyroscope data, 3-Axis accelerometer data, and temperature data. The MPU's calculated output to the system processor can also include heading data from a digital 3-axis third party magnetometer.
- The FIFO buffers the complete data set, reducing timing requirements on the system processor by allowing the processor burst read the FIFO data. After burst reading the FIFO data, the system processor can save power by entering a low-power sleep mode while the MPU collects more data.
- Programmable interrupt supports features such as gesture recognition, panning, zooming, scrolling, tap detection, and shake detection
- Digitally-programmable low-pass filters
- Low-power pedometer functionality allows the host processor to sleep while the DMP maintains the step count.

#### 5.5 Clocking

- On-chip timing generator  $\pm 1\%$  frequency variation over full temperature range
- Optional external clock inputs of 32.768kHz or 19.2MHz


## 6 Electrical Characteristics

### 6.1 Gyroscope Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V $\pm 5\%$  or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
<b>GYROSCOPE SENSITIVITY</b>						
Full-Scale Range	FS_SEL=0		$\pm 250$		%/s	
	FS_SEL=1		$\pm 500$		%/s	
	FS_SEL=2		$\pm 1000$		%/s	
	FS_SEL=3		$\pm 2000$		%/s	
Gyroscope ADC Word Length			16		bits	
Sensitivity Scale Factor	FS_SEL=0		131		LSB/(%/s)	
	FS_SEL=1		65.5		LSB/(%/s)	
	FS_SEL=2		32.8		LSB/(%/s)	
	FS_SEL=3		16.4		LSB/(%/s)	
Sensitivity Scale Factor Tolerance	25°C	-3		+3	%	
Sensitivity Scale Factor Variation Over Temperature			$\pm 2$		%	
Nonlinearity	Best fit straight line; 25°C		0.2		%	
Cross-Axis Sensitivity			$\pm 2$		%	
<b>GYROSCOPE ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)</b>						
Initial ZRO Tolerance	25°C		$\pm 20$		%/s	
ZRO Variation Over Temperature	-40°C to +85°C		$\pm 20$		%/s	
Power-Supply Sensitivity (1-10Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		%/s	
Power-Supply Sensitivity (10 - 250Hz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		0.2		%/s	
Power-Supply Sensitivity (250Hz - 100kHz)	Sine wave, 100mVpp; VDD=2.5V		4		%/s	
Linear Acceleration Sensitivity	Static		0.1		%/s/g	
<b>SELF-TEST RESPONSE</b>						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	1
<b>GYROSCOPE NOISE PERFORMANCE</b>						
Total RMS Noise	FS_SEL=0 DLPF_CFG=2 (100Hz)		0.05		%/s-rms	
Low-frequency RMS noise	Bandwidth 1Hz to 10Hz		0.033		%/s-rms	
Rate Noise Spectral Density	At 10Hz		0.005		%/s/√Hz	
<b>GYROSCOPE MECHANICAL FREQUENCIES</b>						
X-Axis		30	33	36	kHz	
Y-Axis		27	30	33	kHz	
Z-Axis		24	27	30	kHz	
<b>LOW PASS FILTER RESPONSE</b>						
Programmable Range		5		256	Hz	
<b>OUTPUT DATA RATE</b>						
Programmable		4		8,000	Hz	
<b>GYROSCOPE START-UP TIME</b>						
ZRO Settling (from power-on)	DLPF_CFG=0 to $\pm 1\%$ of Final		30		ms	

1. Please refer to the following document for further information on Self-Test: MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00
		Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013

### 6.2 Accelerometer Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
<b>ACCELEROMETER SENSITIVITY</b>						
Full-Scale Range	AFS_SEL=0 AFS_SEL=1 AFS_SEL=2 AFS_SEL=3		±2 ±4 ±8 ±16		g g g g	
ADC Word Length	Output in two's complement format		16		bits	
Sensitivity Scale Factor	AFS_SEL=0 AFS_SEL=1 AFS_SEL=2 AFS_SEL=3		16,384 8,192 4,096 2,048		LSB/g LSB/g LSB/g LSB/g	
Initial Calibration Tolerance			±3		%	
Sensitivity Change vs. Temperature	AFS_SEL=0, -40°C to +85°C		±0.02		%/°C	
Nonlinearity	Best Fit Straight Line		0.5		%	
Cross-Axis Sensitivity			±2		%	
<b>ZERO-G OUTPUT</b>						
Initial Calibration Tolerance	X and Y axes Z axis		±50 ±80		mg mg	1
Zero-G Level Change vs. Temperature	X and Y axes, 0°C to +70°C Z axis, 0°C to +70°C		±35 ±60		mg	
<b>SELF TEST RESPONSE</b>						
Relative	Change from factory trim	-14		14	%	2
<b>NOISE PERFORMANCE</b>						
Power Spectral Density	@10Hz, AFS_SEL=0 & ODR=1kHz		400		μg/√Hz	
<b>LOW PASS FILTER RESPONSE</b>						
	Programmable Range	5		260	Hz	
<b>OUTPUT DATA RATE</b>						
	Programmable Range	4		1,000	Hz	
<b>INTELLIGENCE FUNCTION INCREMENT</b>			32		mg/LSB	

1. Typical zero-g initial calibration tolerance value after MSL3 preconditioning
2. Please refer to the following document for further information on Self-Test: *MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Descriptions*

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00
		Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013

### 6.3 Electrical and Other Common Specifications

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C


PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
<b>TEMPERATURE SENSOR</b>						
Range			-40 to +85		°C	
Sensitivity	Untrimmed		340		LSB/°C	
Temperature Offset	35°C		-521		LSB	
Linearity	Best fit straight line (-40°C to +85°C)		±1		°C	
<b>VDD POWER SUPPLY</b>						
Operating Voltages		2.375		3.46	V	
Normal Operating Current	Gyroscope + Accelerometer + DMP		3.9		mA	
	Gyroscope + Accelerometer (DMP disabled)		3.8		mA	
	Gyroscope + DMP (Accelerometer disabled)		3.7		mA	
	Gyroscope only (DMP & Accelerometer disabled)		3.6		mA	
	Accelerometer only (DMP & Gyroscope disabled)		500		μA	
Accelerometer Low Power Mode Current	1.25 Hz update rate		10		μA	
	5 Hz update rate		20		μA	
	20 Hz update rate		70		μA	
	40 Hz update rate		140		μA	
Full-Chip Idle Mode Supply Current			5		μA	
Power Supply Ramp Rate	Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value			100	ms	
<b>VLOGIC REFERENCE VOLTAGE</b>						
Voltage Range	MPU-6050 only	1.71		VDD	V	
Power Supply Ramp Rate	VLOGIC must be ≤VDD at all times Monotonic ramp. Ramp rate is 10% to 90% of the final value			3	ms	
Normal Operating Current			100		μA	
<b>TEMPERATURE RANGE</b>						
Specified Temperature Range	Performance parameters are not applicable beyond Specified Temperature Range	-40		+85	°C	

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	---	---

#### 6.4 Electrical Specifications, Continued

VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	Units	Notes
<b>SERIAL INTERFACE</b>						
SPI Operating Frequency, All Registers Read/Write	MPU-6000 only, Low Speed Characterization		100 ±10%		kHz	
	MPU-6000 only, High Speed Characterization		1 ±10%		MHz	
SPI Operating Frequency, Sensor and Interrupt Registers Read Only	MPU-6000 only		20 ±10%		MHz	
I <sup>2</sup> C Operating Frequency	All registers, Fast-mode			400	kHz	
	All registers, Standard-mode			100	kHz	
<b>I<sup>2</sup>C ADDRESS</b>						
	AD0 = 0		1101000			
	AD0 = 1		1101001			
<b>DIGITAL INPUTS (SDI/SDA, AD0, SCLK/SCL, FSYNC, /CS, CLKIN)</b>						
V <sub>ih</sub> , High Level Input Voltage	MPU-6000	0.7*VDD			V	
	MPU-6050	0.7*VLOGIC			V	
V <sub>il</sub> , Low Level Input Voltage	MPU-6000			0.3*VDD	V	
	MPU-6050			0.3*VLOGIC	V	
C <sub>i</sub> , Input Capacitance			< 5		pF	
<b>DIGITAL OUTPUT (SDO, INT)</b>						
V <sub>oh</sub> , High Level Output Voltage	R <sub>LOAD</sub> =1MΩ; MPU-6000	0.9*VDD			V	
	R <sub>LOAD</sub> =1MΩ; MPU-6050	0.9*VLOGIC			V	
V <sub>oh1</sub> , LOW-Level Output Voltage	R <sub>LOAD</sub> =1MΩ; MPU-6000			0.1*VDD	V	
	R <sub>LOAD</sub> =1MΩ; MPU-6050			0.1*VLOGIC	V	
V <sub>ohINT1</sub> , INT Low-Level Output Voltage	OPEN=1, 0.3mA sink Current			0.1	V	
Output Leakage Current	OPEN=1		100		nA	
t <sub>INT</sub> , INT Pulse Width	LATCH_INT_EN=0		50		μs	

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	---	---

#### 6.5 Electrical Specifications, Continued

Typical Operating Circuit of Section 7.2, VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

