



รายงานการวิจัย

การศึกษาการวัดการสั่นสะเทือนเชิงกลโดยใช้ตัวรับรู้แบบระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค

**A study of mechanical vibration measurement
using microelectromechanical system (MEMS)**

ผู้วิจัย

นายสิริพงศ์ เอี่ยมชัยมงคล

โครงการวิจัยทุนสนับสนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

งบประมาณปี พ.ศ. 2554

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพที่ได้ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยด้วยเงินงบประมาณแผ่นดินปี พ.ศ. 2554



บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์เอาตัววัดความเร่งแบบระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Microelectromechanical system, MEMS) ในการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล ผลการวิจัยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การวัดความเร่งสถิต และการวัดความเร่งพลวัต ผลการวิจัยในส่วนของการวัดความเร่งสถิตพบว่าตัววัดความเร่ง (MEMS) สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดการเอียงได้ สำหรับผลการวิจัยในส่วนที่เป็นความเร่งพลวัตโดยใช้การสั่นสะเทือนที่ความถี่ 6 Hz และ 11 Hz ในช่วงความเร่ง 0 – 2 g พบว่าสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร่ง นอกจากนี้ยังพบว่าสัญญาณจากตัววัดความเร่ง (MEMS) มีสัญญาณรบกวนน้อยและเหมาะสำหรับการวัดการสั่นสะเทือนที่มีความเร่งไม่มาก

คำสำคัญ : MEMS, vibration measurement, MEMS accelerometer



Abstract

This research studies the application of MEMS (Microelectromechanical system) accelerometer to measure the acceleration. The experimentation can be divided into two parts: static acceleration and dynamic acceleration. In the case of static acceleration, the result shows that the accelerometer is suitable to sense the tilt angle. In the dynamic acceleration, the relationship between the output voltage and the acceleration in the range of 0-2g at the frequency of 6 Hz and 11 Hz are investigated. The results show that the output voltage is proportional to the acceleration. The signal is clear (low level of noise). Also, it is suitable for measuring at low level of dynamic acceleration.

Keywords : MEMS, vibration measurement, MEMS accelerometer



สารบัญ

กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	หน้า
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	4
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.2 ทฤษฎี	6
2.3 ตัวรับรู้ความเร่ง(MEMS) Analog device ADXL 335	8
บทที่ 3 การออกแบบการวิจัย	
3.1 การออกแบบวงจรไฟเลี้ยงสำหรับตัววัดความเร่ง (MEMS)	10
3.2 การทดลองหาความเร่งแบบสถิต	11
3.2.1 ชุดทดลองสำหรับการวัดความเร่งแบบสถิต	11
3.2.2 ขั้นตอนการวัดความเร่งแบบสถิต	13

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 ผลการทดลองการวัดความเร่งแบบสถิต	14
3.2.4 การคำนวณหาค่าความไว (sensitivity) ในแต่ละแกน ของตัววัดความเร่ง(MEMS)	20 20
3.2.5 การหาเมตริกซ์ตัวประกอบสเกล (scale factor matrix)	21
3.3 การทดลองหาความเร่งพลวัต (dynamic acceleration)	40
3.3.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจ	41
3.3.2 การเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS) กับสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric)	55
3.3.3การทดลองใช้ตัววัดความเร่ง (MEMS) กับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล	56
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 วิเคราะห์ผลการทดลองการวัดความเร่งแบบสถิต	61
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการวัดความเร่งพลวัต	63
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการวิจัยการวัดความเร่งแบบสถิต	67
5.2 สรุปผลการวิจัยการวัดความเร่งพลวัต	67
5.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของตัววัดความเร่ง (MEMS) กับตัววัดความเร่ง แบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric)	67
5.4 งานวิจัยในขั้นตอนต่อไป	69
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 คุณสมบัติของตัววัดความเร่ง ADXL 335	8
ตาราง 2.2 การกำหนดความเร่งในแต่ละแนวแกน	9
ตาราง 3.1 โวลต์เตจที่ได้จากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่งเมื่อหมุนรอบแกน x บนระนาบ yz	14
ตาราง 3.2 โวลต์เตจที่ได้จากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่งเมื่อหมุนรอบแกน y บนระนาบ xz	16
ตาราง 3.3 โวลต์เตจที่ได้จากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่งเมื่อหมุนรอบแกน z บนระนาบ yx	18
ตาราง 3.4 โวลต์เตจที่ตำแหน่งแกน x , y และ z ซี่ขึ้นและซี่ลงในแนวดิ่ง	19
ตาราง 3.5 ความเร่งในแนวแกน y ที่ได้จากการคำนวณ (least square regression) เปรียบเทียบ กับความเร่งในแนวแกน y ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	28
ตาราง 3.6 ความเร่งในแนวแกน z ที่ได้จากการคำนวณ (least square regression) เปรียบเทียบ กับความเร่งในแนวแกน z ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	30
ตาราง 3.7 ความเร่งในแนวแกน z ที่ได้จากการคำนวณ (least square regression) เปรียบเทียบ กับความเร่งในแนวแกน z ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน y ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	32
ตาราง 3.8 ความเร่งในแนวแกน x ที่ได้จากการคำนวณ (least square regression) เปรียบเทียบ กับความเร่งในแนวแกน x ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน y ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	34
ตาราง 3.9 ความเร่งในแนวแกน x ที่ได้จากการคำนวณ (least square regression) เปรียบเทียบ กับความเร่งในแนวแกน x ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน z ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	36
ตาราง 3.10 ความเร่งในแนวแกน y ที่ได้จากการคำนวณ (least square regression) เปรียบเทียบ กับความเร่งในแนวแกน x ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน y ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	38
ตาราง 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน x ที่ ความถี่ 6 Hz	43
ตาราง 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน y ที่ ความถี่ 6 Hz	45
ตาราง 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน z ที่ ความถี่ 6 Hz	47
ตาราง 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน x ที่ ความถี่ 11 Hz	49
ตาราง 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน y ที่ ความถี่ 11 Hz	51
ตาราง 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน z ที่ ความถี่ 11 Hz	53
ตาราง 4.1 สัญญาณจากตัววัดความเร่งทั้งสามชนิดที่สภาวะต่าง ๆ	65

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 1.1 ตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก : Bruel & Kjar	2
รูป 1.2 เครื่องขยายประจุ Kistler	2
รูป 1.3 เครื่องวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบพกพา SKF CMVL 3850	3
รูป 2.1 ส่วนประกอบของตัววัดความเร่ง (MEMS)	7
รูป 3.1 แผนภาพวงจรไฟเลี้ยง	10
รูป 3.2 การตั้งแกนของตัววัดความเร่ง	11
รูป 3.3 แท่นปรับมุมที่สามารถปรับความเอียงได้	11
รูป 3.4 ตัววัดความเร่ง (MEMS) รุ่น ADXL 335 พร้อมติดแม่เหล็ก	12
รูป 3.5 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke 287	12
รูป 3.6 แท่นปรับมุม	13
รูป 3.7 โวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อหมุนรอบแกน x	15
รูป 3.8 โวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อหมุนรอบแกน y	17
รูป 3.9 โวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อหมุนรอบแกน z	19
รูป 3.10 การหมุนรอบแกน x เป็นมุม θ	26
รูป 3.11 การหมุนรอบแกน y เป็นมุม θ	27
รูป 3.12 การหมุนรอบแกน z เป็นมุม θ	27
รูป 3.13 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน y ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี	29
รูป 3.14 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน z ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี	31
รูป 3.15 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน z ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี	33
รูป 3.16 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน x ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี	35
รูป 3.17 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน x ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี	37
รูป 3.18 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน y ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี	39
รูป 3.19. ก แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลอง ข การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	40
รูป 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน x ที่ความถี่ 6 Hz	44
รูป 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน y ที่ความถี่ 6 Hz	46

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูป 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน z ที่ความถี่ 6 Hz	48
รูป 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน x ที่ความถี่ 11 Hz	50
รูป 3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน y ที่ความถี่ 11 Hz	52
รูป 3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน z ที่ความถี่ 11 Hz	54
รูป 3.26 การติดตั้งตัววัดความเร่งกับคานแบบคานทิลเวอร์	55
รูป 3.27 สัญญาณจากตัววัดความเร่งเมื่อเกิดการสั่นแบบอิสระ	55
รูป 3.28 การติดตั้งตัววัดความเร่งเข้ากับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนไม่สมดุล	56
รูป 3.29 สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อไม่เกิดการสั่นสะเทือน	57
รูป 3.30 สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระ	57
รูป 3.31 สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน	58
รูป 3.32 สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนใกล้ความถี่ธรรมชาติ	58
รูป 3.33 ก สัญญาณความถี่และสเปกตรัมที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS)	59
รูป 3.33 ข สัญญาณความถี่และสเปกตรัมที่ได้จากตัววัดความเร่งจากเครื่องวัดการสั่นสะเทือน	60
รูป 5.1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการพัฒนางานวิจัย	69



บทที่ 1

บทนำ

(Introduction)

ปัจจุบันในโรงงานอุตสาหกรรมหรือในภาคการผลิตต่าง ๆ นั้นเครื่องจักรกลล้วนแล้วแต่มีส่วนเกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตแทบทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มอุตสาหกรรมหนัก เช่นโรงจักรผลิตกำลังไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ล้วนแล้วแต่ต้องใช้เครื่องจักรกลเป็นจำนวนมากในกระบวนการผลิต ตัวอย่างของเครื่องจักรกลเหล่านี้ได้แก่ ปั๊ม (pump) คอมเพรสเซอร์ (compressor) เครื่องปั่นไฟฟ้า (generator) เป็นต้น และเนื่องจากเครื่องจักรกลเหล่านี้มีลักษณะการทำงานแบบเป็นรอบจึงทำให้เกิดการสั่นสะเทือนเกิดขึ้นเสมอ การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นนั้นอาจมีสาเหตุจากการไม่สมดุลของเครื่องจักร (unbalance of rotating machine) การเยื้องศูนย์ของเพลลา (misalignment) การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นถือว่าเป็นเรื่องปกติหากระดับการสั่นสะเทือนอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ ในทางกลับกันหากมีระดับการสั่นสะเทือนมากหรือสัญญาณการสั่นสะเทือนผิดปกตินั้นอาจหมายถึงเกิดการสึกหรอขึ้นในเครื่องจักรกล เช่นการสึกหรอของแบริ่ง (bearing) เมื่อเครื่องจักรใช้งานเป็นเวลานานเป็นต้น หรืออาจกล่าวได้ว่าการตรวจวัดการสั่นสะเทือนและการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนสามารถบ่งบอกสภาพการใช้งานของเครื่องจักรได้เช่นกัน ดังนั้นการตรวจวัดการสั่นสะเทือนจึงเป็นส่วนหนึ่งในการบำรุงรักษา (maintenance) เครื่องจักรภายในโรงงานอุตสาหกรรม

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในการบำรุงรักษาเครื่องจักรกล การเฝ้าเตือนการสั่นสะเทือน (vibration monitoring) นับว่าเป็นเรื่องที่มีความสำคัญมาก เครื่องมือที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนคือตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric accelerometer) ซึ่งมีหลายช่วงการวัด ทั้งการวัดแบบแกนเดียว (single axis) หรือสามแกน (triaxial accelerometer) ดังแสดงในรูป 1.1 ตัววัดความเร่งที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมสามารถวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนได้เป็นอย่างดีและสามารถนำสัญญาณที่ได้มาทำการวิเคราะห์เพื่อบ่งบอกสภาพการใช้งานของเครื่องจักรกลได้อีกด้วย



รูป 1.1 ตัววัดความแรงแบบไพโซอิเล็กทริก : Bruel & Kjaer

อย่างไรก็ตามตัววัดความแรงแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) นั้นมีราคาสูงอีกทั้งตัววัดความแรงเป็นเพียงตัวรับรู้ (sensor) ยังไม่สามารถแสดงผลของความแรงได้เองจำเป็นต้องมีส่วนประกอบอื่นอีกเช่น ส่วนของเครื่องขยายประจุ (charge amplifier) ดังแสดงในรูป 1.2 ส่วนการได้ข้อมูล (data acquisition) และส่วนการประมวลผลสัญญาณ (signal processing) นอกจากนี้ยังต้องใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนอีกด้วย อุปกรณ์ต่างๆ เหล่านี้ค่อนข้างมีความเฉพาะเจาะจงต้องสั่งซื้อจากบริษัทผู้ผลิตโดยตรงทำให้มีค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์วัดและวิเคราะห์สัญญาณการสั่นสะเทือนสูง



รูป 1.2 เครื่องขยายประจุ : Kistler

เครื่องมือที่นิยมใช้ในการตรวจวัดการสั่นสะเทือนในโรงงานอุตสาหกรรมคือเครื่องวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบพกพา (hand held) ซึ่งเป็นการนำเอาส่วนที่เป็นตัววัดความเร่ง ส่วนขยายประจุ ส่วนการได้ข้อมูล และส่วนการประมวลผลสัญญาณเข้าไว้ด้วยกัน เครื่องวัดการสั่นสะเทือนแบบพกพา



รูป 1.3 เครื่องวิเคราะห์การสั่นสะเทือนแบบพกพา SKF CMVL 3850

มีอยู่หลายชนิดด้วยกันขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำงานของเครื่องเช่นหากต้องการวัดเฉพาะระดับการสั่นสะเทือนโดยรวม (overall) สามารถใช้เครื่องวัดการสั่นสะเทือน (vibration meter) ซึ่งจะวัดได้เฉพาะขนาดของการสั่นสะเทือน แต่หากต้องการวิเคราะห์ความบกพร่องของเครื่องจักรกลจะต้องใช้เครื่องวิเคราะห์การสั่นสะเทือน (vibration analyzer) ดังแสดงในรูป 1.3 ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลการสั่นสะเทือนและวิเคราะห์สัญญาณทั้งในรูปแบบโดเมนเวลา (time domain) และโดเมนความถี่ (frequency domain) การวิเคราะห์ความถี่ของการสั่นสะเทือนในโดเมนความถี่นี้เองมีความสำคัญอย่างยิ่งในการบ่งบอกข้อบกพร่องตลอดจนสภาพการใช้งานของเครื่องจักรกลได้เป็นอย่างดี ในการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่นั้นต้องใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier transform) หรือ เอฟเอฟที เพื่อหาสเปกตรัม (spectrum) ความถี่ของการสั่นสะเทือนสเปกตรัมความถี่นี้เองสามารถใช้ในการวิเคราะห์ข้อบกพร่องตลอดจนสภาพการใช้งานของเครื่องจักรกลได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าวิธีการวัดการสั่นสะเทือนโดยใช้ตัววัดความเร่งสามารถใช้ตรวจวัดการทำงานของเครื่องจักรได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนาโนเทคโนโลยีเข้ามามีบทบาทและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้มีการพัฒนาตัวรับรู้ (sensor) แบบใหม่ ๆ ขึ้นรวมถึงตัววัดความเร่งด้วยเช่นกัน ตัววัดความเร่งที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยนาโนเทคโนโลยีนี้เรียกว่าตัววัดความเร่งแบบระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Microelectromechanical system) หรือ MEMS มีข้อดีคือมีขนาดเล็ก น้ำหนักน้อยมากทำให้มวลไม่มีผลต่อระบบที่ต้องการวัด นอกจากนี้ยังสามารถประมวลผลสัญญาณได้ง่ายโดยใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ขั้นพื้นฐาน ซึ่งในปัจจุบันตัววัดความเร่งแบบ MEMS นี้ถูกนำมา

ประยุกต์ใช้กับงานตรวจจับความเร่งเช่น เป็นตัวตรวจจับการทำงานของถุงลมนิรภัย (air bag) ในรถยนต์ หรือใช้ในการควบคุมการทำงานของแขนกลอุตสาหกรรม ควบคุมการทำงานของฮาร์ดดิสก์ในคอมพิวเตอร์แบบพกพา เป็นต้น นอกจากนี้ข้อดีประการสำคัญของการใช้ตัวรับรู้ดังกล่าวคือมีราคาถูกกว่ามากเมื่อเทียบกับตัวรับรู้แบบอื่น และด้วยเหตุผลนี้เองในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะนำเอาตัววัดความเร่งแบบ MEMS มาประยุกต์ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของตัวรับรู้แบบ MEMS บูรณาการเข้ากับการประมวลผลสัญญาณขั้นพื้นฐาน และเปรียบเทียบผลที่ได้กับการวัดด้วยตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ MEMS ในการวัดความเร่งแบบสถิตเช่นการวัดแรงโน้มถ่วง (gravitation) และความเร่งพลวัต (dynamic acceleration) อันได้แก่การวัดการสั่นสะเทือน
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธีดังกล่าวกับอุปกรณ์วัดความเร่งที่ใช้ในอุตสาหกรรม
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์และพัฒนาวิธีการวัดดังกล่าวในการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการวัดความเร่งแบบสถิตโดยใช้ตัววัดความเร่ง (MEMS)
- 1.3.2 ออกแบบและสร้างชุดกำเนิดการสั่นสะเทือนที่สามารถสร้างการสั่นสะเทือนที่มีความถี่ต่าง ๆ ได้
- 1.3.3 ออกแบบและสร้างชุดวงจรประมวลผลสัญญาณ
- 1.3.4 ศึกษาทดลองการประยุกต์ใช้ MEMS ในการวัดการสั่นสะเทือนและเปรียบเทียบกับการวัดโดยใช้ตัววัดความเร่ง
- 1.3.5 สรุปผลการศึกษาที่ได้เพื่อหาแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้รายงานการวิจัยขั้นพื้นฐานเพื่อเผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับชาติซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของดัชนีบ่งชี้ความสำเร็จขององค์กร
- 1.4.2 ได้เครื่องมือวัดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการบูรณาการของวิศวกรรมสาขาต่าง ๆ ได้แก่ วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ซึ่งจะเป็นพื้นฐานต่อไปในการสร้างและพัฒนาเครื่องมือวัดที่ใช้ได้จริงและมีราคาถูกลง เป็นการพึ่งพาตนเอง และลดต้นทุนในการผลิต ตลอดจนเป็นการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันของอุตสาหกรรมของประเทศ
- 1.4.3 สามารถประยุกต์เพื่อเป็นชุดทดลองให้กับนักศึกษาไว้ใช้ในการเรียนรู้ถึงวิธีการวัดการสั่นสะเทือนตลอดจนข้อดีข้อเสียของตัวรับรู้แบบต่าง ๆ



บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (literature review) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การออกแบบการทดลอง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องในประเทศไทยมีการศึกษาบ้างเช่นงานวิจัยเรื่องการทดสอบและพัฒนาการออกแบบอุปกรณ์วัดความเร่งสำหรับการออกแบบทางเทคโนโลยีเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาคเอกซัย ดีศิริ [1.] ซึ่งศึกษาการประกอบตัววัดความเร่งแบบ MEMS เข้ากับแผ่นวงจรไฟฟ้า (PCB) เพื่อใช้วัดความเร่งที่เกิดจากการตกกระแทกจากที่สูง (drop test) โดยศึกษาสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อตกกระทบพื้นดินที่ระดับความสูงต่าง ๆ หรือบทความวิชาการต่าง ๆ ของหทัยเทพ วงษ์สุวรรณ [2.] ที่ได้กล่าวถึงการใช้ตัววัดความเร่งชนิดต่าง ๆ ในการวัดความเร่ง สำหรับงานวิจัยในต่างประเทศมีอย่างแพร่หลายอย่างมากเช่นการปรับเทียบ (calibration) ตัววัดความเร่งเพื่อใช้ในการวัดความเอียงเป็นต้น หรืองานวิจัยของ Albarbar *et al.*[3.] ซึ่งเป็นการศึกษาความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ MEMS ในการเฝ้าติดตามสภาพเครื่องจักรกลโดยวิธีการทดลอง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเปรียบเทียบการใช้ MEMS ในการวัดความเร่งกับการคำนวณโดยใช้โปรแกรมชั้นสูงอีกด้วย สำหรับงานวิจัยนี้จะศึกษาการวัดความเร่งเชิงสถิต (static acceleration) เช่นความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง หรือความเร่งพลวัต (dynamic acceleration) เช่นความเร่งที่เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกลเป็นต้น

2.2 ทฤษฎี

ตัวรับรู้แบบระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Microelectromechanical system) หรือ MEMS คือเทคโนโลยีที่ใช้สร้างชิ้นส่วนของเครื่องกลและไฟฟ้าในระดับไมครอน หรือ Microfabrication ดังนั้นขนาดของชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่ประกอบโดยใช้เทคโนโลยี MEMS นี้จึงมีขนาดตั้งแต่น้อยกว่าหนึ่งไมครอนไปจนถึงหลายมิลลิเมตร ในทำนองเดียวกันประเภทของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างจากเทคโนโลยี MEMS นั้นมีตั้งแต่ประกอบด้วยโครงสร้างอย่างง่ายไปจนถึงโครงสร้างที่มีความสลับซับซ้อนเช่นกัน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เทคโนโลยีของ MEMS สามารถนำไปใช้เป็นตัวรับรู้ (sensor) เช่นตัววัดความดัน (pressure sensor) ตัววัดความเร่ง (accelerometer) ไจโรสโคป (gyroscope) เป็นต้น นอกจากนี้ในปัจจุบันเทคโนโลยี MEMS ได้พัฒนาขึ้นโดยการนำเอาเทคโนโลยี MEMS มาใช้ในการสร้างไมโครแอคชูเอเตอร์ (microactuator) หรือ เครื่องจักรกลระดับไมครอน (micromachine) อีกด้วย

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วถึงอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี MEMS นั้นประกอบขึ้นด้วยเทคโนโลยีระดับไมครอน ดังนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยี MEMS จึงมีขนาดเล็ก อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นที่รู้จักกันดีได้แก่ตัววัดความเร่งที่ใช้เทคโนโลยี MEMS ตัววัดความเร่งดังกล่าวมีคุณสมบัติแตกต่างจากตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) คือมีขนาดเล็ก น้ำหนักน้อย และที่สำคัญคือมีราคาถูกมากเมื่อเทียบกับตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ดังนั้นตัววัดความเร่งดังกล่าวจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในอุโมงค์ลมในรถยนต์หรือในชิ้นส่วนของคอมพิวเตอร์ ตลอดจนในโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น

หลักการทำงานของตัววัดความเร่งแบบ MEMS (MEMS Accelerometer)

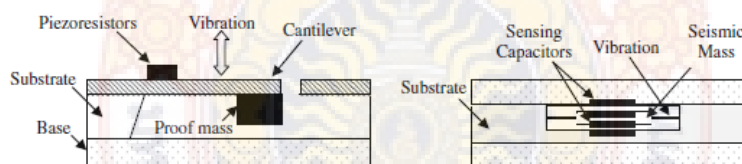
ตัววัดความเร่งแบบ MEMS สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท ดังนี้

1. แบบไพโซรีซิสทีฟ (piezoresistive based accelerometer)

ตัววัดความเร่งแบบนี้ประกอบด้วยมวลติดอยู่บนคานที่มีวัสดุแบบไพโซรีซิสทีฟติดอยู่ดังแสดงในรูป 2.1 ซึ่งสามารถพิจารณาให้เป็นการสั่นสะเทือนแบบที่มีระดับขั้นความเสรีเดียว (single degree of freedom) เมื่อเกิดการสั่นสะเทือนขึ้นมวลที่ติดที่ปลายคานจะเกิดการสั่นสะเทือนและทำให้ไพโซรีซิสทีฟ ปล่อยสัญญาณไฟฟ้าออกมาตามความเร่งที่เกิดขึ้น

2. แบบคาปาซิทีฟ (capacitive based accelerometer)

ตัววัดความเร่งชนิดนี้อาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของค่าความจุ (capacitance) ระหว่างมวล และอิเล็กโทรดตัวนำ (conductive electrode) ซึ่งอยู่ห่างกันในระยะแคบ ดังแสดงในรูป 2.1



รูป 2.1 ส่วนประกอบของตัววัดความเร่ง (MEMS) Albarbar *et al.*[3.]

