

การกำจัดสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนของการชั่งน้ำหนักด้วยระบบแบบปรับตัวได้
โดยอาศัยสัญญาณอ้างอิง AC จากเซนเซอร์ความเร่งและค่าคงที่ DC

VIBRATION NOISE CANCELLATION OF WEIGHING WITH ADAPTIVE SYSTEM
BASE ON AC REFERENCE SIGNAL FROM ACCELEROMETER AND CONSTANT DC



นทีกานต์ มุลทองน้อย
NATEEKAN MOONTHONGNOI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2566

KMITL-2023-EN-M-029-005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VIBRATION NOISE CANCELLATION OF WEIGHING WITH ADAPTIVE SYSTEM
BASE ON AC REFERENCE SIGNAL FROM ACCELEROMETER AND CONSTANT DC



NATEEKAN MOONTHONGNOI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023
KMITL-2023-EN-M-029-005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนของการชั่งน้ำหนักด้วย ด้วยระบบแบบปรับตัวได้โดยอาศัยสัญญาณอ้างอิง AC จากเซนเซอร์ ความเร่งและค่าคงที่ DC
นักศึกษา	นทีกานต์ มุลทองน้อย
รหัสประจำตัว	62601248
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน

บทคัดย่อ

ระบบชั่งน้ำหนักเป็นกระบวนการที่สำคัญในหลายกิจกรรม กิจกรรมบางอย่างต้องการค่าความแม่นยำของน้ำหนักสูง แต่ในสภาพแวดล้อมจริงที่ไม่สามารถควบคุมได้ พบว่าโหลดเซลล์ที่ใช้สำหรับการชั่งน้ำหนักจะปนเปื้อนด้วยการสั่นสะเทือนจากภายนอก ตัวอย่างเช่น รถบรรทุกที่บรรทุกพืชผลที่ไม่ได้ดับเครื่องยนต์ขณะทำการชั่งหรือขณะเคลื่อนที่ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอ การใช้อัลกอริทึม LMS ของระบบแบบปรับตัวได้พร้อมกับการใช้ตัวตรวจจับความเร่งและค่าคงที่ DC เป็นตัวสร้างสัญญาณอ้างอิงสองตัว ให้กับระบบแบบปรับตัวได้เพื่อกำจัดการปนเปื้อนจากการสั่นสะเทือน และประเมินเป็นสัญญาณน้ำหนักที่ถูกต้อง ตามลำดับ ส่งผลทำให้ระบบที่นำเสนอสามารถกำจัดอิทธิพลของการสั่น และมีความแม่นยำในการวัดที่ 96.856 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้แล้วระบบยังใช้เวลาในการคำนวณเพียง 2 วินาที และใช้ทรัพยากรในการคำนวณ 215 กิโลไบต์

Thesis	Vibration Noise Cancellation of Weighing With Adaptive System Based on AC Reference Signal From Accelerometer And Constant DC
Student	Nateekan Moonthongnoi
Student ID	62601248
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Paramote Wardkein

Abstract

The weighing system is a crucial part of the process in many activities. Some activities demand high accuracy, which is a real environment that cannot be controlled. We found that the load cell for weighing is interfered with external vibration, for example, a truck drives through the weighing system with a turned-on engine. Our research presents the use of the LMS algorithm of the adaptive system. Based on AC reference signal from accelerometer. And constant DC. It was used as a reference for the adaptive system to eliminate vibration noise and for the true weight assessment. Therefore, The proposed weighing system has an accuracy of 96.856 percent. In addition, the system takes only 2 seconds to calculate and requires only 215 kilobytes of computing resources.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เกิดจากการสนับสนุนจาก รศ.ดร. ปราโมทย์ วาดเขียน ผู้ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ทั้งในแง่ของแนวความคิด อุปกรณ์ และอื่นๆ อีกทั้งยังคอยผลักดันข้าพเจ้าให้มีกำลังกายและกำลังใจทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณบิดา มารดา ครอบครัวของข้าพเจ้า ผู้ซึ่งให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง

ขอขอบคุณ คุณอัญชลี มโนสีบ สำหรับการเป็นที่ปรึกษา และทำให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ น้องภูริภักดิ์ ชุนหคาม ผู้ที่ช่วยเหลือมาโดยตลอดในการทำผลการทดลอง และการทำเล่ม

