

เครื่องวัดความสูงการกระโดดในแนวตั้งโดยอาศัยหลักการของค่า
ความจุไฟฟ้า

VERTICAL JUMP MEASUREMENT BASED ON CAPACITIVE
SENSING APPROACH



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2560
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VERTICAL JUMP MEASUREMENT BASED ON CAPACITIVE
SENSING APPROACH



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
(APPLIED PHYSICS) DEPARTMENT OF PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ACADEMIC YEAR 2017




ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ เครื่องวัดความสูงการกระโดดในแนวดิ่งโดยอาศัยหลักการของค่าความจุไฟฟ้า
Vertical Jump Measurement Based On Capacitive Sensing Approach

ชื่อนักศึกษา นายคนวัฒน์ ชีรพงศ์วิกรัย รหัสนักศึกษา 57050936
นายธนบูรณ์ กิตินาศิลป์ รหัสนักศึกษา 57050977

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
ปีการศึกษา 2560
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.อนุพงศ์ สรียงประภา ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี กรรมการ	ผ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี
อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ กรรมการ	
ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปะลงเนื้อหาและที่อยู่ของเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	เครื่องวัดความสูงการกระโดดในแนวตั้งโดยอาศัยหลักการของคาปาซิทีฟ
ชื่อนักศึกษา	นายคนวัฒน์ ธีรพงศ์วิกรัย รหัสนักศึกษา 57050936 นายธนบูรณ์ กิตินาศิลป์ รหัสนักศึกษา 57050977
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ภาณุพล โขลนกระโทก

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาเครื่องวัดความสูงการกระโดดในแนวตั้ง ซึ่งอาศัยหลักการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์ เพื่อประมวลผลความสูงในการกระโดดโดยใช้เวลาจากการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งการวิจัยได้เป็น 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ทำการสร้างและทดสอบการใช้งานแผ่น Capacitive Sensor ซึ่งทดสอบค่าของ Capacitive Sensor ขณะที่ไม่มีคนเหยียบได้ 29.60 pF และ ค่าของ Capacitive Sensor ขณะที่มีคนเหยียบได้ 689.90 pF ในขั้นตอนที่ 2 ผู้วิจัยได้ทำการสร้างวงจรแปลงสัญญาณ โดยประกอบด้วย วงจร Capacitive to Frequency วงจร Rectifier วงจร Frequency to Voltage และ วงจร Comparator สัญญาณเอาต์พุตที่ได้ในส่วนนี้เป็นสัญญาณลอจิก และ ในขั้นตอนที่ 3 เป็นการประมวลผลข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์ เพื่อหาระยะความสูงของการกระโดดในแนวตั้ง ในการทดสอบให้ผู้ทดสอบจำนวน 27 คน กระโดดในแนวตั้งบนแผ่น Capacitive Sensor ซึ่งพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ที่ 18.61%

คำสำคัญ : การกระโดดในแนวตั้ง, วงจรจัดการสัญญาณ, วิทยาการศึกษาศาสตร์การกีฬา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Vertical jump measurement based on capacitive sensing approach
Students	Mr.Kanawat Treerapongwikrai Student ID 57050936 Mr.Thanaboon Kitipanasilp Student ID 57050977
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2017
Advisor	Dr.Bhanupol Klonkratog

Abstract

This special project is a study and development of a vertical jump measurement based on the principle of moving physics. To process the jump height using time in vertical motion. The researcher divided the research into 3 steps. Step 1, Creating and testing the Capacitive Sensor without a pedal is 29.60 pF and the value of the Capacitive Sensor while pedal is 689.90 pF. In step 2, the researchers created a conditional circuit. It consists of Capacitive to Frequency circuit, Rectifier circuit, Frequency to Voltage circuit and comparator circuit. The output signal in this section is logic signal In step 3 is Computer data processing. To find the vertical height of the jump. In the test, the number of 27 testers jumped vertically on a capacitive sensor. The result the test showed of average error is 18.61%

Keyword : Vertical Jump, Conditional circuit, Sports Science

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากการช่วยเหลือ และสนับสนุนจาก ดร.ภาณุพล โขลอนกระโทก ผู้ให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอด และยังเสนอแนะข้อสงสัยต่างๆ ทำให้คณะผู้จัดทำมีความรู้ความเข้าใจ และแนวทางที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้ด้วย

ขอขอบคุณนายวริทธิ์ เบ็งโต และนายทศพร วอนเกิด ที่ให้ความรู้ และช่วยเหลือในการสนับสนุนด้านโปรแกรมประมวลผลในการทำโครงการพิเศษ และเป็นที่ยี่ปรึกษาพร้อมทั้งให้กำลังใจที่ดีตลอดมา ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณอาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ปฏิบัติงาน และเครื่องมือที่สำคัญในการทำโครงการพิเศษนี้เสมอมา

ขอขอบคุณนักกีฬาบาสเกตบอล และผู้ทำการทดสอบทุกคนที่ช่วยเหลือการบันทึกผลข้อมูลการกระโดดในการทำโครงการพิเศษมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกคนที่ให้คำปรึกษาแก้ไขปัญหาช่วยเหลือ และให้กำลังใจในการทำโครงการพิเศษจนสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่เมตตาตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบัน ตลอดจน กราบขอบพระคุณ ครอบครัว ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ทุนทรัพย์ และคอยเป็นแรงผลักดันให้คณะผู้จัดทำมีพลังในการทำโครงการพิเศษนี้ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่สุดในการศึกษา และการทำโครงการพิเศษนี้

นายคมวัฒน์ ชีรพงศ์วิกรัย

นายธนบุรณ์ กิติพนาศิลป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญ(ต่อ)	จ
สารบัญ(ต่อ)	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญตาราง(ต่อ)	ซ
สารบัญรูป	ฌ
สารบัญรูป(ต่อ)	ญ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการกระโดด	3
2.1.1 การกระโดด(Jump)	3
2.2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ใน 2 มิติ	4
2.2.1 ปริมาณสเกลาร์ (Scalar Quantity)	4
2.2.2 ปริมาณเวกเตอร์ (Vector Quantity)	4
2.2.3 เวกเตอร์การกระจัด (Vector Displacement)	4
2.2.4 ความเร็วเฉลี่ย (Average Velocity)	4
2.2.5 ความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Velocity)	5
2.2.6 ความเร่งเฉลี่ย (Average Velocity)	5
2.2.7 ความเร่งขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Acceleration)	6
2.2.8 การเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ในสองมิติ	6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.9 การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์	7
2.2.10 ระยะไกลสุดของการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์	7
2.3 เครื่องมือและการวัดความสูง	8
2.4 เซนเซอร์วัดแรง	10
2.4.1 Load Cell	10
2.4.2 สเตรนเกจ(Strain Gauge)	11
2.4.3 Force Sensing Resistor (FSR)	12
2.4.4 Capacitive Sensor	12
2.4.4.1 ทฤษฎีตัวเก็บประจุ	12
2.5 วงจรแปลงสัญญาณ	17
2.5.1 Capacitive to Frequency	17
2.5.2 Frequency to Voltage	18
2.5.3 Comparator	19
บทที่ 3 การออกแบบและขั้นตอนการทดลอง	
3.1 การออกแบบเครื่องมือ	21
3.2 การออกแบบ Capacitive Sensor	22
3.3 วงจรจัดการสัญญาณ	25
บทที่ 4 ผลวิจัยและอภิปรายผล	
4.1 การออกแบบระบบ	26
4.2 การทดลองวงจรตรวจสอบสัญญาณ	27
4.2.1 ผลตอบสนองของวงจร	27
4.3 การประมวลผลข้อมูล	28
4.3.1 LabView	28
4.4 การตอบสนองข้อมูล	30
4.3.1 ผลการตอบสนองของ Capacitive Sensor	30
4.5 อุปกรณ์อ้างอิง	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปลผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปลผลการวิจัย	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ	14
4.1 บันทึกผลของ คนที่ 1 สูง 160 cm. น้ำหนัก 72 Kg. เพศชาย	31
4.2 บันทึกผลของ คนที่ 2 สูง 175 cm. น้ำหนัก 80 Kg. เพศชาย	32
4.3 บันทึกผลของ คนที่ 3 สูง 174 cm. น้ำหนัก 75 Kg. เพศชาย	32
4.4 บันทึกผลของ คนที่ 4 สูง 173 cm. น้ำหนัก 74 Kg. เพศชาย	33
4.5 บันทึกผลของ คนที่ 5 สูง 168 cm. น้ำหนัก 58 Kg. เพศชาย	33
4.6 บันทึกผลของ คนที่ 6 สูง 175 cm. น้ำหนัก 71 Kg. เพศชาย	34
4.7 บันทึกผลของ คนที่ 7 สูง 163 cm. น้ำหนัก 51 Kg. เพศหญิง	34
4.8 บันทึกผลของ คนที่ 8 สูง 174 cm. น้ำหนัก 68 Kg. เพศชาย	35
4.9 บันทึกผลของ คนที่ 9 สูง 175 cm. น้ำหนัก 70 Kg. เพศชาย	35
4.10 บันทึกผลของ คนที่ 10 สูง 168 cm. น้ำหนัก 58 Kg. เพศชาย	36
4.11 บันทึกผลของ คนที่ 11 สูง 168 cm. น้ำหนัก 48 Kg. เพศชาย	36
4.12 บันทึกผลของ คนที่ 12 สูง 168 cm. น้ำหนัก 52 Kg. เพศชาย	37
4.13 บันทึกผลของ คนที่ 13 สูง 164 cm. น้ำหนัก 90 Kg. เพศชาย	37
4.14 บันทึกผลของ คนที่ 14 สูง 163 cm. น้ำหนัก 65 Kg. เพศชาย	38
4.15 บันทึกผลของ คนที่ 15 สูง 187 cm. น้ำหนัก 115 Kg. เพศชาย	38
4.16 บันทึกผลของ คนที่ 16 สูง 176 cm. น้ำหนัก 65 Kg. เพศชาย	39
4.17 บันทึกผลของ คนที่ 17 สูง 166 cm. น้ำหนัก 54 Kg. เพศหญิง	39
4.18 บันทึกผลของ คนที่ 18 สูง 160 cm. น้ำหนัก 49 Kg. เพศหญิง	40
4.19 บันทึกผลของ คนที่ 19 สูง 174 cm. น้ำหนัก 55 Kg. เพศชาย	41
4.20 บันทึกผลของ คนที่ 20 สูง 175 cm. น้ำหนัก 74 Kg. เพศชาย	41
4.21 บันทึกผลของ คนที่ 21 สูง 173 cm. น้ำหนัก 60 Kg. เพศชาย	41
4.22 บันทึกผลของ คนที่ 22 สูง 174 cm. น้ำหนัก 65 Kg. เพศชาย	42
4.23 บันทึกผลของ คนที่ 23 สูง 177 cm. น้ำหนัก 78 Kg. เพศชาย	42
4.24 บันทึกผลของ คนที่ 24 สูง 176 cm. น้ำหนัก 70 Kg. เพศชาย	43

เอกสารนี้ใช้ 4.25 บันทึกผลของ คนที่ 25 สูง 169 cm. น้ำหนัก 63 Kg. เพศชาย 433 คำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.26 บันทึกผลของ คนที่ 26 สูง 178 cm. น้ำหนัก 77 Kg. เพศชาย	44
4.27 บันทึกผลของ คนที่ 27 สูง 172 cm. น้ำหนัก 63 Kg. เพศชาย	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงท่าทางการกระโดดในแนวตั้ง	3
2.2 แสดงลักษณะการหาความเร็วเฉลี่ย	4
2.3 แสดงลักษณะการหาความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง	5
2.4 แสดงลักษณะการหาความเร่งเฉลี่ย	6
2.5 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์	7
2.6 แสดงลักษณะของเครื่องมือ Force Plate	9
2.7 แสดงการกระโดดในแนวตั้ง	9
2.8 แสดงตัวอย่างกระบวนการทำงานของ Load cell ชนิดสเตรนเกจ	10
2.9 แสดงลักษณะของวงจร Wheatstone Bridge ใน Load cell	11
2.10 แสดงลักษณะ Parallel-plate โดยที่ C2 ถูกกดด้วยแรง F	14
2.11 แสดงลักษณะโครงสร้าง Coplanar plate capacitor	15
2.12 Coplanar plate แผ่นหุ้มที่ซ้อนกัน	16
2.13 แสดง Coplanar plate	16
2.14 ลักษณะแผ่น Capacitive Coplanar plat แบบชี้หัว	17
2.15 แสดงวงจร Capacitive to Frequency	18
2.16 แสดงวงจร Frequency to Voltage	19
2.17 แสดงวงจรและสัญญาณ Comparator	20
3.1 ระบบการวัดความสูงจากการกระโดดในแนวตั้ง	21
3.2 แสดงขั้นตอนและขนาดการออกแบบ Capacitive Sensor	22
3.3 แสดงสัญญาณและรูปแบบในการกระโดดในแนวตั้ง	23
3.4 รูปแสดงวงจรการตรวจสัญญาณ	25
4.1 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบ	26
4.2 แสดงการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า	27
4.3 แสดง block diagram ในส่วนนำข้อมูลเข้า LabView	28
4.4 แสดง block diagram ในส่วนคำนวณ	28
4.5 แสดง block diagram ในการบันทึกผลการทดลอง	29
4.6 แสดง block diagram ในเงื่อนไขที่ใช้บันทึกผลการทดลอง	29
4.7 แสดง block diagram ในเงื่อนไขที่ใช้บันทึกผลการทดลอง	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงลักษณะในการกระโดดในแนวดิ่ง	30
4.9 กราฟแสดงสัญญาณของ Capacitive Sensor	31
4.10 แสดงโปรแกรมดูเฟรมเรตเพื่อใช้ในการหาความสูง	31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันอุปกรณ์หรือเทคโนโลยีเกี่ยวกับกีฬา มีบทบาทในการกีฬาหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นเครื่องแต่งกายอุปกรณ์อื่นๆ รวมถึงเทคนิคต่างๆ ที่ช่วยผู้เล่นกีฬามีประสิทธิภาพสูงสุด เช่น นักกรีฑาใช้เครื่องวัดระยะทาง และความเร็วในการวิ่งเพื่อทำให้การวิ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดโดยใช้อุปกรณ์ใช้ร่วมกับ iPod ติดตั้งกับรองเท้าที่ใช้ในการวิ่ง[1] นักกระโดดไกลก็มีเทคนิคการกระโดดเพื่อให้กระโดดได้ระยะที่ไกลที่สุด โดยใช้ Laser Lynx เป็นอุปกรณ์วัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แสงเลเซอร์ในการวัดระยะทาง [2] ปัญหาการกระโดดจึงมีความสำคัญในกีฬาหลายประเภท เช่น นักบาสเก็ตบอล นักแฮนด์บอล[3] เป็นต้น คณะผู้จัดทำจึงมีความประสงค์ที่สร้างโครงงานเรื่อง เครื่องวัดความสูงการกระโดดในแนวตั้งจากการเคลื่อนที่โดยใช้เซนเซอร์ชนิดความจุไฟฟ้าเป็นตัวตรวจจับ เพื่อศึกษาการวัดระยะการกระโดดที่ช่วยให้มีศักยภาพขึ้นมา เพื่อช่วยเหลือนักกีฬาที่ต้องใช้พื้นฐานในการกระโดด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาเพื่อศึกษาวิธีการคำนวณการวัดความสูงของการกระโดดด้วยหลักทางฟิสิกส์
- 2) เพื่อศึกษาการออกแบบ และวิธีการวัดระยะการกระโดดในแนวตั้ง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ออกแบบ และสร้างเครื่องมือในการวัดความสูงจากการกระโดดในแนวตั้งได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

ตาราง 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ระยะเวลา								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ศึกษาอุปกรณ์ โปรแกรมที่ใช้ รวมถึงค่าใช้จ่าย โดยประมาณ	↔								
เริ่มการเขียน โปรแกรมเพื่อ การทำงาน ระหว่างอุปกรณ์			↔						
ทำการทดสอบ โปรแกรมและ วิเคราะห์ข้อมูล					↔				
ทำรูปเล่ม รายงาน								↔	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถออกแบบ และสร้างเครื่องมือวัดการกระโดดในแนวตั้งสำหรับวิทยาศาสตร์การกีฬาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษโดยอธิบายนิยามเบื้องต้นเกี่ยวกับการกระโดด นิยามเบื้องต้นเกี่ยวกับการเคลื่อนที่สองมิติ เครื่องมือ และเทคนิคการวัดความสูงแบบต่างๆ รวมถึงโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยในการวิเคราะห์ความสูงจากการกระโดด

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการกระโดด

2.1.1 การกระโดด(Jump)

การกระโดดแบ่งออกเป็นหลักๆ 2 ประเภท คือ การกระโดดในแนวตั้ง(vertical jump) และการกระโดดในแนวระนาบ(Horizontal jump) ในปัจจุบันการกระโดดในแนวตั้งเข้ามามีบทบาทมากในกีฬาหลายประเภทเช่น บาสเกตบอล วอลเลย์บอล ฟุตบอล เป็นต้น ดังนั้นการเก็บข้อมูลสถิติความสูงในการกระโดดแนวตั้งจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อสร้างแบบฝึกให้นักกีฬามีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ซึ่งการกระโดดในแนวตั้งที่ใช้ในการทดสอบแบ่งออก 2 ท่า [4] คือ Countermovement jump (CMJ) และ Squat Jump (SJ) CMJ เป็นการกระโดดที่ผู้ทดสอบใช้มือจับบริเวณเอวเพื่อป้องกันการใช้มือช่วยในการกระโดด ยืนตัวตรง เมื่อได้รับสัญญาณให้เริ่มทำการกระโดดให้กระโดดในแนวตั้งอย่างเต็มกำลังดังรูปที่ 2.1 ก) SJ เป็นการกระโดดที่คล้ายกับ CMJ เพียงแต่ก่อนเริ่มทำการทดสอบผู้ทำการทดสอบต้องย่อตัวลง เมื่อได้รับสัญญาณให้เริ่มทำการกระโดดให้กระโดดในแนวตั้งอย่างเต็มกำลังดังรูปที่ 2.1 ข)



ก)



ข)

รูปที่ 2.1 แสดงท่าทางการกระโดดในแนวตั้ง

ก) แสดงการกระโดดแบบ Countermovement jump (CMJ)

ข) แสดงการกระโดดแบบ Squat Jump (SJ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ใน 2 มิติ

2.2.1 ปริมาณสเกลาร์ (Scalar Quantity)

เป็นปริมาณที่บอกให้ทราบถึงขนาดของการเคลื่อนที่ ไม่สามารถบอกทิศทางของการเคลื่อนที่ได้ เราสามารถใช้หลักพื้นฐานทางคณิตศาสตร์มาใช้ในการจัดการกับปริมาณสเกลาร์ได้

2.2.2 ปริมาณเวกเตอร์ (Vector Quantity)

เป็นปริมาณที่บอกได้ทั้งขนาด และทิศทางของการเคลื่อนที่ซึ่งระบุได้ว่าเป็นเวกเตอร์ เช่น ความเร็ว ความเร่ง การกระจัด แรง เช่นอนุภาคเคลื่อนที่จากจุด ก ไปยังจุด ข มีการลากเส้นจากจุด ก ไปยังจุด ข โดยมีหัวลูกศรกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ และความยาวเส้นเป็นปริมาณที่สามารถเคลื่อนที่ได้

2.2.3 เวกเตอร์การกระจัด (Vector Displacement)

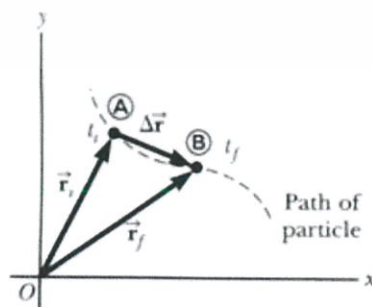
การกระจัดคือเส้นตรงที่ลากจากจุดกำเนิดไปยังจุดสุดท้ายที่เกิดการเคลื่อนที่ เพราะฉะนั้น เวกเตอร์การกระจัด เวกเตอร์การกระจัด คือเส้นตรงที่ลากจากจุดกำเนิดไปตำแหน่งสุดท้ายในระนาบ โดยไม่จำเป็นต้องเป็นเส้นตรงเสมอไปซึ่งเราสามารถนิยามการกระจัดเป็น $\Delta \vec{r}$ หมายถึงการกระจัดที่ตำแหน่งสุดท้ายกับการกระจัดที่ตำแหน่งเริ่มต้น

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_f - \vec{r}_i \quad (1)$$

2.2.4 ความเร็วเฉลี่ย (Average Velocity)

เมื่อเกิดการเคลื่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเวลาในช่วง Δt ความเร็วเฉลี่ยแปรผันตรงกับการกระจัด ทำให้ไม่ขึ้นกับเส้นทาง และระยะทางการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 2.2 หากเกิดการเคลื่อนที่จากจุดใดจุดหนึ่ง (A) และเคลื่อนที่ไปยังอีกจุดหนึ่ง (B) โดยใช้เวลา Δt วินาทีจึงสามารถนิยามความเร็วเฉลี่ยได้ว่า

$$\vec{v}_{avg} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} \quad (2)$$



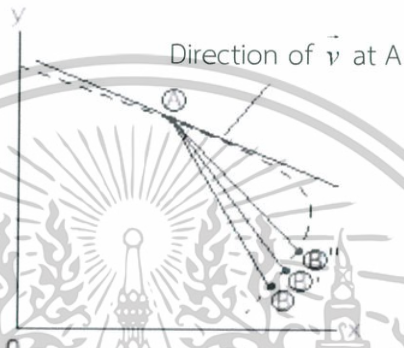
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะการหาความเร็วเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 ความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Velocity)

เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่จุดจุดหนึ่ง (B) เมื่อเกิดการเคลื่อนที่ได้ช่วงเวลาหนึ่งใน การเคลื่อนที่นั้นดังรูปที่ 2.3 นิยามว่าเป็นลิมิตของความเร็เฉลี่ย $\frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ โดยที่ Δt มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

$$\vec{v} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (3)$$



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะการหาความเร็วขณะใดขณะหนึ่ง

2.2.6 ความเร่งเฉลี่ย (Average Velocity)

เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วขณะใดขณะหนึ่งต่อการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลานั้นดัง รูปที่ 2.4 โดย

$$\vec{a}_{avg} \equiv \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i} \quad (4)$$

โดยที่

\vec{a}_{avg} คือความเร่งเฉลี่ย มีหน่วยเป็น m/s^2

$\Delta \vec{v}$ คือความเร็เฉลี่ย มีหน่วยเป็น m/s

Δt คือเวลาที่เปลี่ยนแปลง มีหน่วยเป็น s

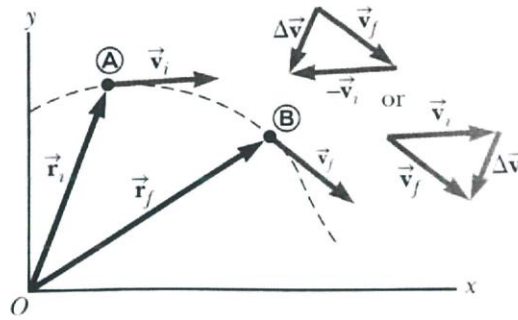
\vec{v}_f คือความเร็วในช่วงสุดท้าย มีหน่วยเป็น m/s

\vec{v}_i คือความเร็วในช่วงแรก มีหน่วยเป็น m/s

t_f คือเวลาในช่วงสุดท้าย มีหน่วยเป็น s

t_i คือเวลาในช่วงแรก มีหน่วยเป็น s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะการหาความเร่งเฉลี่ย

2.2.7 ความเร่งขณะใดขณะหนึ่ง (Instantaneous Acceleration)

ค่าลิมิตของอัตราส่วน $\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ โดยที่ Δt มีค่าเข้าใกล้ศูนย์

$$\vec{a} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (5)$$

2.2.8 การเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ในสองมิติ

เป็นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่โดยทั้งขนาด และทิศทางของความเร่งมีค่าคงที่ มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และแกน y ตั้งฉากกัน และมีการเคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกัน ซึ่งสิ่งเร้าใดๆ มากระทำแกน x จะไม่ส่งผลต่อแกน y ตำแหน่งของการเคลื่อนที่ในระนาบ $x-y$ สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\vec{r} = x \hat{i} + y \hat{j} \quad (6)$$

กำหนดให้ x , y และ r มีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ \hat{i} , \hat{j} เป็นเวกเตอร์บ่งบอกทิศทางความเร็วของการเคลื่อนที่ในระนาบ x , y สามารถเขียนได้ดังนี้

$$h(t) = h_0 + \left(v_{iy} t - \frac{1}{2} g t^2 \right) \quad (7)$$

เนื่องจากพิจารณาในสภาวะความเร่งคงที่ และระนาบ x และ y แยกจากกันโดยสิ้นเชิง a_x และ a_y ทำให้มีค่าคงที่จากสมการการเคลื่อนที่ใน 1 มิติ $u_f = u_i + at$ แทนค่าเพื่อหาความเร็วแบบสองมิติที่เวลา t ใดๆ

$$\vec{v}_f = (v_{xi} + a_x t) \hat{i} + (v_{yi} + a_y t) \hat{j} \quad (8)$$

$$= \left(v_{xi} \hat{i} + v_{yi} \hat{j} \right) + \left(a_x \hat{i} + a_y \hat{j} \right) t$$

$$\vec{v}_f = \vec{v}_i + \vec{a}t$$

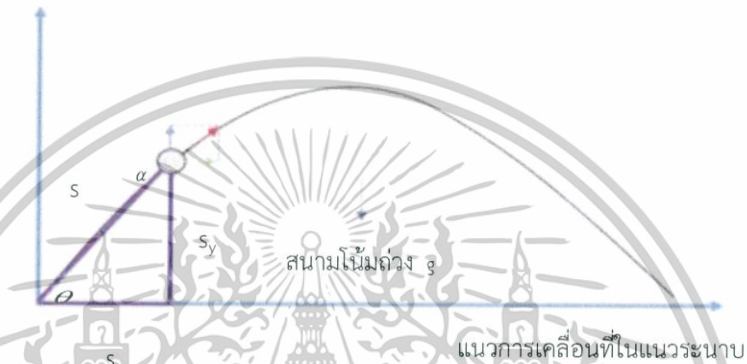
เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\vec{r}_f = \left(x_i + v_{xi}t + \frac{1}{2} a_x t^2 \right) \hat{i} + \left(y_i + v_{yi}t + \frac{1}{2} a_y t^2 \right) \hat{j} \quad (9)$$

$$= \left(x_i \hat{i} + y_i \hat{j} \right) + \left(v_{xi} \hat{i} + v_{yi} \hat{j} \right) t + \frac{1}{2} \left(a_x \hat{i} + a_y \hat{j} \right) t^2$$

$$\vec{r}_f = \vec{r}_i + \vec{v}_i t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2 \quad (10)$$

แนวทางการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์

2.2.9 การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์

เป็นการเคลื่อนที่ที่ลักษณะโค้งเหมือนระฆังคว่ำดังรูปที่ 2.5 ทำการวิเคราะห์โดยกำหนดให้ความเร็วในการตกแบบอิสระมีค่าคงที่ตลอดการเคลื่อนที่ และผลของแรงต้านอากาศมีค่าน้อยมาก สมการที่อธิบายตำแหน่งของโพรเจกไทล์ซึ่งเป็นเป็นฟังก์ชันของเวลาประยุกต์มาจากสมการ กำหนดให้ความเร็วเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก $\vec{a} = \vec{j}$

$$y_f - y_i = \left(v_i \sin \theta_i \right) \frac{v_i \sin \theta_i}{g} - \frac{1}{2} g \left(\frac{v_i \sin \theta_i}{g} \right)^2 \quad (11)$$

ความเร็วทางแกน x และแกน y ของการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์คือ

$$v_{xi} = v_i \cos \theta_i, v_{yi} = v_i \sin \theta_i \quad (12)$$

2.2.10 ระยะไกลสุด (ในแนวระดับ) และระยะสูงสุด (ในแนวตั้ง) ของการเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์

เราสามารถหาค่า h ได้จากการพิจารณาที่จุดสูงสุดมีอัตราเร็วในแนวตั้งมีค่าเป็น 0 สามารถใช้สมการการเคลื่อนที่ ในแนวแกน y เพื่อหาค่าเวลา t ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_{yf} = v_{yi} - gt \rightarrow 0 = v_i \sin \theta_i - gt \quad (13)$$

$$t = \frac{v_i \sin \theta_i}{g} \quad (14)$$

แทนสมการที่ (15) เพื่อหาความสูง h ในแนวตั้งได้ดังนี้

$$\bar{y}_f - \bar{y}_i = (\bar{v}_i \sin \theta_i) \frac{\bar{v}_i \sin \theta_i}{g} - \frac{1}{2} g \left(\frac{\bar{v}_i \sin \theta_i}{g} \right)^2 \quad (15)$$

ดังนั้นความสูงในแนวตั้งมีค่าเท่ากับ

$$h = \frac{\bar{v}_i^2 \sin^2 \theta}{2g} \quad (16)$$

ระยะไกลสุดในแนวแกนระดับมีค่าเท่ากับ

$$x_f = x_i + v_{xi} t \quad (17)$$

เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการหาระยะทางที่ไกลที่สุดมีค่าเป็น 2 เท่า ของเวลาที่ใช้ในแนวตั้ง

$$\bar{x}_f - \bar{x}_i = \bar{v}_{xi} 2t \quad (18)$$

แทนสมการที่ (15) ลงในสมการที่ (19) และแทน $\bar{v}_{xi} = (\bar{v}_i \cos \theta_i)$

$$\begin{aligned} \bar{s} &= (\bar{v}_i \cos \theta_i) \frac{2\bar{v}_i \sin \theta_i}{g} \\ &= \frac{2\bar{v}_i^2 \sin \theta_i \cos \theta_i}{g} \end{aligned} \quad (19)$$

จากเอกลักษณ์ตรีโกณมิติ $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$

ดังนั้นระยะทางที่เคลื่อนที่ได้มีค่าเท่ากับ

$$\bar{s} = \frac{\bar{v}_i^2 \sin 2\theta_i}{g} \quad (20)$$

2.3 เครื่องมือและการวัดความสูง

ในการวัดความสูงของการกระโดดในแนวตั้งนั้น มีการใช้ force plate ซึ่งเป็นชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกด มีลักษณะเป็นแผ่นรองรับแรง ใช้ตรวจสอบแรงของร่างกายที่กระทำให้ค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงส่งผลให้โวลต์ที่ออกมาเกิดการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาหนึ่งๆ จากนั้นเวลาในช่วงที่มีแรงกระทำกับแผ่นนั้นแสดง ดังรูปที่ 2.6 สามารถนำมาคำนวณหาความสูงการกระโดดได้เทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการหาความสูงในการกระโดด [5] คือการพิจารณาจากการใช้กฎการอนุรักษ์พลังงานดังสมการที่ (21) โดยเอกสารนี้แบ่งเป็นส่วนข้อสมการขณะเริ่มทำการกระโดดเท่ากับสมการเมื่อถึงจุดสูงสุดในการกระโดดโดยขึ้นด้านการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะของเครื่องมือ Force Plate

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgh_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgh_f \quad (21)$$

โดยที่

v_i คือความเร็วก่อนทำการกระโดด มีหน่วยเป็น m/s

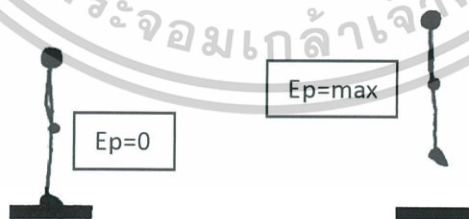
h_i คือความสูงก่อนทำการกระโดด มีหน่วยเป็น m

v_f คือความเร็วหลังทำการกระโดด มีหน่วยเป็น m/s

h_f คือความสูงหลังทำการกระโดด มีหน่วยเป็น m

ในการพิจารณากรณีนี้พิจารณาจากกฎการอนุรักษ์พลังงานเมื่อเริ่มทำการกระโดดจะไม่มีพลังงานศักย์เนื่องจากไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงความสูงมีเพียงแต่พลังงานจลน์เท่านั้น และเมื่อถึงจุดสูงสุดของการกระโดดจะไม่มีพลังงานจลน์เนื่องจากความเร็วเป็นศูนย์ทำให้มีเพียงพจน์ของพลังงานศักย์เท่านั้น และมวลตัดกันเนื่องจากเป็นมวลเดียวกันแสดงดังสมการที่ (22)

$$\cancel{\frac{1}{2}mv_i^2 + mgh_i} = \cancel{\frac{1}{2}mv_f^2 + mgh_f} \quad (22)$$



รูปที่ 2.7 แสดงการกระโดดในแนวตั้ง

ได้เป็นสมการที่ (23)

$$\frac{1}{2}mv_i^2 = mgh_f \quad (23)$$

เอกสารนี้ถ้าสมการการเคลื่อนที่สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v_f = v_i - g(\Delta t) \quad (24)$$

โดย Δt คือเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการกระโดด

เนื่องจากความเร็วเริ่มต้นในการกระโดด และความเร็วสุดท้ายในการกระโดดมีค่าเท่ากันแต่ทิศตรงกันข้าม

$$v_f = -v_i \quad (25)$$

แทนค่าลงในสมการจะได้

$$v_i = g \frac{(\Delta t)}{2} \quad (26)$$

นำ v_i ที่ได้ไปแทนเพื่อหาความสูงจะได้

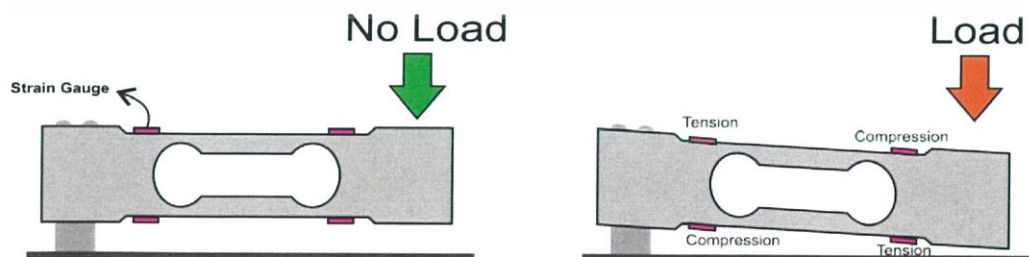
$$h_f = g \frac{(\Delta t)^2}{8} \quad (27)$$

2.4 เซนเซอร์วัดแรง

เป็นอุปกรณ์ตัวหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งในงานอุตสาหกรรม เพราะเซนเซอร์จะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจสอบ ตรวจสอบวัดเงื่อนไขต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการต่างๆ เช่น กำหนดตำแหน่ง ควบคุมปริมาณ คัดแยกชิ้นงาน หรืออื่นๆ เพื่อให้ระบบดำเนินการได้อย่างต่อเนื่อง และมีคุณภาพ ดังนั้นหากเลือกใช้เซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพดีแม่นยำ ก็จะส่งผลให้เกิดกระบวนการที่มีคุณภาพดีเยี่ยมตามไปด้วย เซนเซอร์ที่สามารถวัดแรงกดได้มีดังนี้ [6]

2.4.1 Load Cell

Load Cell คือ Sensor สำหรับตรวจวัดน้ำหนัก แรงกด หรือปริมาณของ Load ที่ต้องการทราบค่า เช่น ใช้สเตรนเกจมาติดตั้งในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของ Load Cell เมื่อมีแรงมากระทำกับตัว Load Cell จะทำให้สเตรนเกจที่ติดอยู่ในบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปทรง ยืด หรือ หด ตัว ทำให้ค่าความต้านทานที่ตัวสเตรนเกจเปลี่ยนไป

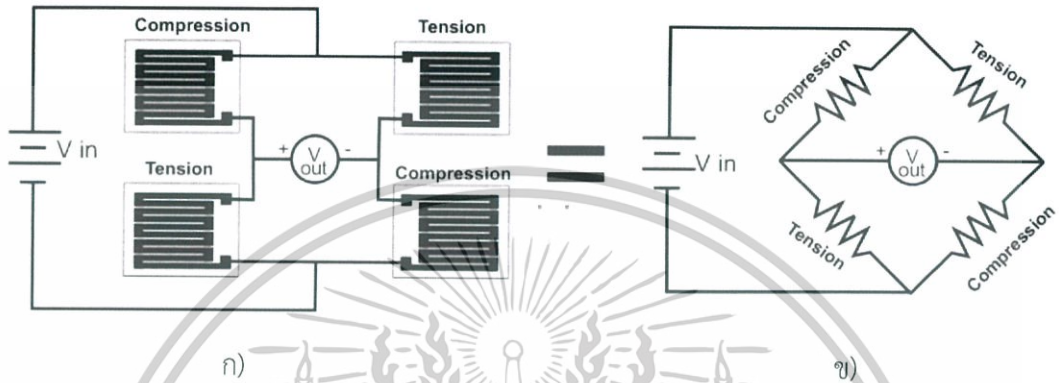


รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างกระบวนการทำงานของ Load cell ชนิดสเตรนเกจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.8 เมื่อ สเตรนเกจ ได้รับแรงกด ทำให้ สเตรนเกจ เกิดการหดตัว และเมื่อได้รับแรงดึง จึงทำให้สเตรนเกจยืดออกในการยืดออก และหดตัวของสเตรนเกจนี้ทำให้ค่าความต้านทานของสเตรนเกจที่ต่ออยู่ในลักษณะของวงจร Wheatstone Bridge ใน Load Cell ซึ่งสามารถแปลงค่าแรงกดหรือแรงดึง ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า [7]



รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะของวงจร Wheatstone Bridge ใน Load cell

- ก) รูปแบบของสเตรนเกจที่ต่ออยู่ในลักษณะของวงจร Wheatstone Bridge
- ข) ลักษณะของวงจร Wheatstone Bridge

2.4.2 สเตรนเกจ (Strain Gauge)

สเตรนเกจถูกยึดเข้ากับวัตถุที่ต้องการวัดความเครียดอย่างแน่นหนาจึงทำให้ตัวรับสัญญาณ (ตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่ทำจากโลหะแผ่นบาง) สามารถยืดหรือหดตัว สเตรนเกจตามความเครียดของวัตถุที่ต้องการวัดค่า ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อตัวโลหะมีการยืดหรือหดตัวทางกล สเตรนเกจใช้หลักการนี้ในการวัดค่าความเครียดผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวรับสัญญาณของสเตรนเกจทำจากโลหะผสมระหว่างทองแดงกับนิเกิล โลหะผสมแผ่นบางนี้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นที่มีค่าคงที่แน่นอนค่าหนึ่งกำหนดความสัมพันธ์หลักดังนี้ [8]

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \epsilon \tag{28}$$

เมื่อ; R คือความต้านทานทางไฟฟ้าเดิมของสเตรนเกจ มีหน่วยเป็น โอห์ม(Ω)

ΔR คือความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสเตรนเกจมีการยืดหรือหดตัว มีหน่วยเป็น โอห์ม(Ω)

K_s คือค่าคงที่ของความสัมพันธ์ หรือ เกจแฟ็คเตอร์

ϵ คือความเครียดของวัตถุที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 Force Sensing Resistor (FSR)

โดยมีคุณสมบัติในการทำงานที่คล้ายกับโพลดเซล หรือ สเตรนเกจนั่นคือ สามารถตรวจจับแรงกดได้ แต่ FSR ให้ค่าในเชิงแนวโน้ม จึงเหมาะสำหรับการตรวจจับเพียงว่า เกิดแรงกดขึ้นที่ตัวตรวจจับหรือไม่ หรืออาจพอวัดได้ว่า แรงกดนี้มีแนวโน้มมากหรือน้อย โดย FSR ไม่เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในการวัดค่าแรงกดจริงๆ ซึ่งตัวตรวจจับแรงกดซึ่งให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงเมื่อมีแรงกดมากกระทำตัว ทำให้เรียกตัวตรวจจับแบบนี้ว่า FSR หรือ Force Sensing Resistor [9]

2.4.4 Capacitive Sensor

ในการศึกษาการทำงานเพื่อออกแบบ Capacitive Sensor และวงจรตรวจสอบสัญญาณ Capacitive Sensor จำเป็นอย่างยิ่งในการศึกษาการทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า และศึกษาหลักการการทำงานของวงจรเพื่อปรับแต่งสภาพสัญญาณ และการเชื่อมต่อสัญญาณที่ได้จากเซ็นเซอร์ที่เหมาะสม

2.4.4.1 ทฤษฎีตัวเก็บประจุ

ในการทำอุปกรณ์ที่จะนำมาวัดค่าแรงกดที่กระทำกับ แพลตฟอรม์ นั้นได้ใช้ตัวเก็บประจุเป็นตัวกลางในการแปลงสัญญาณจากแรงกดให้เป็นแรงดันไฟฟ้าซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นตัวแปลงสัญญาณ โดยเมื่อมีวัตถุมาผ่านตัวแปลงสัญญาณที่เป็นตัวเก็บประจุจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุนั้นเปลี่ยนแปลงไป และทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วย ทำให้เราสามารถนำค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นไปคำนวณหาค่าแรงดันที่เกิดกับตัวแปลงสัญญาณได้ [10]

หลักการการทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์อย่างหนึ่งในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ทำหน้าที่เก็บประจุ และคายประจุให้วงจร ในขณะที่โพลีเมตครอมคาปาซิเตอร์มันจะค่อยๆเก็บประจุจนเต็ม และเมื่อไฟในวงจรลดต่ำลงมันจะทำหน้าที่คายประจุให้แก่วงจร จึงอาจกล่าวได้ว่าคาปาซิเตอร์ทำหน้าที่ต้านทานการเปลี่ยนแปลงแรงดัน

ส่วนประกอบแบบง่ายๆ ของคาปาซิเตอร์ภายในประกอบด้วยโลหะบางๆ สองแผ่นวางประกบกัน และมีฉนวนหรือที่เรียกกันว่า ไดอิเล็กตริก (Dielectric) กั้นตรงกลาง

การเก็บประจุคือ การเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่แผ่นเพลตของตัวเก็บประจุ โดยเมื่อนำแบตเตอรี่ต่อกับตัวเก็บประจุ อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่จะเข้าไปรวมกันที่แผ่นเพลต ทำให้เกิดประจุลบขึ้น และยังส่งสนามไฟฟ้าไป ผลักอิเล็กตรอนของเพลตตรงข้าม ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลตมีประจุเป็นบวกและลบปะปนกันอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลตถูกผลักให้หลุดออกไปแล้วจึงเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไร แผ่นเพลตนั้นก็ยิ่งเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น เมื่อเทียบกับอีกด้าน ลักษณะนี้เราเรียกว่า คาปาซิเตอร์เก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเก็บประจุที่ถูกระเบิดแล้ว ถ้าเรายังไม่นำขั้วตัวเก็บประจุมาต่อกัน อิเล็กตรอนก็ยังคงอยู่ที่แผ่นเพลต แต่ถ้ามีการครบวงจรระหว่างแผ่นเพลตทั้งสองเมื่อไร อิเล็กตรอนก็จะวิ่งจากแผ่นเพลตทางด้านลบไปครบวงจรที่แผ่นเพลตบวกทันที เราเรียกเหตุการณ์นี้ว่าการคายประจุ