2.3 ตัวรับรู้ความเร่ง (MEMS) Analog device ADXL 335

ADXL 335 เป็นตัววัดความเร่งแบบสามแกน มีช่วงการวัดอยู่ในช่วง $\pm 3 g$ ภายในประกอบด้วยโพลีซิลิกอน (polysilicon) และวงจรสำหรับปรับปรุงสัญญาณ (signal conditioning) มีเอาต์พุตเป็นแบบอนาล็อก (analog output) แปรผันตรงตามความเร่ง สามารถใช้วัดความโน้มถ่วงเมื่อต้องการวัดความเอียงของวัตถุ และยังสามารถวัดความเร่งพลวัต (dynamic acceleration) อันได้แก่การสั่นสะเทือน หรือแรงตกกระทบ เป็นต้น

สำหรับคุณลักษณะ (specifications) ที่สำคัญของตัววัดความเร่ง ADXL 335 ที่สำคัญแสดงได้ดังตารางแสดงคุณลักษณะ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของตัววัดความเร่ง ADXL 335

Parameter	
ช่วงการวัด (Measurement Range)	$\pm 3 g$
ความไม่เป็นเชิงเส้น Nonlinearity % of full scale	$\pm 0.3 \%$
ความไว เมื่อให้ไฟเลี้ยง $V_s = 3 V$ แกน x แกน y แกน z	300 mV/g 300 mV/g 300 mV/g
ค่าโวลต์เตจที่ระดับความเร่งเท่ากับศูนย์ (ZERO g BIAS LEVEL) เมื่อไฟเลี้ยง V_s เท่ากับ 3 V แกน x แกน y แกน z	1.5 V 1.5 V 1.5 V

การศึกษาการประยุกต์ใช้ MEMS ในการวัดความเร่งแบบสถิต

ตัววัดความเร่งแบบ MEMS ให้สัญญาณไฟฟ้าออกตามองศาการเอียงของมุมที่ทำกับแกนในแนวตั้ง (vertical) โดยกำหนดให้ความเร่งในแต่ละแกนหากมีการวางในทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วงในแนวแกนตั้งจะกำหนดให้เป็น $+g$ และมีความเร่งเท่ากับ $-g$ เมื่อกำหนดให้มีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลก ดังแสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 การกำหนดความเร่งในแต่ละแนวแกน

ตำแหน่งการวาง	ความเร่งในแต่ละแกน		
	A_x	A_y	A_z
$z_{\uparrow}$	0	0	$-g$
$z_{\downarrow}$	0	0	$+g$
$y_{\uparrow}$	0	$-g$	0
$y_{\downarrow}$	0	$+g$	0
$x_{\uparrow}$	$-g$	0	0
$x_{\downarrow}$	$+g$	0	0

โดยที่ $z_{\uparrow}$ หมายถึงตำแหน่งที่ แกน z ชี้นั้นในแนวดิ่ง
 $z_{\downarrow}$ หมายถึงตำแหน่งที่ แกน z ชี้นั้นในแนวดิ่ง
 $y_{\uparrow}$ หมายถึงตำแหน่งที่ แกน y ชี้นั้นในแนวดิ่ง
 $y_{\downarrow}$ หมายถึงตำแหน่งที่ แกน y ชี้นั้นในแนวดิ่ง
 $x_{\uparrow}$ หมายถึงตำแหน่งที่ แกน x ชี้นั้นในแนวดิ่ง
 $x_{\downarrow}$ หมายถึงตำแหน่งที่ แกน x ชี้นั้นในแนวดิ่ง
 A_x หมายถึงความเร่งในแนวแกน x
 A_y หมายถึงความเร่งในแนวแกน y
 A_z หมายถึงความเร่งในแนวแกน z

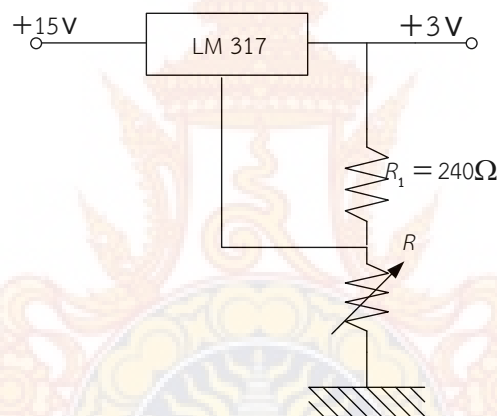
บทที่ 3

การออกแบบการวิจัย (Research Design)

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรไฟเลี้ยงสำหรับตัววัดความเร่ง (MEMS) การทดลองการวัดความเร่งแบบสถิต อันได้แก่การวัดความโน้มถ่วง (gravity) และการวัดความเร่งพลวัต (dynamic acceleration) อันได้แก่ การวัดการสั่นสะเทือน (vibration) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.1 การออกแบบวงจรไฟเลี้ยงสำหรับตัววัดความเร่ง (MEMS)

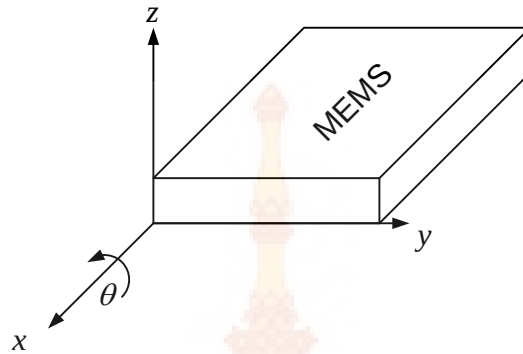
ในการทดลองนี้จะให้ไฟเลี้ยงกับตัววัดความเร่งที่ระดับ 3 V ซึ่งทำได้โดยใช้ไอซีเบอร์ LM 317 เพื่อให้ระดับสัญญาณมีค่าคงที่เท่ากับ 3 V ดังแสดงในรูป 3.1



รูป 3.1 แผนภาพวงจรไฟเลี้ยง

3.2 การทดลองวัดความเร่งแบบสถิต

ในการทดลองหาความเร่งแบบสถิตจะใช้วัดความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก (gravitational acceleration) ซึ่งทำได้โดยการหมุนแกนที่ต้องการทดลองแล้ววัดเอาท์พุทโวลต์เตจ (output voltages) ในแต่ละแกน อันได้แก่แกน x แกน y และแกน z ของตัววัดความเร่ง ดังแสดงในรูป 3.2



รูป 3.2 การตั้งแกนของตัววัดความเร่ง

3.2.1 ชุดทดลองสำหรับการวัดความเร่งแบบสถิต

ชุดทดลองสำหรับการวัดความเร่งแบบสถิตประกอบด้วย

1. แท่นปรับมุมที่สามารถปรับความเอียงได้ดังแสดงในรูป 3.3
2. ตัววัดความเร่ง (MEMS) ADXL 335 พร้อมติดแม่เหล็ก ดังแสดงในรูป 3.4
3. วงจรไฟเลี้ยง 3 V ดังแสดงในรูป 3.1
4. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke 287 สำหรับวัดโวลต์เตจจากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่ง (MEMS) ดังแสดงในรูป 3.5



รูป 3.3 แท่นปรับมุมที่สามารถปรับความเอียงได้



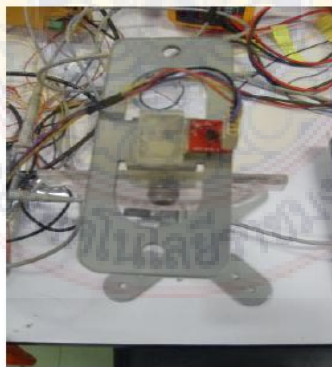
รูป 3.4 ตัววัดความเร่ง (MEMS) ADXL 335 พร้อมติดแม่เหล็ก



รูป 3.5 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke 287

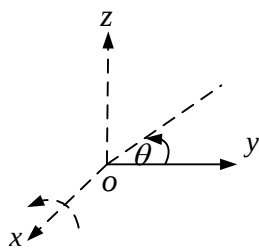
3.2.2 ขั้นตอนการวัดความเร่งแบบสถิต

1. ต่อตัววัดความเร่งเข้ากับวงจรไฟเลี้ยง 3 V
2. ติดตัววัดความเร่ง (MEMS) กับแท่นปรับมุมและติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูป 3.6 โดยให้แกน z ของตัววัดความเร่ง (MEMS) มีทิศชี้ขึ้นในแนวตั้งโดยระนาบ xy อยู่บนแนวระนาบ
3. หมุนตัววัดความเร่งรอบแกนที่อยู่ในแนวนอน (horizontal) โดยเริ่มจากการหมุนรอบแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาครั้งละ 10 องศา
4. บันทึกค่าโวลต์เตจที่ได้จากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่ง (MEMS) ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์
5. จากนั้นติดตั้งตัววัดความเร่ง (MEMS) โดยให้แกน x มีทิศชี้ขึ้นในแนวตั้งโดยระนาบ yz อยู่บนแนวระนาบ หมุนตัววัดความเร่ง (MEMS) รอบแกน y ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาครั้งละ 10 องศา
6. บันทึกค่าโวลต์เตจที่ได้จากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่ง (MEMS) ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์
7. จากนั้นติดตั้งตัววัดความเร่ง (MEMS) โดยให้แกน y มีทิศชี้ขึ้นในแนวตั้งโดยระนาบ zx อยู่บนแนวระนาบ หมุนตัววัดความเร่ง (MEMS) รอบแกน z ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาครั้งละ 10 องศา
8. บันทึกค่าโวลต์เตจที่ได้จากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่ง (MEMS) ด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์



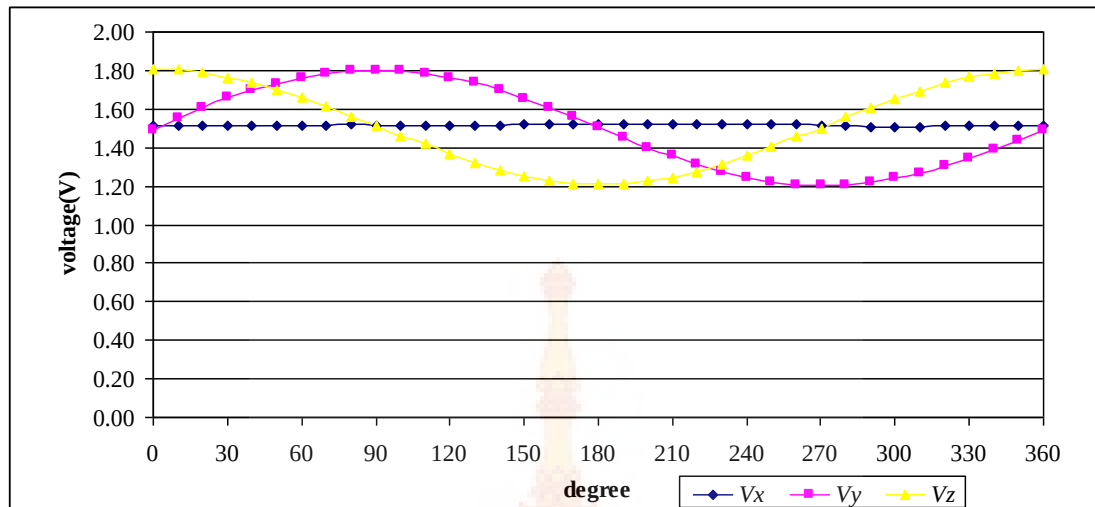
รูป 3.6 ติดตั้งตัววัดความเร่งเข้ากับแท่นปรับมุม

3.2.3 ผลการทดลองการวัดความเร่งแบบสถิต

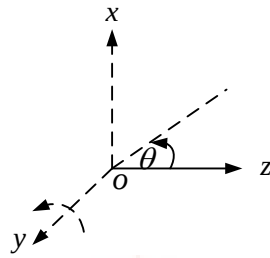


ตาราง 3.1 โวลต์เตจที่ได้จากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่งเมื่อหมุนรอบแกน x บนระนาบ yz

องศา	x axis (V)	y axis (V)	z axis (V)	องศา	x axis (V)	y axis (V)	z axis (V)
0	1.5100	1.4930	1.8080	180	1.5200	1.5040	1.2095
10	1.5100	1.5535	1.8040	190	1.5200	1.4510	1.2130
20	1.5100	1.6030	1.7910	200	1.5200	1.4010	1.2260
30	1.5100	1.6590	1.7640	210	1.5200	1.3575	1.2470
40	1.5150	1.6990	1.7350	220	1.5200	1.3120	1.2760
50	1.5100	1.7330	1.6990	230	1.5200	1.2725	1.3160
60	1.5100	1.7607	1.6600	240	1.5200	1.2415	1.3605
70	1.5100	1.7822	1.6150	250	1.5200	1.2214	1.4040
80	1.5200	1.7965	1.5600	260	1.5200	1.2070	1.4590
90	1.5130	1.8018	1.5150	270	1.5100	1.2030	1.5010
100	1.5120	1.7985	1.4615	280	1.5100	1.2070	1.5575
110	1.5120	1.7860	1.4200	290	1.5090	1.2201	1.6070
120	1.5120	1.7640	1.3635	300	1.5070	1.2402	1.6520
130	1.5149	1.7395	1.3240	310	1.5080	1.2687	1.6940
140	1.5160	1.6990	1.2810	320	1.5101	1.3070	1.7350
150	1.5190	1.6550	1.2510	330	1.5100	1.3465	1.7646
160	1.5190	1.6060	1.2270	340	1.5100	1.3930	1.7875
170	1.5190	1.5590	1.2140	350	1.5150	1.4400	1.8015

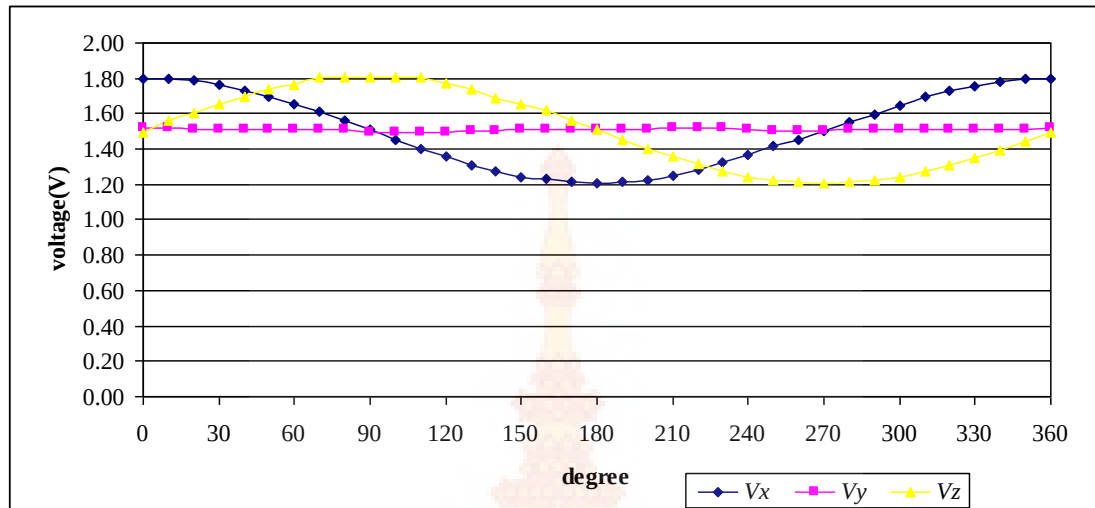


รูป 3.7 โวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความแรงเมื่อหมุนรอบแกน x

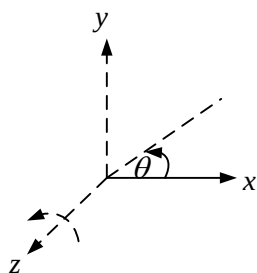


ตาราง 3.2 โวลต์เตจที่ได้จากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่งเมื่อหมุนรอบแกน y บนระนาบ xz

องศา	x axis (V)	y axis (V)	z axis (V)	องศา	x axis (V)	y axis (V)	z axis (V)
0	1.8015	1.5200	1.4920	180	1.2065	1.5100	1.5110
10	1.7972	1.5200	1.5590	190	1.2140	1.5100	1.4480
20	1.7850	1.5100	1.6060	200	1.2270	1.5100	1.4040
30	1.7620	1.5100	1.6550	210	1.2500	1.5200	1.3570
40	1.7330	1.5100	1.6960	220	1.2840	1.5200	1.3140
50	1.6950	1.5100	1.7360	230	1.3240	1.5200	1.2770
60	1.6510	1.5100	1.7670	240	1.3650	1.5100	1.2430
70	1.6090	1.5100	1.8020	250	1.4200	1.5000	1.2260
80	1.5640	1.5080	1.8020	260	1.4540	1.5040	1.2125
90	1.5105	1.4954	1.8075	270	1.5050	1.5050	1.2090
100	1.4550	1.4950	1.8050	280	1.5520	1.5100	1.2110
110	1.4000	1.4950	1.8050	290	1.5960	1.5100	1.2220
120	1.3570	1.4970	1.7704	300	1.6460	1.5100	1.2440
130	1.3070	1.4990	1.7355	310	1.6970	1.5100	1.2770
140	1.2720	1.5021	1.6875	320	1.7310	1.5100	1.3120
150	1.2440	1.5070	1.6565	330	1.7590	1.5100	1.3500
160	1.2280	1.5100	1.6200	340	1.7820	1.5100	1.3960
170	1.2110	1.5100	1.5580	350	1.7950	1.5100	1.4410

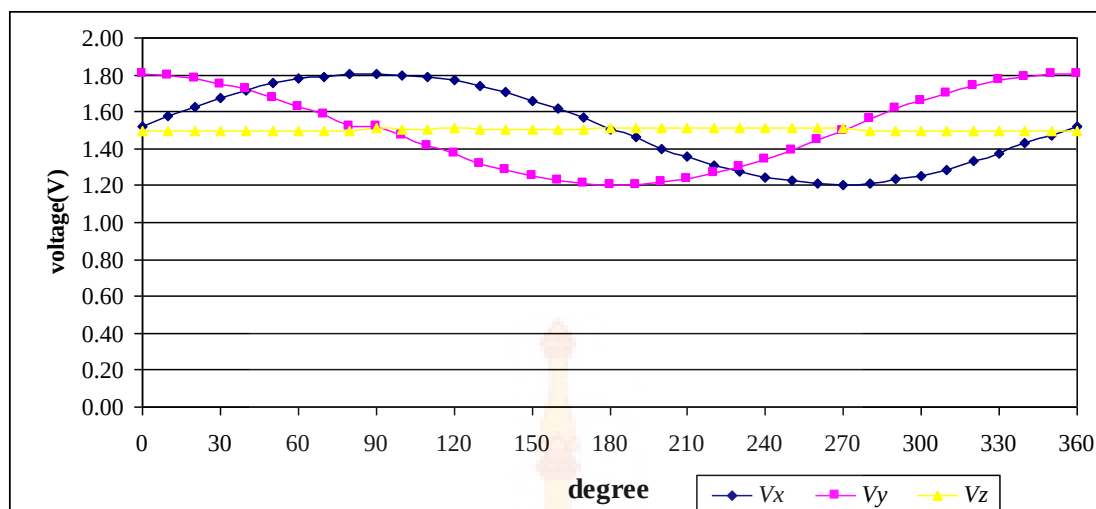


รูป 3.8 โวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความแรงเมื่อหมุนรอบแกน y



ตาราง 3.3 โวลต์แดงที่ได้จากแกนทั้งสามของตัววัดความเร่งเมื่อหมุนรอบแกน z บนระนาบ yx

องศา	x axis (V)	y axis (V)	z axis (V)	องศา	x axis (V)	y axis (V)	z axis (V)
0	1.5167	1.8021	1.4970	180	1.5062	1.2032	1.5099
10	1.5756	1.7952	1.4980	190	1.4610	1.2052	1.5099
20	1.6227	1.7796	1.4970	200	1.3991	1.2202	1.5100
30	1.6770	1.7498	1.4970	210	1.3599	1.2380	1.5149
40	1.7140	1.7199	1.4990	220	1.3124	1.2697	1.5099
50	1.7525	1.6730	1.4990	230	1.2771	1.3042	1.5099
60	1.7770	1.6271	1.4990	240	1.2458	1.3440	1.5099
70	1.7924	1.5857	1.4990	250	1.2259	1.3910	1.5099
80	1.8014	1.5230	1.4990	260	1.2100	1.4510	1.5085
90	1.8015	1.5200	1.5100	270	1.2064	1.4989	1.5095
100	1.8004	1.4690	1.5065	280	1.2135	1.5610	1.4965
110	1.7880	1.4177	1.5056	290	1.2321	1.6178	1.4965
120	1.7710	1.3740	1.5085	300	1.2540	1.6590	1.4965
130	1.7390	1.3210	1.5065	310	1.2850	1.7019	1.4965
140	1.7050	1.2850	1.5077	320	1.3320	1.7430	1.4965
150	1.6610	1.2510	1.5060	330	1.3765	1.7701	1.4960
160	1.6170	1.2276	1.5060	340	1.4290	1.7909	1.4960
170	1.5710	1.2118	1.5060	350	1.4725	1.8021	1.4990



รูป 3.9 โวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความแรงเมื่อหมุนรอบแกน z

จากตาราง 3.1 3.2 และ 3.3 หากนำโวลต์เตจที่ตำแหน่งของแกนของตัววัดความแรงชี้ขึ้นและชี้ลงในแนวดิ่งซึ่งมีทั้งหมดหกตำแหน่งสามารถแสดงได้ดังตาราง 3.4

ตาราง 3.4 โวลต์เตจที่ตำแหน่งแกน x แกน y และแกน z ชี้ขึ้นและชี้ลงในแนวดิ่ง

ตำแหน่งการวาง	voltage (V)
$x_{\uparrow}$	1.8015
$x_{\downarrow}$	1.2064
$y_{\uparrow}$	1.8018
$y_{\downarrow}$	1.2030
$z_{\uparrow}$	1.8075
$z_{\downarrow}$	1.2090

จากตาราง 3.4 จะพบว่าค่าโวลต์เตจที่ชี้ลงและชี้ขึ้นในแนวดิ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 1.8 V ดังนั้นหากต้องการหาค่าโวลต์เตจในแต่ละแกนเมื่ออยู่ในแนวระนาบ (ไม่มีการเอียงขึ้นและเอียงลง) สามารถหาได้จากสมการ 3.1 ถึง 3.3

$$X_0 = \frac{X_{\uparrow} + X_{\downarrow}}{2} \quad 3.1$$

$$Y_0 = \frac{Y_{\uparrow} + Y_{\downarrow}}{2} \quad 3.2$$

$$Z_0 = \frac{Z_{\uparrow} + Z_{\downarrow}}{2} \quad 3.3$$

โดยที่ X_0 หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน x เมื่อแกน x อยู่ในแนวระนาบ

Y_0 หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน y เมื่อแกน y อยู่ในแนวระนาบ

Z_0 หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน z เมื่อแกน z อยู่ในแนวระนาบ

$X_{\uparrow}$ หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน x เมื่อแกน x ชี้นั้นในแนวตั้ง

$X_{\downarrow}$ หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน x เมื่อแกน x ชี้นั้นในแนวตั้ง

$Y_{\uparrow}$ หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน y เมื่อแกน y ชี้นั้นในแนวตั้ง

$Y_{\downarrow}$ หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน y เมื่อแกน y ชี้นั้นในแนวตั้ง

$Z_{\uparrow}$ หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน z เมื่อแกน z ชี้นั้นในแนวตั้ง

$Z_{\downarrow}$ หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน z เมื่อแกน z ชี้นั้นในแนวตั้ง

จากสมการที่ 3.1 3.2 และ 3.3 จะได้

$$X_0 = 1.5040 \quad \text{V}$$

$$Y_0 = 1.5024 \quad \text{V}$$

$$Z_0 = 1.5083 \quad \text{V}$$

3.2.4 การคำนวณหาค่าความไว (sensitivity) ในแต่ละแกนของตัววัดความเร่ง

ตาราง 3.1 3.2 และ 3.3 พบว่าหากแกนใดมีทิศชี้ขึ้นในแนวตั้งโวลต์เตจที่อ่านได้จะมีค่าประมาณ 1.8 V หากแกนใดอยู่ในแนวระนาบโวลต์เตจที่อ่านได้จะมีค่าประมาณ 1.5 V และหากแกนใดมีทิศชี้ลงในแนวตั้งค่าโวลต์เตจที่อ่านได้จะมีค่าประมาณ 1.2 V

ดังนั้นหากนำโวลต์เตจที่เปลี่ยนไปหารด้วยความเร่งที่เปลี่ยนไปจะทำให้ได้ค่าความไวของตัววัดความเร่งซึ่งพบว่ามีค่าประมาณ $\frac{(1.8\text{V}-1.5\text{V})}{g}$ หรือประมาณ 300 mV/g ซึ่งตรงกับค่าความไวที่ระบุในตารางคุณสมบัติ (ตาราง 2.1)

อย่างไรก็ตามความไวดังกล่าวอาจมีความผิดพลาดหากการติดตั้งตัววัดความเร่ง (MEMS) เข้ากับวงจรแผ่นปริ้นซ์มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นจึงมีการคำนวณค่าความไวใหม่เพื่อชดเชยกับความผิดพลาดที่เกิดจากการติดตั้ง จากงานวิจัยของ Pooya Najafi Zanjani *et al.* [4.] ได้เสนอวิธีการหาความไวของตัววัดความเร่ง (MEMS) ซึ่งแสดงได้ในสมการ 3.4 ถึง 3.6 และมุมของแกนตัววัดความเร่งเทียบกับแนวตั้งดังแสดงในสมการ 3.7 ถึง 3.9

$$S_x = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (X_2 - X_0)^2 + (X_3 - X_0)^2} \quad 3.4$$

$$S_y = \sqrt{(Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2} \quad 3.5$$

$$S_z = \sqrt{(Z_1 - Z_0)^2 + (Z_2 - Z_0)^2 + (Z_3 - Z_0)^2} \quad 3.6$$

โดย X_1 Y_1 และ Z_1 คือ โวลต์เตจจากแกนทั้งสามเมื่อแกน x มีทิศชี้ขึ้นในแนวดิ่ง
 X_2 Y_2 และ Z_2 คือ โวลต์เตจจากแกนทั้งสามเมื่อแกน y มีทิศชี้ขึ้นในแนวดิ่ง
 X_3 Y_3 และ Z_3 คือ โวลต์เตจจากแกนทั้งสามเมื่อแกน z มีทิศชี้ขึ้นในแนวดิ่ง

S_x หมายถึงค่าความไวของตัววัดความเร่งในแนวแกน x

S_y หมายถึงค่าความไวของตัววัดความเร่งในแนวแกน y

S_z หมายถึงค่าความไวของตัววัดความเร่งในแนวแกน z

$$\theta_x = \sin^{-1} \left(\frac{X - X_0}{S_x} \right) \quad 3.7$$

$$\theta_y = \sin^{-1} \left(\frac{Y - Y_0}{S_y} \right) \quad 3.8$$

$$\theta_z = \sin^{-1} \left(\frac{Z - Z_0}{S_z} \right) \quad 3.9$$

θ_x หมายถึงมุมแกน x ของตัววัดความเร่งเทียบกับแนวดิ่ง

θ_y หมายถึงมุมแกน y ของตัววัดความเร่งเทียบกับแนวดิ่ง

θ_z หมายถึงมุมแกน z ของตัววัดความเร่งเทียบกับแนวดิ่ง

3.2.5 การหาเมตริกซ์ตัวประกอบสเกล (scale factor matrix) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method)