สุดท้าย ขอขอบคุณตัวข้าพเจ้าที่ไม่ย่อท้อต่ออุปสรรคต่างๆ และทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง และประโยชน์ใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นทีกานต์ มูลทองน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ.....	I
Abstract.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	1
1.2 จุดมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.5 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Weighing scale).....	5
2.2 สเตรนเกจ (Strain Gauge).....	9
2.2.1 โครงสร้างของสเตรนเกจ.....	9
2.2.2 หลักการทำงานของสเตรนเกจ.....	9
2.3 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer).....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4	วงจรรขยายอินสตรูเมนต์เซ็น (Instrumentation Amplifier).....	11
2.5	ระบบแบบปรับตัวได้ (Adaptive System).....	13
2.5.1	กล่าวนำ.....	13
2.5.2	ตัวกรองแบบวินเนอร์ (Wiener Filter).....	14
2.5.3	กลไกในการหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบแบบปรับตัวได้	17
2.5.4	อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Least Mean Square Algorithm)	20
2.6	การซีกตัวอย่าง (Sampling).....	21
2.7	ค่าเฉลี่ยแบบสถิติก (Static Average)	22
2.8	ค่าเฉลี่ยแบบไดนามิก (Dynamic Average).....	23
2.9	ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแบบไดนามิกกับค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับตัวของระบบแบบปรับตัวได้ ที่ใช้อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Dynamic Averaging and Adaptive Coefficient) ...	24
2.10	ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมของระบบแบบปรับตัวได้	25
2.11	ตัวแปรที่ใช้เปรียบเทียบ	29
2.11.1	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error).....	29
2.11.2	ค่าความแม่นยำสัมพัทธ์ (Relative Accuracy).....	29
2.11.3	ค่าความเที่ยงตรง (Precision).....	29
บทที่ 3	การออกแบบระบบของเครื่องชั่งน้ำหนักที่สามารถกำจัดสัญญาณการสั่นสะเทือน.....	31
3.1	กล่าวนำ.....	31
3.2	การออกแบบวงจรรขยายสัญญาณอินสตรูเมนต์เซ็นใช้งานร่วมกับโพลเดเซลล์	31
3.2.1	กล่าวนำ.....	31
3.3	การออกแบบระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ	32
3.3.1	กล่าวนำ.....	32
3.4	วิธีการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ	37

3.4.1	กล่าวนำ.....	37
3.5	ค่าความละเอียดในการซึ่่งนำหน้าของระบบ	40
3.6	เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	40
3.6.1	เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope).....	40
3.6.2	เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply)	41
3.6.3	เครื่องสร้างสัญญาณ (Signal Generator).....	41
3.6.4	เครื่องซึ่่งนำหน้า.....	42
3.6.5	ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 (Microcontroller ESP32).....	42
3.6.6	เซนเซอร์วัดความถี่ที่ถูกนำมาใช้งานในการวัดแรงสั่นสะเทือน	43
3.6.7	เครื่องสร้างการสั่นสะเทือน.....	44
3.6.8	โปรแกรมอาร์ดูโนไอดีอี (Arduino IDE).....	45
3.6.9	โปรแกรมอัลเทียมดีไซน์เนอร์(Altium Designer).....	45
3.6.10	โปรแกรมแมทแลป(MATLAB).....	46
3.6.11	คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.7	การออกแบบการทดลอง.....	47
3.7.1	การออกแบบการทดลองของวงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน	47
3.7.2	การออกแบบการทดลองของระบบแบบปรับตัวได้นำเสนอ	49
3.7.3	การออกแบบการทดลองสร้างโมเดลคณิตศาสตร์เพื่อหาสมการคำนวณค่าน้ำหนัก	49
3.7.4	การออกแบบการทดลองเพื่อหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบที่นำเสนอ.....	50
3.7.5	การออกแบบการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการนำค่าจากวงจรอินสตรูเมนเตชันโดยตรงมาคำนวณหาค่าน้ำหนัก.....	51
3.7.6	การออกแบบการทดลองวัดประสิทธิภาพของระบบ	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	55
4.1 กล่าวนำ.....	55
4.2 ผลการทดลองของวงจรขยายอินสตรูเมนต์ชัน	55
4.3 ผลการทดลองทดสอบระบบแบบปรับตัวได้น้ำเสนอ.....	55
4.4 การทดลองสร้างโมเดลคณิตศาสตร์เพื่อหาสมการคำนวณค่าน้ำหนัก	56
4.5 ผลการทดลองเพื่อหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบ แบบปรับตัวได้น้ำเสนอ	58
4.5.1 ผลการทดลองโดยใช้น้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม	58
4.5.2 ผลการทดลองโดยใช้น้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม	59
4.5.3 ผลการทดลองโดยใช้น้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม	60
4.6 ผลการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการนำค่าจากวงจรอินสตรูเมนต์ชันโดยตรงมา คำนวณหาค่าน้ำหนัก.....	61
4.7 ผลการทดลองประสิทธิภาพของระบบ	63
4.7.1 อัตราการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมกับระบบที่นำเสนอ	63
4.7.2 ผลการทดลองเพื่อดูประสิทธิภาพและเวลาของระบบแบบปรับตัวได้น้ำเสนอ.....	63
4.7.3 ทดสอบค่าความแม่นยำและค่าความเที่ยงตรง(Accuracy and Precision Test).....	67
4.7.4 การทดลองเพื่อหาวิธีการชั่งน้ำหนักที่ควรจะไปใช้งาน	67
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	70
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
ภาคผนวก.....	75
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	76