Parameters	Conditions	Typical	Units	Notes
<b>Primary I<sup>2</sup>C I/O (SCL, SDA)</b>				
V <sub>il</sub> , LOW-Level Input Voltage	MPU-6000	-0.5 to 0.3*VDD	V	
V <sub>ih</sub> , HIGH-Level Input Voltage	MPU-6000	0.7*VDD to VDD + 0.5V	V	
V <sub>hys</sub> , Hysteresis	MPU-6000	0.1*VDD	V	
V <sub>il</sub> , LOW Level Input Voltage	MPU-6050	-0.5V to 0.3*VLOGIC	V	
V <sub>ih</sub> , HIGH-Level Input Voltage	MPU-6050	0.7*VLOGIC to VLOGIC + 0.5V	V	
V <sub>hys</sub> , Hysteresis	MPU-6050	0.1*VLOGIC	V	
V <sub>oh1</sub> , LOW-Level Output Voltage	3mA sink current	0 to 0.4	V	
I <sub>oh</sub> , LOW-Level Output Current	V <sub>oh</sub> = 0.4V	3	mA	
	V <sub>oh</sub> = 0.6V	5	mA	
Output Leakage Current		100	nA	
t <sub>of</sub> , Output Fall Time from V <sub>ihmax</sub> to V <sub>ilmax</sub>	C <sub>b</sub> bus capacitance in pF	20+0.1C <sub>b</sub> to 250	ns	
C <sub>i</sub> , Capacitance for Each I/O pin		< 10	pF	
<b>Auxiliary I<sup>2</sup>C I/O (AUX_CL, AUX_DA)</b>				
V <sub>il</sub> , LOW-Level Input Voltage	MPU-6050: AUX_VDDIO=0	-0.5V to 0.3*VLOGIC	V	
V <sub>ih</sub> , HIGH-Level Input Voltage		0.7*VLOGIC to VLOGIC + 0.5V	V	
V <sub>hys</sub> , Hysteresis		0.1*VLOGIC	V	
V <sub>oh1</sub> , LOW-Level Output Voltage	VLOGIC > 2V; 1mA sink current	0 to 0.4	V	
V <sub>oh2</sub> , LOW-Level Output Voltage	VLOGIC < 2V; 1mA sink current	0 to 0.2*VLOGIC	V	
I <sub>oh</sub> , LOW-Level Output Current	V <sub>oh</sub> = 0.4V	1	mA	
	V <sub>oh</sub> = 0.6V	1	mA	
Output Leakage Current		100	nA	
t <sub>of</sub> , Output Fall Time from V <sub>ihmax</sub> to V <sub>ilmax</sub>	C <sub>b</sub> bus capacitance in pF	20+0.1C <sub>b</sub> to 250	ns	
C <sub>i</sub> , Capacitance for Each I/O pin		< 10	pF	

### 6.6 Electrical Specifications, Continued

Typical Operating Circuit of Section 7.2, VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

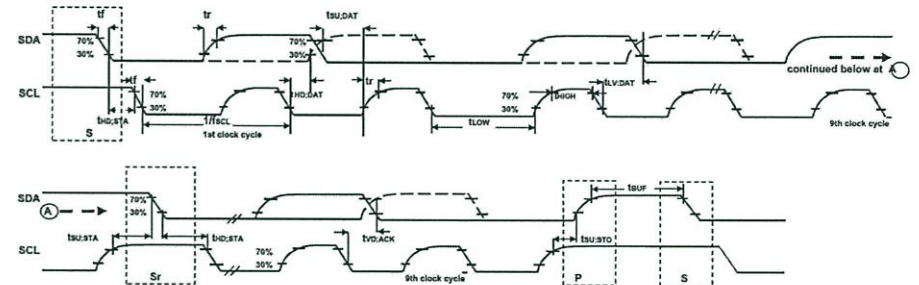
Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
<b>INTERNAL CLOCK SOURCE</b>						
Gyroscope Sample Rate, Fast	CLK_SEL=0,1,2,3 DLPFCFG=0 SAMPLERATEDIV = 0		8		kHz	
Gyroscope Sample Rate, Slow	DLPFCFG=1,2,3,4,5, or 6 SAMPLERATEDIV = 0		1		kHz	
Accelerometer Sample Rate			1		kHz	
Clock Frequency Initial Tolerance	CLK_SEL=0, 25°C CLK_SEL=1,2,3; 25°C	-5		+5	%	
Frequency Variation over Temperature	CLK_SEL=0 CLK_SEL=1,2,3	-1	-15 to +10	+1	%	
PLL Settling Time	CLK_SEL=1,2,3 CLK_SEL=1,2,3		±1	10	ms	
<b>EXTERNAL 32.768kHz CLOCK</b>	CLK_SEL=4					
External Clock Frequency			32.768		kHz	
External Clock Allowable Jitter	Cycle-to-cycle rms		1 to 2		µs	
Gyroscope Sample Rate, Fast	DLPFCFG=0 SAMPLERATEDIV = 0		8.192		kHz	
Gyroscope Sample Rate, Slow	DLPFCFG=1,2,3,4,5, or 6 SAMPLERATEDIV = 0		1.024		kHz	
Accelerometer Sample Rate			1.024		kHz	
PLL Settling Time			1	10	ms	
<b>EXTERNAL 19.2MHz CLOCK</b>	CLK_SEL=5					
External Clock Frequency			19.2		MHz	
Gyroscope Sample Rate	Full programmable range	3.9		8000	Hz	
Gyroscope Sample Rate, Fast Mode	DLPFCFG=0 SAMPLERATEDIV = 0		8		kHz	
Gyroscope Sample Rate, Slow Mode	DLPFCFG=1,2,3,4,5, or 6 SAMPLERATEDIV = 0		1		kHz	
Accelerometer Sample Rate			1		kHz	
PLL Settling Time			1	10	ms	

### 6.7 I<sup>2</sup>C Timing Characterization

Typical Operating Circuit of Section 7.2, VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
<b>I<sup>2</sup>C TIMING</b>	<b>I<sup>2</sup>C FAST-MODE</b>					
f <sub>SCL</sub> , SCL Clock Frequency				400	kHz	
t <sub>HD,STA</sub> , (Repeated) START Condition Hold Time		0.6			µs	
t <sub>LOW</sub> , SCL Low Period		1.3			µs	
t <sub>HIGH</sub> , SCL High Period		0.6			µs	
t <sub>SU,STA</sub> , Repeated START Condition Setup Time		0.6			µs	
t <sub>HD,DAT</sub> , SDA Data Hold Time		0			µs	
t <sub>SU,DAT</sub> , SDA Data Setup Time		100			ns	
t <sub>r</sub> , SDA and SCL Rise Time	C <sub>b</sub> bus cap. from 10 to 400pF	20+0.1C <sub>b</sub>		300	ns	
t <sub>f</sub> , SDA and SCL Fall Time	C <sub>b</sub> bus cap. from 10 to 400pF	20+0.1C <sub>b</sub>		300	ns	
t <sub>SU,STO</sub> , STOP Condition Setup Time		0.6			µs	
t <sub>BUF</sub> , Bus Free Time Between STOP and START Condition		1.3			µs	
C <sub>b</sub> , Capacitive Load for each Bus Line			< 400		pF	
t <sub>VD,DAT</sub> , Data Valid Time				0.9	µs	
t <sub>VD,ACK</sub> , Data Valid Acknowledge Time				0.9	µs	

Note: Timing Characteristics apply to both Primary and Auxiliary I<sup>2</sup>C Bus

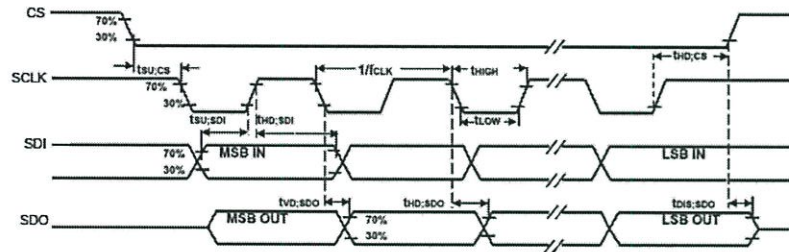


I<sup>2</sup>C Bus Timing Diagram

### 6.8 SPI Timing Characterization (MPU-6000 only)

Typical Operating Circuit of Section 7.2, VDD = 2.375V-3.46V, VLOGIC (MPU-6050 only) = 1.8V±5% or VDD, T<sub>A</sub> = 25°C, unless otherwise noted.

Parameters	Conditions	Min	Typical	Max	Units	Notes
<b>SPI TIMING</b>						
f <sub>SCLK</sub> , SCLK Clock Frequency				1	MHz	
t <sub>LOW</sub> , SCLK Low Period		400			ns	
t <sub>HIGH</sub> , SCLK High Period		400			ns	
t <sub>SU,CS</sub> , CS Setup Time		8			ns	
t <sub>HO,CS</sub> , CS Hold Time		500			ns	
t <sub>SU,SDI</sub> , SDI Setup Time		11			ns	
t <sub>HO,SDI</sub> , SDI Hold Time		7			ns	
t <sub>VD,SDO</sub> , SDO Valid Time	C <sub>load</sub> = 20pF			100	ns	
t <sub>HD,SDO</sub> , SDO Hold Time	C <sub>load</sub> = 20pF	4			ns	
t <sub>DIS,SDO</sub> , SDO Output Disable Time				10	ns	



SPI Bus Timing Diagram

### 6.9 Absolute Maximum Ratings

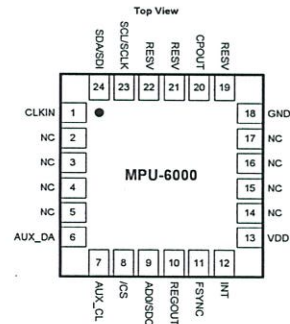
Stress above those listed as "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only and functional operation of the device at these conditions is not implied. Exposure to the absolute maximum ratings conditions for extended periods may affect device reliability.