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นถึงความผิดพลาดในการติดตั้งตัววัดความเร่งเข้ากับแผ่นวงจรอาจเกิดความไม่ตรง (misalignment) ซึ่งอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้ การหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งที่ได้จากตัววัดความเร่งและโวลต์เตจจากทั้งสามแกน นอกจากการใช้สมการ 3.1 ถึง 3.6 ดังในหัวข้อ 3.2.4 แล้วยังสามารถหาได้โดยการหาโดยการหาเมตริกซ์ตัวประกอบสเกล (scale factor matrix) [5.] ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้คือ

กำหนดให้ความเร่งที่ใช้เป็นความเร่งเทียบกับความโน้มถ่วงของโลก , A_n (normalized earth gravity) ซึ่งแสดงได้ดังสมการ 3.10

$$A_n = \frac{A}{g} \quad 3.10$$

โวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความเร่งทั้งสามแกนสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ได้ดังสมการ 3.11.1 และ 3.11.2

$$\begin{Bmatrix} A_{nx} \\ A_{ny} \\ A_{nz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} O_x \\ O_y \\ O_z \end{Bmatrix} \quad 3.11.1$$

$$\begin{Bmatrix} A_{nx} \\ A_{ny} \\ A_{nz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & O_x \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & O_y \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & O_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ 1 \end{Bmatrix} \quad 3.11.2$$

กำหนดให้ $\bar{A}_n = \begin{Bmatrix} A_{nx} \\ A_{ny} \\ A_{nz} \end{Bmatrix} \quad 3.11.3$

และ $\vec{V} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ 1 \end{Bmatrix} \quad 3.11.4$

$$\bar{A}_n = [S] \vec{V} \quad 3.12.1$$

โดยกำหนดให้

$\bar{A}_n$ หมายถึงเวกเตอร์ความเร่งเทียบกับความโน้มถ่วง

A_{nx} หมายถึงความเร่งเทียบกับความโน้มถ่วงของโลกในแนวแกน x

A_{ny} หมายถึงความเร่งเทียบกับความโน้มถ่วงของโลกในแนวแกน y

A_{nz} หมายถึงความเร่งเทียบกับความโน้มถ่วงของโลกในแนวแกน z

$\vec{V}$ หมายถึงเวกเตอร์ของโวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความเร่ง

V_x หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน x ของตัววัดความเร่ง

V_y หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน y ของตัววัดความเร่ง

V_z หมายถึงโวลต์เตจที่ได้จากแกน z ของตัววัดความเร่ง

$[S]$ หมายถึงเมตริกซ์ตัวประกอบสเกล (scale factor matrix)

O_x หมายถึงโวลต์เตจไบแอส (bias) ในแนวแกน x

O_y หมายถึงโวลต์เตจไบแอส (bias) ในแนวแกน y

O_z หมายถึงโวลต์เตจไบแอส (bias) ในแนวแกน z

สมการ 3.12.1 สามารถเขียนใหม่โดยใช้คุณสมบัติของเมตริกซ์ได้ดังสมการ 3.12.2

$$\vec{A}_n^T = \vec{V}^T [S]^T \quad 3.12.2$$

หรือ

$$\begin{bmatrix} A_{nx} & A_{ny} & A_{nz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_x & V_y & V_z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} \\ S_{12} & S_{22} & S_{32} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \\ O_x & O_y & O_z \end{bmatrix} \quad 3.12.3$$

พิจารณาเมตริกซ์ตัวประกอบสเกลในสมการ 3.12.3 จะพบว่ามีตัวไม่ทราบค่า 12 ตัวซึ่งตัวไม่ทราบค่าเหล่านี้จะใช้ข้อมูลจากการทดลองวางตัววัดความเร่ง (MEMS) ที่ตำแหน่งต่างๆ คือ 6 ตำแหน่งอันได้แก่ $x_\uparrow, x_\downarrow, y_\uparrow, y_\downarrow, z_\uparrow, z_\downarrow$ ในการคำนวณ

ข้อมูลทั้ง 6 ตำแหน่งจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณสมการที่ 3.13

$$\vec{A}_{ni}^T = \vec{V}_i^T [S]^T \quad 3.13$$

$\vec{A}_{ni}$ หมายถึงเวกเตอร์ความเร่งในแต่ละแกนเทียบกับความโน้มถ่วงของโลก

$$\vec{A}_{ni} = \begin{Bmatrix} A_{nxi} \\ A_{nyi} \\ A_{nzi} \end{Bmatrix}$$

A_{nxi} หมายถึงความเร่งเทียบกับความโน้มถ่วงของโลกในแนวแกน x ที่ตำแหน่ง i

A_{nyi} หมายถึงความเร่งเทียบกับความโน้มถ่วงของโลกในแนวแกน y ที่ตำแหน่ง i

A_{nzi} หมายถึงความเร่งเทียบกับความโน้มถ่วงของโลกในแนวแกน z ที่ตำแหน่ง i

$\vec{V}_i$ หมายถึงเวกเตอร์ของโวลต์เตจที่ได้จากการทดลองโดยมีรายละเอียดดังนี้

$$\vec{V}_i = \begin{Bmatrix} V_{xi} \\ V_{yi} \\ V_{zi} \\ 1 \end{Bmatrix}$$

V_{xi} หมายถึงค่าโวลต์เตจที่วัดได้จากแกน x ที่ตำแหน่ง i

V_{yi} หมายถึงค่าโวลต์เตจที่วัดได้จากแกน y ที่ตำแหน่ง i

V_{zi} หมายถึงค่าโวลต์เตจที่วัดได้จากแกน z ที่ตำแหน่ง i

[S] หมายถึงเมตริกซ์ตัวประกอบสเกล (scale factor matrix)

โดยการประยุกต์พีชคณิตเชิงเส้น (linear algebra) ในการหาการถดถอยแบบกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) เมทริกซ์ตัวประกอบสเกลสามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$[S]^T = ([V]^T [V])^{-1} [V]^T [A_n] \quad 3.14.1$$

โดย

$$[A_n] = \begin{bmatrix} \bar{A}_{n1}^T \\ \bar{A}_{n2}^T \\ \bar{A}_{n3}^T \\ \bar{A}_{n4}^T \\ \bar{A}_{n5}^T \\ \bar{A}_{n6}^T \end{bmatrix} \quad 3.14.2$$

และ

$$[V] = \begin{bmatrix} \bar{V}_1^T \\ \bar{V}_2^T \\ \bar{V}_3^T \\ \bar{V}_4^T \\ \bar{V}_5^T \\ \bar{V}_6^T \end{bmatrix} \quad 3.14.3$$

สำหรับเมทริกซ์ $[A_n]$ และเมทริกซ์ $[V]$ สามารถหาได้จากการทดลองดังนี้

กำหนดให้ทิศทางแรงโน้มถ่วงมีทิศตั้งนั้นหากแกนใดแกนหนึ่งของตัววัดความเร่งมีทิศชี้ขึ้น จะกำหนดให้เท่ากับ $-g$ และกำหนดแกนของตัววัดความเร่งที่มีทิศชี้ลงในแนวดิ่งมีค่าเท่ากับ g

ดังนั้นหากแกนของตัววัดความเร่งมีทิศชี้ขึ้นในแนวดิ่ง ความเร่งเทียบกับแรงโน้มถ่วงของโลก ในแกนนั้นเท่ากับ $A_n = -1$ และหากแกนของตัววัดความเร่งมีทิศชี้ลงในแนวดิ่ง ความเร่งเทียบกับแรงโน้มถ่วงของโลกในแกนนั้นเท่ากับ $A_n = 1$

หากวางตำแหน่งแกน z ชี้ขึ้นในแนวดิ่ง

ทำการทดลองและเก็บผลทั้ง 6 ตำแหน่งจะได้ค่าดังนี้

ตำแหน่งการวางแกน z ชี้ลงในแนวดิ่ง ($z_{\downarrow}$) แกน x และ แกน y อยู่ในแนวระนาบ

$$\bar{A}_{n1}^T = [0 \ 0 \ 1] \quad 3.15.1$$

$$\bar{V}_1^T = [V_{x1} \ V_{y1} \ V_{z1} \ 1] = [1.5050 \ 1.5050 \ 1.2090 \ 1] \quad 3.15.2$$

ตำแหน่งการวางแกน z ชี้ขึ้นในแนวดิ่ง ($z_{\uparrow}$) แกน x และ แกน y อยู่ในแนวระนาบ

$$\bar{A}_{n2}^T = [0 \ 0 \ -1] \quad 3.15.3$$

$$\bar{V}_2^T = [V_{x2} \ V_{y2} \ V_{z2} \ 1] = [1.5105 \ 1.4954 \ 1.8075 \ 1] \quad 3.15.4$$

ตำแหน่งการวางแกน y ชี้ลงในแนวดิ่ง ($y_{\downarrow}$) แกน z และ แกน x อยู่ในแนวระนาบ

$$\bar{A}_{n3}^T = [0 \ 1 \ 0] \quad 3.15.5$$

$$\bar{V}_3^T = [V_{x3} \ V_{y3} \ V_{z3} \ 1] = [1.5100 \ 1.2030 \ 1.5010 \ 1] \quad 3.15.6$$

ตำแหน่งการวางแกน y ชี้ขึ้นในแนวตั้ง ($y_{\uparrow}$) แกน z และ แกน x อยู่ในแนวระนาบ

$$\vec{A}_{n4}^T = [0 \quad -1 \quad 0] \quad 3.15.7$$

$$\vec{V}_4^T = [V_{x4} \quad V_{y4} \quad V_{z4} \quad 1] = [1.5130 \quad 1.8018 \quad 1.5150 \quad 1] \quad 3.15.8$$

ตำแหน่งการวางแกน x ชี้ลงในแนวตั้ง ($x_{\downarrow}$) แกน z และ แกน y อยู่ในแนวระนาบ

$$\vec{A}_{n5}^T = [1 \quad 0 \quad 0] \quad 3.15.9$$

$$\vec{V}_5^T = [V_{x5} \quad V_{y5} \quad V_{z5} \quad 1] = [1.2064 \quad 1.4989 \quad 1.5095 \quad 1] \quad 3.15.10$$

ตำแหน่งการวางแกน x ชี้ขึ้นในแนวตั้ง ($x_{\uparrow}$) แกน y และ แกน z อยู่ในแนวระนาบ

$$\vec{A}_{n6}^T = [-1 \quad 0 \quad 0] \quad 3.15.11$$

$$\vec{V}_6^T = [V_{x6} \quad V_{y6} \quad V_{z6} \quad 1] = [1.8015 \quad 1.5200 \quad 1.5100 \quad 1] \quad 3.15.12$$

จากสมการ 3.14.2 และ 3.14.3 จะได้

$$[A_n] = \begin{bmatrix} \vec{A}_{n1}^T \\ \vec{A}_{n2}^T \\ \vec{A}_{n3}^T \\ \vec{A}_{n4}^T \\ \vec{A}_{n5}^T \\ \vec{A}_{n6}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 3.16.1$$

และ

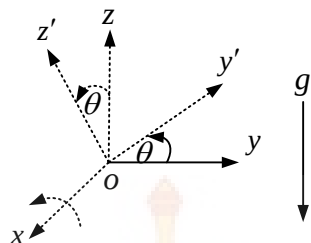
$$[V] = \begin{bmatrix} \vec{V}_1^T \\ \vec{V}_2^T \\ \vec{V}_3^T \\ \vec{V}_4^T \\ \vec{V}_5^T \\ \vec{V}_6^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5050 & 1.5050 & 1.2090 & 1.0000 \\ 1.5105 & 1.4954 & 1.8075 & 1.0000 \\ 1.5100 & 1.2030 & 1.5010 & 1.0000 \\ 1.5130 & 1.8018 & 1.5150 & 1.0000 \\ 1.2064 & 1.4989 & 1.5095 & 1.0000 \\ 1.8015 & 1.5200 & 1.5100 & 1.0000 \end{bmatrix} \quad 3.16.2$$

จากสมการ 3.14.1 $[S]^T = ([V]^T [V])^{-1} [V]^T [A_n]$

ดังนั้นจะได้เมตริกซ์ตัวประกอบสเกล (scale factor matrix) ดังสมการ 3.17.1 และ 3.17.2

$$[S]^T = \begin{bmatrix} -3.3602 & 0.1173 & -0.0002 \\ 0.0151 & -3.3375 & 0.0784 \\ 0.0309 & -0.0543 & -3.3404 \\ 4.9971 & 4.9247 & 4.9219 \end{bmatrix} \quad 3.17.1$$

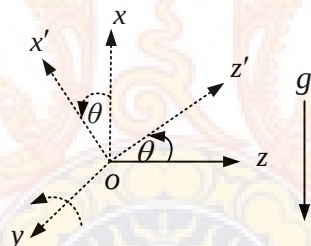
$$\text{หรือ } [S] = \begin{bmatrix} -3.3602 & 0.0151 & 0.0309 & 4.9971 \\ 0.1173 & -3.3375 & -0.0543 & 4.9247 \\ -0.0002 & 0.0784 & -3.3404 & 4.9219 \end{bmatrix} \quad 3.17.2$$



รูป 3.10 การหมุนรอบแกน x เป็นมุม θ

ความเร่งในแต่ละแนวแกนเมื่อหมุนรอบแกน x ทิศทางทวนเข็มนาฬิกาโดยกำหนดให้แกน z มีทิศชี้ขึ้นในแนวตั้งพบว่าความเร่งในแกน z' มีค่าเท่ากับ $-g \cos(\theta)$ ส่วนความเร่งในแกน y' มีค่าเท่ากับ $-g \sin(\theta)$ หรือ $\vec{A}_n^T = [A_{nx} \ A_{ny} \ A_{nz}] = [0 \ -\sin(\theta) \ -\cos(\theta)]$ 3.18.1

ในทำนองเดียวกันความเร่งในแต่ละแนวแกนเมื่อมีการหมุนรอบแกน y ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม θ โดยมีแกน x มีทิศชี้ขึ้นในแนวตั้งดังแสดงในรูป 3.11 สามารถแสดงได้ดังสมการ 3.18.2



รูป 3.11 การหมุนรอบแกน y เป็นมุม θ

$$\vec{A}_n^T = [A_{nx} \ A_{ny} \ A_{nz}] = [-\cos(\theta) \ 0 \ -\sin(\theta)] \quad 3.18.2$$

ตัวอย่างเช่น หากต้องการหาความเร่งที่หมุนรอบแกน y เป็นมุม 30 องศา โดยให้แกน x มีทิศชี้ขึ้นในแนวตั้งหาได้โดยนำโวลต์เตจที่ได้จากการทดลองซึ่งจากตาราง 3.2 พบว่ามีค่าเท่ากับ

โวลต์เตจที่ได้จากแกน x = 1.7620 V

โวลต์เตจที่ได้จากแกน y = 1.5100 V

โวลต์เตจที่ได้จากแกน z = 1.6550 V

ความเร่งที่ได้จากสมการ 3.12.3 จะได้

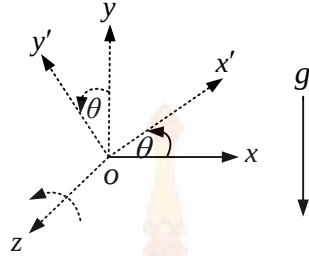
$$\vec{A}_n^T = [-0.8496 \ 0.0019 \ -0.4884]$$

และหากเปรียบเทียบกับทฤษฎีดังสมการ 3.18.2 จะได้

$$\vec{A}_n^T = [-\cos(30^\circ) \ 0 \ -\sin(30^\circ)] = [-0.866 \ 0 \ -0.500]$$

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

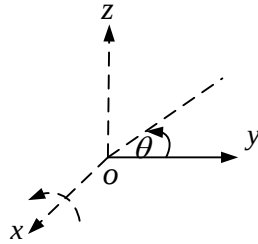
ในทำนองเดียวกันความเร่งในแต่ละแนวแกนเมื่อมีการหมุนรอบแกน z ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเป็นมุม θ โดยมีแกน y มีทิศชี้ขึ้นในแนวตั้งดังแสดงในรูป 3.12 สามารถแสดงได้ดังสมการ 3.18.3



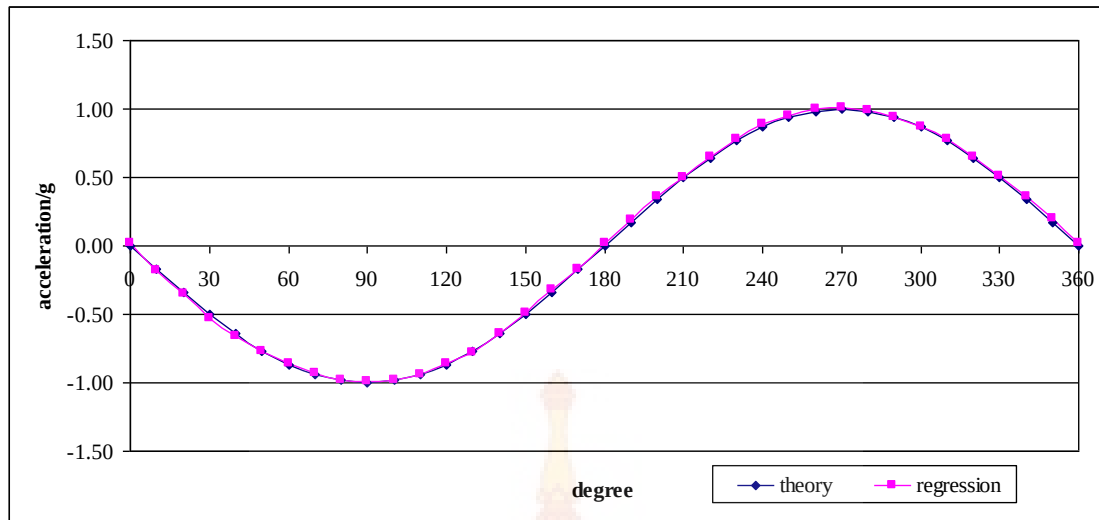
รูป 3.12 การหมุนรอบแกน z เป็นมุม θ

$$\vec{A}_n^T = [-\sin(\theta) \quad -\cos(\theta) \quad 0] \quad 3.18.3$$

ตาราง 3.5 ความเร่งในแนวแกน y ที่ได้จากการคำนวณ (least squares regression) เปรียบเทียบกับ
กับความเร่งในแนวแกน y ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

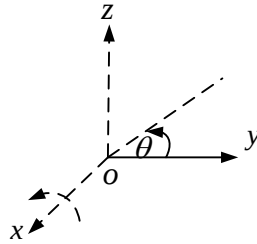


องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)	องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)
0	0.021	0.000	180	0.018	0.000
10	-0.181	-0.174	190	0.194	0.174
20	-0.345	-0.342	200	0.361	0.342
30	-0.531	-0.500	210	0.505	0.500
40	-0.662	-0.643	220	0.655	0.643
50	-0.774	-0.766	230	0.785	0.766
60	-0.865	-0.866	240	0.886	0.866
70	-0.934	-0.940	250	0.950	0.940
80	-0.978	-0.985	260	0.995	0.985
90	-0.994	-1.000	270	1.005	1.000
100	-0.980	-0.985	280	0.989	0.985
110	-0.936	-0.940	290	0.942	0.940
120	-0.859	-0.866	300	0.873	0.866
130	-0.775	-0.766	310	0.775	0.766
140	-0.637	-0.643	320	0.646	0.643
150	-0.489	-0.500	330	0.512	0.500
160	-0.324	-0.342	340	0.356	0.342
170	-0.166	-0.174	350	0.199	0.174

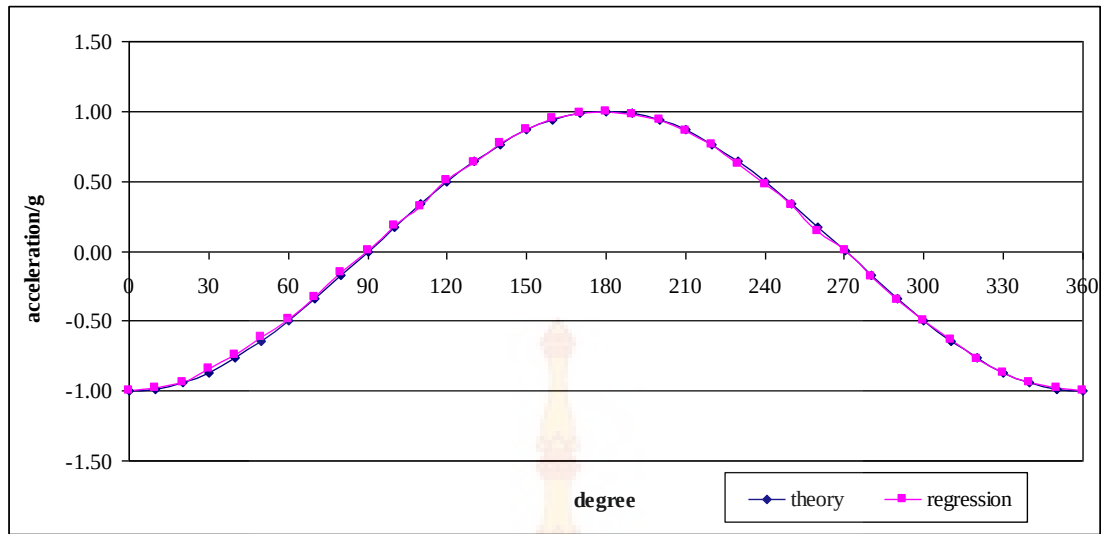


รูป 3.13 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน y ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี

ตาราง 3.6 ความเร่งในแนวแกน z ที่ได้จากการคำนวณ (least squares regression) เปรียบเทียบกับ
กับความเร่งในแนวแกน z ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน x ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

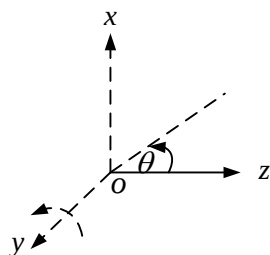


องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)	องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)
0	-1.001	-1.000	180	0.999	1.000
10	-0.983	-0.985	190	0.983	0.985
20	-0.935	-0.940	200	0.936	0.940
30	-0.841	-0.866	210	0.863	0.866
40	-0.741	-0.766	220	0.762	0.766
50	-0.618	-0.643	230	0.625	0.643
60	-0.485	-0.500	240	0.474	0.500
70	-0.333	-0.342	250	0.327	0.342
80	-0.149	-0.174	260	0.143	0.174
90	0.002	0.000	270	0.002	0.000
100	0.181	0.174	280	-0.186	-0.174
110	0.318	0.342	290	-0.351	-0.342
120	0.505	0.500	300	-0.500	-0.500
130	0.635	0.643	310	-0.638	-0.643
140	0.776	0.766	320	-0.772	-0.766
150	0.873	0.866	330	-0.867	-0.866
160	0.949	0.940	340	-0.940	-0.940
170	0.989	0.985	350	-0.983	-0.985

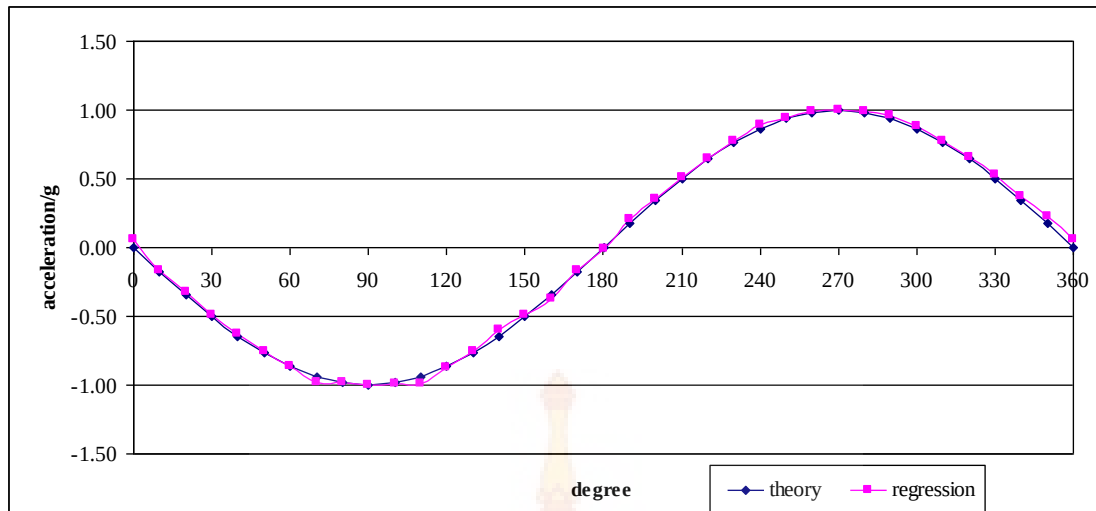


รูป 3.14 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน z ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี

ตาราง 3.7 ความเร่งในแนวแกน z ที่ได้จากการคำนวณ (least squares regression) เปรียบเทียบกับ ความเร่งในแนวแกน z ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน y ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

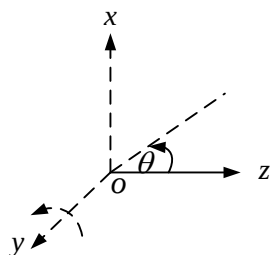


องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)	องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)
0	0.057	0.000	180	-0.007	0.000
10	-0.167	-0.174	190	0.203	0.174
20	-0.325	-0.342	200	0.350	0.342
30	-0.488	-0.500	210	0.508	0.500
40	-0.625	-0.643	220	0.652	0.643
50	-0.759	-0.766	230	0.775	0.766
60	-0.863	-0.866	240	0.888	0.866
70	-0.979	-0.940	250	0.944	0.940
80	-0.980	-0.985	260	0.989	0.985
90	-0.999	-1.000	270	1.001	1.000
100	-0.991	-0.985	280	0.995	0.985
110	-0.991	-0.940	290	0.958	0.940
120	-0.875	-0.866	300	0.884	0.866
130	-0.758	-0.766	310	0.774	0.766
140	-0.598	-0.643	320	0.657	0.643
150	-0.494	-0.500	330	0.530	0.500
160	-0.371	-0.342	340	0.377	0.342
170	-0.164	-0.174	350	0.226	0.174