สำหรับการเก็บประจุไฟฟ้ากระแสสลับ นั้นไฟฟ้ากระแสสลับมีการเปลี่ยนแปลงแรงดันอยู่ตลอดเวลา คาปาซิเตอร์จึงพยายามเปลี่ยนแรงดันตาม จึงดูเหมือนกับว่าไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านตัวคาปาซิเตอร์ได้

ชนิดของไดอิเล็กตริก

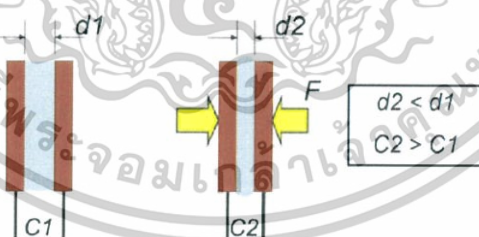
สารไดอิเล็กตริกมีคุณสมบัติเป็นฉนวน และมีผลต่อเส้นแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นเพลต ดังนั้นชนิดของวัสดุที่นำมาใช้เป็น ไดอิเล็กตริก จึงมีผลต่อค่าการเก็บประจุ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric Constant , K) เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถในการที่จะทำให้เกิด เส้นแรงแม่เหล็กขึ้น เมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นเพลต สุญญากาศเป็นไดอิเล็กตริกที่มีประสิทธิภาพน้อยสุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น นั่นคือมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เท่ากับ 1 สำหรับไดอิเล็กตริกชนิดอื่นนั้น จะใช้สุญญากาศเป็นตัวอ้างอิงในการแสดงค่า เช่น ไมก้า มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เท่ากับ 50 หมายความว่า ไมก้า สามารถทำให้เส้นแรงแม่เหล็กสามารถกักตัวได้ง่ายกว่าสุญญากาศถึง 5 เท่า และด้วยการเก็บประจุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกดังนั้น ตัวเก็บประจุแบบไมก้า จึงมีค่าการเก็บประจุมากกว่าตัวเก็บประจุที่ใช้สุญญากาศเป็นไดอิเล็กตริกถึง 5 เท่า ส่วนไดอิเล็กตริกของวัสดุชนิดอื่นๆ แสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุต่างๆ

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (K)
สุญญากาศ	1.0
อากาศ	1.0006
เทฟลอน	2.0
ซีดีซี	2.25
กระดาษ	2.5
อำพัน	2.65
ยาง	3.0
น้ำมัน	4.0
ไม้ก้ำ	5.0
เซรามิก	6.0
แบคคาไลต์	7.0
แก้ว	7.5
น้ำ	78.0

Parallel-plate capacitor ประกอบด้วยแผ่นตัวนำ 2 แผ่น วางห่างกันโดยมีระยะห่างแผ่น d หน่วย โครงสร้างแบบนี้ ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐาน และสมการของค่าความจุไฟฟ้าก็คือ



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะ Parallel-plate โดยที่ C2 ถูกกดด้วยแรง F

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

d คือระยะห่างระหว่างตัวนำสองแผ่น มีหน่วยเป็น m

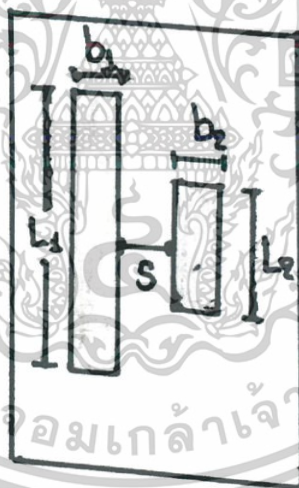
A คือพื้นที่ของแผ่นตัวนำสองแผ่นที่ทับซ้อนกัน มีหน่วยเป็น m^2

ϵ_0 คือpermittivity ของพื้นที่ว่าง ($\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} F m^{-1}$)

ϵ_r คือRelative dielectric constant ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นตัวนำ 2 แผ่น นั้น คือถ้าเป็นอากาศค่า ϵ_r ก็เท่ากับ 1 แต่ถ้าเป็นน้ำกลั่นก็มีค่า 80 ที่อุณหภูมิห้อง

Coplanar-plate capacitor โดยระนาบแผ่นตัวนำควรมีคุณสมบัติยืดหยุ่นหรือคืนรูปได้อย่างรวดเร็วเมื่อถูกบีบอัด และไม่ควรรณาเกินไปเพราะจะทำให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยจนยากแก่การวัด ระบายตัวนำสองแผ่น ดังรูปที่ 2.11 โดยมีพื้นที่ ที่ระยะ $L_1 \gg L_2$ โดยมีค่าดังสมการที่ (30) และแผ่นตัวนำมีรูปแบบต่างๆ เช่น

$$c = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r L_2}{\pi} \ln \frac{(s+b_1)(s+b_2)}{s(s+b_1+b_2)} \quad (30)$$

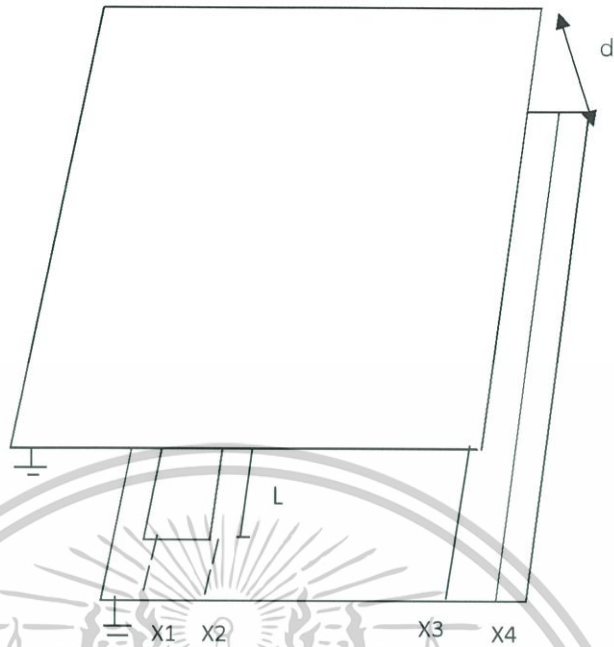


รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้าง Coplanar plate capacitor

แผ่นตัวนำแบบ Coplanar กับ แผ่นหุ้มที่มีรูปทรงเรขาคณิตต่างๆ ดังรูปที่ 2.12 ที่มีขนาดใหญ่กว่าแผ่นตัวนำนี้ โดยค่าความจุแสดงโดยสมการ (31)

$$c = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r L_2}{\pi} \ln \frac{\sinh \left[\frac{\pi}{2d} (x_1 - x_3) \right] \sinh \left[\frac{\pi}{2d} (x_2 - x_4) \right]}{\sinh \left[\frac{\pi}{2d} (x_2 - x_3) \right] \sinh \left[\frac{\pi}{2d} (x_1 - x_4) \right]} \quad (31)$$

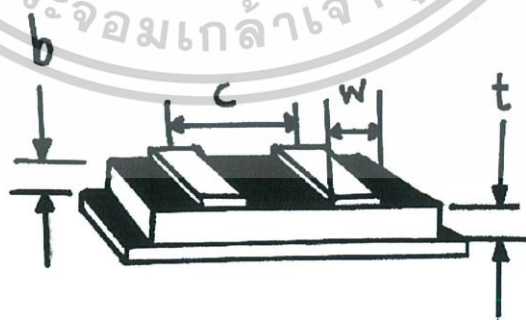
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 Coplanar plate แผ่นหุ้มที่ซ้อนกัน

แผ่นตัวนำสองแผ่นในระนาบเดียวกันที่มีรูปทรงเรขาคณิตสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังรูปที่ 2.13 ในกรณีนี้ จะมีความจุต่อกันในระหว่างตัวนำสามารถแสดงโดยสมการ (32) ซึ่งความยาว (L) ความกว้าง (w) ความหนา (t) และระยะห่างระหว่างตัวนำ (c) ดังรูปที่ 2.13

$$C_m \approx \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r \epsilon_{eff} L}{\ln\left(\frac{\pi(c-w)}{w+t}\right) + 1} \tag{32}$$

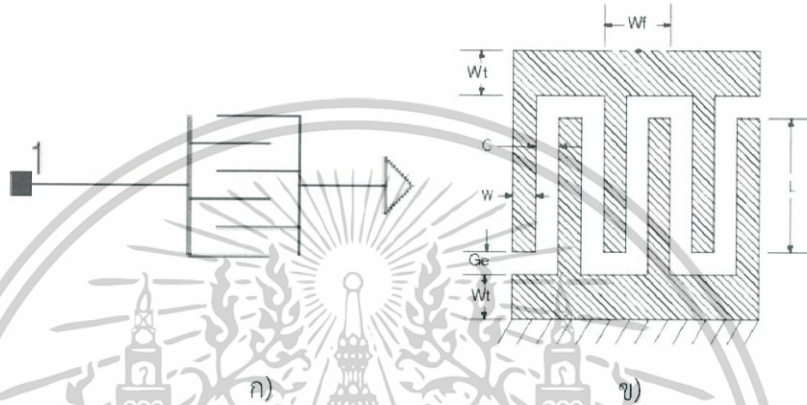


รูปที่ 2.13 แสดง Coplanar plate

ประสิทธิภาพของไดอิเล็กทริกโดยประมาณ เมื่อ $c \gg b$ หรือ ถ้า $c \approx b$ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า $\epsilon_{r,eff} \approx (1 + \epsilon_r)/2$ ในส่วนที่มีแถบความกว้าง w_1 และ w_2 แตกต่างกัน แสดงโดยสมการ (33) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_m \approx \frac{55.6 \epsilon_{r(eff)} L}{\ln \left[\pi^2 c^2 \left(\frac{1}{w_1 + t} \right) \left(\frac{1}{w_2 + t} \right) \right]} \tag{33}$$

แผ่น Capacitive Coplanar plat แบบซีทีวี(1 port) [11] มีลักษณะดังรูปที่_ โดย G และ Ge คือ ระยะห่างระหว่างซีทีวี W และ Wt คือความกว้างของซี และ L คือ ความยาวของซีทีวี



รูปที่ 2.14 ลักษณะแผ่น Capacitive Coplanar plat แบบซีทีวี

ก) สัญลักษณ์ ของ MICAP3 1 port

ข) ภาพประกอบแสดงโครงสร้างพื้นฐานของแผ่นคาปาซิทีฟแบบ 1 port

2.5 วงจรแปลงสัญญาณ

การนำสัญญาณที่ได้จาก Capacitive Sensor มาเข้าวงจรแปลงสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณให้ออกมาเป็นสัญญาณที่จะเข้าสู่ Microcontroller เพื่อนำไปประมวลผลผ่านโปรแกรมในคอมพิวเตอร์ได้

2.5.1 Capacitive to Frequency

เป็นวงจรที่ใช้แปลงสัญญาณอินพุตให้เป็นความถี่เอาต์พุต โดยมีอุปกรณ์ LM324 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณให้เป็นความถี่เอาต์พุตดังรูป ก) โดยความถี่เอาต์พุตหาได้จากสมการที่ (35)

$$\tau = \frac{C_s \cdot (V_{th} - V_{WE})}{I} \tag{34}$$

$$f = \frac{1}{\tau + t_d + t_{pw}} \tag{35}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

I คือกระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น A .

C_s คือความจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น F .

V_{th} คือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร Comparator มีหน่วยเป็น V .

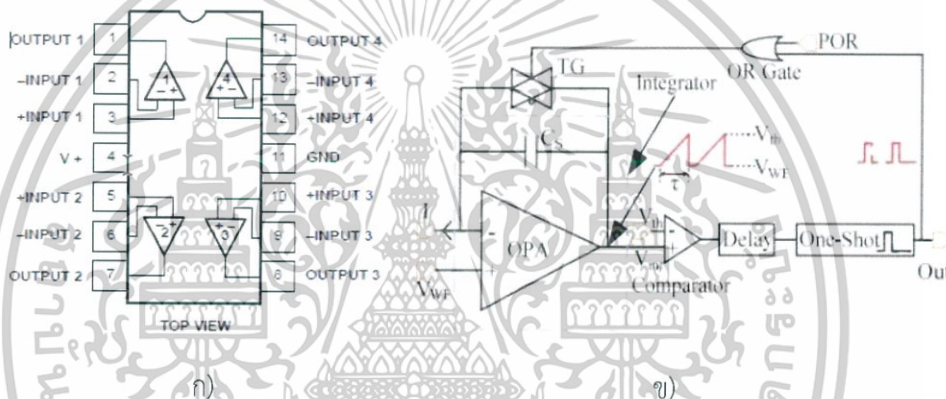
V_{WE} คือแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในวงจร Capacitive to Frequency มีหน่วยเป็น V .

τ คือเวลารวม มีหน่วยเป็น s .

f คือความถี่ไฟฟ้าเอาต์พุต มีหน่วยเป็น Hz .

t_{pw} คือเวลาในพัลส์ มีหน่วยเป็น s .

t_d คือเวลาของความล่าช้า มีหน่วยเป็น s .



รูปที่ 2.15 แสดงวงจร Capacitive to Frequency

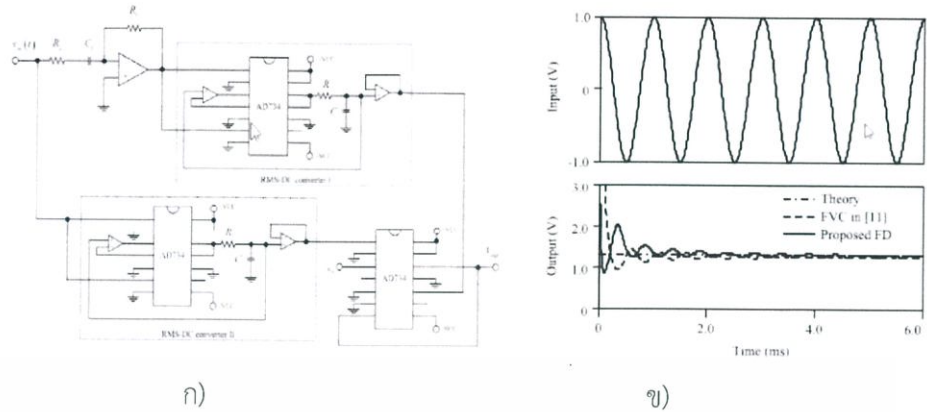
ก) ออปแอมป์ LM324

ข) แสดงวงจร Capacitive to Frequency

2.5.2 Frequency to Voltage

เป็นวงจรที่ใช้แปลงสัญญาณความถี่ไฟฟ้าอินพุตให้ออกมาในรูปของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต โดยมีอุปกรณ์ LM331 ทำหน้าที่แปลงสัญญาณความถี่ไฟฟ้าเป็นแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมาโดยแรงดันไฟฟ้าดังรูป ก) และสัญญาณอินพุตเมื่อเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตได้ดังรูป ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 แสดงวงจร Frequency to Voltage

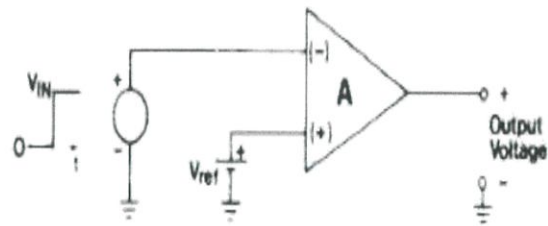
ก) แสดงวงจร Frequency to Voltage

ข) แสดงสัญญาณเอาต์พุตของวงจร Frequency to Voltage

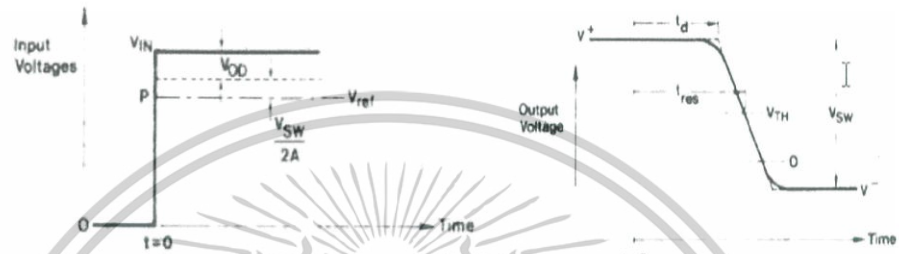
2.5.3 Comparator

เป็นวงจรเปรียบเทียบแรงดันที่ใช้เปรียบเทียบสัญญาณอินพุต กับแรงดันอ้างอิง (Voltage Reference) ที่อินพุตขาหนึ่ง และอ้างอิงอีกขาหนึ่งซึ่งสัญญาณอินพุตเป็นดังรูป ข) เมื่อผ่านวงจร Comparator จะมีสัญญาณเอาต์พุตเป็นไปดังรูป ค) ซึ่งมีความล่าช้าของสัญญาณอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)



ข)

ค)

รูปที่ 2.17 แสดงวงจร และสัญญาณ Comparator

ก) การเชื่อมต่อวงจร Comparator

ข) แสดงสัญญาณอินพุตที่เข้า Comparator

ค) แสดงสัญญาณเอาต์พุตที่ออกจาก Comparator

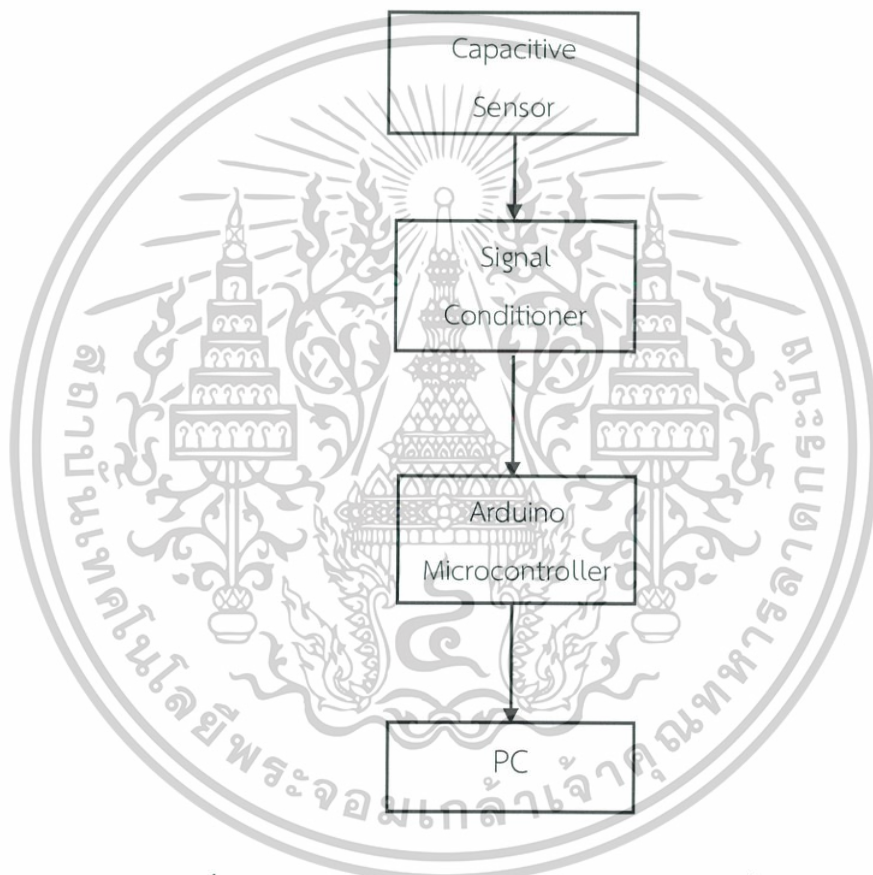
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและขั้นตอนการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงขั้นตอนการศึกษา และการออกแบบการสร้างเครื่องมือในการวัดความสูงจากการกระโดดในแนวดิ่ง โดยการประมวลผล และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์