Parameter	Rating
Supply Voltage, VDD	-0.5V to +6V
VLOGIC Input Voltage Level (MPU-6050)	-0.5V to VDD + 0.5V
REGOUT	-0.5V to 2V
Input Voltage Level (CLKIN, AUX_DA, AD0, FSYNC, INT, SCL, SDA)	-0.5V to VDD + 0.5V
CPOUT (2.5V ≤ VDD ≤ 3.6V)	-0.5V to 30V
Acceleration (Any Axis, unpowered)	10,000g for 0.2ms
Operating Temperature Range	-40°C to +105°C
Storage Temperature Range	-40°C to +125°C
Electrostatic Discharge (ESD) Protection	2kV (HBM); 250V (MM)
Latch-up	JEDEC Class II (2), 125°C ±100mA

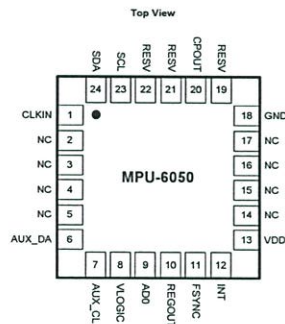
## 7 Applications Information

### 7.1 Pin Out and Signal Description

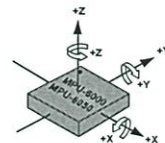
Pin Number	MPU-6000	MPU-6050	Pin Name	Pin Description
1	Y	Y	CLKIN	Optional external reference clock input. Connect to GND if unused.
6	Y	Y	AUX_DA	I <sup>2</sup> C master serial data, for connecting to external sensors
7	Y	Y	AUX_CL	I <sup>2</sup> C Master serial clock, for connecting to external sensors
8	Y		/CS	SPI chip select (0=SPI mode)
8		Y	VLOGIC	Digital I/O supply voltage
9	Y		AD0 / SDO	I <sup>2</sup> C Slave Address LSB (AD0); SPI serial data output (SDO)
9		Y	AD0	I <sup>2</sup> C Slave Address LSB (AD0)
10	Y	Y	REGOUT	Regulator filter capacitor connection
11	Y	Y	FSYNC	Frame synchronization digital input. Connect to GND if unused.
12	Y	Y	INT	Interrupt digital output (totem pole or open-drain)
13	Y	Y	VDD	Power supply voltage and Digital I/O supply voltage
18	Y	Y	GND	Power supply ground
19, 21	Y	Y	RESV	Reserved. Do not connect.
20	Y	Y	CPOUT	Charge pump capacitor connection
22	Y	Y	RESV	Reserved. Do not connect.
23	Y		SCL / SCLK	I <sup>2</sup> C serial clock (SCL); SPI serial clock (SCLK)
23		Y	SCL	I <sup>2</sup> C serial clock (SCL)
24	Y		SDA / SDI	I <sup>2</sup> C serial data (SDA); SPI serial data input (SDI)
24		Y	SDA	I <sup>2</sup> C serial data (SDA)
2, 3, 4, 5, 14, 15, 16, 17	Y	Y	NC	Not internally connected. May be used for PCB trace routing.



QFN Package  
24-pin, 4mm x 4mm x 0.9mm

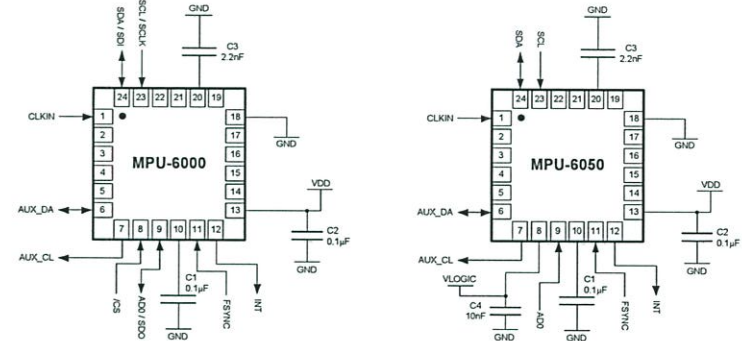


QFN Package  
24-pin, 4mm x 4mm x 0.9mm



Orientation of Axes of Sensitivity and  
Polarity of Rotation

### 7.2 Typical Operating Circuit



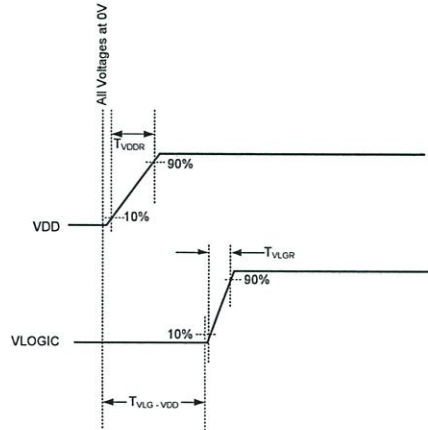
Typical Operating Circuits

### 7.3 Bill of Materials for External Components

Component	Label	Specification	Quantity
Regulator Filter Capacitor (Pin 10)	C1	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 2V	1
VDD Bypass Capacitor (Pin 13)	C2	Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 4V	1
Charge Pump Capacitor (Pin 20)	C3	Ceramic, X7R, 2.2nF ±10%, 50V	1
VLOGIC Bypass Capacitor (Pin 8)	C4*	Ceramic, X7R, 10nF ±10%, 4V	1

\* MPU-6050 Only.

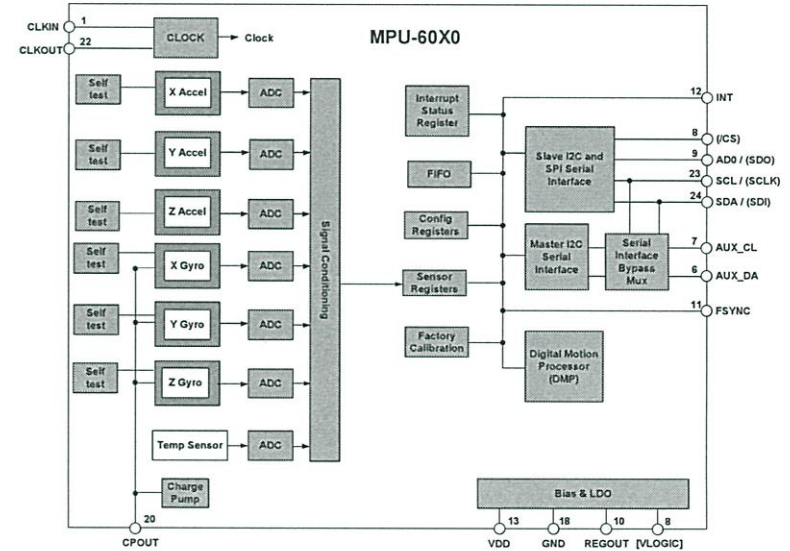
### 7.4 Recommended Power-on Procedure



#### Power-Up Sequencing

1. VLOGIC amplitude must always be  $\leq$ VDD amplitude
2.  $T_{VDDR}$  is VDD rise time: Time for VDD to rise from 10% to 90% of its final value
3.  $T_{VDDR}$  is  $\leq$ 100ms
4.  $T_{VLGR}$  is VLOGIC rise time: Time for VLOGIC to rise from 10% to 90% of its final value
5.  $T_{VLGR}$  is  $\leq$ 3ms
6.  $T_{VLG-VDD}$  is the delay from the start of VDD ramp to the start of VLOGIC rise
7.  $T_{VLG-VDD}$  is  $\geq$ 0
8. VDD and VLOGIC must be monotonic ramps

### 7.5 Block Diagram



Note: Pin names in round brackets ( ) apply only to MPU-6000  
Pin names in square brackets [ ] apply only to MPU-6050

### 7.6 Overview

The MPU-60X0 is comprised of the following key blocks and functions:

- Three-axis MEMS rate gyroscope sensor with 16-bit ADCs and signal conditioning
- Three-axis MEMS accelerometer sensor with 16-bit ADCs and signal conditioning
- Digital Motion Processor (DMP) engine
- Primary I<sup>2</sup>C and SPI (MPU-6000 only) serial communications interfaces
- Auxiliary I<sup>2</sup>C serial interface for 3<sup>rd</sup> party magnetometer & other sensors
- Clocking
- Sensor Data Registers
- FIFO
- Interrupts
- Digital-Output Temperature Sensor
- Gyroscope & Accelerometer Self-test
- Bias and LDO
- Charge Pump

	<b>MPU-6000/MPU-6050 Product Specification</b>	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	--	---

### 7.7 Three-Axis MEMS Gyroscope with 16-bit ADCs and Signal Conditioning

The MPU-60X0 consists of three independent vibratory MEMS rate gyroscopes, which detect rotation about the X-, Y-, and Z- Axes. When the gyros are rotated about any of the sense axes, the Coriolis Effect causes a vibration that is detected by a capacitive pickoff. The resulting signal is amplified, demodulated, and filtered to produce a voltage that is proportional to the angular rate. This voltage is digitized using individual on-chip 16-bit Analog-to-Digital Converters (ADCs) to sample each axis. The full-scale range of the gyro sensors may be digitally programmed to  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ , or  $\pm 2000$  degrees per second (dps). The ADC sample rate is programmable from 8,000 samples per second, down to 3.9 samples per second, and user-selectable low-pass filters enable a wide range of cut-off frequencies.

### 7.8 Three-Axis MEMS Accelerometer with 16-bit ADCs and Signal Conditioning

The MPU-60X0's 3-Axis accelerometer uses separate proof masses for each axis. Acceleration along a particular axis induces displacement on the corresponding proof mass, and capacitive sensors detect the displacement differentially. The MPU-60X0's architecture reduces the accelerometers' susceptibility to fabrication variations as well as to thermal drift. When the device is placed on a flat surface, it will measure 0g on the X- and Y-axes and +1g on the Z-axis. The accelerometers' scale factor is calibrated at the factory and is nominally independent of supply voltage. Each sensor has a dedicated sigma-delta ADC for providing digital outputs. The full scale range of the digital output can be adjusted to  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ , or  $\pm 16g$ .

### 7.9 Digital Motion Processor

The embedded Digital Motion Processor (DMP) is located within the MPU-60X0 and offloads computation of motion processing algorithms from the host processor. The DMP acquires data from accelerometers, gyroscopes, and additional 3<sup>rd</sup> party sensors such as magnetometers, and processes the data. The resulting data can be read from the DMP's registers, or can be buffered in a FIFO. The DMP has access to one of the MPU's external pins, which can be used for generating interrupts.

The purpose of the DMP is to offload both timing requirements and processing power from the host processor. Typically, motion processing algorithms should be run at a high rate, often around 200Hz, in order to provide accurate results with low latency. This is required even if the application updates at a much lower rate; for example, a low power user interface may update as slowly as 5Hz, but the motion processing should still run at 200Hz. The DMP can be used as a tool in order to minimize power, simplify timing, simplify the software architecture, and save valuable MIPS on the host processor for use in the application.

### 7.10 Primary I<sup>2</sup>C and SPI Serial Communications Interfaces

The MPU-60X0 communicates to a system processor using either a SPI (MPU-6000 only) or an I<sup>2</sup>C serial interface. The MPU-60X0 always acts as a slave when communicating to the system processor. The LSB of the of the I<sup>2</sup>C slave address is set by pin 9 (AD0).