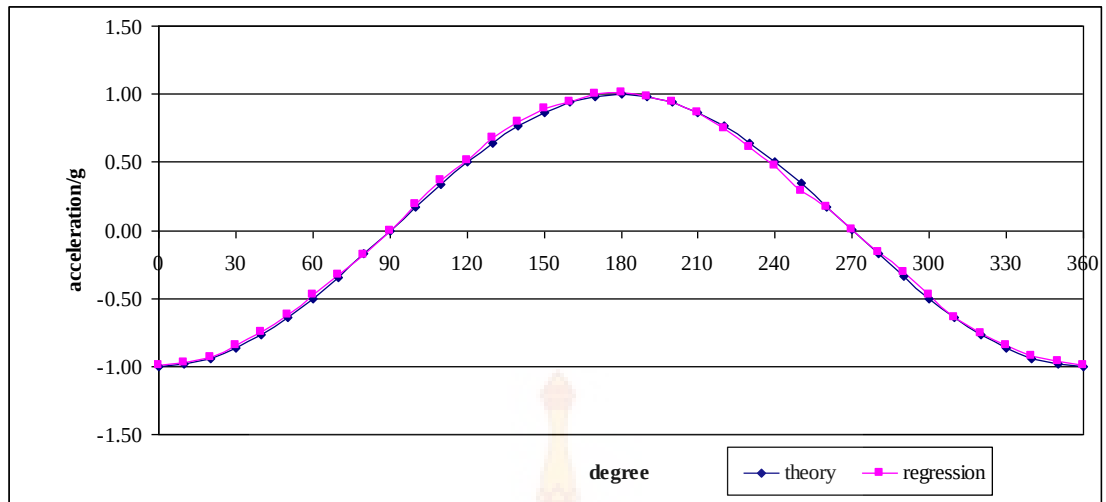


รูป 3.15 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน z ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี

ตาราง 3.8 ความเร่งในแนวแกน x ที่ได้จากการคำนวณ (least squares regression) เปรียบเทียบกับความเร่งในแนวแกน x ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน y ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

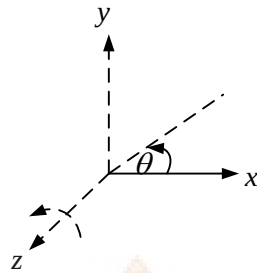


องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)	องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)
0	0.000	0.000	180	0.000	0.000
10	-0.186	-0.174	190	0.158	0.174
20	-0.371	-0.342	200	0.305	0.342
30	-0.515	-0.500	210	0.473	0.500
40	-0.682	-0.643	220	0.643	0.643
50	-0.798	-0.766	230	0.756	0.766
60	-0.891	-0.866	240	0.849	0.866
70	-0.944	-0.940	250	0.925	0.940
80	-0.999	-0.985	260	0.967	0.985
90	-1.013	-1.000	270	0.987	1.000
100	-0.985	-0.985	280	0.971	0.985
110	-0.940	-0.940	290	0.928	0.940
120	-0.862	-0.866	300	0.850	0.866
130	-0.746	-0.766	310	0.751	0.766
140	-0.611	-0.643	320	0.622	0.643
150	-0.472	-0.500	330	0.473	0.500
160	-0.286	-0.342	340	0.331	0.342
170	-0.172	-0.174	350	0.180	0.174

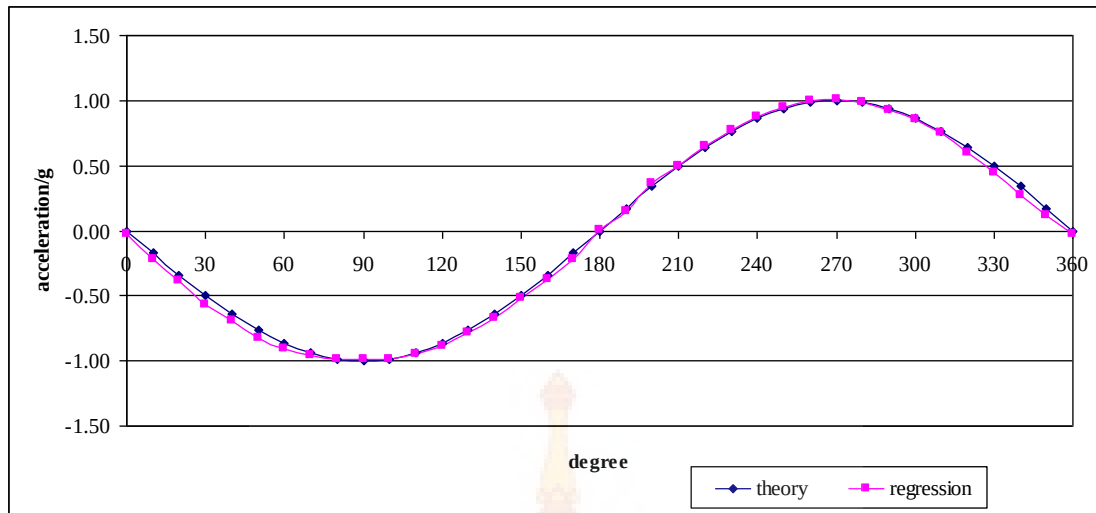


รูป 3.16 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน x ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี

ตาราง 3.9 ความเร่งในแนวแกน x ที่ได้จากการคำนวณ (least squares regression) เปรียบเทียบกับ
กับความเร่งในแนวแกน x ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน z ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

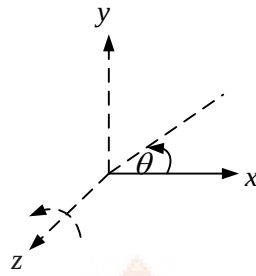


องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)	องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)
0	-0.026	0.000	180	0.001	0.000
10	-0.224	-0.174	190	0.153	0.174
20	-0.382	-0.342	200	0.361	0.342
30	-0.565	-0.500	210	0.493	0.500
40	-0.690	-0.643	220	0.653	0.643
50	-0.820	-0.766	230	0.772	0.766
60	-0.903	-0.866	240	0.878	0.866
70	-0.955	-0.940	250	0.945	0.940
80	-0.987	-0.985	260	1.000	0.985
90	-0.987	-1.000	270	1.013	1.000
100	-0.984	-0.985	280	0.989	0.985
110	-0.943	-0.940	290	0.928	0.940
120	-0.886	-0.866	300	0.855	0.866
130	-0.780	-0.766	310	0.751	0.766
140	-0.666	-0.643	320	0.594	0.643
150	-0.519	-0.500	330	0.445	0.500
160	-0.371	-0.342	340	0.269	0.342
170	-0.217	-0.174	350	0.123	0.174

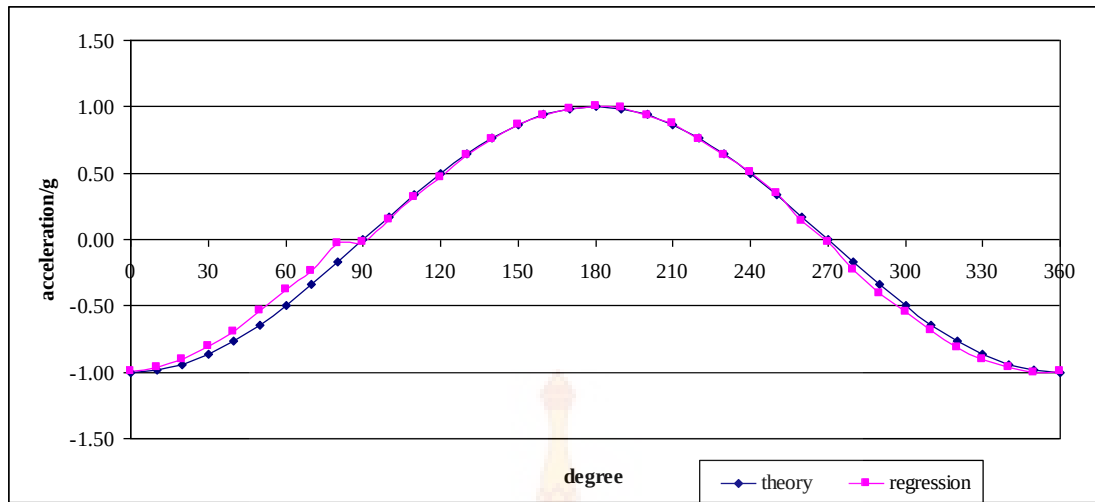


รูป 3.17 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน x ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี

ตาราง 3.10 ความเร่งในแนวแกน y ที่ได้จากการคำนวณ (least squares regression) เปรียบเทียบกับความเร่งในแนวแกน y ทางทฤษฎีโดยการหมุนรอบแกน z ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



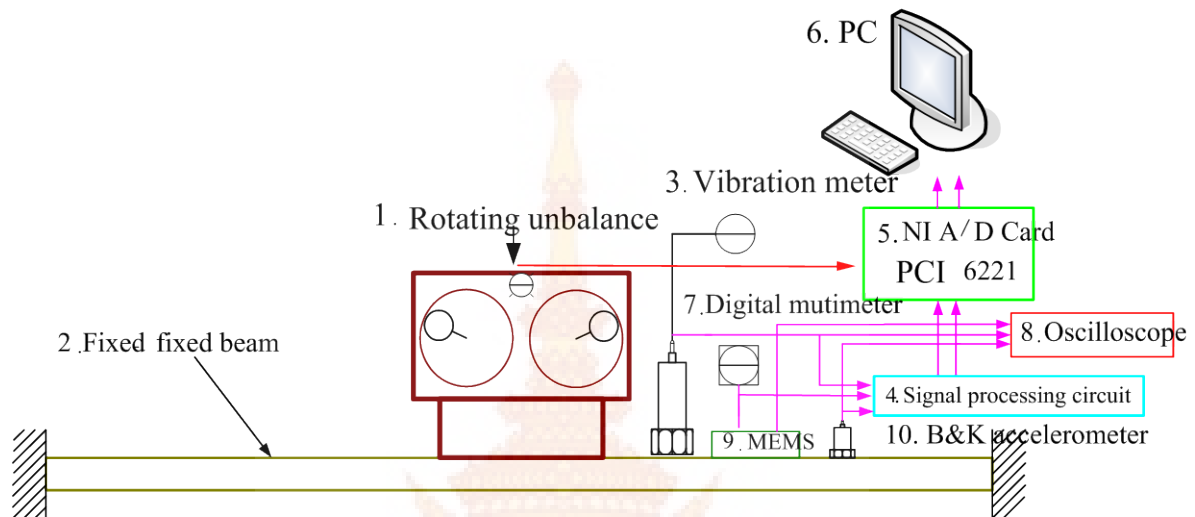
องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)	องศา	ความเร่ง regression (g)	ความเร่ง ทฤษฎี (g)
0	-0.993	-1.000	180	1.004	1.000
10	-0.963	-0.985	190	0.992	0.985
20	-0.906	-0.940	200	0.934	0.940
30	-0.800	-0.866	210	0.870	0.866
40	-0.696	-0.766	220	0.759	0.766
50	-0.535	-0.643	230	0.640	0.643
60	-0.379	-0.500	240	0.503	0.500
70	-0.239	-0.342	250	0.344	0.342
80	-0.028	-0.174	260	0.142	0.174
90	-0.019	0.000	270	-0.018	0.000
100	0.151	0.174	280	-0.224	-0.174
110	0.321	0.342	290	-0.411	-0.342
120	0.465	0.500	300	-0.546	-0.500
130	0.638	0.643	310	-0.686	-0.643
140	0.754	0.766	320	-0.818	-0.766
150	0.863	0.866	330	-0.903	-0.866
160	0.935	0.940	340	-0.966	-0.940
170	0.983	0.985	350	-0.998	-0.985



รูป 3.18 กราฟเปรียบเทียบระหว่างความเร่งในแนวแกน y ที่ได้จากการคำนวณกับทางทฤษฎี

3.3 การทดลองการวัดความเร่งพลวัต (dynamic acceleration)

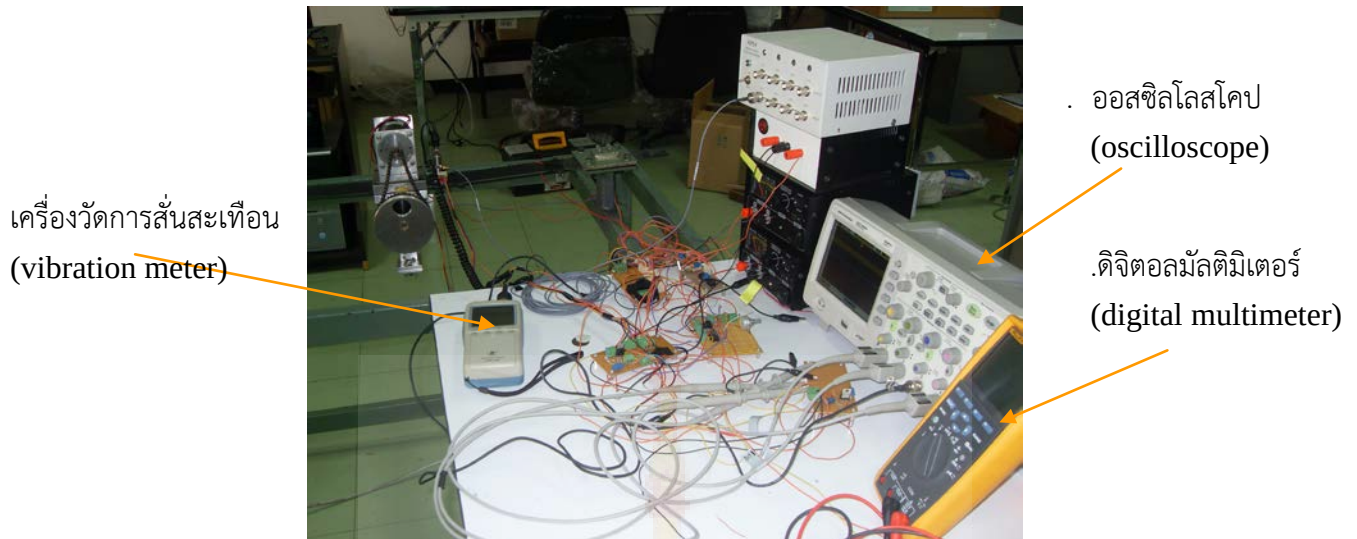
ในหัวข้อที่ผ่านมาข้างต้นได้กล่าวถึงการทดลองหาความเร่งอันเกิดจากความโน้มถ่วงหรือความเร่งสถิต ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทดลองวัดความเร่งพลวัต อันได้แก่การสั่นสะเทือนโดยในการทดลองหัวข้อนี้จะทำการวัดความเร่งที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของชุดทดลองซึ่งประกอบด้วย มวลไม่สมดุล (rotating unbalance) และแผ่นคานสปริงดังแสดงในรูป 3.19 ก และ รูป 3.19 ข



รูป 3.19 ก แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย

1. ชุดมวลไม่สมดุล (rotating unbalance)
 2. คานสปริงแผ่นปลายยึดแน่นทั้งสองด้าน (fixed-fixed beam)
 3. เครื่องวัดการสั่นสะเทือน (vibration meter) รุ่น VM – 82 ของบริษัท RION
 4. วงจรจ่ายไฟเลี้ยงให้กับตัววัดความเร่ง (MEMS)
 5. การ์ดสำหรับเปลี่ยนจากสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (A/D Card) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ การ์ดของบริษัท National Instrument (NI) รุ่น PCI 6221
 6. คอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผลสัญญาณ
 7. ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (multimeter)
 8. ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)
 9. ตัววัดความเร่ง (MEMS) ADXL335
 10. ตัววัดความเร่ง (piezoelectric) B&K Accelerometer
- . ชุดมวลไม่สมดุล (rotating unbalance)



รูป 3.19. ข การจัดวางอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจ

ลำดับขั้นตอนในการทดลอง

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS) กับความเร่งที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือน (vibration meter) ในแต่ละแนวแกนประกอบด้วยความเร่งในแนวแกน x (ติดตั้งให้แกน x มีทิศชี้ขึ้นในแนวดิ่ง) แนวแกน y (ติดตั้งให้แกน y มีทิศชี้ขึ้นในแนวดิ่ง) และแนวแกน z (ติดตั้งให้แกน z มีทิศชี้ขึ้นในแนวดิ่ง) โดยความถี่ที่ใช้ในการทดลอง จะใช้ที่ความถี่ประมาณ 6 Hz และ 11 Hz ซึ่งมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. จัดวางอุปกรณ์ดังแสดงในรูป 3.19
2. ปรับความยาวคาบให้ระบบมีความถี่ธรรมชาติประมาณ 6 Hz ติดตั้งตัววัดความเร่งให้แกน z ชี้ขึ้นในแนวดิ่ง
3. เริ่มปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อให้เกิดการสั่นสะเทือนจนกระทั่งความถี่มีค่าประมาณ 6 Hz หรือช่วงความถี่ธรรมชาติของระบบ ที่ช่วงความถี่ดังกล่าวหากความถี่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยจะทำให้การสั่นสะเทือนเปลี่ยนแปลงไปอย่างมากดังนั้นในการทดลองปรับความเร่งหรือขนาดของการสั่นสะเทือนที่ความถี่ 6 Hz สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงความถี่เล็กน้อยในช่วงความถี่ 6 Hz บันทึกค่าความเร่งที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนในโหมด RMS พร้อมกับวัดโวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความเร่งในโหมด ac
4. ติดตั้งตัววัดความเร่งใหม่โดยให้แกน y มีทิศชี้ขึ้นในแนวดิ่งและทำการทดลองตามข้อที่สาม
5. ติดตั้งตัววัดความเร่งโดยให้แกน z ให้มีทิศชี้ขึ้นในแนวดิ่งและทำการทดลองตามข้อที่สาม

6. ปรับชุดมอเตอร์ให้มีความถี่ธรรมชาติของระบบประมาณ 11 Hz ทำการทดลองดังเช่นข้อที่สาม ข้อที่สี่ และข้อที่ห้า
7. บันทึกรูปสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งและเครื่องวัดการสั่นสะเทือน (vibration meter) โดยผ่านทาง การ์ด A/D รุ่น PCI 6221 ของบริษัท National Instrument
8. เปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งและ จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือน

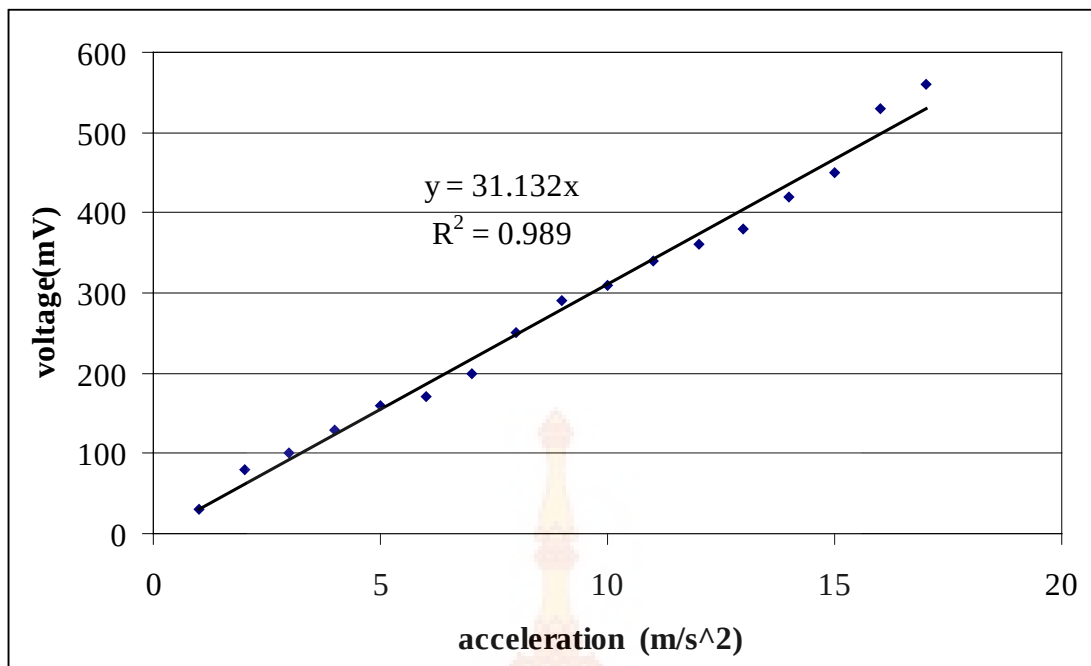


ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจ

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความเร่งกับความเร่งที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนที่ความ 6 Hz และ 11 Hz แสดงได้ดังตาราง 3.11

ตาราง 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน X ที่ ความถี่ 6 Hz

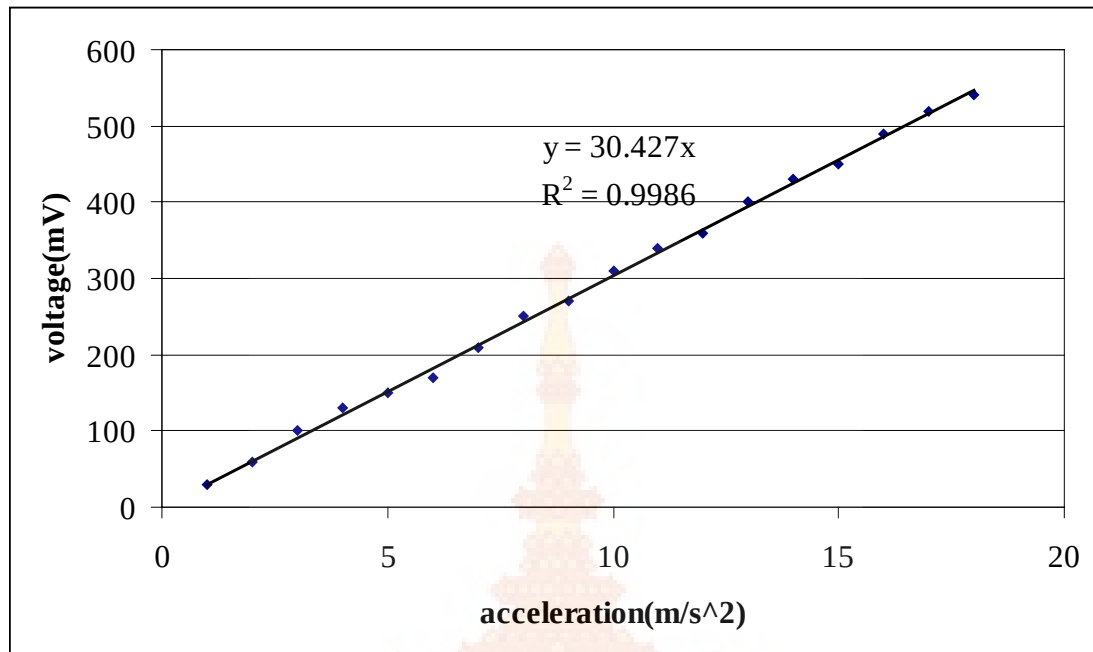
ความเร่ง $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$	โวลต์เตจ mV (ac)
1	31
2	80
3	100
4	130
5	160
6	170
7	200
8	250
9	290
10	310
11	340
12	360
13	380
14	420
15	450
16	530
17	560



รูป 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน x ที่ความถี่ 6 Hz

ตาราง 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน y ที่ ความถี่ 6 Hz

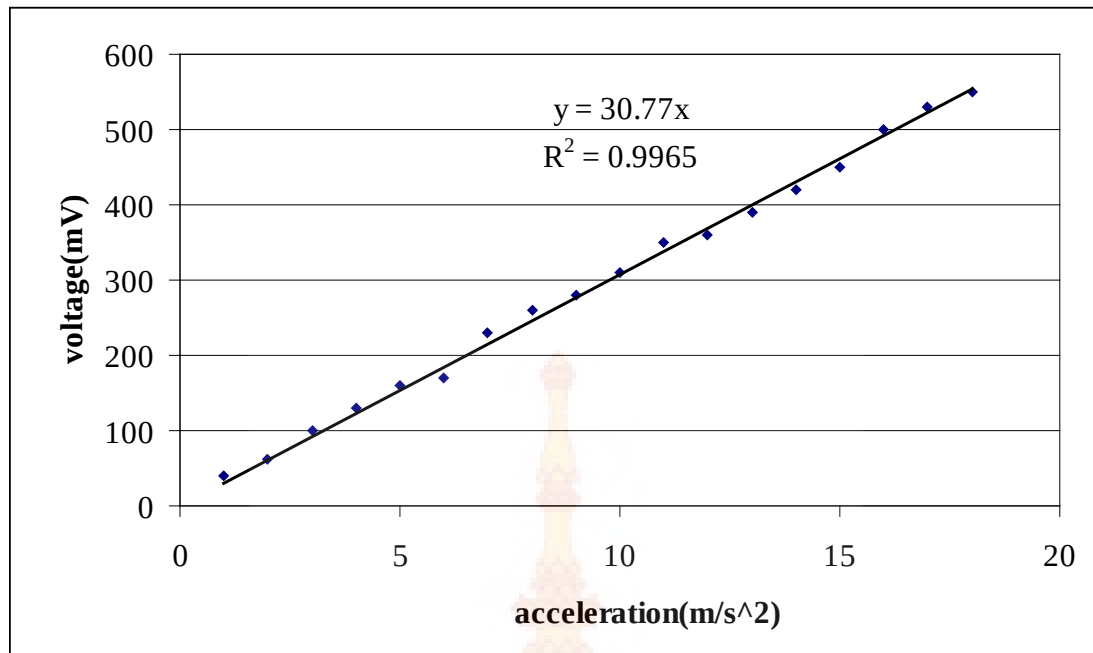
ความเร่ง $\left(\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}^2}\right)$	โวลต์เตจ $\mathbf{mV} \text{ (ac)}$
1	30
2	60
3	100
4	130
5	150
6	170
7	210
8	250
9	270
10	310
11	340
12	360
13	400
14	430
15	450
16	490
17	520
18	540