3.1 การออกแบบเครื่องมือ



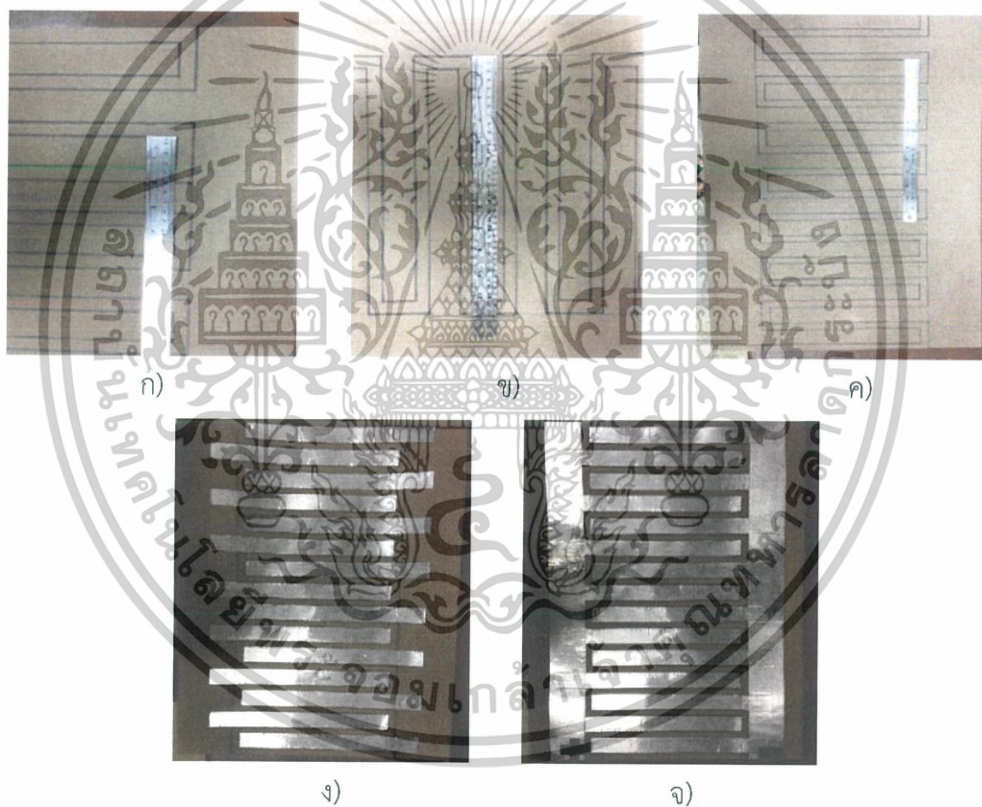
รูปที่ 3.1 ระบบการวัดความสูงจากการกระโดดในแนวดิ่ง

ระบบการออกแบบเพื่อใช้ในการวัดความสูงจากการกระโดดในแนวดิ่ง เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์ Capacitive Sensor ในการตรวจสอบการมีอยู่ของบุคคลทดสอบที่พื้นการกระโดด จากนั้นเชื่อมต่อกับวงจร และส่งข้อมูลเพื่อนำไปประมวลผล และแสดงผลโดยคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบ Capacitive Sensor

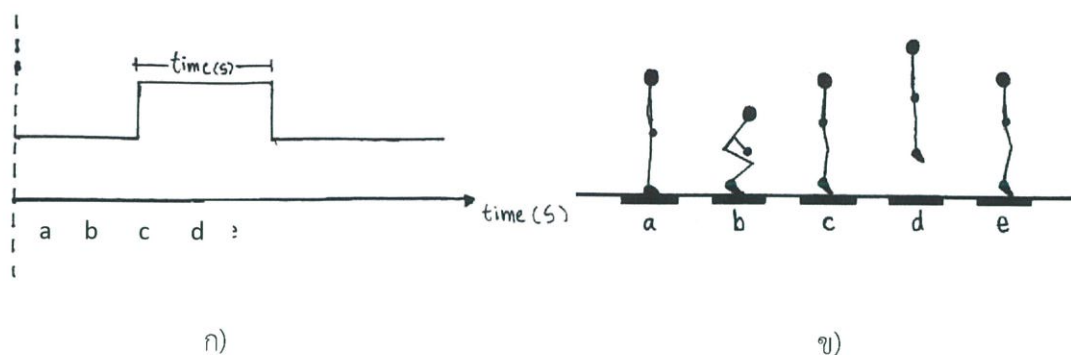
ในการออกแบบ Capacitive Sensor โดยนำเอาแผ่นเทปกาวพอลิเอทิลีนที่มีขนาดความกว้าง 6.4 เซนติเมตร นำมาตัดแบ่งครึ่งเพื่อที่จะเอามาติดเป็นซีทวิลงบนแผ่นโพลีเอทิลีนที่มีลักษณะทางกายภาพที่มีความยืดหยุ่น ซึ่งสามารถยุบตัวเมื่อมีแรงกดทับ และคลายตัวเมื่อผ่อนแรงลง ที่มีขนาด $50.3 * 70.6$ เซนติเมตร [10] รูปแบบของเซ็นเซอร์ capacitive interdigital เป็นโครงสร้างแบบ coplanar ประกอบด้วยตัวนำสองตัวแบบหวี การทำงานของเซ็นเซอร์แบบ capacitive interdigital เหมาะสมสำหรับการใช้งาน และดำเนินการโดยการวัดความจุระหว่างตัวนำไฟฟ้าสองตัวซึ่งวางอยู่บนวัสดุฉนวน และยังสามารถเชื่อมต่อไปยังวงจร และสามารถแสดงเป็นสัญญาณในการตรวจสอบเวลาการกระโดดของบุคคลอ้างอิงที่ทดสอบกระโดดบนเซ็นเซอร์ได้ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอน และขนาดการออกแบบ Capacitive Sensor

- ก) แสดงการวัดความกว้าง และความห่างของซีทวิ
- ข) แสดงการวัดความยาวของซีทวิ
- ค) แสดงการร่างเส้นความกว้าง และความห่างของซีทวิทั้งหมด
- ง) การติดแผ่นพอลิเอทิลีนในส่วนซีทวิลงบนแผ่นโพลีเอทิลีน
- จ) การติดแผ่นพอลิเอทิลีนลงบนแผ่นโพลีเอทิลีนแบบซีทวิเสร็จสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก)

ข)

รูปที่ 3.3 แสดงสัญญาณและรูปแบบในการกระโดดในแนวตั้ง

ก) แสดงสัญญาณ timing diagram เมื่อทำการกระโดดในแนวตั้ง

ข) รูปแสดงการกระโดดในแนวตั้ง

หลักการวัดความสูงจากการกระโดดในแนวตั้งโดยใช้ Capacitive Sensor เป็นอุปกรณ์วัด จากกฎอนุรักษ์พลังงานจะเทียบได้ว่าพลังงานขณะเริ่มการกระโดดขึ้นจะเท่ากับพลังงานขณะกระโดดจนถึงระยะสูงสุด โดยพลังงานขณะเริ่มการกระโดดขึ้นจะไม่มีพลังงานศักย์แต่จะมีพลังงานจลน์ (ตำแหน่ง c) และขณะลอยขึ้นถึงระยะสูงสุดในการกระโดดขึ้นจะไม่มีพลังงานจลน์แต่จะมีพลังงานศักย์(ตำแหน่ง d) จะได้ว่า [12]

$$\frac{1}{2}mv_i^2 + mgh_i = \frac{1}{2}mv_f^2 + mgh_f \quad (36)$$

$$\frac{1}{2}mv_i^2 = mgh_f \quad (37)$$

$$h_f = \frac{v_i^2}{2g} \quad (38)$$

และทราบว่าความเร็วในขณะเริ่มกระโดด (ตำแหน่ง c) จะมีค่าความเร็วเท่ากับ ความเร็วขณะเริ่มตกลงสู่พื้น (ตำแหน่ง e) แต่จะมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน โดยจะได้เวลาทั้งหมดในการกระโดดจากการรับสัญญาณที่ Capacitive Sensor เฟลต (Δt) จึงได้ว่า

$$-v_i = v_f \quad (39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการการเคลื่อนที่ใน 1 มิติ

$$v_f = v_i - g(\Delta t) \quad (40)$$

เมื่อ $-v_i = v_f$ จะได้ว่า

$$-v_i = v_i - g(\Delta t) \quad (41)$$

ดังนั้นความเร็วต้นคือ

$$v_i = \frac{g(\Delta t)}{2} \quad (42)$$

ดังนั้นจะทราบความสูงการกระโดดโดยใช้เวลาในการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยนำ v_i จากสมการที่ (42) ไปแทนลงในสมการที่ (38)

$$h_f = \frac{g\Delta t^2}{8} \quad (43)$$

กำหนดให้

m คือมวลของผู้ทดสอบการกระโดดในแนวดิ่ง มีหน่วยเป็น kg .

v_i คือความเร็วที่ตำแหน่งเริ่มต้นของการกระโดด มีหน่วยเป็น m/s

h_i คือความสูงที่ตำแหน่งเริ่มต้นของการกระโดด มีหน่วยเป็น m .

v_f คือความเร็วที่ตำแหน่งสูงสุด มีหน่วยเป็น m/s

h_f คือความสูงที่ตำแหน่งสูงสุด มีหน่วยเป็น m .

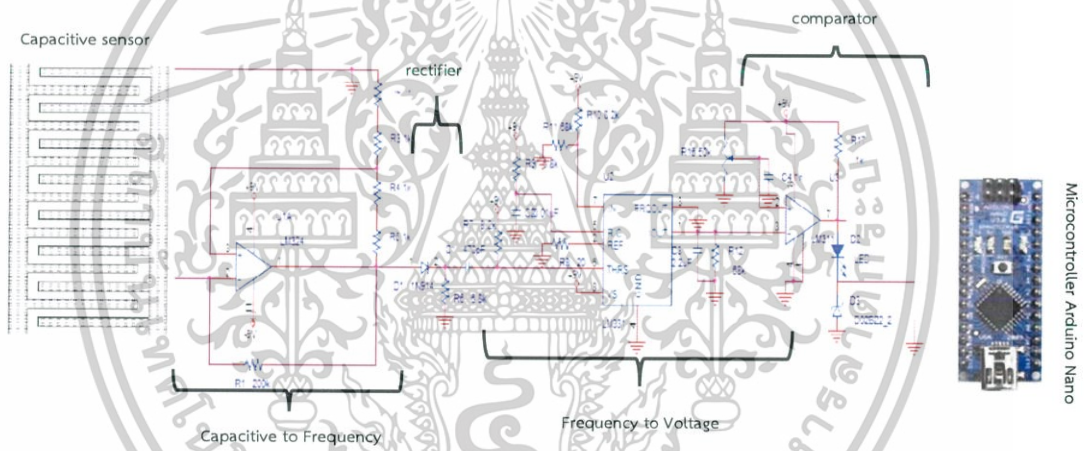
g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น m/s^2

Δt คือระยะเวลาในการกระโดดทั้งหมด มีหน่วยเป็น s .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรจัดการสัญญาณ

จากรูปจะเห็นว่าวงจรถูกแบ่งเป็น 3 ส่วนหลักๆ คือส่วนที่เป็น Capacitive to Frequency ส่วน Frequency to Voltage และ Voltage to Microcontroller โดยส่วน Capacitive to Frequency จะเป็นส่วนที่รับสัญญาณจากตัวเก็บประจุโดยสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณพัลส์ซึ่งมีความถี่ขึ้นอยู่กับค่าตัวเก็บประจุ และนำสัญญาณพัลส์ที่ได้มายังส่วน Frequency to Voltage เพื่อแปลงสัญญาณพัลส์ที่รับมาเป็นแรงดันไฟฟ้า โดยแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะถูกนำมาในส่วน ในส่วนของวงจร Comparator เพื่อส่งสัญญาณลอจิกเป็น High หรือ Low ให้แก่ Microcontroller โดยจะกำหนดให้สัญญาณเป็น High เมื่อมี Load บน Capacitive Sensor เฟลต และสัญญาณจะเป็น Low เมื่อไม่มี Load ก็คือขณะที่กระโดดอยู่บน Capacitive Sensor เฟลต และจะเป็น High อีกครั้งเมื่อบุคคลตกลงบน Capacitive Sensor เฟลตอีกครั้งดังรูป ก) [11]



รูปที่ 3.4 รูปแสดงวงจรการตรวจสัญญาณ

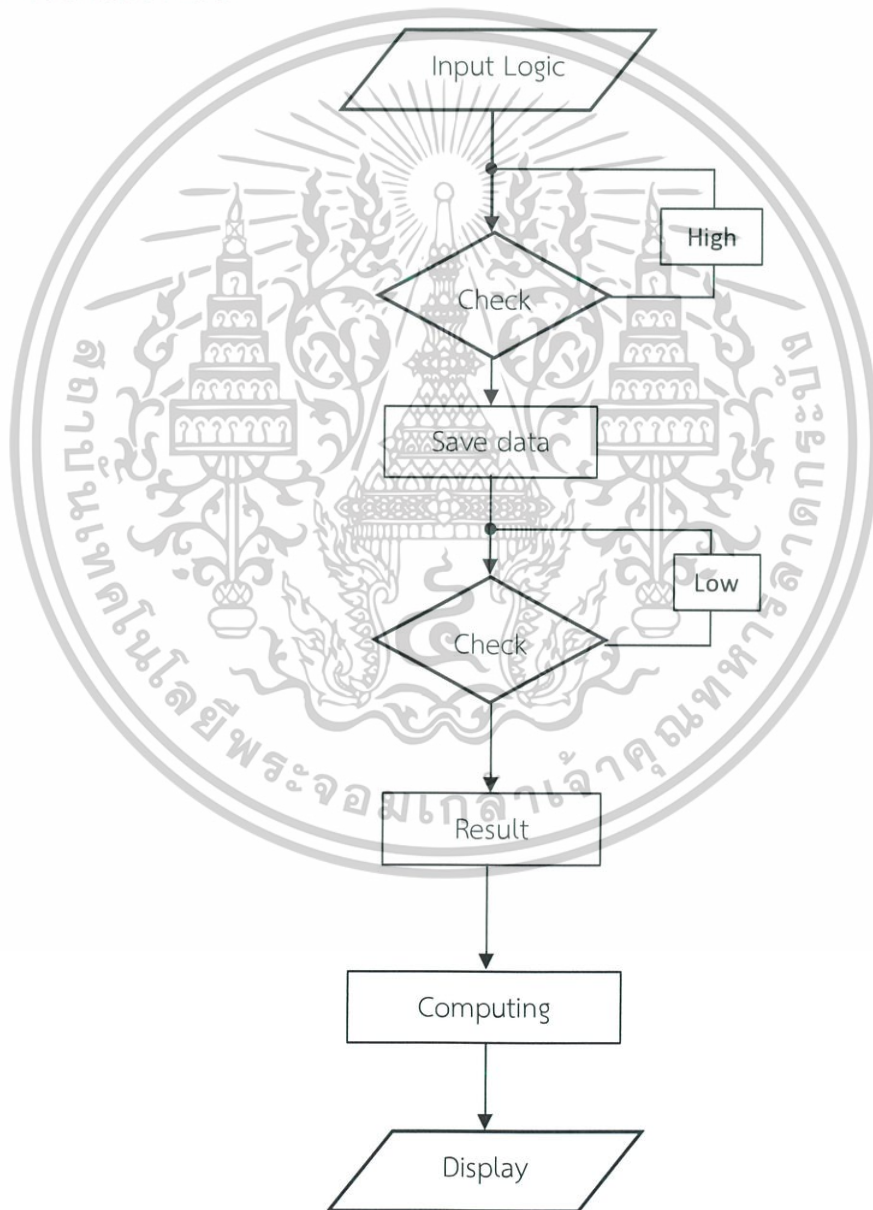
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลวิจัยและอภิปรายผล

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการทดลอง และผลการทดลอง วงจรตรวจสอบสัญญาณ การออกแบบ Capacitive Sensor และการทดลองการใช้งานร่วมกับ Accelerometer Sensor โดยมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 การออกแบบระบบ



รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนการออกแบบระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับทำางใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการออกแบบเพื่อใช้ในการวัดความสูงจากการกระโดดในแนวดิ่ง เมื่อได้ Input Logic จาก Capacitive Sensor โดยขณะยังอยู่บนแผ่น สัญญาณที่ได้เป็น High ดังนั้นขณะทำการกระโดด สัญญาณที่ได้เป็น Low ระบบจะทำการ Check ว่าเมื่อสัญญาณเป็น Low ก็ไปยังส่วน Save data เพื่อเก็บข้อมูล และ ระบบเชื่อว่าถ้าสัญญาณเป็น High จะทำการหยุดบันทึกข้อมูลทันที ดังนั้นจะได้ข้อมูลในเฉพาะการกระโดดเท่านั้น และ ระบบใช้ข้อมูลในรูปแบบเวลาที่ได้นำมาประมวลผลทางทฤษฎีฟิสิกส์ เพื่อให้ข้อมูลเวลาอยู่ในรูปแบบของความสูงในการกระโดดในแนวดิ่ง และ แสดงผลความสูงจากการกระโดดในแนวดิ่งทาง Display

4.2 การทดลองวงจรตรวจสอบสัญญาณ

ในส่วนนี้เป็นการศึกษาการทำงานของวงจรเพื่อสังเกตลักษณะของวงจรให้ตอบสนองเป็นลอจิก เพื่อสะดวกต่อการนำไปประมวลผล

4.2.1 ผลตอบสนองของวงจร

หลังจากที่สร้างแผ่น Capacitive Sensor เมื่อนำมาทดสอบ ทำให้ทราบว่ามีค่าความแตกต่างของค่า Capacitive Sensor ในขณะที่มีคนอยู่กับไม่มีคนอยู่บนแผ่น Capacitive Sensor ที่ชัดเจน ดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



ก)

ข)

รูปที่ 4.2 แสดงการตรวจวัดค่าความจุไฟฟ้า

ก) ค่าของ Capacitive Sensor ขณะที่ไม่มีคนเหยียบได้ 29.60 pF

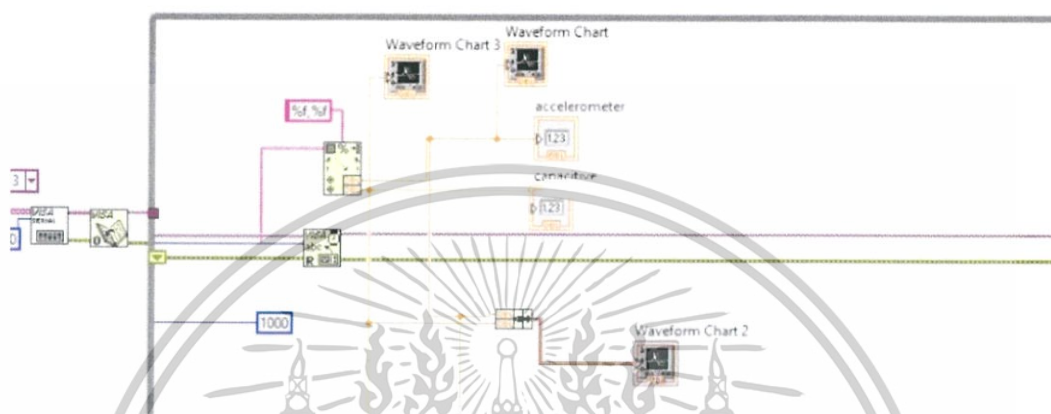
ข) ค่าของ Capacitive Sensor ขณะที่มีคนเหยียบได้ 689.90 pF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การประมวลผลข้อมูล

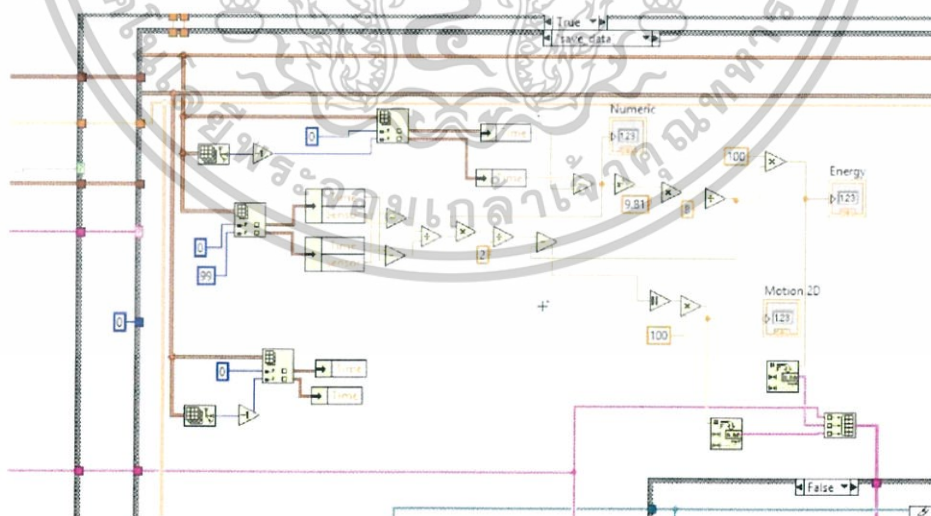
4.3.1 LabView

หลังจากที่ได้สัญญาณจาก Capacitive Sensor จึงนำมาประมวลผล และคำนวณผลโดยใช้โปรแกรม LabView ให้แสดงผลออกมาในรูปแบบของความสูงในการกระโดดในแนวดิ่งที่ตรวจวัดได้



รูปที่ 4.3 แสดง block diagram ในส่วนนำข้อมูลเข้า LabView

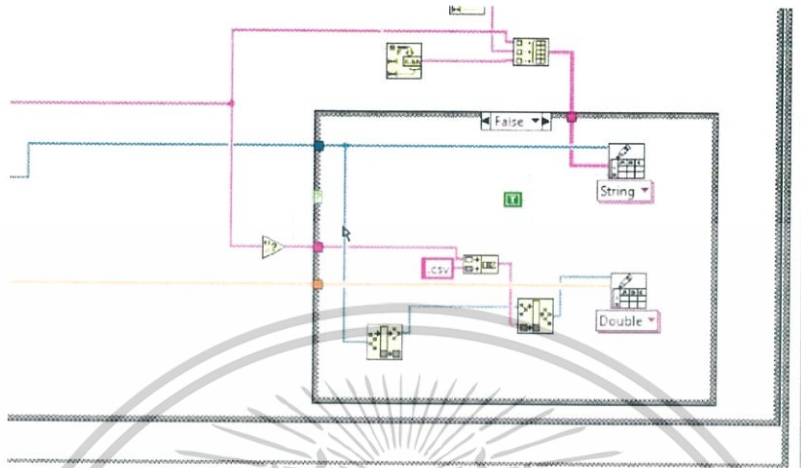
นำข้อมูลจาก Arduino โดยตั้งค่า COM และ Baud rate ของ Arduino ให้ตรงกันเพื่อเชื่อมต่อเข้าสู่ LabView โดยใช้ VISA และแสดงข้อมูลในรูปแบบกราฟ และตัวเลขข้อมูลเพื่อใช้ตรวจสอบข้อมูลที่ได้รับ