The logic levels for communications between the MPU-60X0 and its master are as follows:

- **MPU-6000:** The logic level for communications with the master is set by the voltage on VDD
- **MPU-6050:** The logic level for communications with the master is set by the voltage on VLOGIC

For further information regarding the logic levels of the MPU-6050, please refer to Section 10.

	<b>MPU-6000/MPU-6050 Product Specification</b>	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	--	---

### 7.11 Auxiliary I<sup>2</sup>C Serial Interface

The MPU-60X0 has an auxiliary I<sup>2</sup>C bus for communicating to an off-chip 3-Axis digital output magnetometer or other sensors. This bus has two operating modes:

- **I<sup>2</sup>C Master Mode:** The MPU-60X0 acts as a master to any external sensors connected to the auxiliary I<sup>2</sup>C bus
- **Pass-Through Mode:** The MPU-60X0 directly connects the primary and auxiliary I<sup>2</sup>C buses together, allowing the system processor to directly communicate with any external sensors.

#### Auxiliary I<sup>2</sup>C Bus Modes of Operation:

- **I<sup>2</sup>C Master Mode:** Allows the MPU-60X0 to directly access the data registers of external digital sensors, such as a magnetometer. In this mode, the MPU-60X0 directly obtains data from auxiliary sensors, allowing the on-chip DMP to generate sensor fusion data without intervention from the system applications processor.

For example, In I<sup>2</sup>C Master mode, the MPU-60X0 can be configured to perform burst reads, returning the following data from a magnetometer:

- X magnetometer data (2 bytes)
- Y magnetometer data (2 bytes)
- Z magnetometer data (2 bytes)

The I<sup>2</sup>C Master can be configured to read up to 24 bytes from up to 4 auxiliary sensors. A fifth sensor can be configured to work single byte read/write mode.

- **Pass-Through Mode:** Allows an external system processor to act as master and directly communicate to the external sensors connected to the auxiliary I<sup>2</sup>C bus pins (AUX\_DA and AUX\_CL). In this mode, the auxiliary I<sup>2</sup>C bus control logic (3<sup>rd</sup> party sensor interface block) of the MPU-60X0 is disabled, and the auxiliary I<sup>2</sup>C pins AUX\_DA and AUX\_CL (Pins 6 and 7) are connected to the main I<sup>2</sup>C bus (Pins 23 and 24) through analog switches.

Pass-Through Mode is useful for configuring the external sensors, or for keeping the MPU-60X0 in a low-power mode when only the external sensors are used.

In Pass-Through Mode the system processor can still access MPU-60X0 data through the I<sup>2</sup>C interface.

#### Auxiliary I<sup>2</sup>C Bus IO Logic Levels

- **MPU-6000:** The logic level of the auxiliary I<sup>2</sup>C bus is VDD
- **MPU-6050:** The logic level of the auxiliary I<sup>2</sup>C bus can be programmed to be either VDD or VLOGIC

For further information regarding the MPU-6050's logic levels, please refer to Section 10.2.

### 7.12 Self-Test

Please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document for more details on self test.

Self-test allows for the testing of the mechanical and electrical portions of the sensors. The self-test for each measurement axis can be activated by means of the gyroscope and accelerometer self-test registers (registers 13 to 16).

When self-test is activated, the electronics cause the sensors to be actuated and produce an output signal. The output signal is used to observe the self-test response.

The self-test response is defined as follows:

Self-test response = Sensor output with self-test enabled – Sensor output without self-test enabled

The self-test response for each accelerometer axis is defined in the accelerometer specification table (Section 6.2), while that for each gyroscope axis is defined in the gyroscope specification table (Section 6.1).

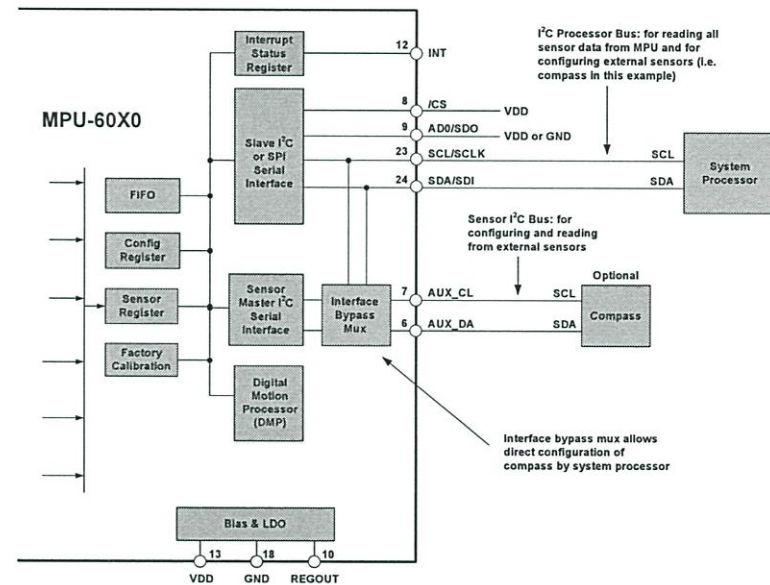
When the value of the self-test response is within the min/max limits of the product specification, the part has passed self test. When the self-test response exceeds the min/max values, the part is deemed to have failed self-test. Code for operating self test code is included within the MotionApps software provided by InvenSense.

### 7.13 MPU-60X0 Solution for 9-axis Sensor Fusion Using I<sup>2</sup>C Interface

In the figure below, the system processor is an I<sup>2</sup>C master to the MPU-60X0. In addition, the MPU-60X0 is an I<sup>2</sup>C master to the optional external compass sensor. The MPU-60X0 has limited capabilities as an I<sup>2</sup>C Master, and depends on the system processor to manage the initial configuration of any auxiliary sensors. The MPU-60X0 has an interface bypass multiplexer, which connects the system processor I<sup>2</sup>C bus pins 23 and 24 (SDA and SCL) directly to the auxiliary sensor I<sup>2</sup>C bus pins 6 and 7 (AUX\_DA and AUX\_CL).

Once the auxiliary sensors have been configured by the system processor, the interface bypass multiplexer should be disabled so that the MPU-60X0 auxiliary I<sup>2</sup>C master can take control of the sensor I<sup>2</sup>C bus and gather data from the auxiliary sensors.

For further information regarding I<sup>2</sup>C master control, please refer to Section 10.



#### 7.14 MPU-6000 Using SPI Interface

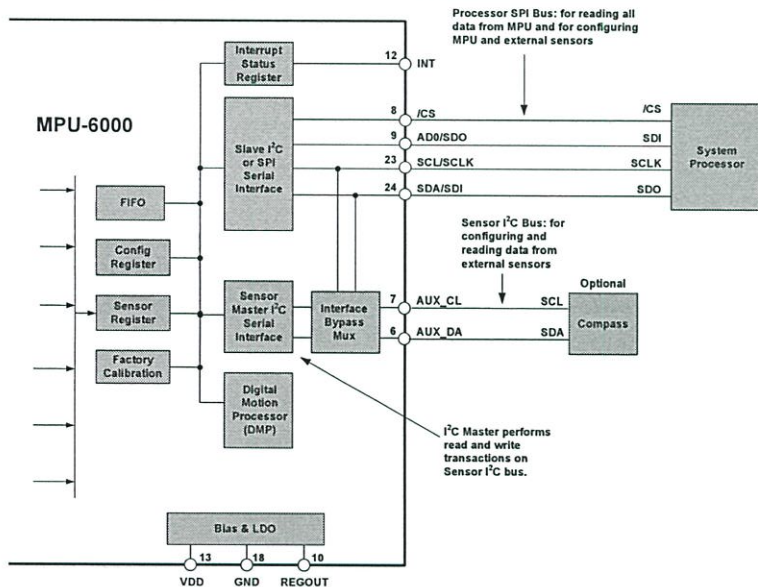
In the figure below, the system processor is an SPI master to the MPU-6000. Pins 8, 9, 23, and 24 are used to support the /CS, SDO, SCLK, and SDI signals for SPI communications. Because these SPI pins are shared with the I<sup>2</sup>C slave pins (9, 23 and 24), the system processor cannot access the auxiliary I<sup>2</sup>C bus through the interface bypass multiplexer, which connects the processor I<sup>2</sup>C interface pins to the sensor I<sup>2</sup>C interface pins.

Since the MPU-6000 has limited capabilities as an I<sup>2</sup>C Master, and depends on the system processor to manage the initial configuration of any auxiliary sensors, another method must be used for programming the sensors on the auxiliary sensor I<sup>2</sup>C bus pins 6 and 7 (AUX\_DA and AUX\_CL).

When using SPI communications between the MPU-6000 and the system processor, configuration of devices on the auxiliary I<sup>2</sup>C sensor bus can be achieved by using I<sup>2</sup>C Slaves 0-4 to perform read and write transactions on any device and register on the auxiliary I<sup>2</sup>C bus. The I<sup>2</sup>C Slave 4 interface can be used to perform only single byte read and write transactions.

Once the external sensors have been configured, the MPU-6000 can perform single or multi-byte reads using the sensor I<sup>2</sup>C bus. The read results from the Slave 0-3 controllers can be written to the FIFO buffer as well as to the external sensor registers.

For further information regarding the control of the MPU-60X0's auxiliary I<sup>2</sup>C interface, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document.



#### 7.15 Internal Clock Generation

The MPU-60X0 has a flexible clocking scheme, allowing a variety of internal or external clock sources to be used for the internal synchronous circuitry. This synchronous circuitry includes the signal conditioning and ADCs, the DMP, and various control circuits and registers. An on-chip PLL provides flexibility in the allowable inputs for generating this clock.

Allowable internal sources for generating the internal clock are:

- An internal relaxation oscillator
- Any of the X, Y, or Z gyros (MEMS oscillators with a variation of  $\pm 1\%$  over temperature)

Allowable external clocking sources are:

- 32.768kHz square wave
- 19.2MHz square wave

Selection of the source for generating the internal synchronous clock depends on the availability of external sources and the requirements for power consumption and clock accuracy. These requirements will most likely vary by mode of operation. For example, in one mode, where the biggest concern is power consumption, the user may wish to operate the Digital Motion Processor of the MPU-60X0 to process accelerometer data, while keeping the gyros off. In this case, the internal relaxation oscillator is a good clock choice. However, in another mode, where the gyros are active, selecting the gyros as the clock source provides for a more accurate clock source.