รูป 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน y ที่ความถี่ 6 Hz

ตาราง 3.13 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน z ที่ ความถี่ 6 Hz

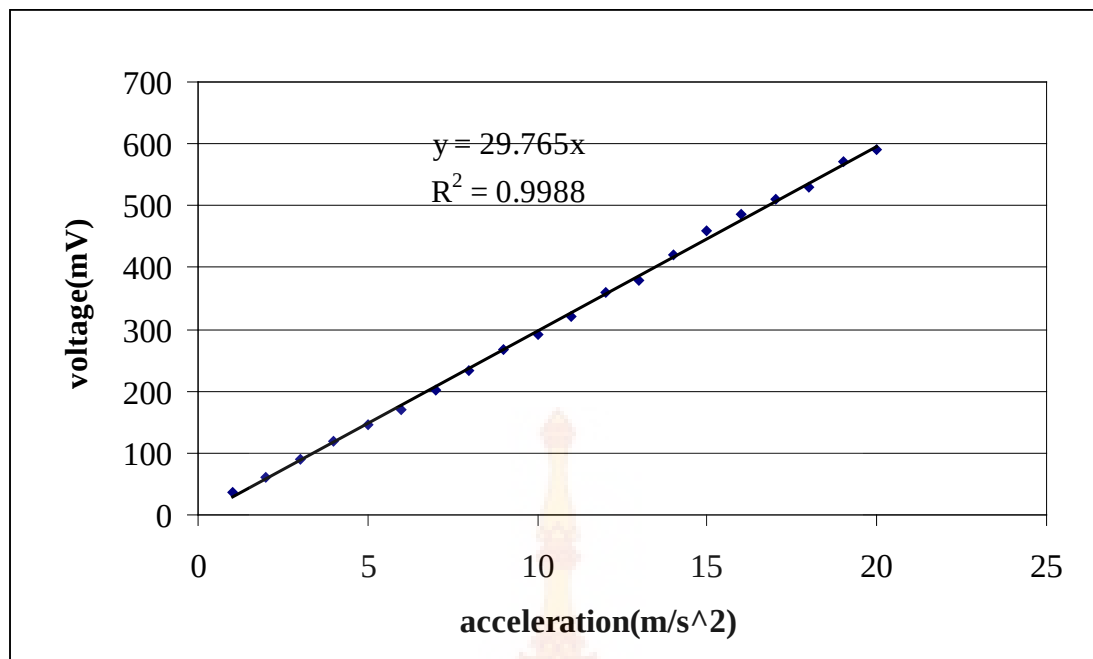
ความเร่ง $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$	โวลต์เตจ mV (ac)
1	40
2	62
3	100
4	130
5	160
6	170
7	230
8	260
9	280
10	310
11	350
12	360
13	390
14	420
15	450
16	500
17	530
18	550



รูป 3.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน z ที่ความถี่ 6 Hz

ตาราง 3.14 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน x ที่ ความถี่ 11 Hz

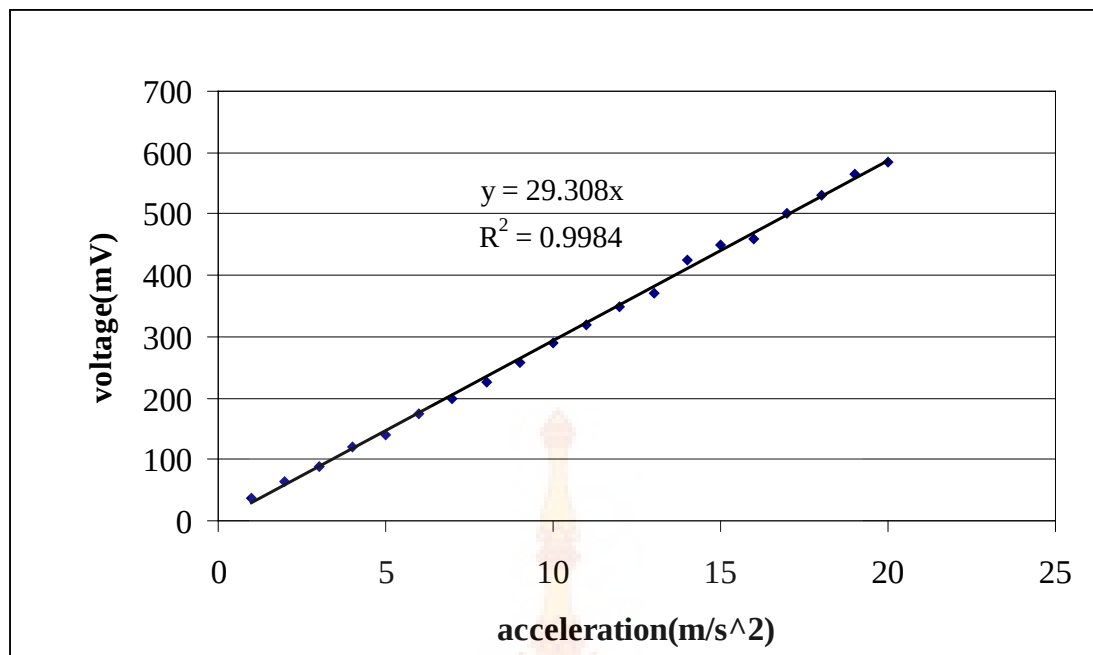
ความเร่ง $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$	โวลต์เตจ mV (ac)	ความเร่ง $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$	โวลต์เตจ mV (ac)
1	36	16	485
2	60	17	510
3	90	18	530
4	119	19	570
5	145	20	590
6	170	21	620
7	202	22	640
8	234	23	660
9	268	24	680
10	292	25	700
11	320	26	710
12	360	27	720
13	380	28	731
14	420	29	750
15	460	30	770



รูป 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน x ที่ความถี่ 11 Hz

ตาราง 3.15 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน y ที่ ความถี่ 11 Hz

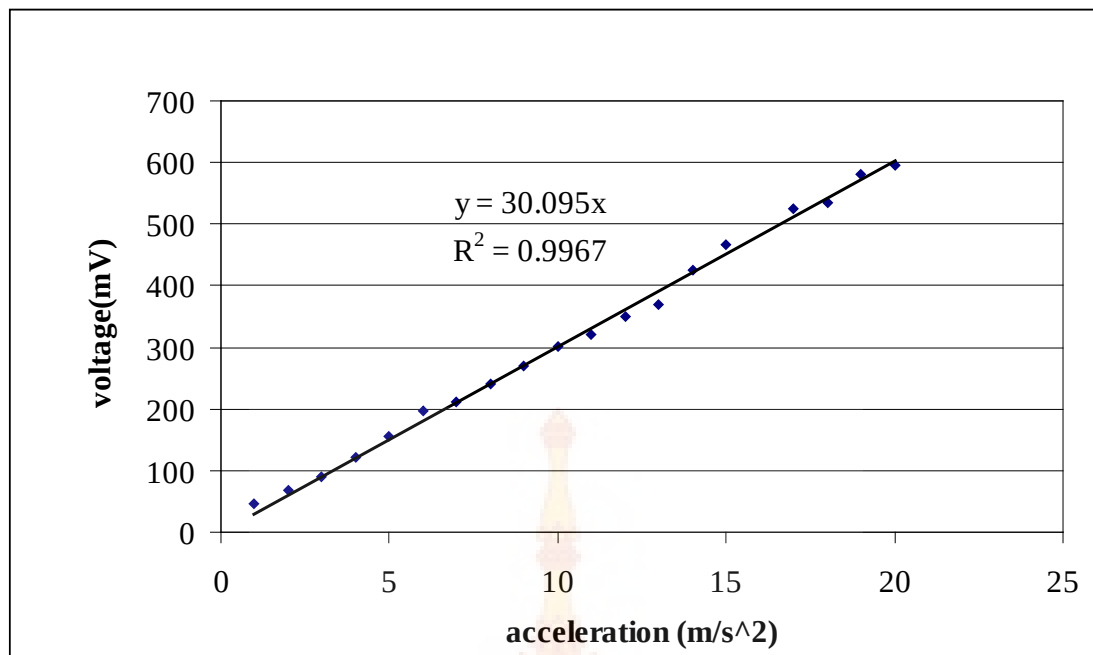
ความเร่ง $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$	โวลต์เตจ mV (ac)	ความเร่ง $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$	โวลต์เตจ mV (ac)
1	37	16	460
2	64	17	500
3	89	18	530
4	120	19	564
5	140	20	585
6	174	21	595
7	200	22	630
8	225	23	638
9	257	24	660
10	290	25	675
11	320	26	710
12	350	27	720
13	370	28	732
14	425	29	750
15	450	30	770



รูป 3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน y ที่ความถี่ 11 Hz

ตาราง 3.16 ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งในแนวแกน z ที่ ความถี่ 11 Hz

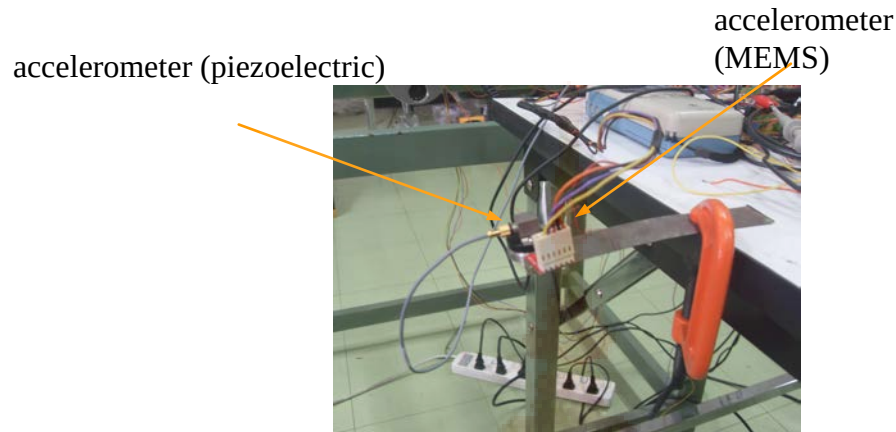
ความเร่ง $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)$	โวลต์เตจ mV (ac)
1	46
2	68
3	90
4	122
5	156
6	196
7	212
8	240
9	270
10	301
11	320
12	350
13	370
14	425
15	466
17	524
18	535
19	580
20	595



รูป 3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน z ที่ความถี่ 11 Hz

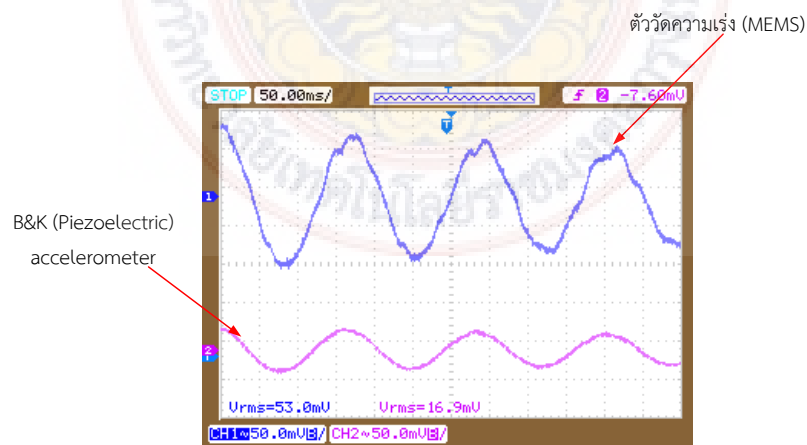
3.3.2 การเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS) กับสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric)

ในการทดลองเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่ง(MEMS) กับตัววัดความเร่ง ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ทำได้โดยติดตั้งตัววัดความเร่งทั้งสองตัวไว้บนแผ่นคานดังแสดงในรูป 3.26



รูป 3.26 การติดตั้งตัววัดความเร่งกับคานแบบคานทิลเวอร์

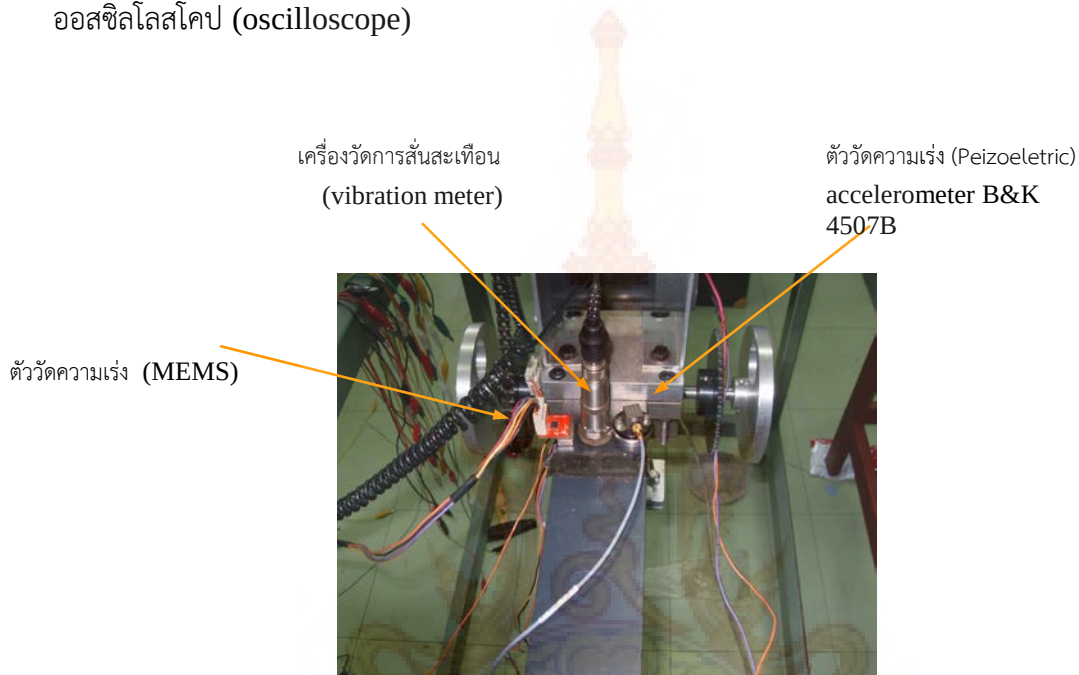
อุปกรณ์ประกอบด้วยตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) B&K รุ่น 4807B แบบ IEPE ความไว (sensitivity) 100 mV/g ในการทดลองนี้จะให้ไฟเลี้ยงแบบกระแสคงที่ (constant current) 4 mA โดยไม่มีการกรองสัญญาณหรือขยายสัญญาณใด ๆ และตัววัดความเร่ง (MEMS) ADXL 335 ทำการทดลองโดยการให้เงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) โดยการดึงแล้วปล่อยจะได้สัญญาณดังแสดงในรูป 3.27



รูป 3.27 สัญญาณจากตัววัดความเร่งเมื่อเกิดการสั่นแบบอิสระ

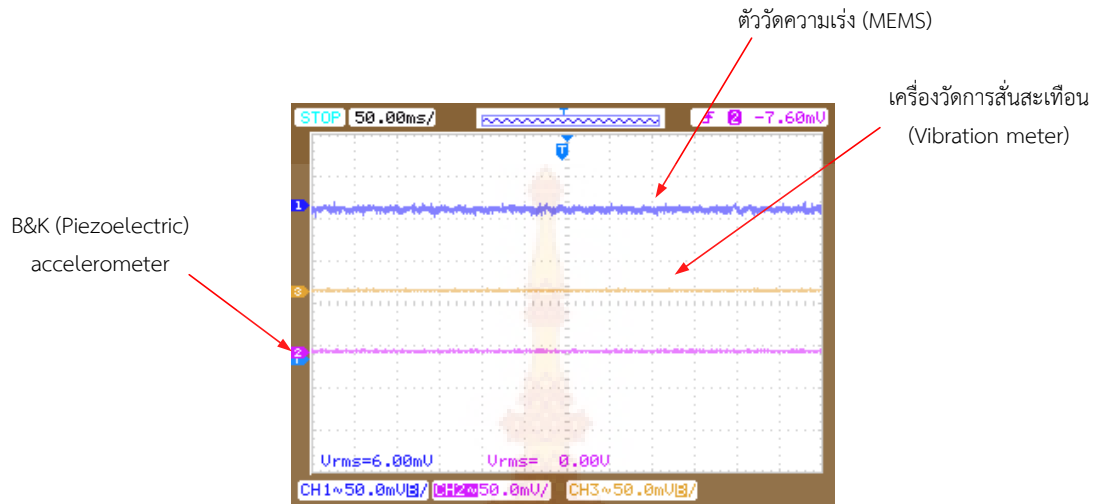
3.3.3 การทดลองใช้ตัววัดความเร่ง (MEMS) กับการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรกล

เพื่อที่จะทดลองถึงความเป็นไปได้ในการนำไปประยุกต์ใช้ตัววัดความเร่ง (MEMS) กับเครื่องจักรกลในงานจริง ในการทดลองนี้จึงทดลองเปรียบเทียบให้เห็นความแตกต่างโดยเริ่มจากการติดตั้งตัววัดความเร่งทั้งสามอันได้แก่ ตัววัดความเร่ง (MEMS) ตัววัดความเร่งจากเครื่องวัดการสั่นสะเทือน (Vibration meter) รุ่น VM 82 RION และตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) accelerometer รุ่น B&K 4507 B โดยการติดตั้งตัววัดทั้งสามบนแผ่นคานที่มีมอเตอร์ขับเคลื่อนไม่สมดุลดังแสดงในรูป 3.28 จากนั้นต่อสัญญาณจากตัววัดความเร่งเข้าสู่ออสซิลโลสโคป (oscilloscope)

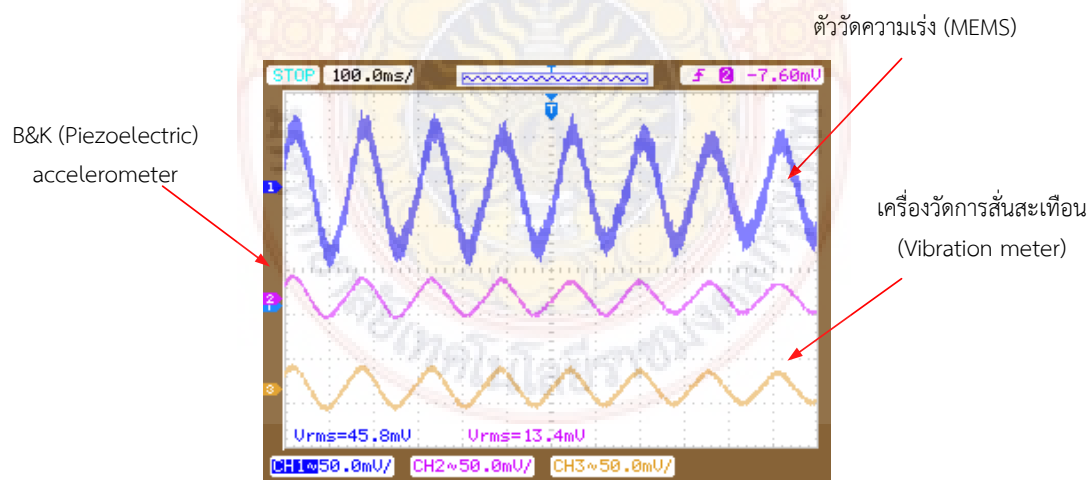


รูป 3.28 การติดตั้งตัววัดความเร่งเข้ากับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนไม่สมดุล

เมื่อติดตั้งตัววัดความเร่งทั้งสามบนแผ่นคานโดยยังไม่เปิดมอเตอร์พบว่าสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งทั้งสามแสดงได้ดังรูป 3.29 ถึง 3.33

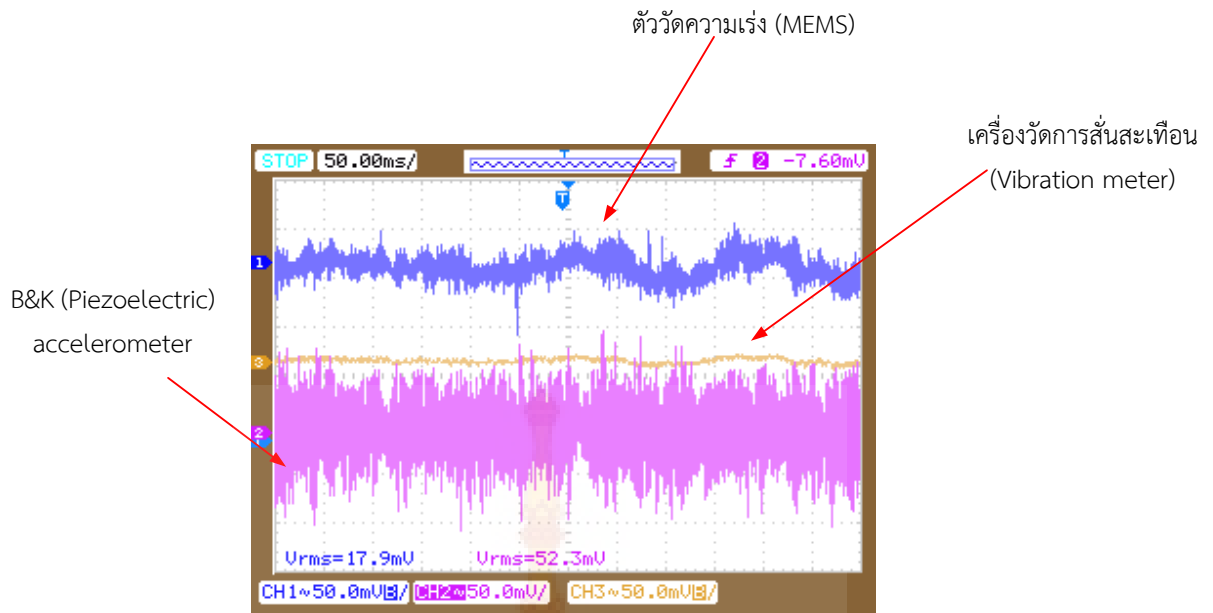


รูป 3.29 สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อไม่เกิดการสั่นสะเทือน
เมื่อทดสอบการสั่นแบบอิสระโดยการยกแผ่นคานแล้วปล่อยเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial condition) พบว่าสัญญาณที่ได้สามารถแสดงได้ดังรูป 3.30



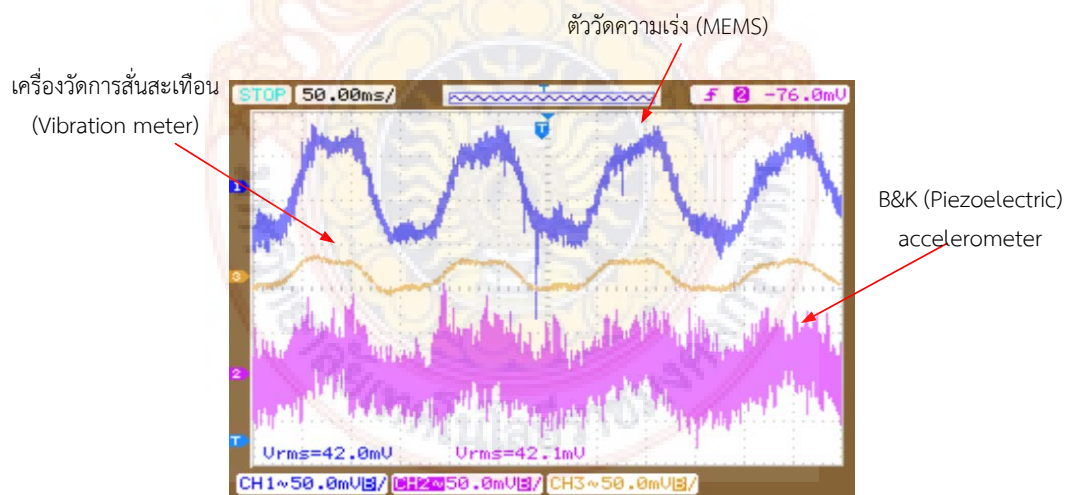
รูป 3.30 สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนแบบอิสระ

เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนแต่การสั่นสะเทือนยังไม่รุนแรงสัญญาณที่ได้แสดงได้ดังรูป 3.31



รูป 3.31 สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน

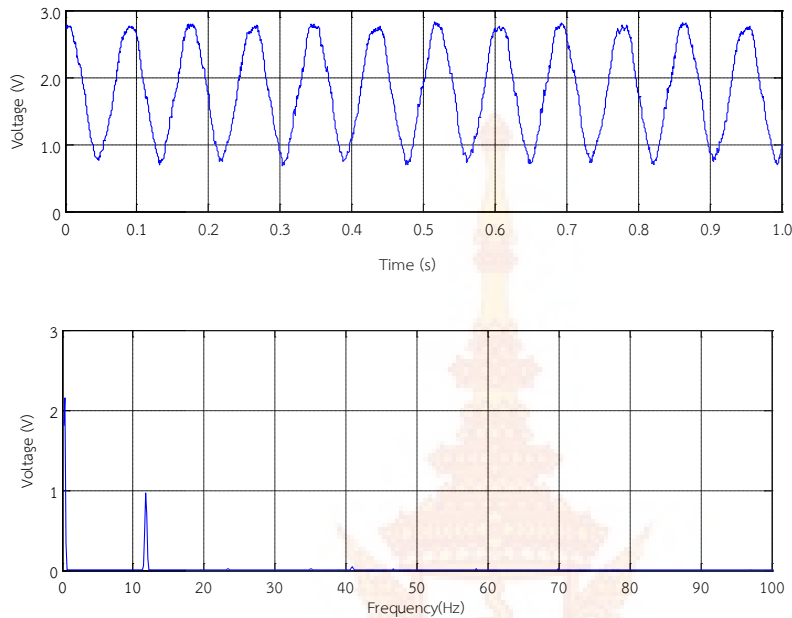
เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุนเข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติพบว่าการสั่นสะเทือนมีความรุนแรงขึ้นสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งสามารถแสดงได้ดังรูป 3.32