รูปที่ 4.4 แสดง block diagram ในส่วนคำนวณ

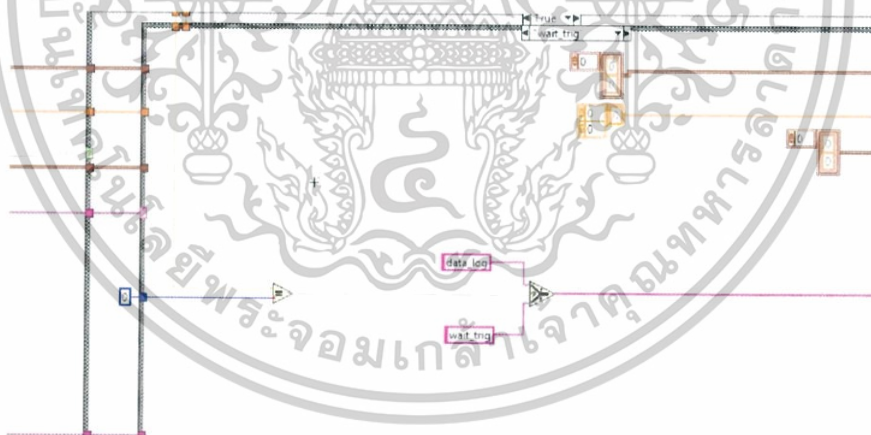
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนนี้ใช้ในการคำนวณเวลาที่วัดได้ในช่วงแรกให้ได้ตัวเลขออกมาเป็นความสูงในการกระโดด โดยจะใช้ในการคำนวณตามหลักทฤษฎีกฎอนุรักษ์พลังงาน และการเคลื่อนที่ในสองมิติ



รูปที่ 4.5 แสดง block diagram ในการบันทึกผลการทดลอง

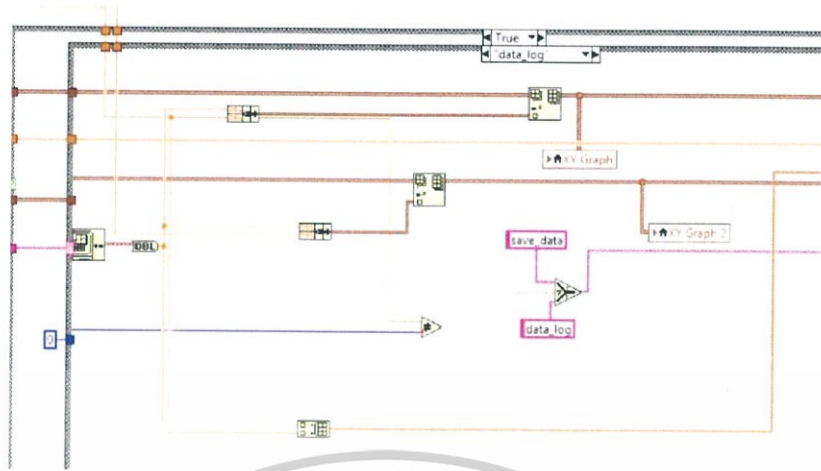
จากข้างต้นเมื่อเราได้ข้อมูลความสูงของการกระโดดในแนวตั้งได้แล้วเราจะนำมาบันทึกข้อมูลเก็บไว้เพื่อใช้ในการบันทึกค่าแสดงดังตารางบันทึกผลที่ได้



รูปที่ 4.6 แสดง block diagram ในเงื่อนไขที่ใช้บันทึกผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะเป็นการเริ่มจับเวลาขณะกระโดดทั้งหมด จากสัญญาณที่ได้จาก Capacitive Sensor โดยจะให้เริ่มบันทึกค่าเวลาในช่วงที่เท่ากับ 0 ก็คือในช่วง Low

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



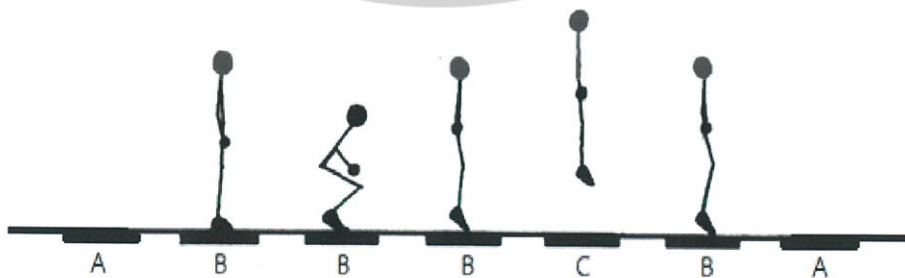
รูปที่ 4.7 แสดง block diagram ในเงื่อนไขที่ใช้บันทึกผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการหยุดบันทึกค่า และเวลา ก็คือในช่วงที่บุคคลลงมาเหยียบบน Capacitive Sensor อีกครั้งในช่วงที่ไม่เท่ากับ 0 ก็คือในช่วงที่เป็น High

4.4 การตอบสนองข้อมูล

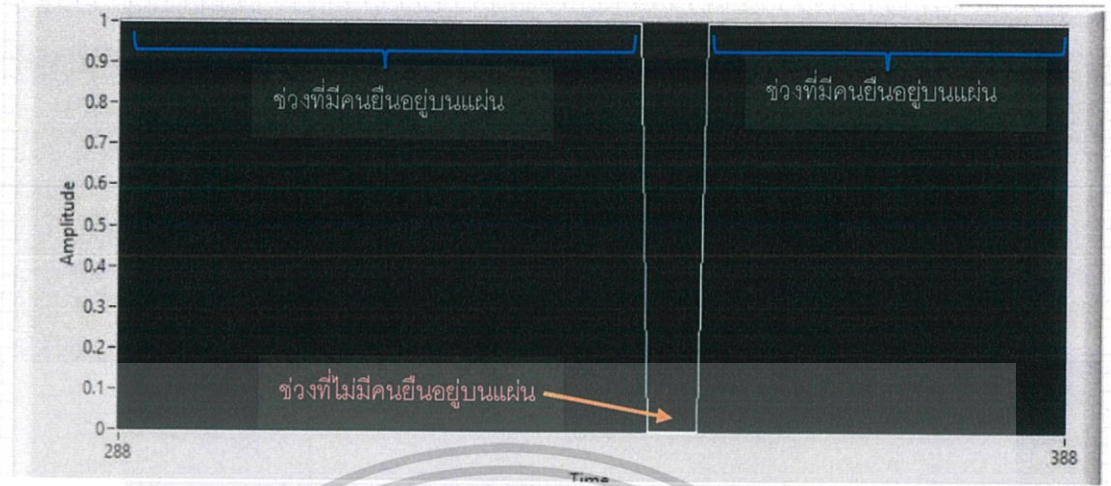
4.3.1 ผลการตอบสนองของ Capacitive Sensor

การวัดความสูงจากการกระโดดในแนวตั้งโดย Capacitive Sensor สนใจในช่วงที่คนเริ่มกระโดดลอยขึ้นจนลงมาถึงพื้น และนำเวลาที่ได้ในช่วงนั้นจากกราฟมาคำนวณหาความสูงจากการกระโดดในแนวตั้งค่าที่วัดได้จาก Capacitive Sensor นำมาสร้างความสัมพันธ์ได้ ดังรูปที่ 4.11 ทำให้ทราบว่ตำแหน่ง A คือขณะที่ไม่มีคนยืนอยู่บน Capacitive Sensor ตำแหน่ง B คือขณะที่มีคนยืนอยู่บน Capacitive Sensor และตำแหน่ง C คือขณะที่คนเริ่มกระโดดลอยขึ้นจนลงมาถึงพื้น Capacitive Sensor ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.8 แสดงลักษณะในการกระโดดในแนวตั้ง

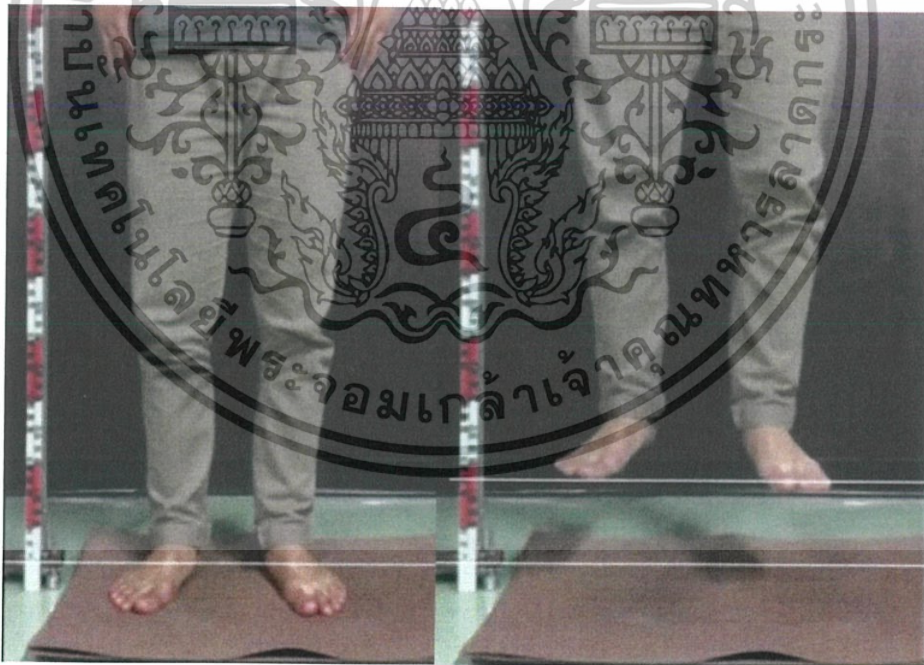
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงสัญญาณของ Capacitive Sensor

4.5 อุปกรณ์อ้างอิง

กล้องใช้ตรวจจับความสูงในขณะที่ทำการกระโดดใช้โปรแกรมตัวดีโอที่บันทึกแล้วเทียบระยะเวลาความสูงเทียบในแต่ละเฟรมเรต



รูปที่ 4.10 แสดงโปรแกรมดูเฟรมเรตเพื่อใช้ในการหาความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 บันทึกผลของ คนที่ 1 สูง 160 cm. น้ำหนัก 72 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	21.02	17	23.64
2	32.62	26	25.46
3	32.47	27	20.25
4	32.51	28	16.10
5	32.43	28	15.82
6	32.64	28	16.57
7	32.73	28	16.89
8	21.08	18	17.11
9	20.82	21	-0.85
10	32.62	28	16.50
11	20.66	15	37.73
12	32.40	26	24.61
13	32.67	27	21.00
14	20.97	17	23.35
15	20.57	16	28.56

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลของ คนที่ 2 สูง 175 cm. น้ำหนัก 80 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.59	17	21.11
2	20.16	18	12.00
3	20.49	16	28.06
4	20.06	14	43.28
5	20.96	16	31.00
6	20.60	15	37.33
7	20.88	16	30.50
8	20.51	20	2.55
9	11.30	10	13.00
10	11.76	13	-9.53
11	11.46	11	4.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 บันทึกผลของ คนที่ 2 สูง 175 cm. น้ำหนัก 80 Kg. เพศชาย (ต่อ)

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
12	32.83	27	21.59
13	32.44	28	15.85
14	20.41	21	-2.80
15	20.56	18	14.22

ตารางที่ 4.3 บันทึกผลของ คนที่ 3 สูง 174 cm. น้ำหนัก 75 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.82	19	9.57
2	32.40	29	11.72
3	20.82	16	30.12
4	20.94	16	30.87
5	20.97	17	23.35
6	20.81	19	9.52
7	20.90	16	30.62
8	20.85	16	30.31
9	20.79	17	22.29
10	20.94	20	4.70
11	20.90	19	10.00
12	20.99	17	23.47
13	20.74	19	9.15
14	20.83	16	30.18
15	20.75	16	29.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 บันทึกผลของ คนที่ 4 สูง 173 cm. น้ำหนัก 74 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.62	14	47.28
2	20.84	18	15.77
3	20.15	15	34.33
4	20.65	21	-1.67
5	20.87	17	22.76
6	20.07	22	-8.77
7	20.96	14	49.71
8	20.38	20	1.90
9	32.58	27	20.67
10	32.91	28	17.54
11	20.42	16	27.63
12	11.14	11	1.27
13	11.94	9	32.67
14	21.04	18	16.89
15	32.16	28	14.86

ตารางที่ 4.5 บันทึกผลของ คนที่ 5 สูง 168 cm. น้ำหนัก 58 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	11.85	10	18.50
2	5.18	5	3.60
3	5.14	4	28.50
4	20.68	14	47.71
5	11.76	9	30.67
6	11.57	9	28.56
7	11.56	5	131.20
8	20.32	20	1.60
9	20.71	15	38.06
10	32.64	28	16.57
11	32.88	28	17.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 บันทึกผลของ คนที่ 5 สูง 168 cm. น้ำหนัก 58 Kg. เพศชาย (ต่อ)

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
12	20.83	23	-9.43
13	5.46	3	82.00
14	5.34	4	33.50
15	20.84	18	15.77

ตารางที่ 4.6 บันทึกผลของ คนที่ 6 สูง 175 cm. น้ำหนัก 71 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	11.68	9	29.78
2	11.65	9	29.44
3	11.66	13	-10.31
4	11.72	12	-2.33
5	20.81	14	48.64
6	20.90	15	39.33
7	20.78	32	-35.06
8	11.71	10	17.10
9	11.77	10	17.70
10	11.53	15	-23.13
11	11.73	12	-2.25
12	11.78	9	30.89
13	20.78	18	15.44
14	32.45	25	29.80
15	11.58	13	-10.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 บันทึกผลของ คนที่ 7 สูง 163 cm. น้ำหนัก 51 Kg. เพศหญิง

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	5.23	4	30.75
2	5.18	4	29.50
3	5.19	5	3.80
4	11.66	8	45.75
5	5.15	3	71.67
6	5.17	5	3.40
7	11.78	10	17.80
8	5.16	4	29.00
9	5.27	3	75.67
10	11.71	9	30.11
11	5.26	4	31.50
12	5.19	4	29.75
13	11.72	11	6.55
14	5.24	4	31.00
15	11.69	13	-10.08

ตารางที่ 4.8 บันทึกผลของ คนที่ 8 สูง 174 cm. น้ำหนัก 68 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.45	16	27.81
2	20.64	17	21.41
3	20.40	17	20.00
4	21.63	19	13.84
5	32.75	29	12.93
6	32.11	30	7.03
7	32.64	28	16.57
8	20.87	23	-9.26
9	20.94	17	23.17
10	20.59	16	28.68
11	20.62	17	21.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปให้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 บันทึกผลของ คนที่ 8 สูง 174 cm. น้ำหนัก 68 Kg. เพศชาย (ต่อ)

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
12	20.58	18	14.33
13	11.99	15	-20.06
14	11.74	15	-21.73
15	20.39	16	27.43

ตารางที่ 4.9 บันทึกผลของ คนที่ 9 สูง 175 cm. น้ำหนัก 70 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.75	18	15.27
2	21.03	20	5.15
3	20.94	20	4.70
4	20.06	18	11.44
5	20.65	21	-1.66
6	20.32	18	12.88
7	20.97	20	4.85
8	20.36	23	-11.47
9	11.47	14	-18.07
10	11.90	14	-15.00
11	11.11	10	11.10
12	11.04	13	-15.07
13	20.66	19	8.73
14	20.74	17	22.00
15	20.25	18	12.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 บันทึกผลของ คนที่ 10 สูง 168 cm. น้ำหนัก 58 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	11.65	9	29.44
2	5.19	5	3.80
3	20.82	16	30.12
4	11.70	12	-2.50
5	20.76	17	22.11
6	20.82	17	22.47
7	21.54	19	13.36
8	20.70	17	21.76
9	20.31	18	12.83
10	21.89	19	15.21
11	20.75	20	3.75
12	20.38	17	19.88
13	32.30	28	15.35
14	11.46	13	-11.84
15	20.32	17	19.52

ตารางที่ 4.11 บันทึกผลของ คนที่ 11 สูง 168 cm. น้ำหนัก 48 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.72	20	3.60
2	32.59	26	25.34
3	32.68	28	16.71
4	32.63	28	16.53
5	20.81	18	15.61
6	20.56	16	28.50
7	20.67	17	21.58
8	11.00	14	-21.42
9	20.35	17	19.70
10	20.57	20	2.85
11	20.32	17	19.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 บันทึกผลของ คนที่ 11 สูง 168 cm. น้ำหนัก 48 Kg. เพศชาย (ต่อ)

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
12	20.10	17	18.23
13	20.93	18	16.27
14	21.44	20	7.20
15	20.31	16	26.93

ตารางที่ 4.12 บันทึกผลของ คนที่ 12 สูง 168 cm. น้ำหนัก 52 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	32.64	31	5.29
2	20.76	26	-20.15
3	20.89	26	-19.65
4	20.85	30	-30.50
5	20.81	18	15.61
6	20.42	18	13.44
7	20.98	18	16.55
8	20.74	16	29.62
9	20.45	20	2.25
10	32.92	27	21.92
11	32.48	30	8.26
12	11.45	14	-18.21
13	20.74	18	15.22
14	20.35	16	27.18
15	20.69	17	21.70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 บันทึกผลของ คนที่ 13 สูง 164 cm. น้ำหนัก 90 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.97	18	16.50
2	20.56	17	20.94
3	20.97	18	16.50
4	20.64	18	14.66
5	20.59	17	21.11
6	20.38	16	27.37
7	20.71	17	21.82
8	20.60	15	37.33
9	20.65	16	29.06
10	20.49	18	13.83
11	20.73	17	21.94
12	20.55	16	28.43
13	20.96	18	16.44
14	20.67	17	21.58
15	20.30	15	35.33

ตารางที่ 4.14 บันทึกผลของ คนที่ 14 สูง 163 cm. น้ำหนัก 65 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.94	17	23.17
2	20.65	16	29.06
3	21.08	18	17.11
4	20.75	17	22.05
5	11.97	15	-20.20
6	20.65	18	14.72
7	20.71	24	-13.70
8	20.85	20	4.25
9	32.56	28	16.28
10	20.67	18	14.83
11	20.28	17	19.29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 บันทึกผลของ คนที่ 14 สูง 163 cm. น้ำหนัก 65 Kg. เพศชาย (ต่อ)

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
12	20.60	16	28.75
13	20.67	16	29.18
14	20.34	16	27.12
15	20.98	18	16.55

ตารางที่ 4.15 บันทึกผลของ คนที่ 15 สูง 187 cm. น้ำหนัก 115 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.98	18	16.55
2	20.42	17	20.11
3	20.64	17	21.41
4	11.48	15	-23.46
5	11.97	15	-20.2
6	11.73	14	-16.21
7	20.76	17	22.11
8	11.61	14	-17.07
9	11.96	15	-20.26
10	32.23	28	15.10
11	20.38	19	7.26
12	20.67	18	14.83
13	20.76	20	3.80
14	20.44	18	13.55
15	20.14	16	25.87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 บันทึกผลของ คนที่ 16 สูง 176 cm. น้ำหนัก 65 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.31	16	26.93
2	20.87	18	15.94
3	21.06	20	5.30
4	20.49	18	13.83
5	20.76	18	15.33
6	20.41	17	20.05
7	20.34	19	7.05
8	20.45	17	20.29
9	20.76	18	15.33
10	20.64	18	14.66
11	20.46	18	13.66
12	20.81	19	9.52
13	20.34	17	19.64
14	20.92	18	16.22
15	20.54	18	14.11

ตารางที่ 4.17 บันทึกผลของ คนที่ 17 สูง 166 cm. น้ำหนัก 54 Kg. เพศหญิง

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	11.46	14	-18.14
2	11.75	15	-21.66
3	11.94	16	-25.37
4	11.07	9	23.00
5	11.78	12	-1.83
6	11.66	15	-22.26
7	11.45	13	-11.92
8	11.85	16	-25.93
9	11.36	15	-24.26
10	20.34	18	13.00
11	11.78	13	-9.38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 บันทึกผลของ คนที่ 17 สูง 166 cm. น้ำหนัก 54 Kg. เพศหญิง (ต่อ)

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
12	11.97	15	-20.20
13	11.34	15	-24.40
14	11.97	16	-25.18
15	11.53	14	-17.64

ตารางที่ 4.18 บันทึกผลของ คนที่ 18 สูง 160 cm. น้ำหนัก 49 Kg. เพศหญิง

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	5.78	4	44.50
2	5.63	4	40.75
3	5.91	5	18.20
4	5.44	5	8.80
5	11.36	9	26.22
6	5.24	3	74.66
7	5.49	5	9.80
8	11.46	9	27.33
9	11.82	10	18.20
10	11.51	14	-17.78
11	5.09	4	27.25
12	11.85	9	31.66
13	11.97	10	19.70
14	5.76	4	44.00
15	5.38	4	34.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 บันทึกผลของ คนที่ 19 สูง 174 cm. น้ำหนัก 55 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	32.11	30	7.03
2	32.59	30	8.63
3	20.47	24	-14.70
4	20.58	21	-2.00
5	32.25	29	11.20
6	21.64	20	8.20
7	32.64	27	20.88
8	32.87	28	17.39
9	20.45	18	13.61
10	20.76	18	15.33
11	20.19	16	26.18
12	20.45	17	20.29
13	20.97	18	16.50
14	32.84	28	17.28
15	20.38	16	27.37