Clock accuracy is important, since timing errors directly affect the distance and angle calculations performed by the Digital Motion Processor (and by extension, by any processor).

There are also start-up conditions to consider. When the MPU-60X0 first starts up, the device uses its internal clock until programmed to operate from another source. This allows the user, for example, to wait for the MEMS oscillators to stabilize before they are selected as the clock source.

#### 7.16 Sensor Data Registers

The sensor data registers contain the latest gyro, accelerometer, auxiliary sensor, and temperature measurement data. They are read-only registers, and are accessed via the serial interface. Data from these registers may be read anytime. However, the interrupt function may be used to determine when new data is available.

For a table of interrupt sources please refer to Section 8.

#### 7.17 FIFO

The MPU-60X0 contains a 1024-byte FIFO register that is accessible via the Serial Interface. The FIFO configuration register determines which data is written into the FIFO. Possible choices include gyro data, accelerometer data, temperature readings, auxiliary sensor readings, and FSYNC input. A FIFO counter keeps track of how many bytes of valid data are contained in the FIFO. The FIFO register supports burst reads. The interrupt function may be used to determine when new data is available.

For further information regarding the FIFO, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document.

#### 7.18 Interrupts

Interrupt functionality is configured via the Interrupt Configuration register. Items that are configurable include the INT pin configuration, the interrupt latching and clearing method, and triggers for the interrupt. Items that can trigger an interrupt are (1) Clock generator locked to new reference oscillator (used when switching clock

sources); (2) new data is available to be read (from the FIFO and Data registers); (3) accelerometer event interrupts; and (4) the MPU-60X0 did not receive an acknowledge from an auxiliary sensor on the secondary I<sup>2</sup>C bus. The interrupt status can be read from the Interrupt Status register.

For further information regarding interrupts, please refer to the MPU-60X0 Register Map and Register Descriptions document.

For information regarding the MPU-60X0's accelerometer event interrupts, please refer to Section 8.

#### 7.19 Digital-Output Temperature Sensor

An on-chip temperature sensor and ADC are used to measure the MPU-60X0 die temperature. The readings from the ADC can be read from the FIFO or the Sensor Data registers.

#### 7.20 Bias and LDO

The bias and LDO section generates the internal supply and the reference voltages and currents required by the MPU-60X0. Its two inputs are an unregulated VDD of 2.375 to 3.46V and a VLOGIC logic reference supply voltage of 1.71V to VDD (MPU-6050 only). The LDO output is bypassed by a capacitor at REGOUT. For further details on the capacitor, please refer to the Bill of Materials for External Components (Section 7.3).

#### 7.21 Charge Pump

An on-board charge pump generates the high voltage required for the MEMS oscillators. Its output is bypassed by a capacitor at CPOUT. For further details on the capacitor, please refer to the Bill of Materials for External Components (Section 7.3).

## 8 Programmable Interrupts

The MPU-60X0 has a programmable interrupt system which can generate an interrupt signal on the INT pin. Status flags indicate the source of an interrupt. Interrupt sources may be enabled and disabled individually.

#### Table of Interrupt Sources

Interrupt Name	Module
FIFO Overflow	FIFO
Data Ready	Sensor Registers
I <sup>2</sup> C Master errors: Lost Arbitration, NACKs	I <sup>2</sup> C Master
I <sup>2</sup> C Slave 4	I <sup>2</sup> C Master

For information regarding the interrupt enable/disable registers and flag registers, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document. Some interrupt sources are explained below.

## 9 Digital Interface

### 9.1 I<sup>2</sup>C and SPI (MPU-6000 only) Serial Interfaces

The internal registers and memory of the MPU-6000/MPU-6050 can be accessed using either I<sup>2</sup>C at 400 kHz or SPI at 1MHz (MPU-6000 only). SPI operates in four-wire mode.

#### Serial Interface

Pin Number	MPU-6000	MPU-6050	Pin Name	Pin Description
8	Y		/CS	SPI chip select (0=SPI enable)
8		Y	VLOGIC	Digital I/O supply voltage. VLOGIC must be $\leq$ VDD at all times.
9	Y		AD0 / SDO	I <sup>2</sup> C Slave Address LSB (AD0); SPI serial data output (SDO)
9		Y	AD0	I <sup>2</sup> C Slave Address LSB
23	Y		SCL / SCLK	I <sup>2</sup> C serial clock (SCL); SPI serial clock (SCLK)
23		Y	SCL	I <sup>2</sup> C serial clock
24	Y		SDA / SDI	I <sup>2</sup> C serial data (SDA); SPI serial data input (SDI)
24		Y	SDA	I <sup>2</sup> C serial data

#### Note:

To prevent switching into I<sup>2</sup>C mode when using SPI (MPU-6000), the I<sup>2</sup>C interface should be disabled by setting the *I2C\_IF\_DIS* configuration bit. Setting this bit should be performed immediately after waiting for the time specified by the "Start-Up Time for Register Read/Write" in Section 6.3.

For further information regarding the *I2C\_IF\_DIS* bit, please refer to the MPU-6000/MPU-6050 Register Map and Register Descriptions document.

### 9.2 I<sup>2</sup>C Interface

I<sup>2</sup>C is a two-wire interface comprised of the signals serial data (SDA) and serial clock (SCL). In general, the lines are open-drain and bi-directional. In a generalized I<sup>2</sup>C interface implementation, attached devices can be a master or a slave. The master device puts the slave address on the bus, and the slave device with the matching address acknowledges the master.

The MPU-60X0 always operates as a slave device when communicating to the system processor, which thus acts as the master. SDA and SCL lines typically need pull-up resistors to VDD. The maximum bus speed is 400 kHz.

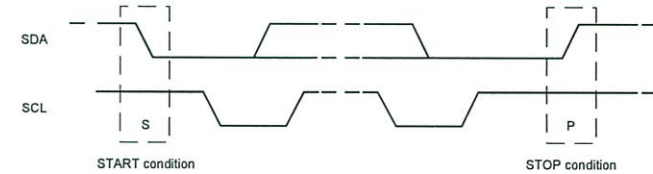
The slave address of the MPU-60X0 is b110100X which is 7 bits long. The LSB bit of the 7 bit address is determined by the logic level on pin AD0. This allows two MPU-60X0s to be connected to the same I<sup>2</sup>C bus. When used in this configuration, the address of the one of the devices should be b1101000 (pin AD0 is logic low) and the address of the other should be b1101001 (pin AD0 is logic high).

### 9.3 I<sup>2</sup>C Communications Protocol

#### START (S) and STOP (P) Conditions

Communication on the I<sup>2</sup>C bus starts when the master puts the START condition (S) on the bus, which is defined as a HIGH-to-LOW transition of the SDA line while SCL line is HIGH (see figure below). The bus is considered to be busy until the master puts a STOP condition (P) on the bus, which is defined as a LOW to HIGH transition on the SDA line while SCL is HIGH (see figure below).

Additionally, the bus remains busy if a repeated START (Sr) is generated instead of a STOP condition.

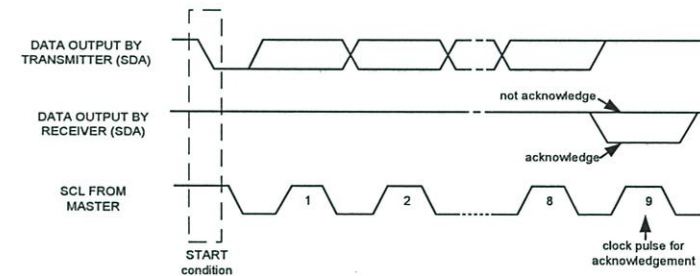


START and STOP Conditions

#### Data Format / Acknowledge

I<sup>2</sup>C data bytes are defined to be 8-bits long. There is no restriction to the number of bytes transmitted per data transfer. Each byte transferred must be followed by an acknowledge (ACK) signal. The clock for the acknowledge signal is generated by the master, while the receiver generates the actual acknowledge signal by pulling down SDA and holding it low during the HIGH portion of the acknowledge clock pulse.

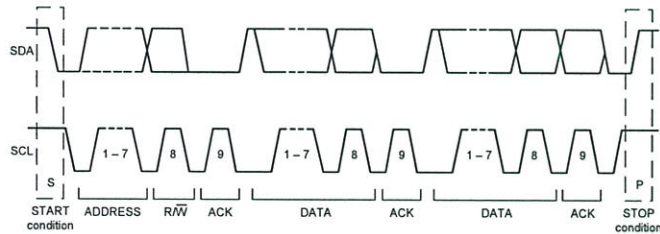
If a slave is busy and cannot transmit or receive another byte of data until some other task has been performed, it can hold SCL LOW, thus forcing the master into a wait state. Normal data transfer resumes when the slave is ready, and releases the clock line (refer to the following figure).



Acknowledge on the I<sup>2</sup>C Bus

**Communications**

After beginning communications with the START condition (S), the master sends a 7-bit slave address followed by an 8<sup>th</sup> bit, the read/write bit. The read/write bit indicates whether the master is receiving data from or is writing to the slave device. Then, the master releases the SDA line and waits for the acknowledge signal (ACK) from the slave device. Each byte transferred must be followed by an acknowledge bit. To acknowledge, the slave device pulls the SDA line LOW and keeps it LOW for the high period of the SCL line. Data transmission is always terminated by the master with a STOP condition (P), thus freeing the communications line. However, the master can generate a repeated START condition (Sr), and address another slave without first generating a STOP condition (P). A LOW to HIGH transition on the SDA line while SCL is HIGH defines the stop condition. All SDA changes should take place when SCL is low, with the exception of start and stop conditions.