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ตารางการหาค่า RMSE เฉลี่ยของทุกน้ำหนักที่นำเสนอ	61
ตารางที่ 4.2 ตารางทดสอบค่าความเที่ยงตรงและค่าความแม่นยำ	67
ตารางที่ 4.3 ตารางการทดลองเพื่อหาวิธีการชั่งน้ำหนักของระบบที่สร้างขึ้น	68



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักของอารยธรรมอียิปต์ในยุคโบราณ	5
รูปที่ 2.2 ตั้มน้ำหนักที่พิพิธภัณฑน์เนเปิ้ลส์ (Naples).....	6
รูปที่ 2.3 ภาพแกะสลักของคนขายเนื้อชาวโรมัน	6
รูปที่ 2.4 ริชาร์ด ซอลเตอร์ ผู้ประดิษฐ์เครื่องชั่งแบบสปริง.....	7
รูปที่ 2.5 เครื่องชั่งสปริงในช่วงราวปี ค.ศ. 1770	7
รูปที่ 2.6 เครื่องชั่งน้ำหนักเชิงวิเคราะห์มวลขนาดเล็ก	8
รูปที่ 2.7 เครื่องชั่งน้ำหนักเชิงวิเคราะห์ที่มีฐานชั่งน้ำหนักเป็นลักษณะแบบจานเดี่ยว	8
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสเตอร์นเกจ	9
รูปที่ 2.9 เซนเซอร์วัดความเร่ง	11
รูปที่ 2.10 วงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน	11
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของตัวกรองแบบวินเนอร์	14
รูปที่ 2.12 โครงสร้างระบบแบบปรับตัวได้.....	17
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงการปรับค่าความผิดพลาดด้วยวิธีแบบเกรเดียนต์เดสเซนต์	17
รูปที่ 2.14 โครงสร้างระบบแบบปรับตัวได้ที่อาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด	20
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบสมการที่ (2.45) และสมการที่ (2.46).....	25
รูปที่ 2.16 โครงสร้างระบบแบบ Linear Combiner.....	26
รูปที่ 3.1 วงจรขยายอินสตรูเมนเตชันที่มีการยกกระดบสัญญาณไฟตรง.....	32
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ	33
รูปที่ 3.3 แผนผังโปรแกรมการทำงานของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ	34
รูปที่ 3.4 แผนผังโปรแกรมการทำงานของระบบแบบปรับตัวได้โดยใช้คอมพิวเตอร์อาร์ดูโน้	36
รูปที่ 3.5 แผนผังโปรแกรมในการหาค่าเสี้ยนไขเริ่มต้นโดยใช้โปรแกรมแมทแลป.....	38
รูปที่ 3.6 แผนผังโปรแกรมในการหาค่าเสี้ยนไขเริ่มต้นโดยใช้คอมพิวเตอร์อาร์ดูโน้.....	39
รูปที่ 3.7 เครื่องออสซิลโลสโคป TEKTRONIX DPO4032	40
รูปที่ 3.8 เครื่องจ่ายไฟ HP Agilent E3630A.....	41