ตารางที่ 4.20 บันทึกผลของ คนที่ 20 สูง 175 cm. น้ำหนัก 74 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.79	18	15.50
2	20.64	19	8.63
3	20.87	17	22.76
4	20.63	16	28.93
5	20.52	19	8.00
6	20.48	17	20.47
7	20.17	20	0.85
8	20.67	16	29.18
9	20.97	18	16.50
10	20.14	16	25.87
11	20.93	16	30.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 บันทึกผลของ คนที่ 20 สูง 175 cm. น้ำหนัก 74 Kg. เพศชาย (ต่อ)

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
12	20.11	20	0.55
13	20.84	21	-0.76
14	20.29	17	19.35
15	20.70	19	8.94

ตารางที่ 4.21 บันทึกผลของ คนที่ 21 สูง 173 cm. น้ำหนัก 60 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.16	18	12.00
2	20.35	19	7.10
3	20.80	19	9.47
4	20.76	19	9.26
5	20.19	18	12.16
6	20.25	20	1.25
7	20.64	19	8.63
8	20.48	19	7.78
9	20.33	18	12.94
10	20.94	18	16.33
11	20.69	19	8.89
12	20.75	20	3.75
13	20.50	19	7.89
14	11.80	10	18.00
15	32.48	28	16.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 บันทึกผลของ คนที่ 22 สูง 174 cm. น้ำหนัก 65 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	32.58	30	8.60
2	32.46	28	15.92
3	32.48	29	12.00
4	20.89	19	9.94
5	20.95	18	16.38
6	20.96	19	10.31
7	20.79	20	3.95
8	32.15	29	10.86
9	32.48	30	8.26
10	20.69	20	3.45
11	20.88	18	16.00
12	20.85	18	15.83
13	20.76	19	9.26
14	20.74	20	3.70
15	20.46	19	7.68

ตารางที่ 4.23 บันทึกผลของ คนที่ 23 สูง 177 cm. น้ำหนัก 78 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	11.80	12	-1.66
2	11.78	12	-1.83
3	11.56	15	-22.93
4	11.79	14	-15.78
5	11.84	13	-8.92
6	11.68	15	-22.13
7	11.76	12	-2.00
8	11.58	13	-10.92
9	11.94	13	-8.15
10	11.75	15	-21.66
11	11.56	15	-22.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารชุดนี้แก่บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาต

ตารางที่ 4.23 บันทึกผลของ คนที่ 23 สูง 177 cm. น้ำหนัก 78 Kg. เพศชาย (ต่อ)

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
12	5.98	8	-25.25
13	11.74	14	-16.14
14	11.34	11	3.09
15	20.46	18	13.66

ตารางที่ 4.24 บันทึกผลของ คนที่ 24 สูง 176 cm. น้ำหนัก 70 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	32.58	31	5.09
2	20.16	18	12.00
3	20.46	19	7.68
4	20.11	17	18.29
5	20.80	20	4.00
6	20.34	19	7.05
7	20.59	19	8.36
8	20.52	19	8.00
9	20.92	22	-4.90
10	20.76	23	-9.73
11	20.48	19	7.78
12	20.34	20	1.70
13	20.81	21	-0.90
14	20.30	18	12.77
15	20.73	20	3.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 บันทึกผลของ คนที่ 25 สูง 169 cm. น้ำหนัก 63 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	11.68	13	-10.15
2	11.88	14	-15.14
3	20.67	20	3.35
4	20.84	23	-9.39
5	20.34	21	-3.14
6	20.91	24	-12.87
7	20.72	22	-5.81
8	20.16	18	12.00
9	20.49	19	7.84
10	20.76	23	-9.73
11	11.84	14	-15.42
12	11.49	12	-4.25
13	11.73	13	-9.76
14	11.76	13	-9.53
15	20.85	20	4.25

ตารางที่ 4.26 บันทึกผลของ คนที่ 26 สูง 178 cm. น้ำหนัก 77 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	20.45	18	13.61
2	20.78	19	9.36
3	20.36	16	27.25
4	20.45	16	27.81
5	20.18	15	34.53
6	20.76	16	29.75
7	20.37	17	19.82
8	20.45	17	20.29
9	20.68	17	21.64
10	20.15	16	25.93
11	20.44	15	36.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.26 บันทึกผลของ คนที่ 26 สูง 178 cm. น้ำหนัก 77 Kg. เพศชาย (ต่อ)

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
12	11.46	13	-11.84
13	11.57	13	-11.00
14	20.39	17	19.94
15	20.15	16	25.93

ตารางที่ 4.27 บันทึกผลของ คนที่ 27 สูง 172 cm. น้ำหนัก 63 Kg. เพศชาย

จำนวน(ครั้ง)	Capacitive(cm)	Camera(cm)	Error(%)
1	11.76	14	-16.00
2	11.52	14	-17.71
3	11.37	13	-12.53
4	11.24	15	-25.07
5	11.84	16	-26.00
6	11.88	16	-25.75
7	11.46	15	-23.60
8	5.28	4	32.00
9	5.67	4	41.75
10	5.26	3	75.33
11	11.60	15	-22.67
12	11.41	15	-23.93
13	11.94	15	-20.40
14	20.32	16	27.00
15	20.78	17	22.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบการวัดความสูงการกระโดดในแนวตั้งโดยใช้ Capacitive Sensor พบว่า มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 18.61 % สามารถวัดความสูงของการกระโดดในแนวตั้ง โดยใช้การวิเคราะห์ การจับเวลาในการกระโดดในแนวตั้ง จากความสัมพันธ์ในทฤษฎีการเคลื่อนที่ในสองมิติ และกฎอนุรักษ์ พลังงานทางฟิสิกส์ โดย Capacitive Sensor สามารถติดตั้ง และทดลองได้โดยง่าย อีกทั้งยังสามารถ ผลิตเองได้ ซึ่ง Capacitive Sensor นี้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพความสูงของการกระโดด ในแนวตั้งได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทดสอบข้างต้นผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะสำหรับผู้สนใจในโครงการพิเศษนี้ ในการออกแบบ แผ่น Capacitive Sensor ควรจะมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคบ และควรมีจำนวนขั้วที่มากจะทำให้การ ตรวจจับสะดวกขึ้น ในส่วนของวงจรควรจะมีปรับค่าความต้านทานในวงจรให้เหมาะสมกับวงจรเพื่อไม่ให้เกิดการล้าช้าของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] จีราพร บุณนาค. 2560. เปิดตัว Apple Watch Nike. [Online]. Available : <https://www.apple.com/th/newsroom/2016/09/07Apple-Nike-Launch-the-Perfect-Running-Partner-Apple-Watch-Nike/>
- [2] Lynx ระบบนักพัฒนา (นามแฝง). 2561. LaserLynx การวัดระยะทาง. [Online]. Available : <http://www.finishlynx.com/th/product/event-management/laserlynx-distance-measurement/>
- [3] Garlic SlideSofter (นามแฝง). 2558. แบบฝึกกระโดด บาสเกตบอล ผู้เริ่มต้นฝึก หรือ กระโดดเพิ่มความสูง. [Online]. Available : <http://alldobasketball.blogspot.com/2016/05/blog-post.html>
- [4] วีรวัฒน์ ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์ และถาวร กมทศรี. 2557. การเปรียบเทียบสมรรถภาพการกระโดดระหว่างนักกีฬาทีมวอลเลย์บอลหญิงทีมชาติไทยและยูวชน. [Online]. Available : <http://repository.li.mahidol.ac.th/dspace/handle/123456789/1454>
- [5] ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์. 2558. ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกดฝ่าเท้าและสมดุร่างกาย.
- [6] John F. Drazan, Student Member, EMBS, Heather Danielsen, Matthew Vercelletto, Amy Loya, James Davis and Ron Eglash. 2016. A Case Study for Integrated STEM Outreach in an Urban Setting Using a Do-It-Yourself Vertical Jump Measurement Platform.
- [7] SARAH AL-MUTLAQ and ALEX THE GIANT. 2560. วิธีการใช้งาน Load Cell. [Online]. Available : <http://thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article/how-to-use-load-cell-and-hx711-amplifier-module.html>
- [8] Kyowa Electronic Instruments (นามแฝง). 2560. สเตรนเกจ. [Online]. Available : http://www.kyowa-ei.co.th/tha/technical/strain_gages/strain_gage.html
- [9] Circuitshops (นามแฝง). 2560. ตัวตรวจจับแรงกดแบบกลม 0.5 นิว. [Online]. Available : <http://circuitshops.com/articles/41972683/%E0%B8%95%E0%B8%B1%E0%B8%A7%B9%89%E0%B8%A7.html>
- [10] นายจอมพล พุ่มไชย นายนิรันดร์ ผลเพิ่มพูนทวี และนายนิรันดร์ อร่ามรัตน์พันธุ์. 2553. CAPACITIVE SENSORS CIRCUIT
- [11] Stevens Creek Blvd and Santa Clara. 2551. Microstrip Interdigital Capacitor. [Online]. Available : <http://edadocs.software.keysight.com/display/ads2008U2/Distributed+Components+Print+View>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM2902, LM324/LM324A, LM224/ LM224A

Quad Operational Amplifier

Features

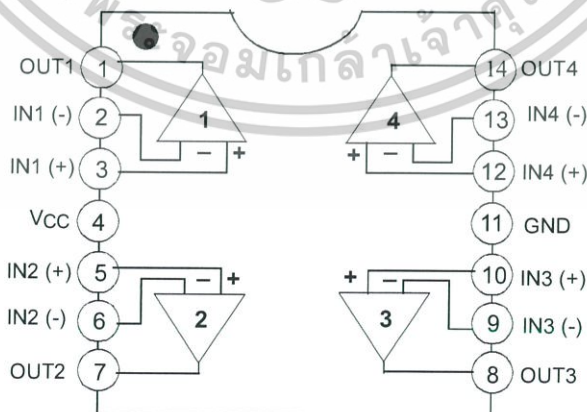
- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain: 100dB
- Wide Power Supply Range:
LM224/LM224A, LM324/LM324A : 3V~32V (or $\pm 1.5 \sim 16V$)
LM2902: 3V~26V (or $\pm 1.5V \sim 13V$)
- Input Common Mode Voltage Range Includes Ground
- Large Output Voltage Swing: 0V to $V_{CC} - 1.5V$
- Power Drain Suitable for Battery Operation

Description

The LM324/LM324A, LM2902, LM224/LM224A consist of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide voltage range. operation from split power supplies is also possible so long as the difference between the two supplies is 3 volts to 32 volts. Application areas include transducer amplifier, DC gain blocks and all the conventional OP Amp circuits which now can be easily implemented in single power supply systems.



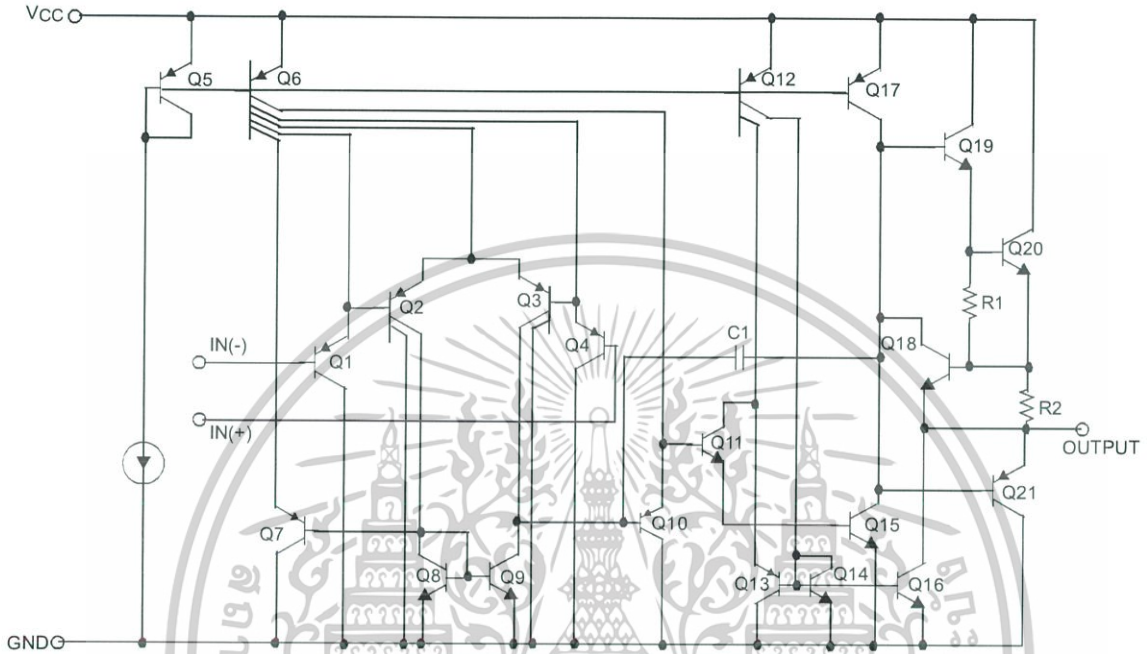
Internal Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
Rev. 1.0.4

Schematic Diagram

(One Section Only)



Absolute Maximum Ratings

Parameter	Symbol	LM224/LM224A	LM324/LM324A	LM2902	Unit
Power Supply Voltage	V _{CC}	±16 or 32	±16 or 32	±13 or 26	V
Differential Input Voltage	V _{I(DIFF)}	32	32	26	V
Input Voltage	V _I	-0.3 to +32	-0.3 to +32	-0.3 to +26	V
Output Short Circuit to GND V _{CC} ≤ 15V, T _A = 25°C (one Amp)	-	Continuous	Continuous	Continuous	-
Power Dissipation, T _A = 25°C	P _D	1310 640	1310 640	1310 640	mW
Operating Temperature Range	T _{OPR}	-25 ~ +85	0 ~ +70	-40 ~ +85	°C
Storage Temperature Range	T _{STG}	-65 ~ +150	-65 ~ +150	-65 ~ +150	°C

Thermal Data

Parameter	Symbol	Value	Unit
Thermal Resistance Junction-Ambient Max. 14-DIP 14-SOP	R _{θja}	95 195	°C/W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics

($V_{CC} = 5.0V$, $V_{EE} = GND$, $T_A = 25^\circ C$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	LM224			LM324			LM2902			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V_{IO}	$V_{CM} = 0V$ to $V_{CC} - 1.5V$ $V_{O(P)} = 1.4V$, $R_S = 0\Omega$ (Note1)	-	1.5	5.0	-	1.5	7.0	-	1.5	7.0	mV
Input Offset Current	I_{IO}	$V_{CM} = 0V$	-	2.0	30	-	3.0	50	-	3.0	50	nA
Input Bias Current	I_{BIAS}	$V_{CM} = 0V$	-	40	150	-	40	250	-	40	250	nA
Input Common-Mode Voltage Range	$V_{I(R)}$	Note1	0	-	$V_{CC} - 1.5$	0	$V_{CC} - 1.5$	-	0	-	$V_{CC} - 1.5$	V
Supply Current	I_{CC}	$R_L = \infty$, $V_{CC} = 30V$ (LM2902, $V_{CC} = 26V$)	-	1.0	3	-	1.0	3	-	1.0	3	mA
		$R_L = \infty$, $V_{CC} = 5V$	-	0.7	1.2	-	0.7	1.2	-	0.7	1.2	mA
Large Signal Voltage Gain	G_V	$V_{CC} = 15V$, $R_L = 2k\Omega$ $V_{O(P)} = 1V$ to $11V$	50	100	-	25	100	-	25	100	-	V/ mV
Output Voltage Swing	$V_{O(H)}$	Note1, $R_L = 2k\Omega$ $R_L = 10k\Omega$	26	-	-	26	-	-	22	-	-	V
			27	28	-	27	28	-	23	24	-	V
	$V_{O(L)}$	$V_{CC} = 5V$, $R_L = 10k\Omega$	-	5	20	-	5	20	-	5	100	mV
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	-	70	85	-	65	75	-	50	75	-	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	-	65	100	-	65	100	-	50	100	-	dB
Channel Separation	CS	$f = 1kHz$ to $20kHz$ (Note2)	-	120	-	-	120	-	-	120	-	dB
Short Circuit to GND	I_{SC}	$V_{CC} = 15V$	-	40	60	-	40	60	-	40	60	mA
Output Current	I_{SOURCE}	$V_{I(+)} = 1V$, $V_{I(-)} = 0V$ $V_{CC} = 15V$ $V_{O(P)} = 2V$	20	40	-	20	40	-	20	40	-	mA
		$V_{I(+)} = 0V$, $V_{I(-)} = 1V$ $V_{CC} = 15V$ $V_{O(P)} = 2V$	10	13	-	10	13	-	10	13	-	mA
	I_{SINK}	$V_{I(+)} = 0V$, $V_{I(-)} = 1V$ $V_{CC} = 5V$, $V_{O(R)} = 200mV$	12	45	-	12	45	-	-	-	-	μA
Differential Input Voltage	$V_{I(DIFF)}$	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	-	V

Note :

- $V_{CC} = 30V$ for LM224 and LM324, $V_{CC} = 26V$ for LM2902
- This parameter, although guaranteed, is not 100% tested in production.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการเผยแพร่ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้แต่แบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics (Continued)

(VCC = 5.0V, VEE = GND, unless otherwise specified)

The following specification apply over the range of $-25^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +85^{\circ}\text{C}$ for the LM224; and the $0^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +70^{\circ}\text{C}$ for the LM324 ; and the $-40^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq +85^{\circ}\text{C}$ for the LM2902

Parameter	Symbol	Conditions	LM224			LM324			LM2902			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V_{IO}	$V_{ICM} = 0\text{V to } V_{CC} - 1.5\text{V}$ $V_{O(P)} = 1.4\text{V}$, $R_S = 0\Omega$ (Note1)	-	-	7.0	-	-	9.0	-	-	10.0	mV
Input Offset Voltage Drift	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	$R_S = 0\Omega$ (Note2)	-	7.0	-	-	7.0	-	-	7.0	-	$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Input Offset Current	I_{IO}	$V_{CM} = 0\text{V}$	-	-	100	-	-	150	-	-	200	nA
Input Offset Current Drift	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	$R_S = 0\Omega$ (Note2)	-	10	-	-	10	-	-	10	-	$\text{pA}/^{\circ}\text{C}$
Input Bias Current	I_{BIAS}	$V_{CM} = 0\text{V}$	-	-	300	-	-	500	-	-	500	nA
Input Common-Mode Voltage Range	$V_{I(R)}$	Note1	0	-	$V_{CC} - 2.0$	0	-	$V_{CC} - 2.0$	0	-	$V_{CC} - 2.0$	V
Large Signal Voltage Gain	G_V	$V_{CC} = 15\text{V}$, $R_L = 2.0\text{k}\Omega$ $V_{O(P)} = 1\text{V to } 11\text{V}$	25	-	-	15	-	-	15	-	-	V/mV
Output Voltage Swing	$V_{O(H)}$	Note1 $R_L = 2\text{k}\Omega$	26	-	-	26	-	-	22	-	-	V
	$V_{O(L)}$	$R_L = 10\text{k}\Omega$	27	28	-	27	28	-	23	24	-	V
Output Current	I_{SOURCE}	$V_{I(+)} = 1\text{V}$, $V_{I(-)} = 0\text{V}$, $V_{CC} = 15\text{V}$, $V_{O(P)} = 2\text{V}$	10	20	-	10	20	-	10	20	-	mA
	I_{SINK}	$V_{I(+)} = 0\text{V}$, $V_{I(-)} = 1\text{V}$, $V_{CC} = 15\text{V}$, $V_{O(P)} = 2\text{V}$	10	13	-	5	8	-	5	8	-	mA
Differential Input Voltage	$V_{I(DIFF)}$	-	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	-	-	V_{CC}	V

Note:

1. $V_{CC} = 30\text{V}$ for LM224 and LM324 , $V_{CC} = 26\text{V}$ for LM2902
2. These parameters, although guaranteed, are not 100% tested in production.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ให้มีให้ชัดเจนบนเนื้อที่ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics (Continued)(V_{CC} = 5.0V, V_{EE} = GND, T_A = 25°C, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	LM224A			LM324A			Unit	
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.		
Input Offset Voltage	V _{IO}	V _{CM} = 0V to V _{CC} -1.5V V _{O(P)} = 1.4V, R _S = 0Ω (Note1)	-	1.0	3.0	-	1.5	3.0	mV	
Input Offset Current	I _{IO}	V _{CM} = 0V	-	2	15	-	3.0	30	nA	
Input Bias Current	I _{BIAS}	V _{CM} = 0V	-	40	80	-	40	100	nA	
Input Common-Mode Voltage Range	V _{I(R)}	V _{CC} = 30V	0	-	V _{CC} -1.5	0	-	V _{CC} -1.5	V	
Supply Current	I _{CC}	V _{CC} = 30V, R _L = ∞	-	1.5	3	-	1.5	3	mA	
		V _{CC} = 5V, R _L = ∞	-	0.7	1.2	-	0.7	1.2	mA	
Large Signal Voltage Gain	G _V	V _{CC} = 15V, R _L = 2kΩ V _{O(P)} = 1V to 11V	50	100	-	25	100	-	V/mV	
Output Voltage Swing	V _{O(H)}	Note1	R _L = 2kΩ	26	-	-	26	-	-	V
			R _L = 10kΩ	27	28	-	27	28	-	V
	V _{O(L)}	V _{CC} = 5V, R _L = 10kΩ	-	5	20	-	5	20	mV	
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	-	70	85	-	65	85	-	dB	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	-	65	100	-	65	100	-	dB	
Channel Separation	CS	f = 1kHz to 20kHz (Note2)	-	120	-	-	120	-	dB	
Short Circuit to GND	I _{SC}	V _{CC} = 15V	-	40	60	-	40	60	mA	
Output Current	I _{SOURCE}	V _{I(+)} = 1V, V _{I(-)} = 0V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V	20	40	-	20	40	-	mA	
		V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V	10	20	-	10	20	-	mA	
	I _{SINK}	V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 5V V _{O(P)} = 200mV	12	50	-	12	50	-	μA	
Differential Input Voltage	V _{I(DIFF)}	-	-	-	V _{CC}	-	-	V _{CC}	V	