**Complete I<sup>2</sup>C Data Transfer**

To write the internal MPU-60X0 registers, the master transmits the start condition (S), followed by the I<sup>2</sup>C address and the write bit (0). At the 9<sup>th</sup> clock cycle (when the clock is high), the MPU-60X0 acknowledges the transfer. Then the master puts the register address (RA) on the bus. After the MPU-60X0 acknowledges the reception of the register address, the master puts the register data onto the bus. This is followed by the ACK signal, and data transfer may be concluded by the stop condition (P). To write multiple bytes after the last ACK signal, the master can continue outputting data rather than transmitting a stop signal. In this case, the MPU-60X0 automatically increments the register address and loads the data to the appropriate register. The following figures show single and two-byte write sequences.

*Single-Byte Write Sequence*

Master	S	AD+W		RA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK	

*Burst Write Sequence*

Master	S	AD+W		RA		DATA		DATA		P
Slave			ACK		ACK		ACK		ACK	

To read the internal MPU-60X0 registers, the master sends a start condition, followed by the I<sup>2</sup>C address and a write bit, and then the register address that is going to be read. Upon receiving the ACK signal from the MPU-60X0, the master transmits a start signal followed by the slave address and read bit. As a result, the MPU-60X0 sends an ACK signal and the data. The communication ends with a not acknowledge (NACK) signal and a stop bit from master. The NACK condition is defined such that the SDA line remains high at the 9<sup>th</sup> clock cycle. The following figures show single and two-byte read sequences.

*Single-Byte Read Sequence*

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			NACK	P
Slave			ACK		ACK		ACK	DATA			

*Burst Read Sequence*

Master	S	AD+W		RA		S	AD+R			ACK		NACK	P
Slave			ACK		ACK		ACK	DATA		DATA			

**9.4 I<sup>2</sup>C Terms**

Signal	Description
S	Start Condition: SDA goes from high to low while SCL is high
AD	Slave I <sup>2</sup> C address
W	Write bit (0)
R	Read bit (1)
ACK	Acknowledge: SDA line is low while the SCL line is high at the 9 <sup>th</sup> clock cycle
NACK	Not-Acknowledge: SDA line stays high at the 9 <sup>th</sup> clock cycle
RA	MPU-60X0 internal register address
DATA	Transmit or received data
P	Stop condition: SDA going from low to high while SCL is high

### 9.5 SPI Interface (MPU-6000 only)

SPI is a 4-wire synchronous serial interface that uses two control lines and two data lines. The MPU-6000 always operates as a Slave device during standard Master-Slave SPI operation.

With respect to the Master, the Serial Clock output (SCLK), the Serial Data Output (SDO) and the Serial Data Input (SDI) are shared among the Slave devices. Each SPI slave device requires its own Chip Select (/CS) line from the master.

/CS goes low (active) at the start of transmission and goes back high (inactive) at the end. Only one /CS line is active at a time, ensuring that only one slave is selected at any given time. The /CS lines of the non-selected slave devices are held high, causing their SDO lines to remain in a high-impedance (high-z) state so that they do not interfere with any active devices.

#### SPI Operational Features

1. Data is delivered MSB first and LSB last
2. Data is latched on the rising edge of SCLK
3. Data should be transitioned on the falling edge of SCLK
4. The maximum frequency of SCLK is 1MHz
5. SPI read and write operations are completed in 16 or more clock cycles (two or more bytes). The first byte contains the SPI Address, and the following byte(s) contain(s) the SPI data. The first bit of the first byte contains the Read/Write bit and indicates the Read (1) or Write (0) operation. The following 7 bits contain the Register Address. In cases of multiple-byte Read/Writes, data is two or more bytes:

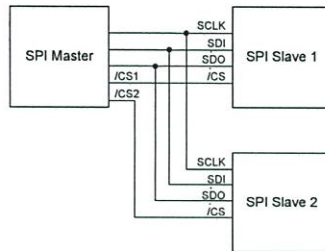
#### SPI Address format

<b>MSB</b>								<b>LSB</b>
RW	A6	A5	A4	A3	A2	A1	A0	

#### SPI Data format

<b>MSB</b>								<b>LSB</b>
D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	

6. Supports Single or Burst Read/Writes.



Typical SPI Master / Slave Configuration

## 10 Serial Interface Considerations (MPU-6050)

### 10.1 MPU-6050 Supported Interfaces

The MPU-6050 supports I<sup>2</sup>C communications on both its primary (microprocessor) serial interface and its auxiliary interface.

### 10.2 Logic Levels

The MPU-6050's I/O logic levels are set to VLOGIC, as shown in the table below. AUX\_VDDIO must be set to 0.

#### I/O Logic Levels vs. AUX\_VDDIO

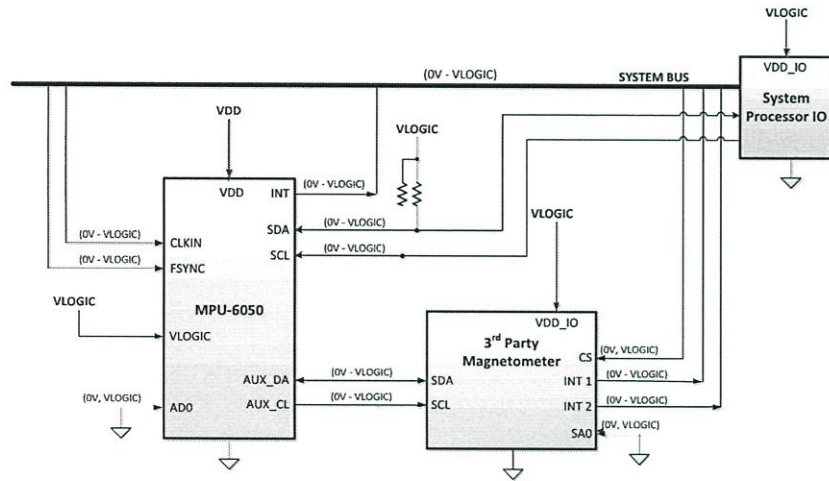
AUX_VDDIO	MICROPROCESSOR LOGIC LEVELS (Pins: SDA, SCL, AD0, CLKIN, INT)	AUXILIARY LOGIC LEVELS (Pins: AUX_DA, AUX_CL)
0	VLOGIC	VLOGIC

Note: The power-on-reset value for AUX\_VDDIO is 0.

When AUX\_VDDIO is set to 0 (its power-on-reset value), VLOGIC is the power supply voltage for both the microprocessor system bus and the auxiliary I<sup>2</sup>C bus, as shown in the figure of Section 10.3.

### 10.3 Logic Levels Diagram for AUX\_VDDIO = 0

The figure below depicts a sample circuit with a third party magnetometer attached to the auxiliary I<sup>2</sup>C bus. It shows logic levels and voltage connections for AUX\_VDDIO = 0. Note: Actual configuration will depend on the auxiliary sensors used.



I/O Levels and Connections for AUX\_VDDIO = 0

#### Notes:

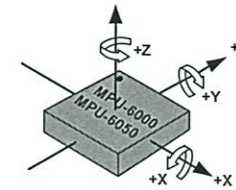
1. AUX\_VDDIO determines the IO voltage levels of AUX\_DA and AUX\_CL (0 = set output levels relative to VLOGIC)
2. All other MPU-6050 logic IOs are referenced to VLOGIC.

## 11 Assembly

This section provides general guidelines for assembling InvenSense Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS) gyros packaged in Quad Flat No leads package (QFN) surface mount integrated circuits.

### 11.1 Orientation of Axes

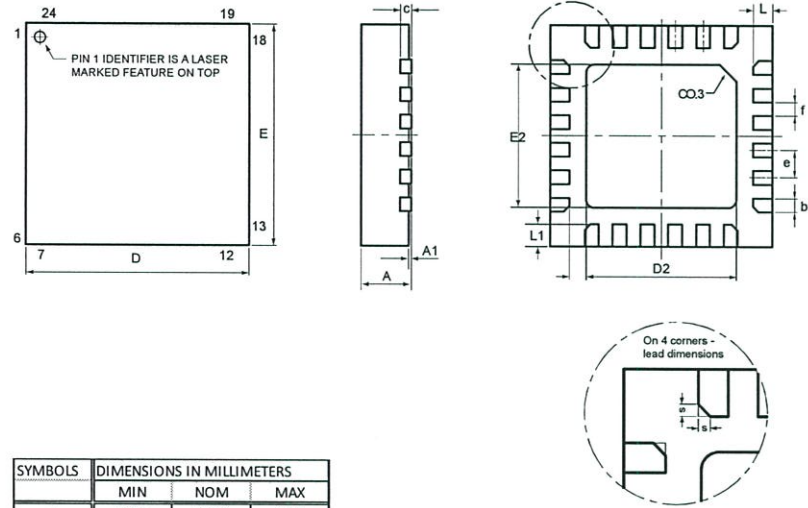
The diagram below shows the orientation of the axes of sensitivity and the polarity of rotation. Note the pin 1 identifier (•) in the figure.



Orientation of Axes of Sensitivity and Polarity of Rotation

### 11.2 Package Dimensions

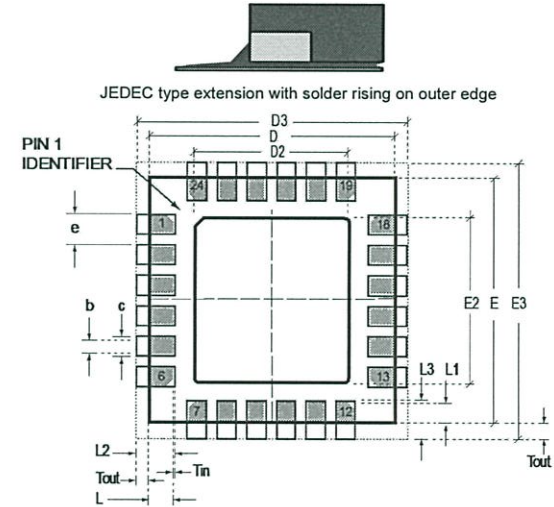
24 Lead QFN (4x4x0.9) mm NiPdAu Lead-frame finish



SYMBOLS	DIMENSIONS IN MILLIMETERS		
	MIN	NOM	MAX
A	0.85	0.90	0.95
A1	0.00	0.02	0.05
b	0.18	0.25	0.30
c	---	0.20 REF	---
D	3.90	4.00	4.10
D2	2.65	2.70	2.75
E	3.90	4.00	4.10
E2	2.55	2.60	2.65
e	---	0.50	---
f (e-b)	---	0.25	---
K	0.25	0.30	0.35
L	0.30	0.35	0.40
L1	0.35	0.40	0.45
s	0.05	---	0.15

### 11.3 PCB Design Guidelines

The Pad Diagram using a JEDEC type extension with solder rising on the outer edge is shown below. The Pad Dimensions Table shows pad sizing (mean dimensions) recommended for the MPU-60X0 product.