รูปที่ 3.9	เครื่องสร้างสัญญาณ HP Agilent 33120A	42
รูปที่ 3.10	แบบจำลองเครื่องชั่งน้ำหนัก	42
รูปที่ 3.11	เครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้ทดลอง.....	42
รูปที่ 3.12	ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32.....	43
รูปที่ 3.13	เซนเซอร์วัดความเร่งเบอร์ ADXL335	43
รูปที่ 3.14	เครื่องสร้างการสั่นสะเทือน	44
รูปที่ 3.15	กราฟสัญญาณรบกวนในโดเมนเวลา และกราฟสัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ของเครื่อง สร้างการสั่นสะเทือน	44
รูปที่ 3.16	โลโก้โปรแกรมอาร์ดูโนโอดีอี	45
รูปที่ 3.17	โลโก้โปรแกรมอัลเทียมดีไซน์เนอร์	46
รูปที่ 3.18	โลโก้โปรแกรมแมทแลป	46
รูปที่ 3.19	Asus K556UR-XX134T	47
รูปที่ 3.20	ผังวงจรรวมของวงจรขยายอินสตรูเมนต์ชันรวมกันกับไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32	47
รูปที่ 3.21	แผ่นวงจรพิมพ์รวมของวงจรขยายอินสตรูเมนต์ชันรวมกันกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอส พี32.....	48
รูปที่ 3.22	แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดสอบผลตอบสนองความถี่ของวงจรขยายอินสตรูเมนต์ ชัน.....	48
รูปที่ 3.23	แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองสร้างโมเดลคณิตศาสตร์เพื่อหาสมการคำนวณค่า น้ำหนัก.....	50
รูปที่ 3.24	แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองเพื่อหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดในการนำมา หาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบที่นำเสนอ	51
รูปที่ 3.25	แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการนำค่าจาก โพลีเซลล์โดยตรงมาคำนวณหาค่าน้ำหนักระบบที่นำเสนอ.....	52
รูปที่ 3.26	แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองเพื่อหาค่าความละเอียดในการชั่งน้ำหนักของระบบ	54
รูปที่ 4.1	ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรขยายอินสตรูเมนต์ชัน	55
รูปที่ 4.2	สัญญาณเอาต์พุตของระบบแบบปรับตัวได้ที่ถูกกำจัดสัญญาณรบกวน	56
รูปที่ 4.3	ค่าความผิดพลาดกำลังสองของการทดลองระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ	56

รูปที่ 4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $h_2(n)$ กับค่าน้ำหนัก.....	57
รูปที่ 4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $d(n)$ กับค่าน้ำหนัก.....	57
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงค่า $h_2(n)$ ของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม.....	58
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม.....	59
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงค่า $h_2(n)$ ของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม.....	59
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม.....	60
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงค่า $h_2(n)$ ของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม ...	60
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม.....	61
รูปที่ 4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาด RMSE กับค่าอัตราการสุ่มตัวอย่าง	63
รูปที่ 4.13	กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ $h_2(n)$ ที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎีของน้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม.....	64
รูปที่ 4.14	กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในทางปฏิบัติและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของน้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม.....	64
รูปที่ 4.15	กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ $h_2(n)$ ที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎีของน้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม.....	65
รูปที่ 4.16	กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของน้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม.....	65
รูปที่ 4.17	กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ $h_2(n)$ ที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎีของน้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม.....	66
รูปที่ 4.18	กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของน้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม	66
รูปที่ 4.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าน้ำหนัก 10 น้ำหนักที่ผ่านระบบที่นำเสนอกับระยะเวลา ...	67
รูปที่ 4.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกับแรงดันจากโพลดเซลล์จากรายที่ 4.3.....	69

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และความสำคัญ

ในภาคอุตสาหกรรม ระบบการชั่งน้ำหนักต้องการความแม่นยำ ความถูกต้อง และความรวดเร็วในการหาค่าน้ำหนัก จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่า ปัญหาที่มักเกิดขึ้นในระบบการชั่งน้ำหนักคือ สัญญาณเอาต์พุตของการชั่งน้ำหนักที่ได้รับมาจากเซนเซอร์จะมีการปนเปื้อนจากการสั่นสะเทือน ทำให้น้ำหนักที่ได้ไม่มีความแม่นยำถูกต้อง ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทางด้านต้นทุน และคุณภาพของสินค้า โดยทั่วไปการกำจัดสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนของระบบการชั่งน้ำหนักจะเปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าเฉลี่ย แต่ทั้งนี้วิธีการหาค่าเฉลี่ยระบบประมวลผลจะได้รับการชะงักงัน เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าไว้เพื่อคำนวณค่าเฉลี่ยตลอดเวลา เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือน โดยที่ที่มีการนำเสนอวิธีการต่างๆ เช่น