Note:1. V_{CC} = 30V for LM224A, LM324A

2. This parameter, although guaranteed, is not 100% tested in production.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการเผยแพร่ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ เมิให้ตีแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Electrical Characteristics (Continued)(V_{CC} = 5.0V, V_{EE} = GND, unless otherwise specified)The following specification apply over the range of -25°C ≤ T_A ≤ +85°C for the LM224A; and the 0°C ≤ T_A ≤ +70°C for the LM324A

Parameter	Symbol	Conditions	LM224A			LM324A			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V _{IO}	V _{CM} = 0V to V _{CC} -1.5V V _{O(P)} = 1.4V, R _S = 0Ω (Note1)	-	-	4.0	-	-	5.0	mV
Input Offset Voltage Drift	ΔV _{IO} /ΔT	R _S = 0Ω (Note2)	-	7.0	20	-	7.0	30	μV/°C
Input Offset Current	I _{IO}	V _{CM} = 0V	-	-	30	-	-	75	nA
Input Offset Current Drift	ΔI _{IO} /ΔT	R _S = 0Ω (Note2)	-	10	200	-	10	300	pA/°C
Input Bias Current	I _{BIAS}	-	-	40	100	-	40	200	nA
Input Common-Mode Voltage Range	V _{I(R)}	Note1	0	-	V _{CC} -2.0	0	-	V _{CC} -2.0	V
Large Signal Voltage Gain	G _V	V _{CC} = 15V, R _L = 2.0kΩ	25	-	-	15	-	-	V/mV
Output Voltage Swing	V _{O(H)}	Note1	26	-	-	26	-	-	V
		R _L = 10kΩ	27	28	-	27	28	-	V
	V _{O(L)}	V _{CC} = 5V, R _L = 10kΩ	-	5	20	-	5	20	mV
Output Current	I _{SOURCE}	V _{I(+)} = 1V, V _{I(-)} = 0V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V	10	20	-	10	20	-	mA
	I _{SINK}	V _{I(+)} = 0V, V _{I(-)} = 1V V _{CC} = 15V, V _{O(P)} = 2V	5	8	-	5	8	-	mA
Differential Input Voltage	V _{I(DIFF)}	-	-	-	V _{CC}	-	-	V _{CC}	V

Note:

1. V_{CC} = 30V for LM224A and LM324A.
2. These parameters, although guaranteed, are not 100% tested in production.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการเผยแพร่ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้แต่แบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics

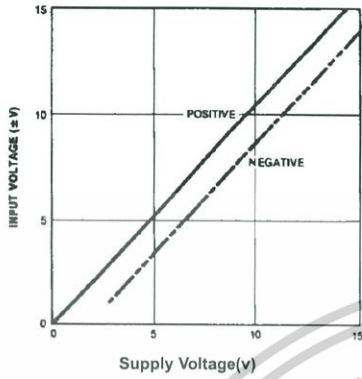


Figure 1. Input Voltage Range vs Supply Voltage

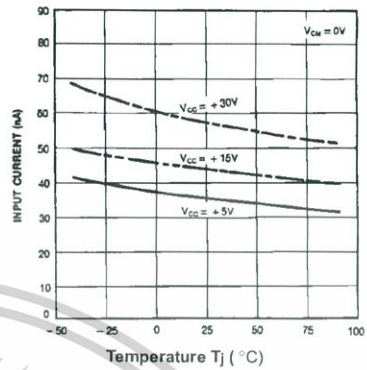


Figure 2. Input Current vs Temperature

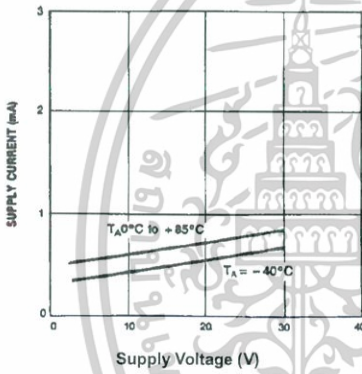


Figure 3. Supply Current vs Supply Voltage

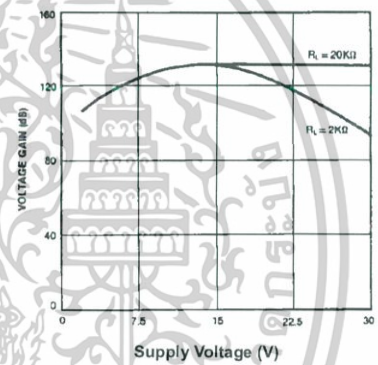


Figure 4. Voltage Gain vs Supply Voltage

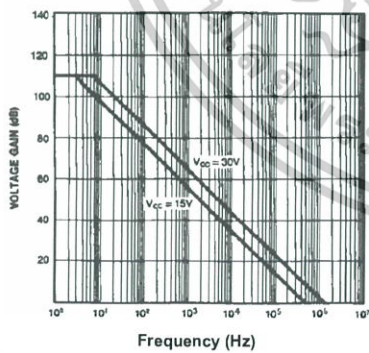


Figure 5. Open Loop Frequency Response

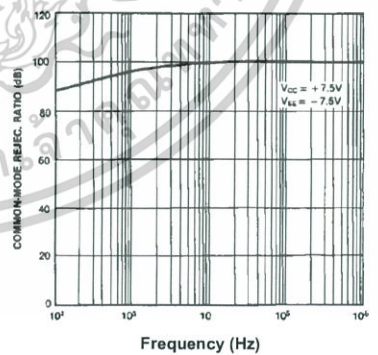


Figure 6. Common mode Rejection Ratio

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการเผยแพร่ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่มีการให้ข้อมูลที่เผยแพร่และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics (Continued)

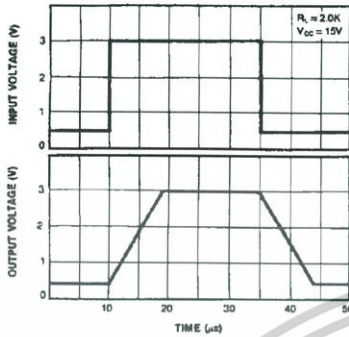


Figure 7. Voltage Follower Pulse Response

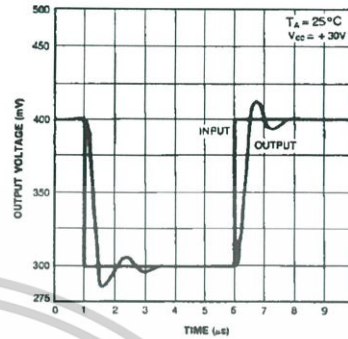


Figure 8. Voltage Follower Pulse Response (Small Signal)

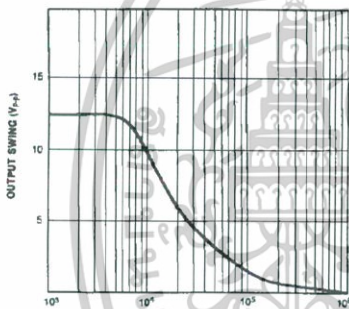


Figure 8. Large Signal Frequency Response

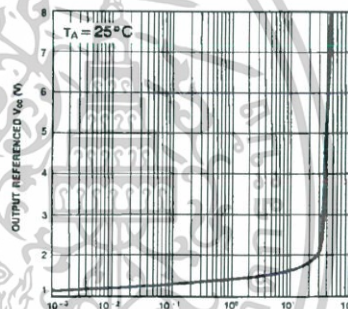


Figure 9. Output Characteristics vs Current Sourcing

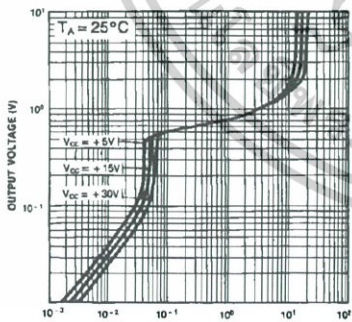


Figure 10. Output Characteristics vs Current Sinking

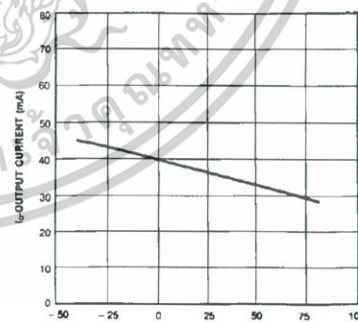


Figure 11. Current Limiting vs Temperature

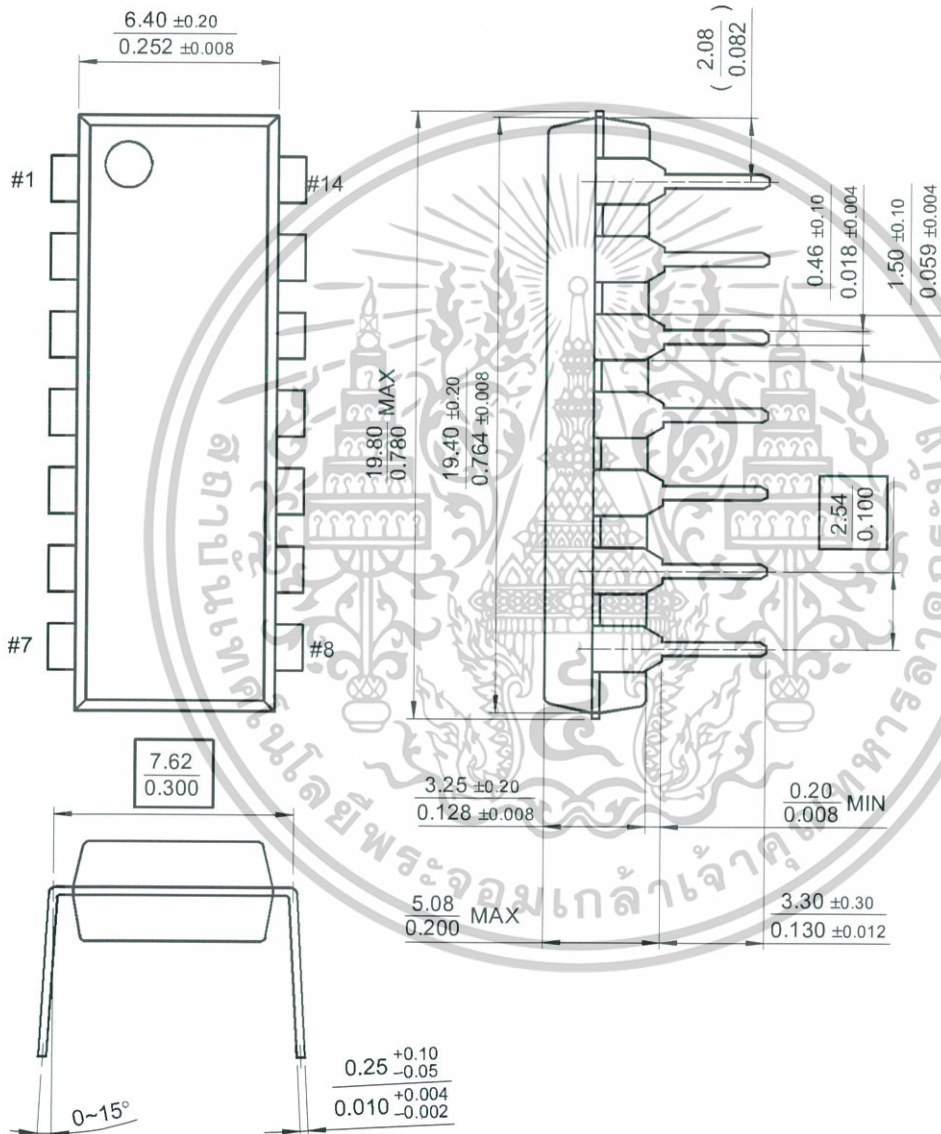
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการเผยแพร่ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่มีการให้ข้อมูลที่แบบละเอียด และที่ยังอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mechanical Dimensions

Package

Dimensions in millimeters

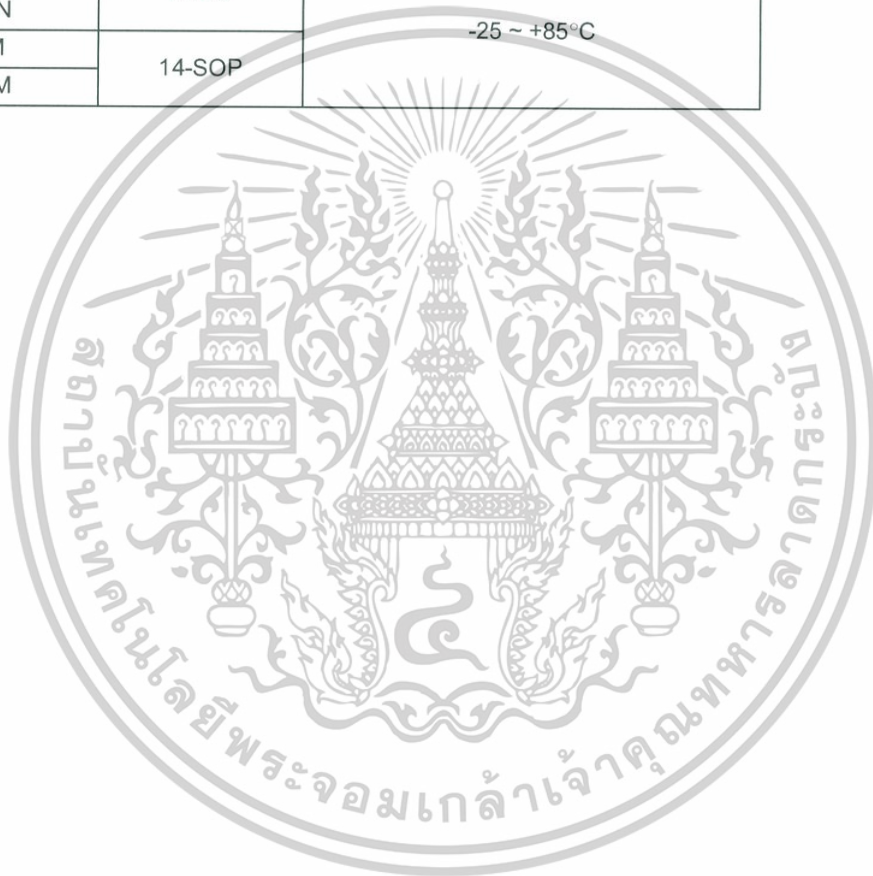
14-DIP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการเผยแพร่ ทั้งสิ้น ยกเว้นให้แต่แบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

Ordering Information

Product Number	Package	Operating Temperature
LM324N	14-DIP	0 ~ +70°C
LM324AN		
LM324M	14-SOP	
LM324AM		
LM2902N	14-DIP	-40 ~ +85°C
LM2902M	14-SOP	
LM224N	14-DIP	-25 ~ +85°C
LM224AN		
LM224M	14-SOP	
LM224AM		



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการเผยแพร่ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
www.fairchildsemi.com

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และที่ยังอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้ง

11/19/02 0.0m 001

Stock#DSxxxxxx

© 2002 Fairchild Semiconductor Corporation

LM331

V-F Converter

Features

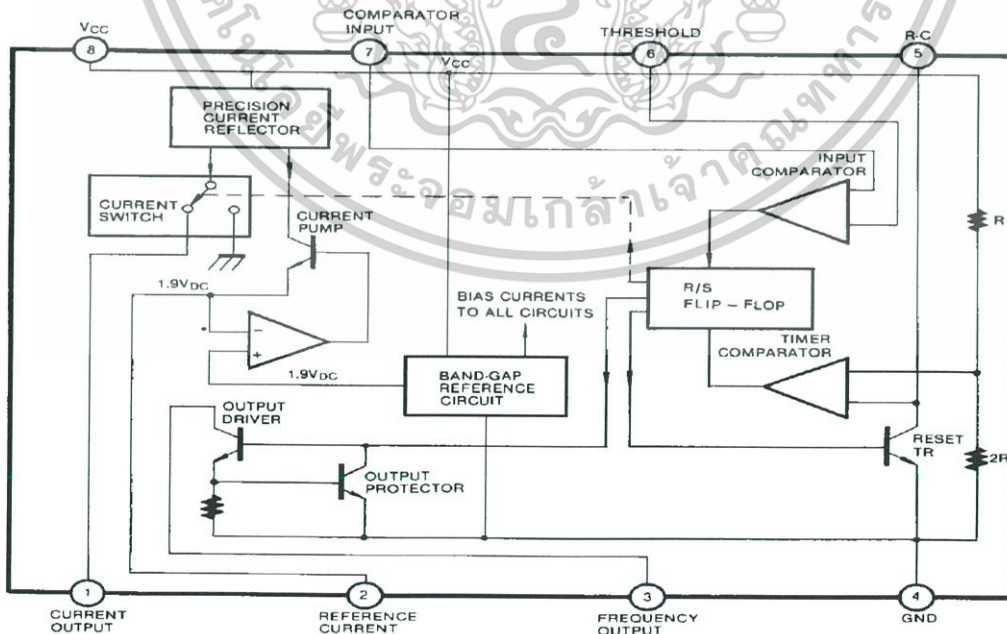
- Guaranteed linearity: 0.01% max.
- Low power dissipation: 15mW at 5V
- Wide range of full scale frequency: 1Hz to 100KHz
- Pulse output compatible with all logic forms
- Wide dynamic range: 100dB min at 10KHz full scale frequency

Description

This voltage to frequency converter provides the output pulse train at a frequency precisely proportional to the applied input voltage. The LM331 can operate at power supplies as low as 4.0V and be changed output frequency from 1Hz to 100KHz. It is ideally suited for use in simple low cost circuit for analog-to digital conversion, long term integration, linear frequency modulation or demodulation, frequency to voltage conversion, and many other functions.