PCB Layout Diagram

SYMBOLS	DIMENSIONS IN MILLIMETERS	NOM
<b>Nominal Package I/O Pad Dimensions</b>		
e	Pad Pitch	0.50
b	Pad Width	0.25
L	Pad Length	0.35
L1	Pad Length	0.40
D	Package Width	4.00
E	Package Length	4.00
D2	Exposed Pad Width	2.70
E2	Exposed Pad Length	2.60
<b>I/O Land Design Dimensions (Guidelines)</b>		
D3	I/O Pad Extent Width	4.80
E3	I/O Pad Extent Length	4.80
c	Land Width	0.35
Tout	Outward Extension	0.40
Tin	Inward Extension	0.05
L2	Land Length	0.80
L3	Land Length	0.85

PCB Dimensions Table (for PCB Lay-out Diagram)

## 11.4 Assembly Precautions

### 11.4.1 Gyroscope Surface Mount Guidelines

InvenSense MEMS Gyros sense rate of rotation. In addition, gyroscopes sense mechanical stress coming from the printed circuit board (PCB). This PCB stress can be minimized by adhering to certain design rules:

When using MEMS gyroscope components in plastic packages, PCB mounting and assembly can cause package stress. This package stress in turn can affect the output offset and its value over a wide range of temperatures. This stress is caused by the mismatch between the Coefficient of Linear Thermal Expansion (CTE) of the package material and the PCB. Care must be taken to avoid package stress due to mounting.

Traces connected to pads should be as symmetric as possible. Maximizing symmetry and balance for pad connection will help component self alignment and will lead to better control of solder paste reduction after reflow.

Any material used in the surface mount assembly process of the MEMS gyroscope should be free of restricted RoHS elements or compounds. Pb-free solders should be used for assembly.

### 11.4.2 Exposed Die Pad Precautions

The MPU-60X0 has very low active and standby current consumption. The exposed die pad is not required for heat sinking, and should not be soldered to the PCB. Failure to adhere to this rule can induce performance changes due to package thermo-mechanical stress. There is no electrical connection between the pad and the CMOS.

### 11.4.3 Trace Routing

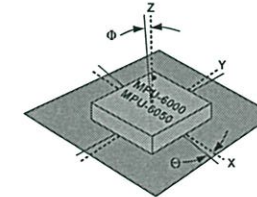
Routing traces or vias under the gyro package such that they run under the exposed die pad is prohibited. Routed active signals may harmonically couple with the gyro MEMS devices, compromising gyro response. These devices are designed with the drive frequencies as follows: X = 33±3Khz, Y = 30±3Khz, and Z=27±3Khz. To avoid harmonic coupling don't route active signals in non-shielded signal planes directly below, or above the gyro package. Note: For best performance, design a ground plane under the e-pad to reduce PCB signal noise from the board on which the gyro device is mounted. If the gyro device is stacked under an adjacent PCB board, design a ground plane directly above the gyro device to shield active signals from the adjacent PCB board.

### 11.4.4 Component Placement

Do not place large insertion components such as keyboard or similar buttons, connectors, or shielding boxes at a distance of less than 6 mm from the MEMS gyro. Maintain generally accepted industry design practices for component placement near the MPU-60X0 to prevent noise coupling and thermo-mechanical stress.

### 11.4.5 PCB Mounting and Cross-Axis Sensitivity

Orientation errors of the gyroscope and accelerometer mounted to the printed circuit board can cause cross-axis sensitivity in which one gyro or accel responds to rotation or acceleration about another axis, respectively. For example, the X-axis gyroscope may respond to rotation about the Y or Z axes. The orientation mounting errors are illustrated in the figure below.



Package Gyro & Accel Axes ( - - - ) Relative to PCB Axes ( — ) with Orientation Errors (Θ and Φ)

The table below shows the cross-axis sensitivity as a percentage of the gyroscope or accelerometer's sensitivity for a given orientation error.

Cross-Axis Sensitivity vs. Orientation Error	
Orientation Error (θ or Φ)	Cross-Axis Sensitivity (sinθ or sinΦ)
0°	0%
0.5°	0.87%
1°	1.75%

The specifications for cross-axis sensitivity in Section 6.1 and Section 6.2 include the effect of the die orientation error with respect to the package.

### 11.4.6 MEMS Handling Instructions

MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) are a time-proven, robust technology used in hundreds of millions of consumer, automotive and industrial products. MEMS devices consist of microscopic moving mechanical structures. They differ from conventional IC products, even though they can be found in similar packages. Therefore, MEMS devices require different handling precautions than conventional ICs prior to mounting onto printed circuit boards (PCBs).

The MPU-60X0 has been qualified to a shock tolerance of 10,000g. InvenSense packages its gyroscopes as it deems proper for protection against normal handling and shipping. It recommends the following handling precautions to prevent potential damage.

- Do not drop individually packaged gyroscopes, or trays of gyroscopes onto hard surfaces. Components placed in trays could be subject to g-forces in excess of 10,000g if dropped.
- Printed circuit boards that incorporate mounted gyroscopes should not be separated by manually snapping apart. This could also create g-forces in excess of 10,000g.
- Do not clean MEMS gyroscopes in ultrasonic baths. Ultrasonic baths can induce MEMS damage if the bath energy causes excessive drive motion through resonant frequency coupling.

### 11.4.7 ESD Considerations

Establish and use ESD-safe handling precautions when unpacking and handling ESD-sensitive devices.

- Store ESD sensitive devices in ESD safe containers until ready for use. The Tape-and-Reel moisture-sealed bag is an ESD approved barrier. The best practice is to keep the units in the original moisture sealed bags until ready for assembly.

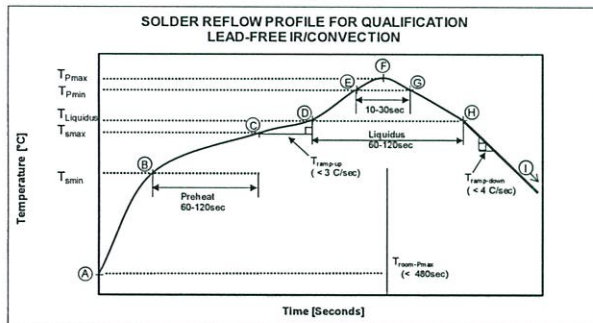
Restrict all device handling to ESD protected work areas that measure less than 200V static charge. Ensure that all workstations and personnel are properly grounded to prevent ESD.

#### 11.4.8 Reflow Specification

**Qualification Reflow:** The MPU-60X0 was qualified in accordance with IPC/JEDEC J-STD-020D.1. This standard classifies proper packaging, storage and handling in order to avoid subsequent thermal and mechanical damage during the solder reflow attachment phase of PCB assembly.

The qualification preconditioning process specifies a sequence consisting of a bake cycle, a moisture soak cycle (in a temperature humidity oven), and three consecutive solder reflow cycles, followed by functional device testing.

The peak solder reflow classification temperature requirement for package qualification is (260 +5/-0°C) for lead-free soldering of components measuring less than 1.6 mm in thickness. The qualification profile and a table explaining the set-points are shown below:



#### Temperature Set Points Corresponding to Reflow Profile Above

Step	Setting	CONSTRAINTS		
		Temp (°C)	Time (sec)	Max. Rate (°C/sec)
A	T <sub>room</sub>	25		
B	T <sub>smn</sub>	150		
C	T <sub>smax</sub>	200	60 < t <sub>CG</sub> < 120	
D	T <sub>Liquidus</sub>	217		r(T <sub>Liquidus</sub> -T <sub>Pmax</sub> ) < 3
E	T <sub>Pmin</sub> (255°C, 260°C)	255		r(T <sub>Liquidus</sub> -T <sub>Pmax</sub> ) < 3
F	T <sub>Pmax</sub> (260°C, 265°C)	260	t <sub>AP</sub> < 480	r(T <sub>Liquidus</sub> -T <sub>Pmax</sub> ) < 3
G	T <sub>Pmin</sub> (255°C, 260°C)	255	10 < t <sub>EG</sub> < 30	r(T <sub>Pmax</sub> -T <sub>Liquidus</sub> ) < 4
H	T <sub>Liquidus</sub>	217	60 < t <sub>HT</sub> < 120	
I	T <sub>room</sub>	25		

Notes: Customers must never exceed the Classification temperature (T<sub>Pmax</sub> = 260°C). All temperatures refer to the topside of the QFN package, as measured on the package body surface.

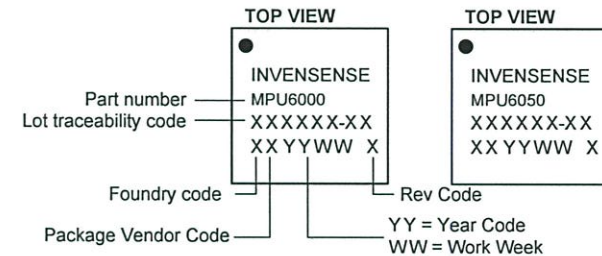
**Production Reflow:** Check the recommendations of your solder manufacturer. For optimum results, use lead-free solders that have lower specified temperature profiles (T<sub>Pmax</sub> ~ 235°C). Also use lower ramp-up and ramp-down rates than those used in the qualification profile. Never exceed the maximum conditions that we used for qualification, as these represent the maximum tolerable ratings for the device.

#### 11.5 Storage Specifications

The storage specification of the MPU-60X0 conforms to IPC/JEDEC J-STD-020D.1 Moisture Sensitivity Level (MSL) 3.