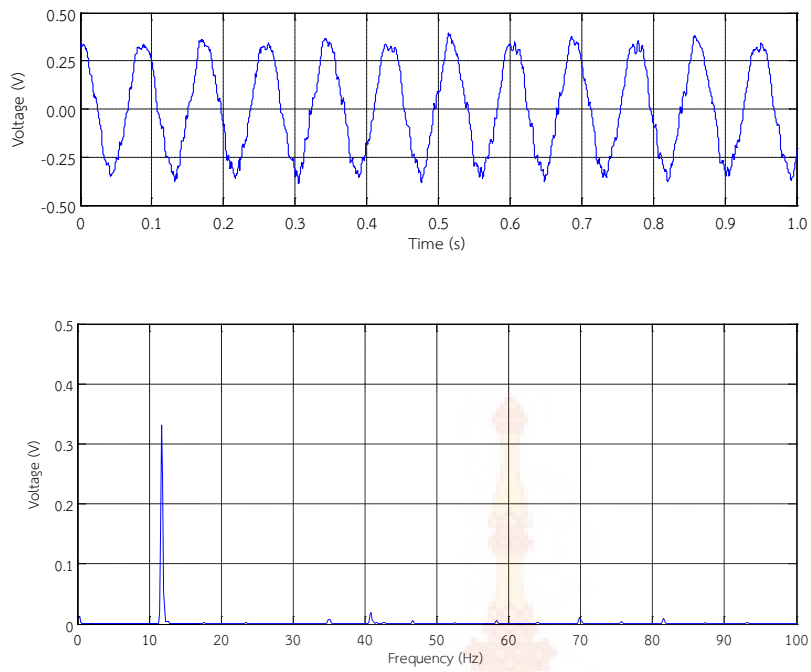
รูป 3.32 สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งเมื่อเกิดการสั่นสะเทือนใกล้ความถี่ธรรมชาติ

การเปรียบเทียบการวิเคราะห์สเปกตรัมความถี่ที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS) และเครื่องวัดการสั่นสะเทือน

ในการทดลองหาสเปกตรัมความถี่ที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS) เปรียบเทียบกับสเปกตรัมที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือน โดยใช้ A/D card ส่งผลไปยังคอมพิวเตอร์โดยทดลองที่ความถี่ 11 Hz พบว่าสเปกตรัมความถี่สามารถแสดงได้ดังรูป 3.33 ก และ ข



รูป 3.33 ก สัญญาณความถี่และสเปกตรัมที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS)



รูป 3.33 ข สัญญาณความถี่และสเปกตรัมที่ได้จากตัววัดความแรงจากเครื่องวัดการสั่นสะเทือน

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง (Experimental Analysis and Discussion)

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองในบทที่ 3 พร้อมกับวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งสามารถแบ่งออกได้ดังนี้คือ

4.1 วิเคราะห์ผลการทดลองการวัดความเร่งแบบสถิต

จากผลการทดลองดังกราฟรูป 3.7 รูป 3.8 และรูป 3.9 พบว่าหากตัววัดความเร่ง (MEMS) หมุนรอบแกนใดจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโวลต์เตจในแนวแกนนั้น สำหรับแกนที่เหลืออีกสองแกนจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยจะขึ้นอยู่กับมุมที่กระทำในแนวตั้งกล่าวคือหากแกนนั้นมีทิศชี้ขึ้นในแนวตั้งพบว่าโวลต์เตจที่ได้จะมีค่าสูงสุดคือประมาณ 1.8 V และหากแกนนั้นมีทิศชี้ลงพบว่าค่าโวลต์เตจที่ได้จะมีค่าต่ำสุดคือประมาณ 1.2 V

สำหรับความไวของตัววัดความเร่ง (MEMS) หากกำหนดให้ทิศของตัววัดความเร่งในทิศชี้ขึ้นเท่ากับ $+g$ และทิศของตัววัดความเร่งในทิศชี้ลงเป็น $-g$ แล้วพบว่าความไวของตัววัดความเร่งหาได้จากสมการ 3.4 สมการ 3.5 และสมการ 3.6 โดย X_0 , Y_0 และ Z_0 จากสมการ 3.1 สมการ 3.2 และสมการ 3.3

$$X_0 = 1.5040 \text{ V}$$

$$Y_0 = 1.5024 \text{ V}$$

$$Z_0 = 1.5083 \text{ V}$$

จะเห็นได้ว่าโวลต์เตจในแนวแกน x แกน y และแกน z มีค่าประมาณ 1.5 V หรือ $x_0 = \left(\frac{V_{cc}}{2}\right)$ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pooya Najafi Zanjani *et al* (2010)

จากตาราง 3.1 ตาราง 3.2 และ ตาราง 3.3 จะได้

$$X_1 = 1.8015 \text{ V} \quad Y_1 = 1.5200 \text{ V} \quad Z_1 = 1.5100 \text{ V}$$

$$X_2 = 1.5130 \text{ V} \quad Y_2 = 1.8018 \text{ V} \quad Z_2 = 1.5150 \text{ V}$$

$$X_3 = 1.5105 \text{ V} \quad Y_3 = 1.4954 \text{ V} \quad Z_3 = 1.8075 \text{ V}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} S_x &= \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (X_2 - X_0)^2 + (X_3 - X_0)^2} \\ &= \sqrt{(1.8015 - 1.5040)^2 + (1.5130 - 1.5040)^2 + (1.5105 - 1.5040)^2} \\ &= 297.71 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_y &= \sqrt{(Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2} \\
 &= \sqrt{(1.5200 - 1.5040)^2 + (1.8018 - 1.5040)^2 + (1.4954 - 1.5040)^2} \\
 &= 298.35 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_z &= \sqrt{(Z_1 - Z_0)^2 + (Z_2 - Z_0)^2 + (Z_3 - Z_0)^2} \\
 &= \sqrt{(1.5100 - 1.5083)^2 + (1.5150 - 1.5083)^2 + (1.8075 - 1.5083)^2} \\
 &= 299.27 \text{ mV}
 \end{aligned}$$

หรือค่าความไวในแนวแกน $x = 297.71 \text{ mV/g}$

ค่าความไวในแนวแกน $y = 298.35 \text{ mV/g}$

ค่าความไวในแนวแกน $z = 299.27 \text{ mV/g}$

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติที่ระบุไว้มีความไวเท่ากับ 300 mV/g พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน

ในการหาเมตริกซ์ตัวประกอบสเกล (scale factor matrix) ดังแสดงในสมการ 3.14.1 โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดพบว่าวิธีการดังกล่าวสามารถใช้หาเมตริกซ์ตัวประกอบสเกลเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจกับความเร่งได้โดยมีความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการ 3.12.1 ถึง 3.12.3 วิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ข้อมูลตำแหน่งทั้งหมด 6 ตำแหน่ง คือ $x_{\uparrow}, x_{\downarrow}, y_{\uparrow}, y_{\downarrow}, z_{\uparrow}$ และ $z_{\downarrow}$ โวลต์เตจทั้งสามค่าในแต่ละตำแหน่งที่ออกจากตัววัดความเร่งจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาเมตริกซ์ตัวประกอบสเกล $[S]$ และเมื่อได้เมตริกซ์ตัวประกอบสเกล แล้วนำมาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎี สำหรับสมการทางทฤษฎีสามารถหาได้จากสมการ 3.18.1 ถึง 3.18.3 พบว่ามีความใกล้เคียงกันโดยการเปรียบเทียบสามารถแสดงได้ดังรูป 3.13 ถึงรูป 3.18

การประยุกต์ใช้ตัววัดความเร่งในการบ่งบอกทิศทาง (orientation) ของวัตถุ

ในการประยุกต์ตัววัดความเร่งเพื่อใช้บ่งบอกทิศทางนั้นไม่สามารถใช้ตัววัดความเร่งเพียงตัวเดียวในการบ่งบอกทิศทางของวัตถุเนื่องจากตัววัดความเร่งจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโวลต์เตจในแกนทั้งสามเมื่อมีการหมุนตัววัดความเร่งรอบแกนที่ชี้ขึ้นหรือชี้ลงในแนวดิ่งหรือแกนที่มีทิศทางเดียวกับแรงโน้มถ่วงของโลกซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Iuri Frosio *et al.* [5.] เช่นกัน

4.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการวัดความเร่งพลวัต

ในการทดลองหาความเร่งพลวัตโดยใช้การสั่นสะเทือนที่ความถี่ 6 Hz และ 11 Hz แสดงได้ดังกราฟรูป 3.20 ถึงกราฟรูป 3.25 โดยการวัดโวลต์เตจแบบ ac และวัดการความเร่งในโหมด RMS พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับโวลต์เตจในแนวแกน x ในแนวแกน y และในแนวแกน z ทั้งที่ความถี่ 6 Hz และ 11 Hz ในช่วงความเร่ง $0 \frac{\text{mV}}{\text{m/s}^2}$ ถึง $20 \frac{\text{mV}}{\text{m/s}^2}$ หรือ 0 g ถึง 2 g มีลักษณะเป็นเชิงเส้นและเมื่อหาสมการเชิงเส้นพบว่าสมการทั้งหกสมการมีความชันประมาณ $30 \frac{\text{mV}}{\text{m/s}^2}$ ซึ่งความชันมีความหมายถึงความไวของตัววัดความเร่ง ดังนั้นจากการทดลองพบว่าตัววัดความเร่งมีความไวประมาณเท่ากับ $300 \frac{\text{mV}}{\text{g}}$ ซึ่งตรงกับคุณสมบัติของตัววัดความเร่งในช่วงความเร่ง 0 g ถึง 2 g

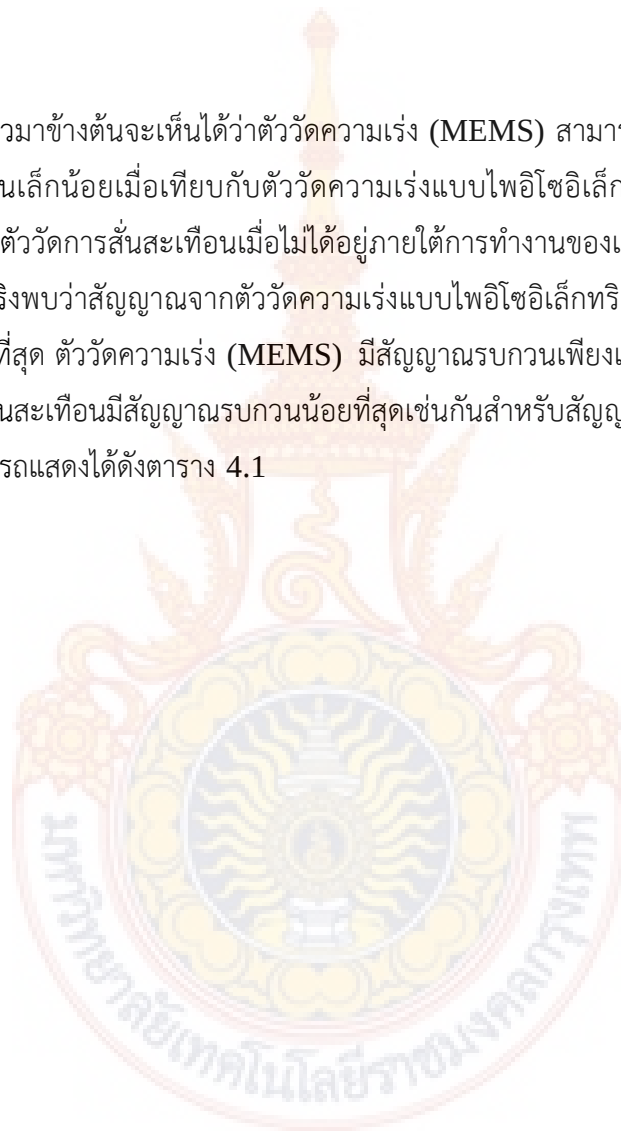
การเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS) กับสัญญาณตัววัดความเร่งไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric)

การทดลองเปรียบเทียบสัญญาณจากตัววัดความเร่ง (MEMS) กับตัววัดความเร่งไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) B&K 4507 B ทำได้โดยการติดตัววัดความเร่งทั้งสองบนแผ่นคานที่ยึดติดแบบคานทิลเวอร์ (cantilever beam) ดังแสดงในรูป 3.26 ทำให้เกิดการสั่นแบบอิสระโดยการดึงแล้วปล่อยพบว่าสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคปมีลักษณะดังกราฟรูป 3.27 จากรูปจะเห็นได้ว่าสัญญาณทั้งสองมีรูปร่างสัญญาณที่เหมือนกันและมีเฟส (phase) เท่ากันหากแต่สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่ง (MEMS) มีแอมพลิจูดสูงกว่าตัววัดความเร่งไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) โดยเห็นได้จาก V_{rms} ของตัววัดความเร่ง (MEMS) มีค่า 53.0 mV ส่วน ในขณะที่ V_{rms} ของตัววัดความเร่งไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) มีค่าเท่ากับ 16.9 mV หรือน้อยกว่าตัววัดความเร่ง (MEMS) ประมาณ 3 เท่าทั้งนี้เนื่องจากความไวของตัววัดความเร่ง (MEMS) มีค่าสูงกว่าตัววัดความเร่งไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ประมาณ 3 เท่า

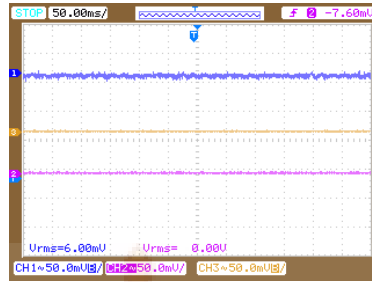
นอกจากนี้ในการทดลองยังได้ทดลองเปรียบเทียบสัญญาณความเร่งที่เกิดจากการสั่นสะเทือนโดยการติดตัววัดความเร่งสามชนิดประกอบด้วยตัววัดความเร่ง (MEMS) ตัววัดความเร่งจากเครื่องวัดการสั่นสะเทือน ตัววัดความเร่งไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ดังแสดงในรูป 3.28 จากนั้นศึกษาสัญญาณทั้งสามชนิดเมื่อยังไม่เกิดการสั่นสะเทือนพบว่าขณะยังไม่เกิดการสั่นสะเทือนสัญญาณจากตัววัดความเร่งทั้งสามดังแสดงในรูป 3.29 มีลักษณะที่คล้ายกันคือไม่มีรูปร่างสัญญาณแต่สัญญาณจากตัววัดความเร่ง (MEMS เส้นสีน้ำเงิน) เกิดสัญญาณรบกวน (noise) มากกว่าสัญญาณจากเครื่องวัดการสั่นสะเทือน (เส้นสีน้ำตาล) และ ตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric เส้นสีม่วง) เมื่อทดสอบการสั่นแบบอิสระโดยการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ดึงแล้วปล่อยพบว่าสัญญาณทั้งสามมีลักษณะเดียวกันโดยมีความถี่และเฟสเหมือนกันดังแสดงในรูป 3.30 แต่แอมพลิจูดต่างกันทั้งนี้เนื่องจากความไวของตัววัดความเร่งแต่ละตัวไม่เท่ากันนั่นเอง เมื่อเริ่มหมุนมอเตอร์พบว่าสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งทั้งสามแสดงได้ดังรูป 3.31 จากรูปพบว่าเกิดสัญญาณ

รบกวนเล็กน้อยกับตัววัดความเร่ง (MEMS) และเกิดสัญญาณรบกวนมากกับตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ในขณะที่ตัววัดความเร่งที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนมีสัญญาณรบกวนน้อยมากทั้งนี้เป็นผลมาจากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนถูกออกแบบให้มีการกรองสัญญาณรบกวน (filter) ทำให้สัญญาณที่ได้มีความชัดเจน เมื่อปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพิ่มขึ้นจนกระทั่งเกิดการสั่นสะเทือนในแอมพลิจูดที่สูงพบว่า สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) ยังคงมีสัญญาณรบกวนมากที่สุดเช่นกัน และเกิดสัญญาณรบกวนกับตัววัดความเร่ง (MEMS) เล็กน้อยโดยสัญญาณจากตัววัดความเร่งที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนยังคงมีน้อยที่สุด

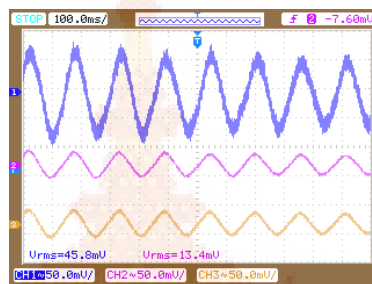
จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าตัววัดความเร่ง (MEMS) สามารถวัดความเร่งพลวัตได้โดยมีสัญญาณรบกวนเล็กน้อยเมื่อเทียบกับตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) และสัญญาณที่ได้จากตัววัดการสั่นสะเทือนเมื่อไม่ได้อยู่ภายใต้การทำงานของเครื่องจักร หากแต่เมื่อใช้วัดกับเครื่องจักรจริงพบว่าสัญญาณจากตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric) มีสัญญาณรบกวนมากที่สุด ตัววัดความเร่ง (MEMS) มีสัญญาณรบกวนเพียงเล็กน้อยและสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนมีสัญญาณรบกวนน้อยที่สุดเช่นกันสำหรับสัญญาณจากตัววัดความเร่งที่สภาวะต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตาราง 4.1



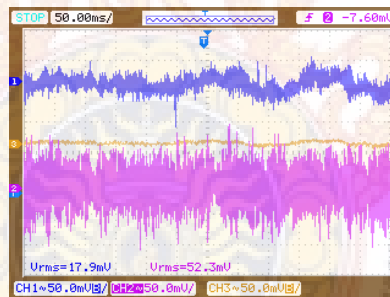
ตาราง 4.1 สัญญาณจากตัววัดความเร่งทั้งสามชนิดที่สภาวะต่าง ๆ



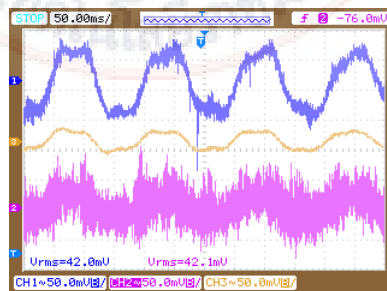
สัญญาณขณะยังไม่เกิดการสั่นสะเทือน



สัญญาณเมื่อเกิดการสั่นแบบอิสระ



สัญญาณเมื่อเริ่มมอเตอร์เริ่มหมุน



สัญญาณเมื่อมอเตอร์หมุนใกล้ความเร็วธรรมชาติ

สำหรับการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งกับสัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดการสั่นสะเทือนสามารถแสดงได้ดังรูป 3.33 ก และ 3.33 ข จากรูปจะเห็นว่าไม่ว่าแสดงผลแบบโดเมนเวลา หรือโดเมนความถี่สัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันอย่างมาก โดยกราฟแสดงให้เห็นว่าในโดเมนเวลาสัญญาณที่ได้จากตัววัดความเร่งทั้งสองมีรูปคลื่นที่เหมือนกัน และไม่เกิดการเปลี่ยนเฟส (phase) แต่อย่างไรก็ตามมีความแตกต่างจากงานวิจัยของ A. Albarbar *et al.*[3] ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากความที่ใช้ในการทดลองแตกต่างกันหรือการติดตั้งตัววัดความเร่งมีความแตกต่างกัน



บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย (Conclusion)

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะตลอดจนการวิจัยในขั้นตอนต่อไปซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัยการวัดความเร่งแบบสถิต

ในการวัดความเร่งแบบสถิตพบว่าเมื่อตัววัดความเร่ง (MEMS) หมุนรอบแกนใดจะไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโวลต์เตจในแนวแกนนั้น

โวลต์เตจในแต่ละแกนจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อแกนนั้นมีการเปลี่ยนแปลงมุมที่กระทำกับแกนที่ชี้ในแนวตั้งหรือแกนเดียวกับแรงโน้มถ่วงของโลก

ในการประยุกต์ใช้ตัววัดความเร่ง (MEMS) ในการบ่งบอกทิศทาง (orientation) ไม่สามารถกระทำโดยใช้ตัววัดความเร่ง (MEMS) เพียงตัวเดียวเนื่องจากตัววัดความเร่งจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงโวลต์เตจเมื่อหมุนรอบแกนที่ชี้ในแนวตั้ง

5.2 สรุปผลการวิจัยการวัดความเร่งพลวัต

ตัววัดความเร่งจะมีการเปลี่ยนแปลงโวลต์เตจเมื่อเกิดความเร่งในแนวแกนนั้นหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงมุมที่กระทำกับแกนในแนวตั้ง หรืออาจกล่าวได้ว่านอกจากความเร่งในแนวแกนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโวลต์เตจแล้วการเปลี่ยนมุมหรือการเอียงยังมีผลต่อโวลต์เตจที่ได้จากตัววัดความเร่งอีกด้วยและด้วยคุณสมบัตินี้จึงทำให้ตัววัดความเร่ง (MEMS) ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์ หรือ tablet ดังนั้นในการประยุกต์ตัววัดความเร่งในแนวแกนเช่นการสั่นสะเทือนจะต้องคำนึงถึงการเอียงด้วยเนื่องจากตัววัดความเร่ง (MEMS) มีการเปลี่ยนแปลงโวลต์เตจเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมที่กระทำกับแกนที่ชี้ในแนวตั้ง

5.3 การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของตัววัดความเร่ง (MEMS) กับตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric)

จากการทดลองในบทที่ 3 สามารถสรุปข้อดีของตัววัดความเร่ง (MEMS) คือ

1. ราคาถูก และง่ายในการใช้งาน วงจรไฟเลี้ยงไม่มีความสลับซับซ้อน
2. มีน้ำหนักเบาและความไวสูงจึงไม่ส่งผลกระทบต่อมวลที่เพิ่มขึ้นของระบบเช่นในงานวิเคราะห์โมดัลของโครงสร้าง
3. จากการทดลองพบว่าหากนำไปใช้วัดเครื่องจักรในงานจริงสัญญาณรบกวนจะน้อยมากเมื่อเทียบกับตัววัดความเร่งแบบไพโซอิเล็กทริก (ไม่มีการประมวลผลสัญญาณ) ดังนั้นในการประยุกต์เอาตัววัดความเร่ง (MEMS) ในการวัดการสั่นสะเทือนจึงมีความเป็นไปได้มากสำหรับข้อเสียของตัววัดความเร่ง (MEMS) คือ
 1. ย่านในการวัดความเร่งแคบคืออยู่ระหว่าง 0g ถึง 3g
 2. การเอียงตัววัดความเร่งจะส่งผลกระทบต่อโวลต์เตจจากตัววัดความเร่งทำให้เกิดสัญญาณ

ความเร่งโดยที่ยังไม่เกิดความเร่งขึ้น

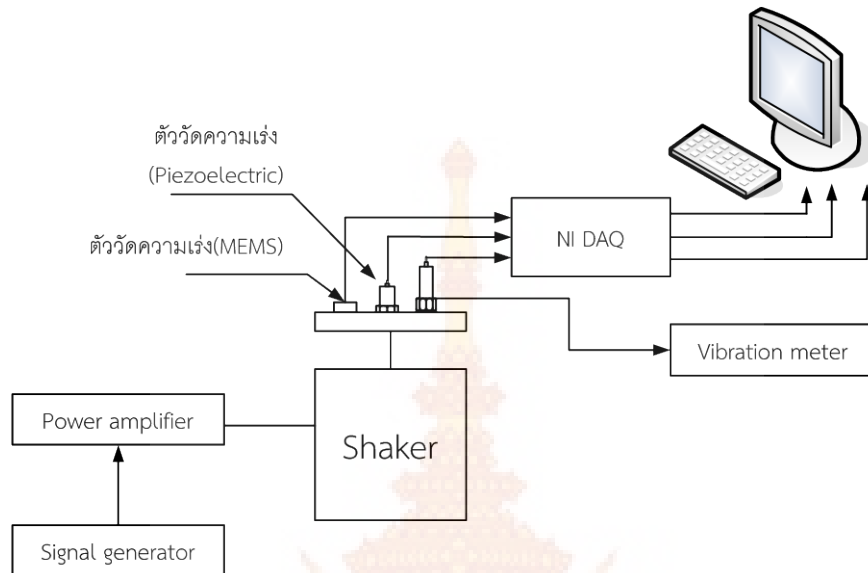
3. ยังไม่ได้รับการรับรองการเปรียบเทียบ

อย่างไรก็ตามการประยุกต์นำไปใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องจักรจริงยังต้องทำการทดลองเปรียบเทียบอีกมาก และต้องหาวิธีการกำจัดโวลต์เตจที่เกิดขึ้นจากการเอียงซึ่งพบว่าสัญญาณที่ได้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร่งอย่างเดียวหากแต่การเอียงก็มีผลต่อโวลต์เตจเช่นกันซึ่งมีแนวทางที่เป็นไปได้เช่นการนำสัญญาณจากตัววัดความเร่ง (MEMS) อีกตัวหนึ่งเข้ามาชดเชยโวลต์เตจที่เกิดจากการเอียงหรืออาจทำได้โดยการนำสัญญาณจากแกนอื่น ๆ ของตัววัดความเร่งมาชดเชยโวลต์เตจที่เกิดจากการเอียงตัววัดความเร่ง (MEMS) และต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อนมากขึ้นดังจะได้เสนอในหัวข้อ 5.4 ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติตัววัดความเร่ง ADXL 335

parameter	คุณสมบัติ ตามที่ระบุ (data sheet)	ผลการทดลอง
ความไว เมื่อให้ไฟเลี้ยง $V_s = 3\text{ V}$		
แกน x	300 mV/g	300 mV/g
แกน y	300 mV/g	300 mV/g
แกน z	300 mV/g	300 mV/g
ค่าโวลต์เตจที่ระดับความเร่งเท่ากับศูนย์ (ZERO g BIAS LEVEL) เมื่อไฟเลี้ยง V_s เท่ากับ 3 V		
แกน x	1.5 V	1.5040 V
แกน y	1.5 V	1.5024 V
แกน z	1.5 V	1.5083 V