Internal Block Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

Rev. 1.0.0

Absolute Maximum Ratings (TA = 25°C)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	VCC	40	V
Input Voltage	VI	-0.2 ~ + VCC	V
Operating Temperature Range	TOPR	0 ~ +70	°C
Power Dissipation	PD	500	mW

Electrical Characteristics

Parameter	Symbol	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
VFC Non-Linearity	VFCNL	$4.5 \leq V_{CC} \leq 20V$	-	± 0.003	± 0.01	% Full-Scale
Conversion Accuracy Scale Factor	ACCUR	$V_I = -10V, R_S = 14K\Omega$	0.90	1.00	1.10	KHz/V
Change Of Gain With VCC	$V_{CC}\Delta G/V_{CC}$	$4.5V \leq V_{CC} \leq 10V$	-	0.01	0.1	% / V
		$10V \leq V_{CC} \leq 40V$	-	0.006	0.06	
Rated Full - Scale Frequency	f	$V_I = -10V$	10.0	-	-	KHz
INPUT COMPARATOR						
Offset Voltage	V _{IO}	$0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$	-	± 3	± 10	mV
Bias Current	I _{BIAS}	-	-	-80	-300	nA
Offset Current	I _{IO}	-	-	± 8	± 100	nA
Common-Mode Range	V _{CM}	$0^\circ C \leq T_A \leq +70^\circ C$	-0.2	-	$V_{CC} - 2.0$	V
TIMER (PIN 5)						
Timer Threshold Voltage	V _{TH}	-	0.63	0.667	0.701	$\times V_{CC}$
Input Bias Current	I _{BIAS}	$V_{CC} = 15V, 0V \leq V_5 \leq 9.9V$	-	± 10	± 100	nA
		$V_5 = 10V$	-	200	1000	nA
Saturation Voltage	V _{SAT}	$I = 5mA$	-	0.22	0.5	V
CURRENT SOURCE (PIN 1)						
Output Current	I _O	$R_S = 14K\Omega, V_1 = 0V$	116	136	156	μA
Change with Voltage	$\Delta I_O / \Delta V_1$	$0V \leq V_1 \leq 10V$	-	0.2	1.0	μA
Current Source Off Leakage	I _{LKG}	-	-	0.02	10.0	nA
REFERENCE VOLTAGE (PIN 2)						
Reference Voltage	V _{REF}	-	1.70	1.89	2.08	V _{DC}
Stability vs Temperature	ST _T	-	-	± 60	-	ppm/°C
Stability vs Time, 1000Hours	ST _T	-	-	± 0.1	-	%
LOGIC OUTPUT (Pin 3)						
Saturation Voltage	V _{SAT}	$I = 5mA$	-	0.15	0.50	V
		$I = 3.2mA$	-	0.10	0.40	
Off Leakage	I _{LKG}	-	-	± 0.05	1.0	μA
SUPPLY CURRENT						
Supply Current	I _{CC}	$V_{CC} = 5V$	1.5	3.0	6.0	mA
		$V_{CC} = 40V$	2.0	4.0	8.0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

2 ไม่มีการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องขังงอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

Typical Applications

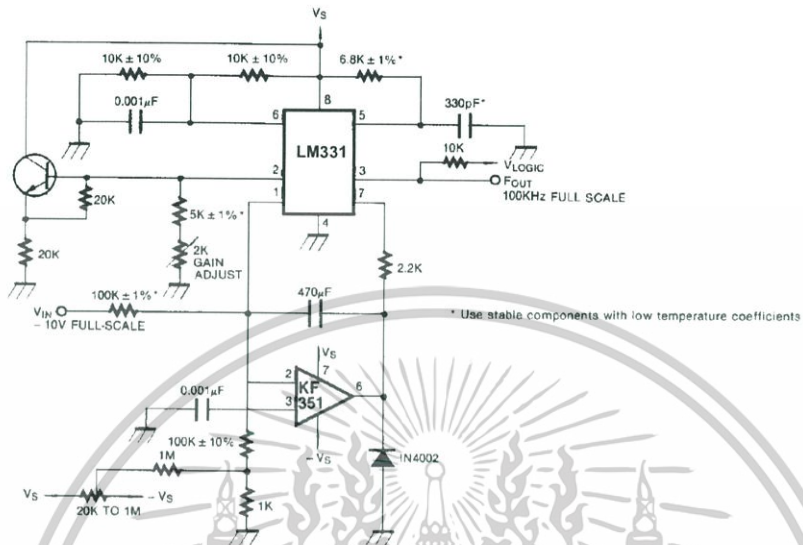


Figure 1. Precision Voltage-to-Frequency Converter, 100KHz Full-Scale

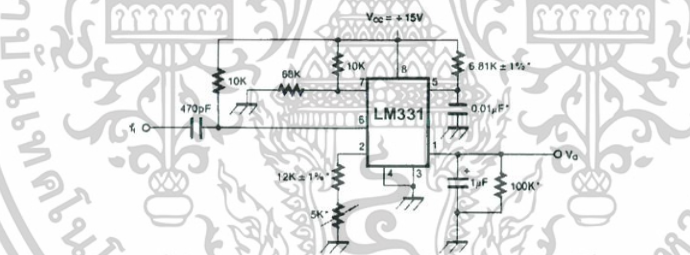


Figure 2. Simple Frequency-to-Voltage Converter, 10KHz Full-Scale

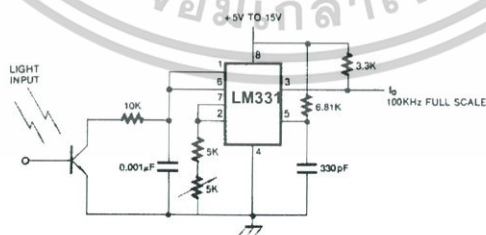


Figure 3. Light Intensity to Frequency Converter

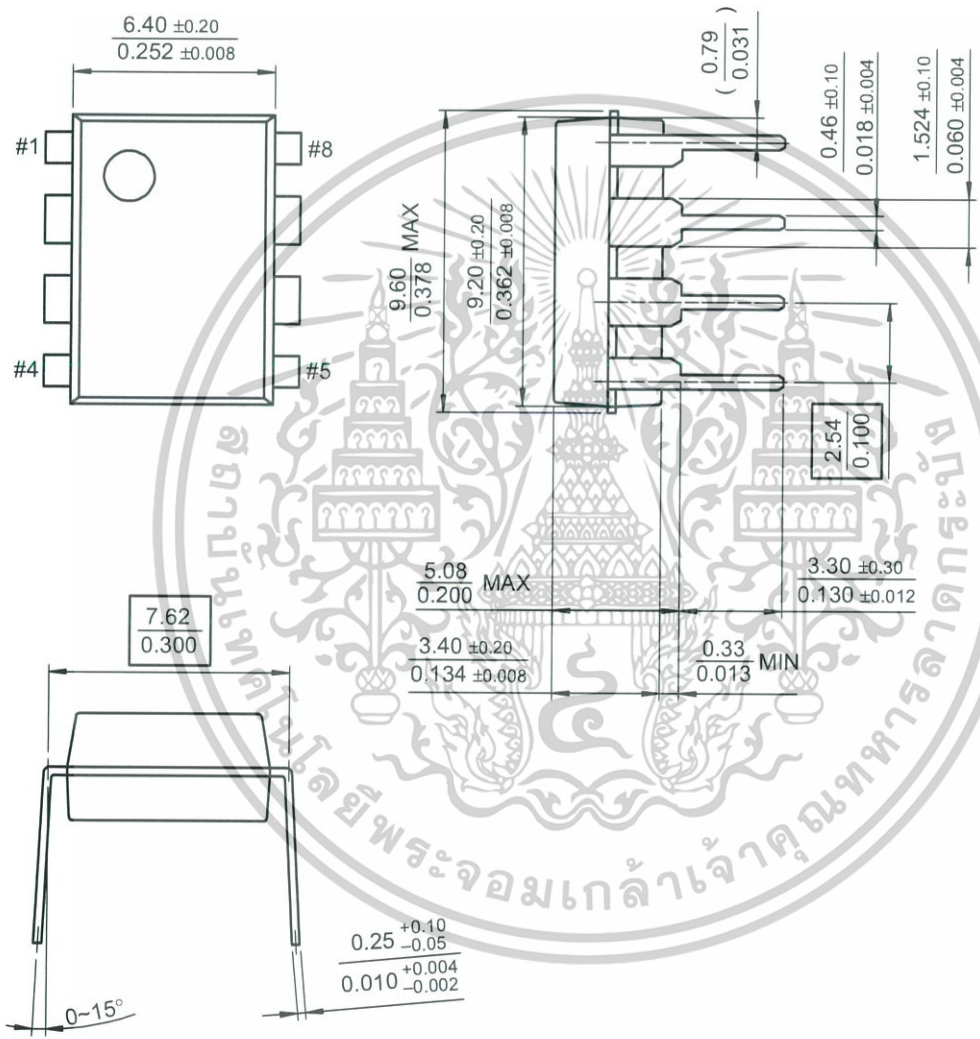
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการฉีดยุ่ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องขังังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Mechanical Dimensions

Package

Dimensions in millimeters

8-DIP



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่ใช้

Ordering Information

Product Number	Package	Operating Temperature
LM331N	8-DIP	0 ~ + 70°C



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่มีการแก้ไข | ทั้งสิ้น ยกทั้งที่ให้มีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีนี้นำไปใช้



DISCLAIMER

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR RESERVES THE RIGHT TO MAKE CHANGES WITHOUT FURTHER NOTICE TO ANY PRODUCTS HEREIN TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN. FAIRCHILD DOES NOT ASSUME ANY LIABILITY ARISING OUT OF THE APPLICATION OR USE OF ANY PRODUCT OR CIRCUIT DESCRIBED HEREIN; NEITHER DOES IT CONVEY ANY LICENSE UNDER ITS PATENT RIGHTS, NOR THE RIGHTS OF OTHERS.

LIFE SUPPORT POLICY

FAIRCHILD'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT OF FAIRCHILD SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and (c) whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury of the user.
2. A critical component in any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

www.fairchildsemi.com

ไม่มีการเผยแพร่ ทั้งสิ้น ยกเว้นที่ อนุมัติให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีโอกาสนำไปใช้

5/22/01 0.0m 001

Stock#DSxxxxxxx

© 2001 Fairchild Semiconductor Corporation

Voltage comparator

LM111/211/311/ LM311B

DESCRIPTION

The LM111 series are voltage comparators that have input currents approximately a hundred times lower than devices like the μ A710. They are designed to operate over a wider range of supply voltages; from standard ± 15 V op amp supplies down to a single 3V supply. Their output is compatible with RTL, DTL, and TTL as well as MOS circuits. Further, they can drive lamps or relays, switching voltages up to 50V at currents as high as 50mA.

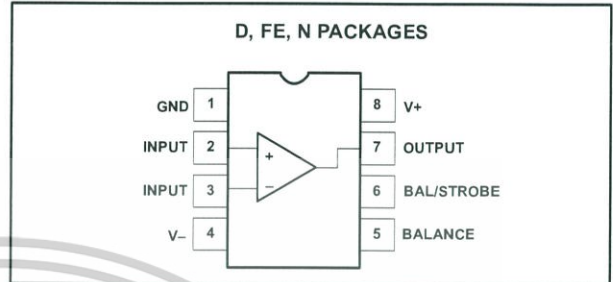
Both the inputs and the outputs of the LM111 series can be isolated from system ground, and the output can drive loads referred to ground, the positive supply, or the negative supply. Offset balancing and strobe capability are provided and outputs can be wire-ORed.

Although slower than the μ A710 (200ns response time vs 40ns), the devices are also much less prone to spurious oscillations. The LM111 series has the same pin configuration as the μ A710 series.

FEATURES

- Operates from single 3V supply (LM311B)
- Maximum input bias current: 150nA (LM311—250nA)
- Maximum offset current: 20nA (LM311—50nA)
- Differential input voltage range: ± 30 V
- Power consumption: 135mW at ± 15 V
- High sensitivity—200V/mV
- Zero crossing detector

PIN CONFIGURATION



APPLICATIONS

- Precision squarer
- Positive/negative peak detector
- Low voltage adjustable reference supply
- Switching power amplifier

ORDERING INFORMATION

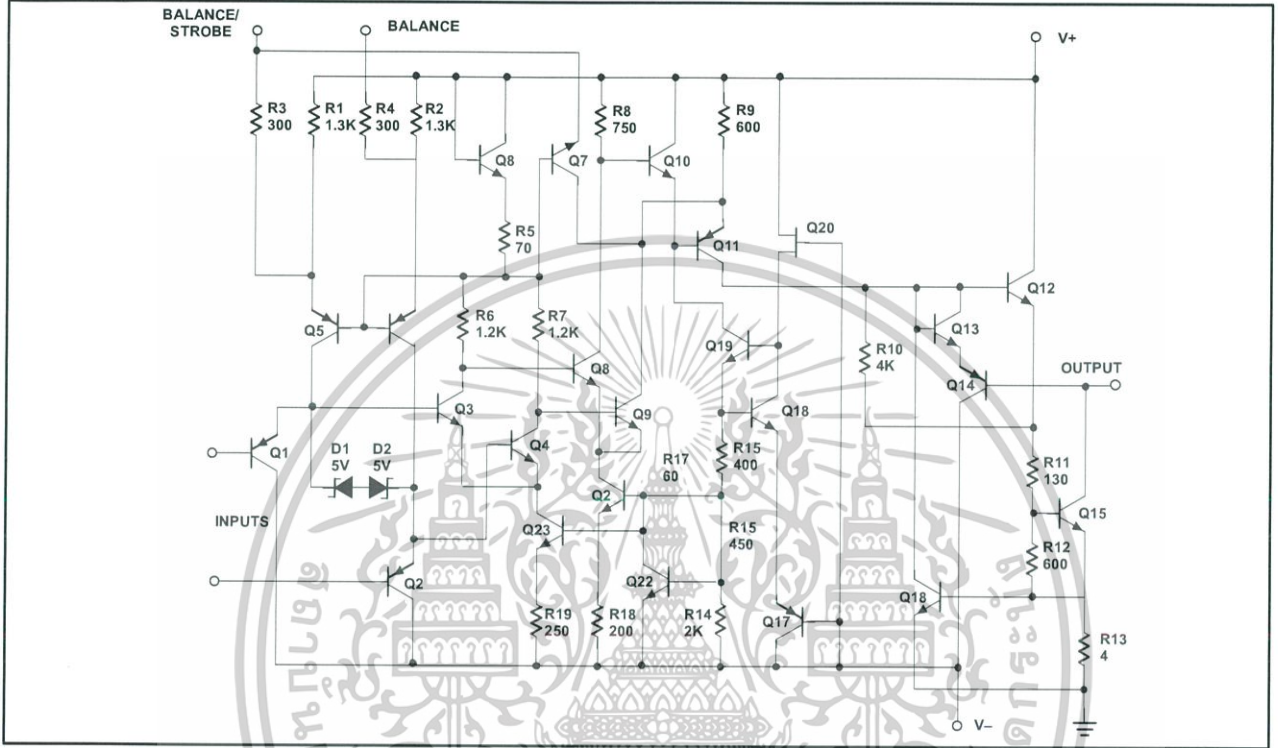
DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	LM111N	0404B
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-25°C to +85°C	LM211N	0404B
8-Pin Plastic Small Outline Package (SO)	0 to +70°C	LM311D	0174C
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to +70°C	LM311N	0404B
8-Pin Plastic Small Outline Package (SO)	-25°C to +85°C	LM211D	0174C
8-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	LM111FE	0580A
8-Pin Plastic Small Outline Package (SO)	0 to +70°C	LM311BD	0174C
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to +70°C	LM311BN	0404B

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage comparator

LM111/211/311/
LM311B

EQUIVALENT SCHEMATIC



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SYMBOL	PARAMETER	RATING	UNIT
V _S	Total supply voltage	36	V
	Output to negative supply voltage:		
	LM111/LM211	50	V
	LM311/LM311B	40	V
	Ground to negative supply voltage	30	V
	Differential input voltage	±30	V
V _{IN}	Input voltage ¹	±15	V
P _D MAX	Maximum power dissipation, T _A =25°C (still-air) ²		
	F package	810	mW
	N package	1190	mW
	D package	780	mW
I	Output short-circuit duration	10	sec
T _A	Operating ambient temperature range		
	LM111	-55 to +125	°C
	LM211	-25 to +85	°C
	LM311/LM311B	0 to +70	°C
T _{STG}	Storage temperature range	-65 to +150	°C
T _{SOLD}	Lead soldering temperature (10sec max)	300	°C

NOTES:

1. This rating applies for ±15V supplies. The positive input voltage limit is 30V above the negative supply. The negative input voltage limit is equal to the negative supply voltage or 30V below the positive supply, whichever is less.
2. Derate above 25°C, at the following rates: F package at 6.4mW/°C; N package at 9.5mW/°C; D package at 6.2mW/°C

Voltage comparator

LM111/211/311/
LM311BDC ELECTRICAL CHARACTERISTICS^{1, 2, 3, 6}

Over temperature range unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	LM111/LM211			LM311			LM311B			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _{OS}	Input offset voltage ³	T _A =25°C, R _S ≤50kΩ		0.7	3.0		2.0	7.5		2.0	7.5	mV
I _{OS}	Input offset current ³	T _A =25°C		4.0	10		6.0	50		6	25	nA
I _{BIAS}	Input bias current	T _A =25°C		60	100		100	250		100	200	nA
A _V	Voltage gain	T _A =25°C		200			200			200		V/mV
	Response time ⁴	T _A =25°C		200			200			500		ns
V _{SAT}	Saturation voltage	LM111/211 V _{IN} ≤-5mV, I _{OUT} =50mA LM311/B V _{IN} ≤-10mV, I _{OUT} =50mA T _A =25°C		0.75	1.5		0.75	1.5		0.75	1.5	V
I _{BAL/STR}	Strobe on current	T _A =25°C		3.0			3.0			3.0		mA
I _{LEAKAGE}	Output leakage current ⁶	LM111/211 V _{IN} ≥5mV, V _{OUT} =35V LM311/B V _{IN} ≥10mV, V _{OUT} =35V T _A =25°C, I _{STROBE} =3mA (V ₋ = V _{GND} = -5V)		0.2	10		0.2	50		0.2	50	nA
V _{OS}	Input offset voltage ³	R _S ≤50kΩ			4.0			10			10	mV
I _{OS}	Input offset current ³				20			70			50	nA
I _{BIAS}	Input bias current				150			300			250	nA
V _{IN}	Input voltage range	V=±15V (Pin 7 may go to 5V)	-14.5	13.8 to -14.7	13.0	-14.5	13.8 to -14.7	13.0	V=±0.5		V+ -1.5	V
V _{OL}	Saturation voltage ⁶	V ₊ ≥ 4.5V, V ₋ = 0 LM111/211 V _{IN} ≤-6mV, I _{SINK} ≤8mA LM311/B V _{IN} ≤-10mV, I _{SINK} ≤8mA		0.23	0.4		0.23	0.4		0.23	0.4	V
I _{OH}	Output leakage current	V _{IN} ≥5mV, V _{OUT} =35V		0.1	0.5							μA
I _{CC}	Positive supply current	T _A =25°C		5.1	6.0		5.1	7.5		1.6	3.5	mA
I _{EE}	Negative supply current	T _A =25°C		4.1	5.0		4.1	5.0				mA

NOTES:

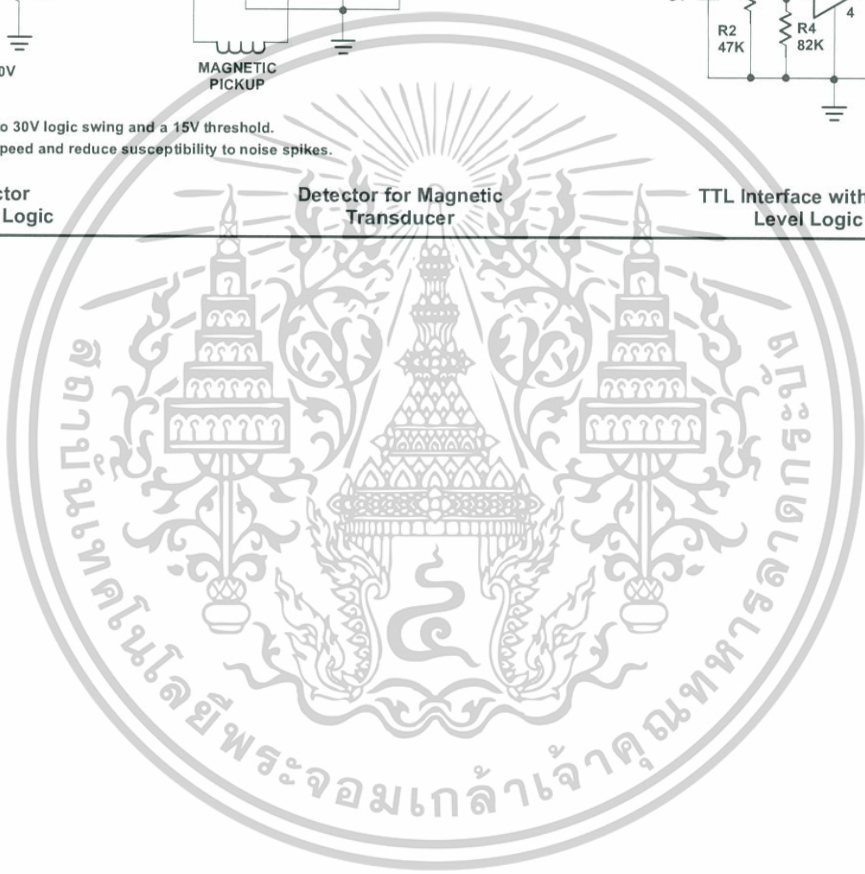
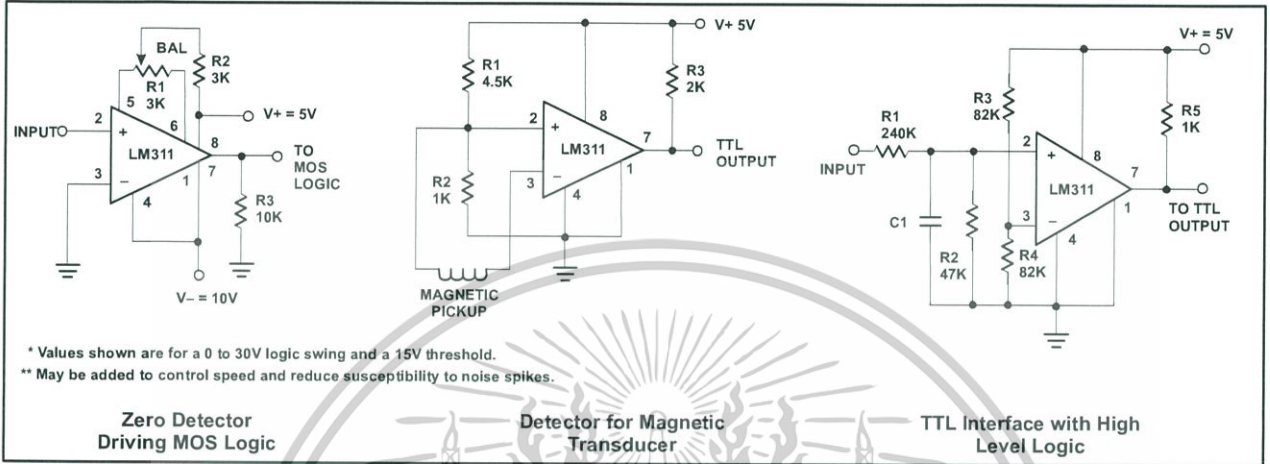
1. This rating applies for ±15V supplies. The positive input voltage limit is 30V above the negative supply. The negative input voltage limit is equal to the negative supply voltage or 30V below the positive supply, whichever is less.
2. These specifications apply for V_S=±15V and 0°C < T_A < 70°C unless otherwise specified. With the LM211, however, all temperature specifications are limited to -25°C ≤ T_A ≤ 85°C and for the LM111 is limited to -55°C T_A < 125°C. The offset voltage, offset current, and bias current specifications apply for any supply voltage from a single 5V supply up to ±15V supplies.
3. The offset voltages and offset currents given are the maximum values required to drive the output within a volt of either supply with 1mA load. Thus, these parameters define an error band and take into account the worst case effects of voltage gain and input impedance.
4. The response time specified is for a 100mV input step with 5mV over-drive.
5. Do not short the strobe pin to ground; it should be current driven at 3mA to 5mA.
6. LM311B, all parameters are at V₊ = 3V ±10%, V₋ = GND = 0V.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Voltage comparator

LM111/211/311/
LM311B

TYPICAL APPLICATIONS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้