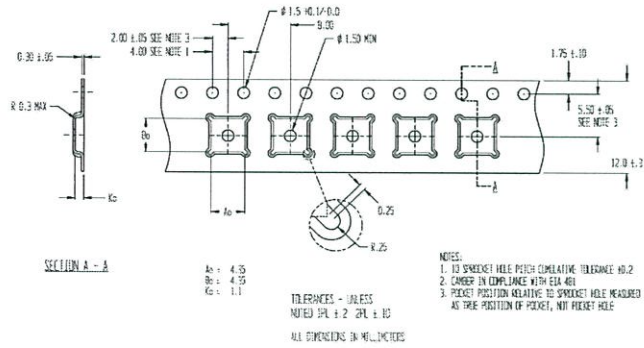
Calculated shelf-life in moisture-sealed bag	12 months -- Storage conditions: <40°C and <90% RH
After opening moisture-sealed bag	168 hours -- Storage conditions: ambient ≤30°C at 60%RH

#### 11.6 Package Marking Specification

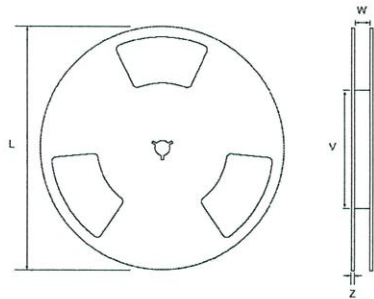


Package Marking Specification

### 11.7 Tape & Reel Specification



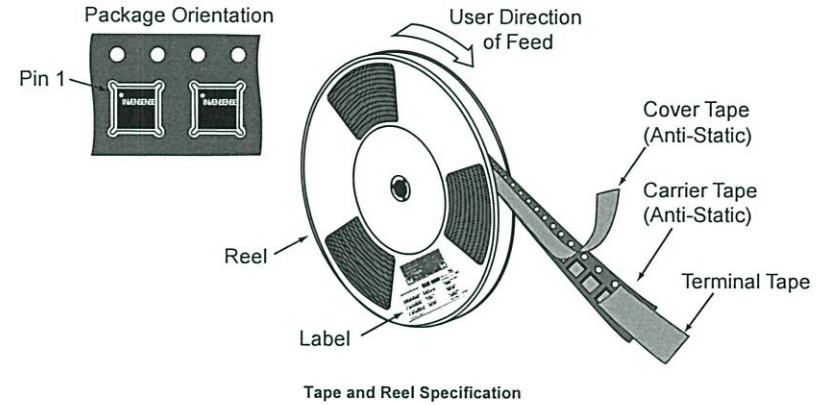
Tape Dimensions



Reel Outline Drawing

Reel Dimensions and Package Size

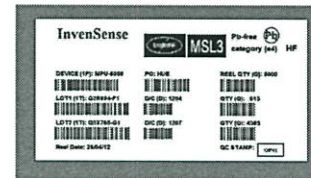
PACKAGE SIZE	REEL (mm)			
	L	V	W	Z
4x4	330	102	12.8	2.3



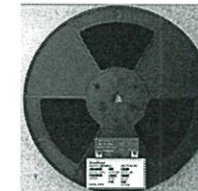
### Reel Specifications

Quantity Per Reel	5,000
Reels per Box	1
Boxes Per Carton (max)	5
Pcs/Carton (max)	25,000

### 11.8 Label



Barcode Label



Location of Label on Reel

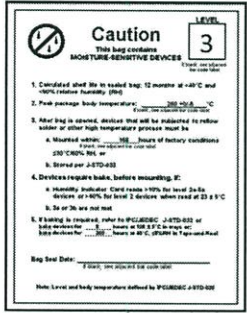
11.9 Packaging



REEL – with Barcode & Caution labels



Vacuum-Sealed Moisture Barrier Bag with ESD, MSL3, Caution, and Barcode Labels



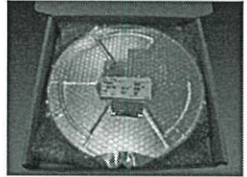
MSL3 Label



Caution Label



ESD Label



Inner Bubble Wrap



Pizza Box

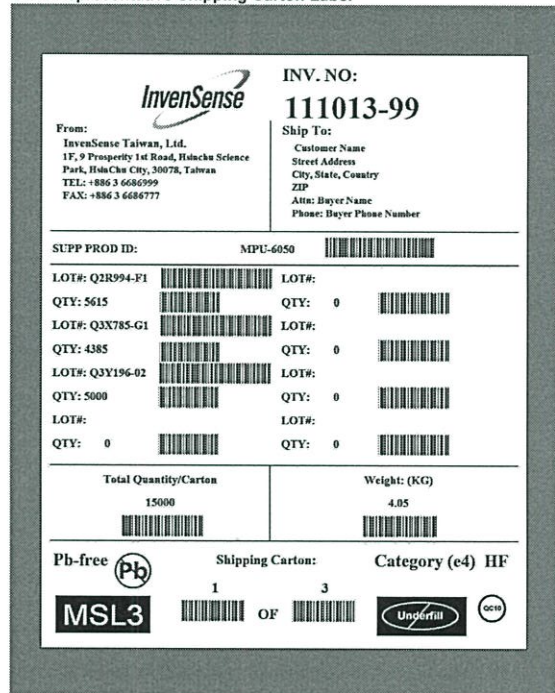


Pizza Boxes Placed in Foam-Lined Shipper Box



Outer Shipper Label

11.10 Representative Shipping Carton Label



	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	---	---

	MPU-6000/MPU-6050 Product Specification	Document Number: PS-MPU-6000A-00 Revision: 3.4 Release Date: 08/19/2013
---	---	---

## 12 Reliability

### 12.1 Qualification Test Policy

InvenSense's products complete a Qualification Test Plan before being released to production. The Qualification Test Plan for the MPU-60X0 followed the JESD471 Standards, "Stress-Test-Driven Qualification of Integrated Circuits," with the individual tests described below.

### 12.2 Qualification Test Plan

#### Accelerated Life Tests

TEST	Method/Condition	Lot Quantity	Sample / Lot	Acc / Reject Criteria
(HTOL/LFR) High Temperature Operating Life	JEDEC JESD22-A108D, Dynamic, 3.63V biased, Tj>125°C [read-points 168, 500, 1000 hours]	3	77	(0/1)
(HAST) Highly Accelerated Stress Test <sup>(1)</sup>	JEDEC JESD22-A118A Condition A, 130°C, 85%RH, 33.3 psia. unbiased, [read-point 96 hours]	3	77	(0/1)
(HTS) High Temperature Storage Life	JEDEC JESD22-A103D, Cond. A, 125°C Non-Bias Bake [read-points 168, 500, 1000 hours]	3	77	(0/1)

#### Device Component Level Tests

TEST	Method/Condition	Lot Quantity	Sample / Lot	Acc / Reject Criteria
(ESD-HBM) ESD-Human Body Model	JEDEC JS-001-2012, (2KV)	1	3	(0/1)
(ESD-MM) ESD-Machine Model	JEDEC JESD22-A115C, (250V)	1	3	(0/1)
(LU) Latch Up	JEDEC JESD-78D Class II (2), 125°C; ±100mA	1	6	(0/1)
(MS) Mechanical Shock	JEDEC JESD22-B104C, Mil-Std-883, Method 2002.5, Cond. E, 10,000g's, 0.2ms, ±X, Y, Z – 6 directions, 5 times/direction	3	5	(0/1)
(VIB) Vibration	JEDEC JESD22-B103B, Variable Frequency (random), Cond. B, 5-500Hz, X, Y, Z – 4 times/direction	3	5	(0/1)
(TC) Temperature Cycling <sup>(1)</sup>	JEDEC JESD22-A104D Condition G [-40°C to +125°C], Soak Mode 2 [5], 1000 cycles	3	77	(0/1)

#### Board Level Tests

TEST	Method/Condition	Lot Quantity	Sample / Lot	Acc / Reject Criteria
(BMS) Board Mechanical Shock	JEDEC JESD22-B104C, Mil-Std-883, Method 2002.5, Cond. E, 10000g's, 0.2ms, ±X, Y, Z – 6 directions, 5 times/direction	1	5	(0/1)
(BTC) Board Temperature Cycling <sup>(1)</sup>	JEDEC JESD22-A104D Condition G [-40°C to +125°C], Soak mode 2 [5], 1000 cycles	1	40	(0/1)

(1) Tests are preceded by MSL3 Preconditioning in accordance with JEDEC JESD22-A113F

## 13 Environmental Compliance

The MPU-6000/MPU-6050 is RoHS and Green compliant.

The MPU-6000/MPU-6050 is in full environmental compliance as evidenced in report HS-MPU-6000, Materials Declaration Data Sheet.

#### Environmental Declaration Disclaimer:

InvenSense believes this environmental information to be correct but cannot guarantee accuracy or completeness. Conformity documents for the above component constitutes are on file. InvenSense subcontracts manufacturing and the information contained herein is based on data received from vendors and suppliers, which has not been validated by InvenSense.

This information furnished by InvenSense is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by InvenSense for its use, or for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications are subject to change without notice. InvenSense reserves the right to make changes to this product, including its circuits and software, in order to improve its design and/or performance, without prior notice. InvenSense makes no warranties, neither expressed nor implied, regarding the information and specifications contained in this document. InvenSense assumes no responsibility for any claims or damages arising from information contained in this document, or from the use of products and services detailed therein. This includes, but is not limited to, claims or damages based on the infringement of patents, copyrights, mask work and/or other intellectual property rights.

Certain intellectual property owned by InvenSense and described in this document is patent protected. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of InvenSense. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. Trademarks that are registered trademarks are the property of their respective companies. InvenSense sensors should not be used or sold in the development, storage, production or utilization of any conventional or mass-destructive weapons or for any other weapons or life threatening applications, as well as in any other life critical applications such as medical equipment, transportation, aerospace and nuclear instruments, undersea equipment, power plant equipment, disaster prevention and crime prevention equipment.

InvenSense® is a registered trademark of InvenSense, Inc. MPU™, MPU-6000™, MPU-6050™, MPU-60X0™, Digital Motion Processor™, DMP™, Motion Processing Unit™, MotionFusion™, MotionInterface™, MotionTracking™, and MotionApps™ are trademarks of InvenSense, Inc.

©2013 InvenSense, Inc. All rights reserved.