5.4 งานวิจัยในขั้นตอนต่อไป

ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่องการสร้างแรงให้กับตัววัดความเร่งคือสามารถทดลองได้เพียง 0 g ถึง 2 g ที่ความถี่ 6 Hz และ 11 Hz ซึ่งไม่สามารถทดสอบตัววัดความเร่งในช่วงที่นอกเหนือช่วงความถี่ดังกล่าวหรือนอกช่วงความถี่ดังกล่าวได้ดังนั้นหากต้องการทดสอบตัววัดความเร่งให้ครอบคลุมจะต้องอาศัยชุดทดสอบดังแสดงในรูป 5.1



รูป 5.1 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องใช้ในการพัฒนางานวิจัย

การทดลองในงานวิจัยนี้ใช้ความถี่ในการทดลองเพียงสองความถี่คือที่ 6 Hz และ 11 Hz สำหรับการควบคุมแอมพลิจูดทำได้แต่เพียงประมาณเท่านั้นโดยการปรับความถี่ของการสั่นให้เข้าใกล้ความถี่ธรรมชาติของระบบเพื่อให้เกิดการสั่นพ้องและที่ความถี่นี้การปรับความถี่ให้เปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนได้เป็นอย่างมากดังนั้นความถี่ที่ใช้ในการทดลองจึงเป็นเพียงค่าประมาณในช่วงการสั่นพ้องซึ่งเป็นข้อจำกัดในงานวิจัยครั้งนี้ ดังนั้นในการพัฒนางานวิจัยต่อไปจะต้องใช้ชุดทดลองที่สามารถควบคุมทั้งความถี่และควบคุมทั้งแอมพลิจูดของการสั่นไปพร้อมกัน

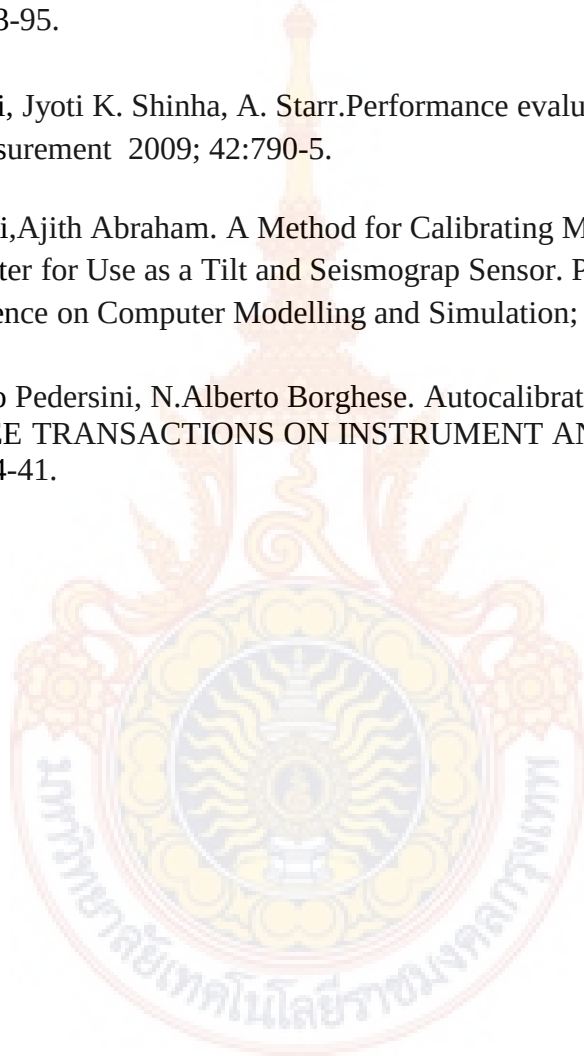
อุปกรณ์ที่สามารถควบคุมความถี่และแอมพลิจูดของการสั่นสะเทือนคือชุดสร้างแรงสั่นสะเทือนซึ่งประกอบด้วยตัวขยายกำลัง (power amplifier) และตัวเขย่า (shaker) เป็นหลัก ดังแสดงในรูป 5.1 เนื่องจากชุดสร้างการสั่นสะเทือนนี้สามารถสร้างแรงสั่นสะเทือนที่ความถี่ต่าง ๆ ได้ ซึ่งจะทำให้ได้ผลการทดลองมีแม่นยำครอบคลุมย่านความถี่ได้มากขึ้น



ภาคผนวก

เอกสารอ้างอิง

- [1.] เอกชัย ดีศิริ.การทดสอบและพัฒนาการออกแบบอุปกรณ์วัดความเร่งสำหรับการออกแบบทางเทคโนโลยี
เครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค.รายงานวิจัย.มหาวิทยาลัยศรีปทุม; 2548.
- [2.] หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ. การตรวจสอบความสั่นสะเทือนเครื่องจักร. กรุงเทพฯ ฯ: บริษัทซีเอดียูเคชั่นจำกัด
(มหาชน) ;2552.หน้า 83-95.
- [3.] A.Albarbar, A. Badri, Jyoti K. Shinha, A. Starr.Performance evaluation of MEMS
accelerometers. Measurement 2009; 42:790-5.
- [4.]. Pooya Najafi Zanjani,Ajith Abraham. A Method for Calibrating Micro Electro Mechanical
Systems Accelerometer for Use as a Tilt and Seismograp Sensor. Proceedings of the 12th
International Conference on Computer Modelling and Simulation; 2010. p. 637-641.
- [5.] Iuri Frosio, Federico Pedersini, N.Alberto Borghese. Autocalibration of MEMS
Accelerometers.IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENT AND MEASUREMENT.
2009 June; 58: 2034-41.



บรรณานุกรม

Floyd, T.L. Electronic Devices. U.S.A. :Prentice-Hall; 1996.

Kelly,S.G. Fundamentals of Mechanical Vibrations. 2nd ed. Singapore: McGraw-Hill; 2000.

Rao, S.S. Mechanical Vibrations.SI ed. Singapore: Pearson; 2005.

หทัยเทพ วงศ์สุวรรณ. การตรวจสอบความสั่นสะเทือนเครื่องจักร. กรุงเทพฯ ฯ: บริษัทซีเอดียูเคชั่นจำกัด (มหาชน) ;2552.



FEATURES

3-axis sensing

Small, low profile package

4 mm × 4 mm × 1.45 mm LFCSP

Low power : 350 μA (typical)

Single-supply operation: 1.8 V to 3.6 V

10,000 g shock survival

Excellent temperature stability

BW adjustment with a single capacitor per axis

RoHS/WECE lead-free compliant

APPLICATIONS

Cost sensitive, low power, motion- and tilt-sensing applications

Mobile devices

Gaming systems

Disk drive protection

Image stabilization

Sports and health devices

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL335 is a small, thin, low power, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs. The product measures acceleration with a minimum full-scale range of $\pm 3 g$. It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the C_X , C_Y , and C_Z capacitors at the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} pins. Bandwidths can be selected to suit the application, with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for the X and Y axes, and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis.

The ADXL335 is available in a small, low profile, 4 mm × 4 mm × 1.45 mm, 16-lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP_LQ).

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

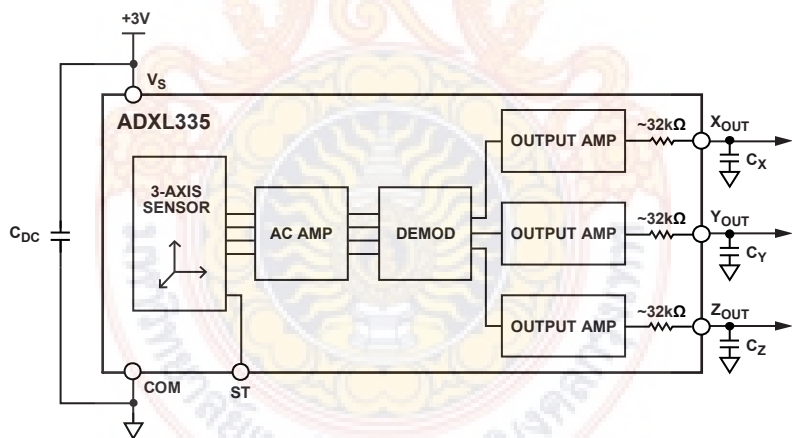


Figure 1.

Rev. 0

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

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.

Tel: 781.329.4700

Fax: 781.461.3113

www.analog.com

©2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

TABLE OF CONTENTS

Features	1	Performance	10
Applications	1	Applications Information	11
General Description	1	Power Supply Decoupling	11
Functional Block Diagram	1	Setting the Bandwidth Using C_X , C_Y , and C_Z	11
Revision History	2	Self Test	11
Specifications	3	Design Trade-Offs for Selecting Filter Characteristics:	
Absolute Maximum Ratings	4	The Noise/BW Trade-Off	11
ESD Caution	4	Use with Operating Voltages Other than 3 V	11
Pin Configuration and Function Descriptions	5	Axes of Acceleration Sensitivity	12
Typical Performance Characteristics	6	Layout and Design Recommendations	13
Theory of Operation	10	Outline Dimensions	14
Mechanical Sensor	10	Ordering Guide	14

REVISION HISTORY

1/09—Revision 0: Initial Version



SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3\text{ V}$, $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\text{ }\mu\text{F}$, acceleration = 0 g, unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT	Each axis				
Measurement Range		± 3	± 3.6		g
Nonlinearity	% of full scale		± 0.3		%
Package Alignment Error			± 1		Degrees
Interaxis Alignment Error			± 0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ¹			± 1		%
SENSITIVITY (RATIOMETRIC) ²	Each axis				
Sensitivity at X_{OUT} , Y_{OUT} , Z_{OUT}	$V_S = 3\text{ V}$	270	300	330	mV/g
Sensitivity Change Due to Temperature ³	$V_S = 3\text{ V}$		± 0.01		%/ $^\circ\text{C}$
ZERO g BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)					
0 g Voltage at X_{OUT} , Y_{OUT}	$V_S = 3\text{ V}$	1.35	1.5	1.65	V
0 g Voltage at Z_{OUT}	$V_S = 3\text{ V}$	1.2	1.5	1.8	V
0 g Offset vs. Temperature			± 1		mg/ $^\circ\text{C}$
NOISE PERFORMANCE					
Noise Density X_{OUT} , Y_{OUT}			150		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
Noise Density Z_{OUT}			300		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
FREQUENCY RESPONSE ⁴					
Bandwidth X_{OUT} , Y_{OUT} ⁵	No external filter		1600		Hz
Bandwidth Z_{OUT} ⁵	No external filter		550		Hz
R_{FILT} Tolerance			$32 \pm 15\%$		k Ω
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
SELF-TEST ⁶					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		μA
Output Change at X_{OUT}	Self-Test 0 to Self-Test 1	-150	-325	-600	mV
Output Change at Y_{OUT}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+325	+600	mV
Output Change at Z_{OUT}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+550	+1000	mV
OUTPUT AMPLIFIER					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	$V_S = 3\text{ V}$		350		μA
Turn-On Time ⁷	No external filter		1		ms
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		-40		+85	$^\circ\text{C}$

¹ Defined as coupling between any two axes.

² Sensitivity is essentially ratiometric to V_S .

³ Defined as the output change from ambient-to-maximum temperature or ambient-to-minimum temperature.

⁴ Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors (C_X , C_Y , C_Z).

⁵ Bandwidth with external capacitors = $1/(2 \times \pi \times 32\text{ k}\Omega \times C)$. For C_X , $C_Y = 0.003\text{ }\mu\text{F}$, bandwidth = 1.6 kHz. For $C_Z = 0.01\text{ }\mu\text{F}$, bandwidth = 500 Hz. For C_X , C_Y , $C_Z = 10\text{ }\mu\text{F}$, bandwidth = 0.5 Hz.

⁶ Self-test response changes cubically with V_S .

⁷ Turn-on time is dependent on C_X , C_Y , C_Z and is approximately $160 \times C_X$ or C_Y or $C_Z + 1\text{ ms}$, where C_X , C_Y , C_Z are in microfarads (μF).

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Table 2.

Parameter	Rating
Acceleration (Any Axis, Unpowered)	10,000 <i>g</i>
Acceleration (Any Axis, Powered)	10,000 <i>g</i>
V_s	−0.3 V to +3.6 V
All Other Pins	(COM − 0.3 V) to (V_s + 0.3 V)
Output Short-Circuit Duration (Any Pin to Common)	Indefinite
Temperature Range (Powered)	−55°C to +125°C
Temperature Range (Storage)	−65°C to +150°C

Stresses above those listed under Absolute Maximum Ratings may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only; functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational section of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

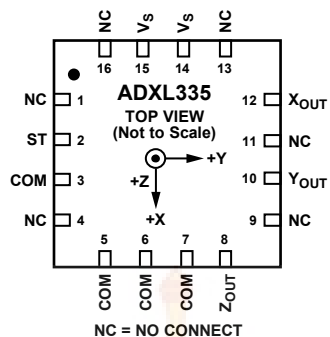
ESD CAUTION



ESD (electrostatic discharge) sensitive device.

Charged devices and circuit boards can discharge without detection. Although this product features patented or proprietary protection circuitry, damage may occur on devices subjected to high energy ESD. Therefore, proper ESD precautions should be taken to avoid performance degradation or loss of functionality.

PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS



NOTES
1. EXPOSED PAD IS NOT INTERNALLY CONNECTED BUT SHOULD BE SOLDERED FOR MECHANICAL INTEGRITY.

07508-003

Figure 2. Pin Configuration

Table 3. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Description
1	NC	No Connect ¹ .
2	ST	Self-Test.
3	COM	Common.
4	NC	No Connect ¹ .
5	COM	Common.
6	COM	Common.
7	COM	Common.
8	Z _{OUT}	Z Channel Output.
9	NC	No Connect ¹ .
10	Y _{OUT}	Y Channel Output.
11	NC	No Connect ¹ .
12	X _{OUT}	X Channel Output.
13	NC	No Connect ¹ .
14	V _S	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
15	V _S	Supply Voltage (1.8 V to 3.6 V).
16	NC	No Connect ¹ .
EP	Exposed Pad	Not internally connected. Solder for mechanical integrity.

¹NC pins are not internally connected and can be tied to COM pins, unless otherwise noted.

TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

N > 1000 for all typical performance plots, unless otherwise noted.

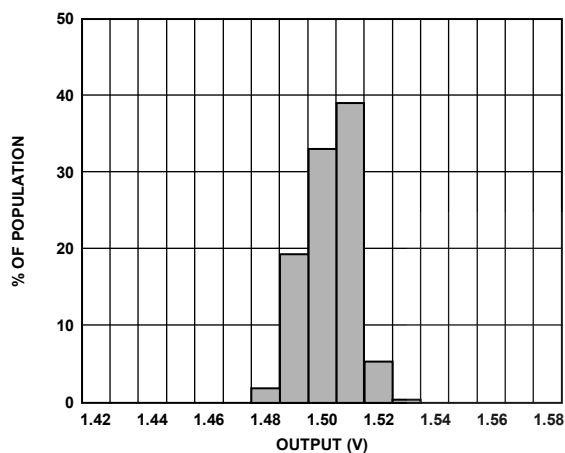


Figure 3. X-Axis Zero g Bias at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

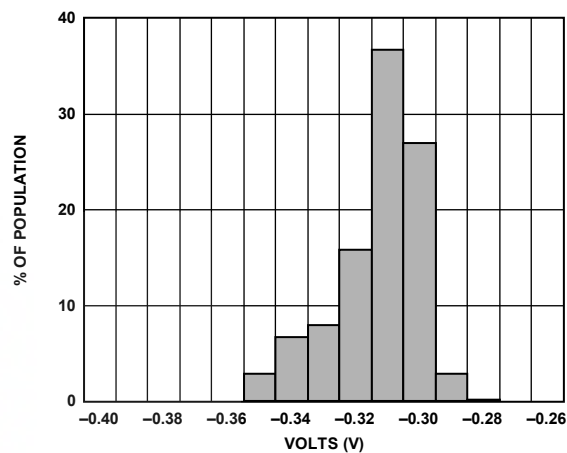


Figure 6. X-Axis Self-Test Response at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

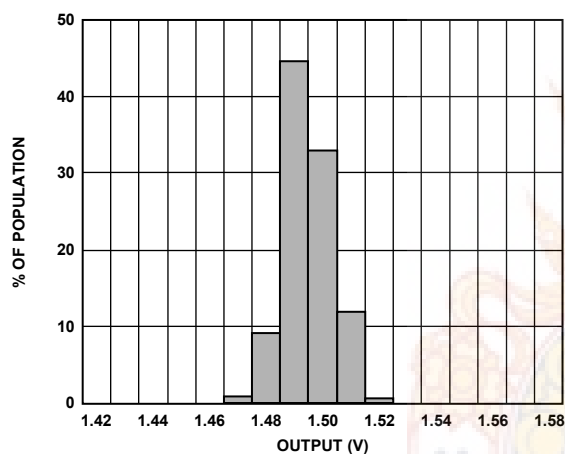


Figure 4. Y-Axis Zero g Bias at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

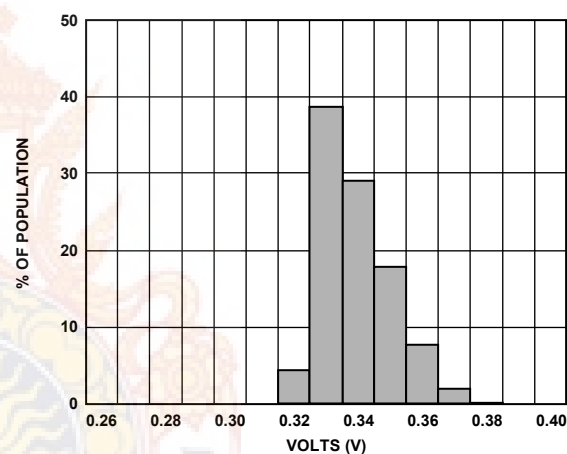


Figure 7. Y-Axis Self-Test Response at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

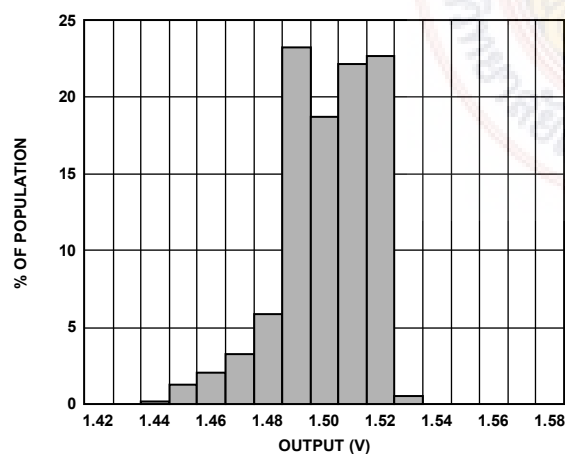


Figure 5. Z-Axis Zero g Bias at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

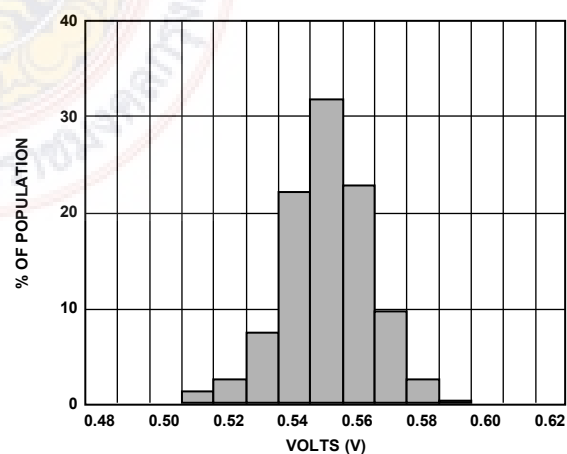


Figure 8. Z-Axis Self-Test Response at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

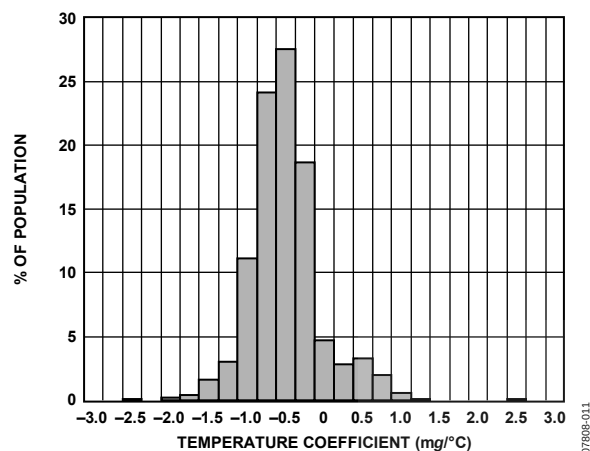


Figure 9. X-Axis Zero g Bias Temperature Coefficient, $V_S = 3\text{ V}$

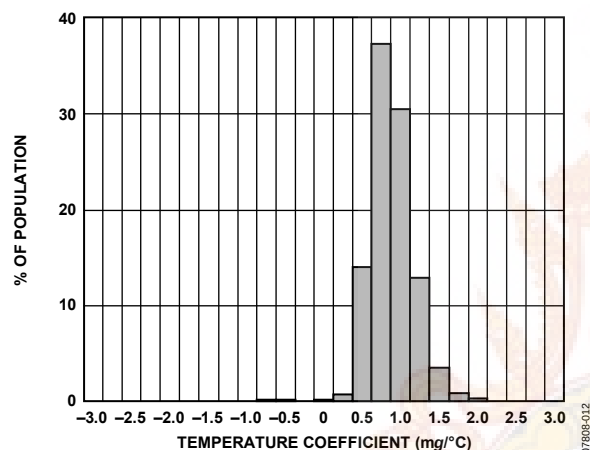


Figure 10. Y-Axis Zero g Bias Temperature Coefficient, $V_S = 3\text{ V}$

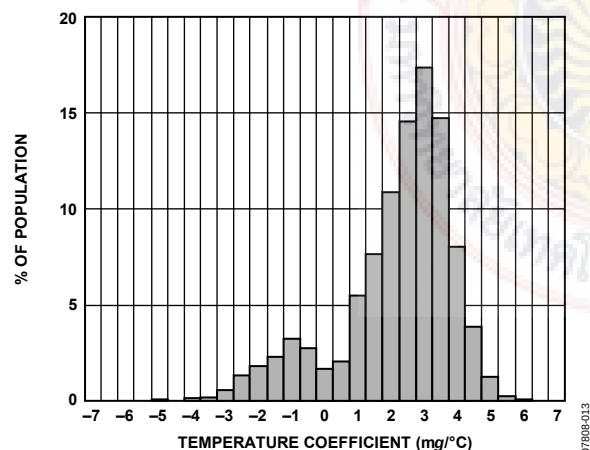


Figure 11. Z-Axis Zero g Bias Temperature Coefficient, $V_S = 3\text{ V}$

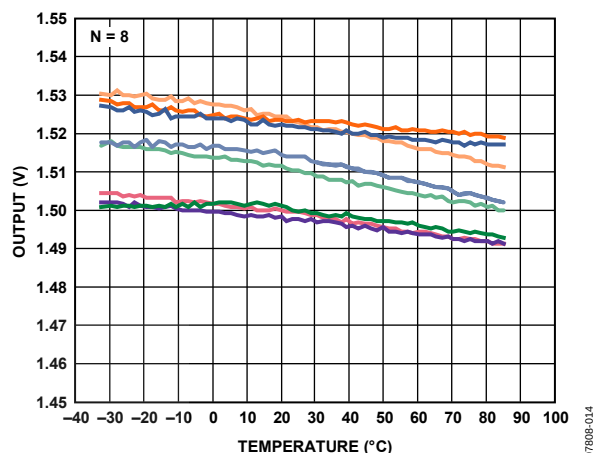


Figure 12. X-Axis Zero g Bias vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB

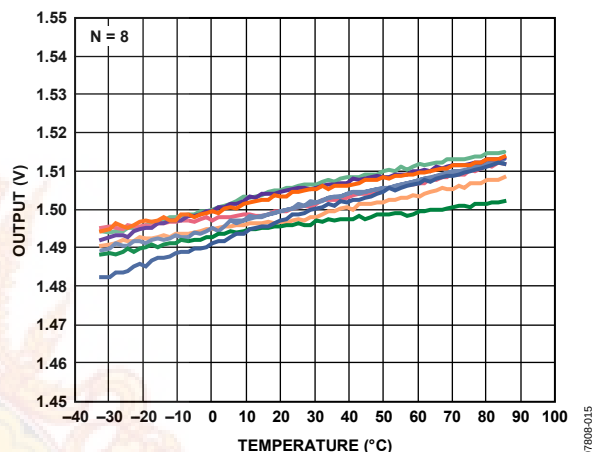


Figure 13. Y-Axis Zero g Bias vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB

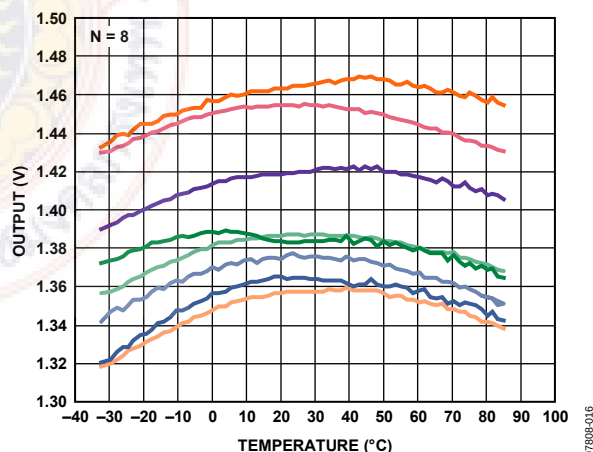


Figure 14. Z-Axis Zero g Bias vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB

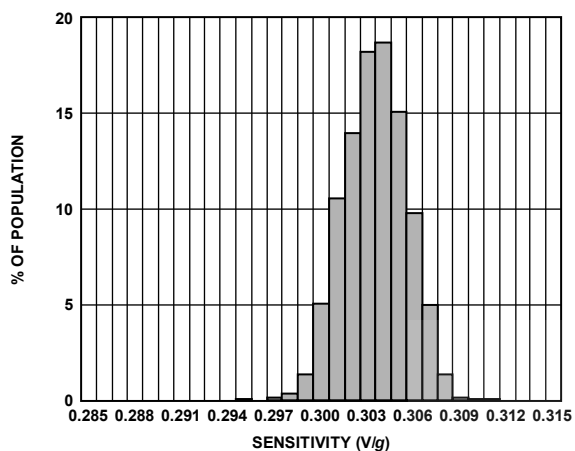


Figure 15. X-Axis Sensitivity at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

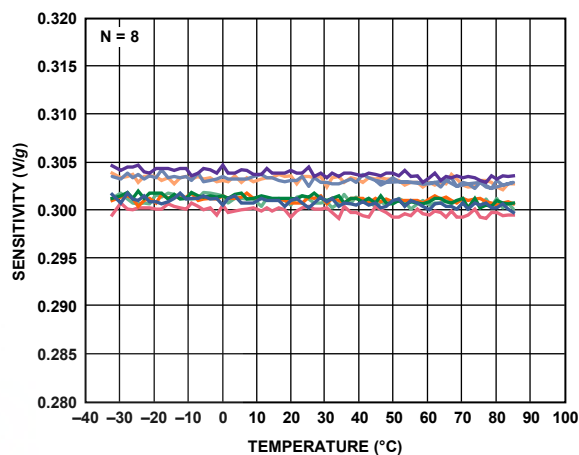


Figure 18. X-Axis Sensitivity vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB, $V_S = 3\text{ V}$

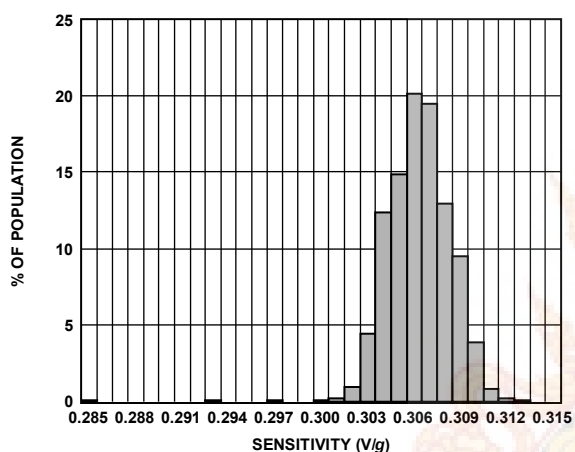


Figure 16. Y-Axis Sensitivity at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

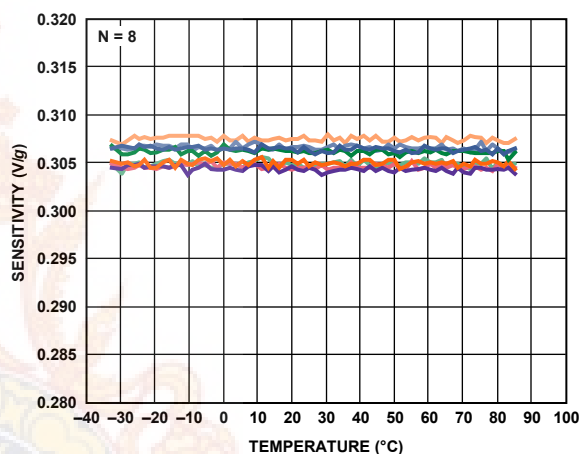


Figure 19. Y-Axis Sensitivity vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB, $V_S = 3\text{ V}$

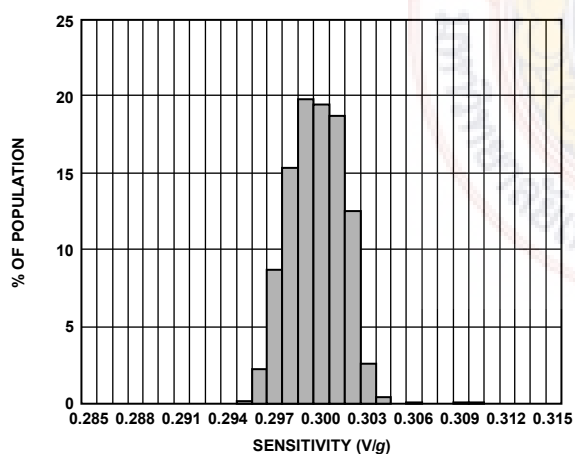


Figure 17. Z-Axis Sensitivity at 25°C, $V_S = 3\text{ V}$

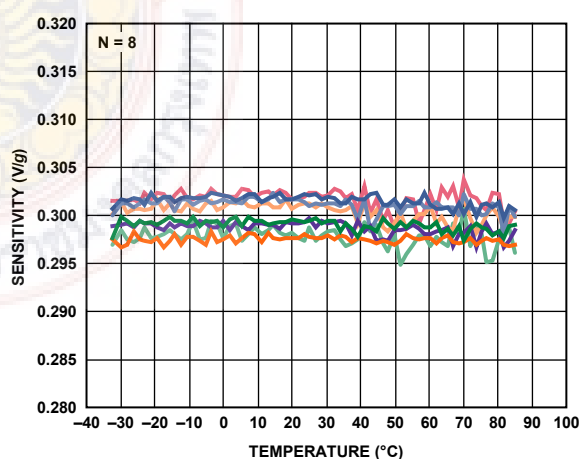


Figure 20. Z-Axis Sensitivity vs. Temperature—
Eight Parts Soldered to PCB, $V_S = 3\text{ V}$

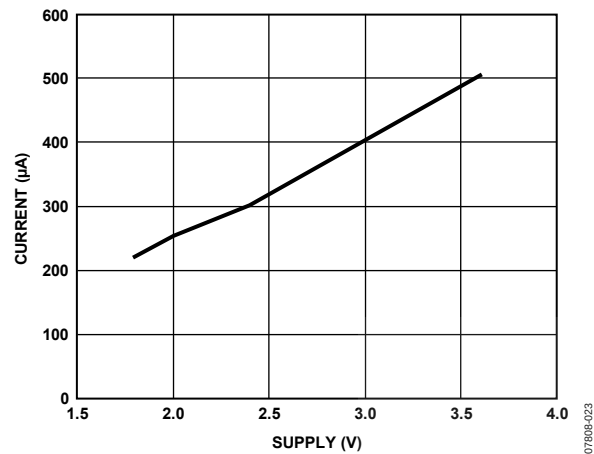


Figure 21. Typical Current Consumption vs. Supply Voltage

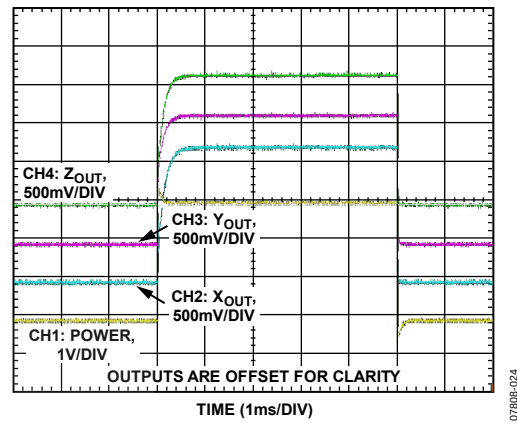


Figure 22. Typical Turn-On Time, $V_s = 3\text{ V}$

THEORY OF OPERATION

The ADXL335 is a complete 3-axis acceleration measurement system. The ADXL335 has a measurement range of ± 3 g minimum. It contains a polysilicon surface-micromachined sensor and signal conditioning circuitry to implement an open-loop acceleration measurement architecture. The output signals are analog voltages that are proportional to acceleration. The accelerometer can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The sensor is a polysilicon surface-micromachined structure built on top of a silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. The fixed plates are driven by 180° out-of-phase square waves. Acceleration deflects the moving mass and unbalances the differential capacitor resulting in a sensor output whose amplitude is proportional to acceleration. Phase-sensitive demodulation techniques are then used to determine the magnitude and direction of the acceleration.

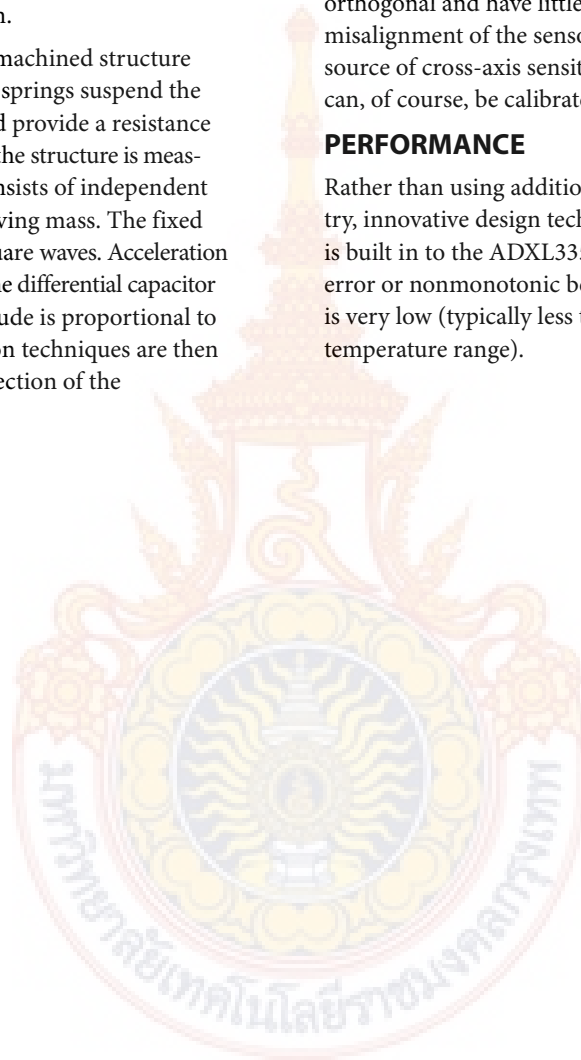
The demodulator output is amplified and brought off-chip through a $32\text{ k}\Omega$ resistor. The user then sets the signal bandwidth of the device by adding a capacitor. This filtering improves measurement resolution and helps prevent aliasing.

MECHANICAL SENSOR

The ADXL335 uses a single structure for sensing the X, Y, and Z axes. As a result, the three axes' sense directions are highly orthogonal and have little cross-axis sensitivity. Mechanical misalignment of the sensor die to the package is the chief source of cross-axis sensitivity. Mechanical misalignment can, of course, be calibrated out at the system level.

PERFORMANCE

Rather than using additional temperature compensation circuitry, innovative design techniques ensure that high performance is built in to the ADXL335. As a result, there is no quantization error or nonmonotonic behavior, and temperature hysteresis is very low (typically less than 3 mg over the -25°C to $+70^\circ\text{C}$ temperature range).



APPLICATIONS INFORMATION

POWER SUPPLY DECOUPLING

For most applications, a single 0.1 μF capacitor, C_{DC} , placed close to the ADXL335 supply pins adequately decouples the accelerometer from noise on the power supply. However, in applications where noise is present at the 50 kHz internal clock frequency (or any harmonic thereof), additional care in power supply bypassing is required because this noise can cause errors in acceleration measurement.

If additional decoupling is needed, a 100 Ω (or smaller) resistor or ferrite bead can be inserted in the supply line. Additionally, a larger bulk bypass capacitor (1 μF or greater) can be added in parallel to C_{DC} . Ensure that the connection from the ADXL335 ground to the power supply ground is low impedance because noise transmitted through ground has a similar effect to noise transmitted through V_s .

SETTING THE BANDWIDTH USING C_x , C_y , AND C_z

The ADXL335 has provisions for band limiting the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} pins. Capacitors must be added at these pins to implement low-pass filtering for antialiasing and noise reduction. The equation for the 3 dB bandwidth is

$$F_{-3\text{ dB}} = 1/(2\pi(32\text{ k}\Omega) \times C_{(X,Y,Z)})$$

or more simply

$$F_{-3\text{ dB}} = 5\text{ }\mu\text{F}/C_{(X,Y,Z)}$$

The tolerance of the internal resistor (R_{FILT}) typically varies as much as $\pm 15\%$ of its nominal value (32 k Ω), and the bandwidth varies accordingly. A minimum capacitance of 0.0047 μF for C_x , C_y , and C_z is recommended in all cases.

Table 4. Filter Capacitor Selection, C_x , C_y , and C_z

Bandwidth (Hz)	Capacitor (μF)
1	4.7
10	0.47
50	0.10
100	0.05
200	0.027
500	0.01

SELF-TEST

The ST pin controls the self-test feature. When this pin is set to V_s , an electrostatic force is exerted on the accelerometer beam. The resulting movement of the beam allows the user to test if the accelerometer is functional. The typical change in output is -1.08 g (corresponding to -325 mV) in the X-axis, $+1.08\text{ g}$ (or $+325\text{ mV}$) on the Y-axis, and $+1.83\text{ g}$ (or $+550\text{ mV}$) on the Z-axis. This ST pin can be left open-circuit or connected to common (COM) in normal use.

Never expose the ST pin to voltages greater than $V_s + 0.3\text{ V}$. If this cannot be guaranteed due to the system design (for instance, if there are multiple supply voltages), then a low V_F clamping diode between ST and V_s is recommended.

DESIGN TRADE-OFFS FOR SELECTING FILTER CHARACTERISTICS: THE NOISE/BW TRADE-OFF

The selected accelerometer bandwidth ultimately determines the measurement resolution (smallest detectable acceleration). Filtering can be used to lower the noise floor to improve the resolution of the accelerometer. Resolution is dependent on the analog filter bandwidth at X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} .

The output of the ADXL335 has a typical bandwidth of greater than 500 Hz. The user must filter the signal at this point to limit aliasing errors. The analog bandwidth must be no more than half the analog-to-digital sampling frequency to minimize aliasing. The analog bandwidth can be further decreased to reduce noise and improve resolution.

The ADXL335 noise has the characteristics of white Gaussian noise, which contributes equally at all frequencies and is described in terms of $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ (the noise is proportional to the square root of the accelerometer bandwidth). The user should limit bandwidth to the lowest frequency needed by the application to maximize the resolution and dynamic range of the accelerometer.

With the single-pole, roll-off characteristic, the typical noise of the ADXL335 is determined by

$$\text{rms Noise} = \text{Noise Density} \times (\sqrt{BW \times 1.6})$$

It is often useful to know the peak value of the noise. Peak-to-peak noise can only be estimated by statistical methods. Table 5 is useful for estimating the probabilities of exceeding various peak values, given the rms value.

Table 5. Estimation of Peak-to-Peak Noise

Peak-to-Peak Value	% of Time That Noise Exceeds Nominal Peak-to-Peak Value
$2 \times \text{rms}$	32
$4 \times \text{rms}$	4.6
$6 \times \text{rms}$	0.27
$8 \times \text{rms}$	0.006

USE WITH OPERATING VOLTAGES OTHER THAN 3 V

The ADXL335 is tested and specified at $V_s = 3\text{ V}$; however, it can be powered with V_s as low as 1.8 V or as high as 3.6 V. Note that some performance parameters change as the supply voltage is varied.

ADXL335

The ADXL335 output is ratiometric, therefore, the output sensitivity (or scale factor) varies proportionally to the supply voltage. At $V_s = 3.6$ V, the output sensitivity is typically 360 mV/g. At $V_s = 2$ V, the output sensitivity is typically 195 mV/g.

The zero g bias output is also ratiometric, thus the zero g output is nominally equal to $V_s/2$ at all supply voltages.

The output noise is not ratiometric but is absolute in volts; therefore, the noise density decreases as the supply voltage increases. This is because the scale factor (mV/g) increases while the noise voltage remains constant. At $V_s = 3.6$ V, the X-axis and Y-axis noise density is typically $120 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$, whereas at $V_s = 2$ V, the X-axis and Y-axis noise density is typically $270 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.

Self-test response in g is roughly proportional to the square of the supply voltage. However, when ratiometricity of sensitivity is factored in with supply voltage, the self-test response in volts is roughly proportional to the cube of the supply voltage. For example, at $V_s = 3.6$ V, the self-test response for the ADXL335 is approximately -560 mV for the X-axis, +560 mV for the Y-axis, and +950 mV for the Z-axis.

At $V_s = 2$ V, the self-test response is approximately -96 mV for the X-axis, +96 mV for the Y-axis, and -163 mV for the Z-axis.

The supply current decreases as the supply voltage decreases. Typical current consumption at $V_s = 3.6$ V is 375 μA , and typical current consumption at $V_s = 2$ V is 200 μA .

AXES OF ACCELERATION SENSITIVITY

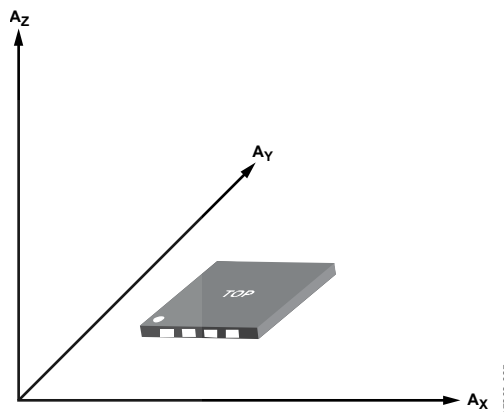


Figure 23. Axes of Acceleration Sensitivity; Corresponding Output Voltage Increases When Accelerated Along the Sensitive Axis.

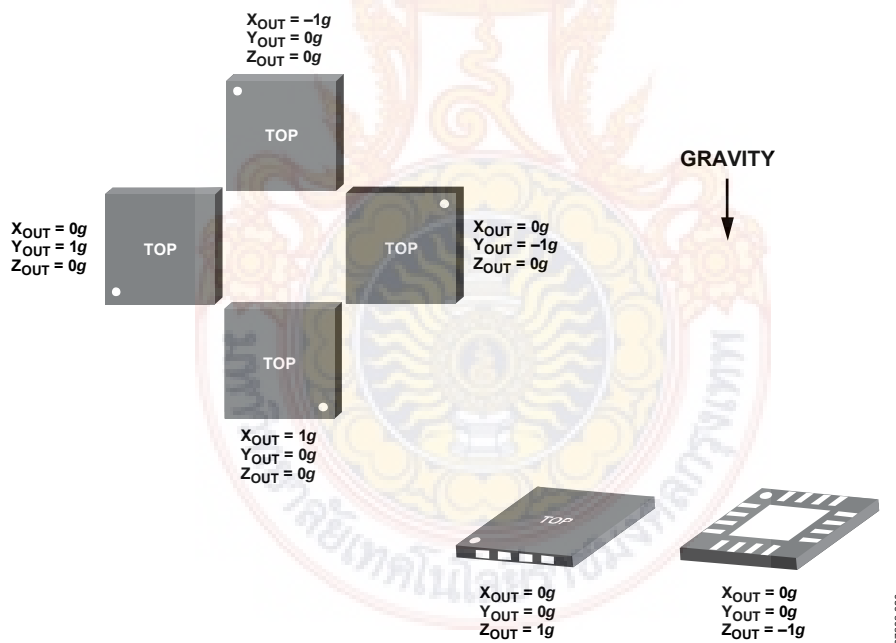


Figure 24. Output Response vs. Orientation to Gravity

LAYOUT AND DESIGN RECOMMENDATIONS

The recommended soldering profile is shown in Figure 25 followed by a description of the profile features in Table 6. The recommended PCB layout or solder land drawing is shown in Figure 26.

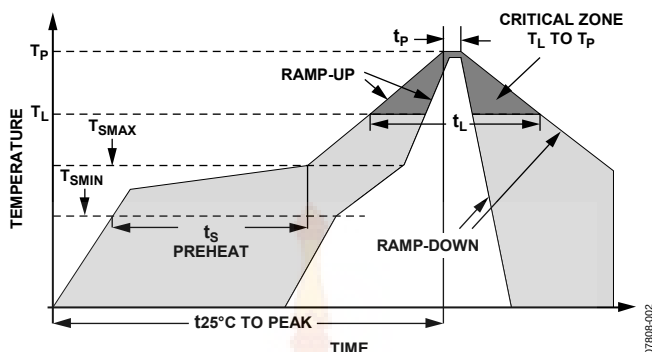


Figure 25. Recommended Soldering Profile

Table 6. Recommended Soldering Profile

Profile Feature	Sn63/Pb37	Pb-Free
Average Ramp Rate (T_L to T_P)	3°C/sec max	3°C/sec max
Preheat		
Minimum Temperature (T_{SMIN})	100°C	150°C
Maximum Temperature (T_{SMAX})	150°C	200°C
Time (T_{SMIN} to T_{SMAX})(t_s)	60 sec to 120 sec	60 sec to 180 sec
T_{SMAX} to T_L		
Ramp-Up Rate	3°C/sec max	3°C/sec max
Time Maintained Above Liquidous (T_L)		
Liquidous Temperature (T_L)	183°C	217°C
Time (t_L)	60 sec to 150 sec	60 sec to 150 sec
Peak Temperature (T_P)	240°C + 0°C/-5°C	260°C + 0°C/-5°C
Time Within 5°C of Actual Peak Temperature (t_p)	10 sec to 30 sec	20 sec to 40 sec
Ramp-Down Rate	6°C/sec max	6°C/sec max
Time 25°C to Peak Temperature	6 minutes max	8 minutes max

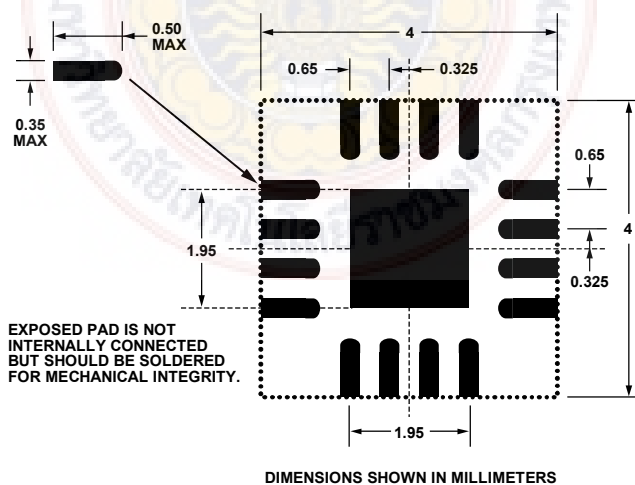


Figure 26. Recommended PCB Layout

OUTLINE DIMENSIONS

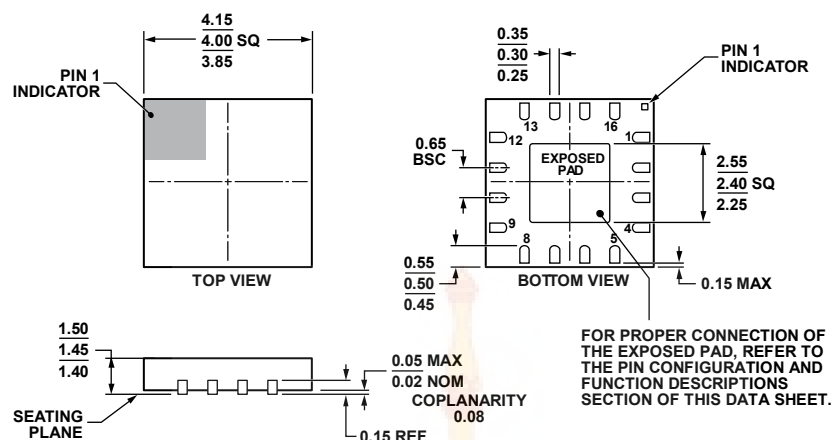


Figure 27. 16-Lead Lead Frame Chip Scale Package [LFCSP_LQ]
 4 mm x 4 mm Body, 1.45 mm Thick Quad
 (CP-16-14)
 Dimensions shown in millimeters

ORDERING GUIDE

Model	Measurement Range	Specified Voltage	Temperature Range	Package Description	Package Option
ADXL335BCPZ ¹	±3 g	3 V	−40°C to +85°C	16-Lead LFCSP_LQ	CP-16-14
ADXL335BCPZ-RL ¹	±3 g	3 V	−40°C to +85°C	16-Lead LFCSP_LQ	CP-16-14
ADXL335BCPZ-RL7 ¹	±3 g	3 V	−40°C to +85°C	16-Lead LFCSP_LQ	CP-16-14
EVAL-ADXL335Z ¹				Evaluation Board	

¹ Z = RoHS Compliant Part.

NOTES



NOTES