ปี ค.ศ. 2010 Zhang ได้นำเสนอวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนในระบบการชั่งน้ำหนักยานพาหนะโดยใช้การปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองแบบปรับตัวได้แอลเอ็มเอสที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นในการคำนวณที่อยู่บนพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมฮอปฟิลด์เปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าเฉลี่ย โดยผลของการทำงานของตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่ Rui Zhang นำเสนอได้ผลที่ดีกว่าวิธีการหาค่าเฉลี่ย [1]

ในปี ค.ศ. 2017 Dhanesh นำเสนอการออกแบบตัวกรองอนุกรมของวอลเตอร์ราแบบปรับตัวได้อันดับที่สอง (Adaptive Second Order Volterra Series Filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวนของระบบไม่เชิงเส้น (nonlinear system) โดยอาศัยโครงสร้างแลตทิซแชนแนล (lattice-channel structure) กับการหน่วงเวลาของตัวกรองอนุกรมวอลเตอร์ราแบบปรับตัวได้อันดับที่สอง โดยใช้อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (ASVSF-LMS) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนจากสัญญาณการสั่นสะเทือนของค่าความผิดพลาดจากแบริง โดยให้ผลลัพธ์ของค่าความผิดพลาดต่ำกว่าการใช้ตัวกรองปรับตัวแบบดั้งเดิม [2]

ในปี ค.ศ. 2009 Yang ได้ทำการศึกษาการใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้กำจัดการสั่นสะเทือนของระบบรับน้ำหนักของยานพาหนะ โดยใช้การจำลองแบบการทำงานระบบรองรับน้ำหนักด้วยระบบมวลสปริงที่มีค่าน้ำหนักที่ไม่คงที่ระหว่างล้อและถนนโดยใช้ตัวแปรอิสระ 2 ตัว two-DOF (Degrees of Freedom) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า [3]

โดย 3 งานวิจัยข้างต้นมีระบบโครงสร้างที่ใหญ่และซับซ้อน ซึ่งทั้ง 3 งานวิจัยนั้นมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุง การกำจัดสัญญาณรบกวนเพื่อให้ได้ความแม่นยำของข่าวสารที่ถูกปนเปื้อนมากับสัญญาณรบกวนสูงขึ้น โดยไม่ได้ คำนึงถึงเวลาและทรัพยากรที่ต้องใช้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการกำจัดสัญญาณ รบกวนจากการสั่นสะเทือนในการชั่งน้ำหนักด้วยการใช้สัญญาณอ้างอิง 2 สัญญาณร่วมกับการเตรียมค่าเงื่อนไข เริ่มต้นเพื่อให้ระบบปรับตัวเข้าสู่สถานะที่เหมาะสมได้เร็วที่สุด ทำให้ระบบที่นำเสนอใช้ทรัพยากรและเวลาในการ คำนวณน้อย

1.2 จุดมุ่งหมาย และวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนด้วยการใช้ระบบแบบปรับตัวได้ โดยอาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดร่วมกับการใช้เซนเซอร์วัดความเร่งและค่าคงที่ เสมือนเป็น สัญญาณไฟตรงถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงสองตัวให้กับระบบแบบปรับตัวได้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนจากการ สั่นสะเทือนที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาและเป็นสัญญาณน้ำหนักเป้าหมายที่คงตัวตามลำดับ นอกจากนั้นแล้วการ ติดตั้งตัวเซนเซอร์ความเร่งยังไม่จำเป็นต้องติดตั้งอยู่ระหว่างตัวโหลด (Load) กับโหลดเซลล์ จึงไม่ก่อให้เกิดการ เสียหายและรบกวนสัญญาณที่ได้รับจากโหลดเซลล์ขณะที่ทำการชั่งน้ำหนัก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์

- เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนออกจากระบบการชั่งน้ำหนัก
- เพื่อสร้างเครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความแม่นยำสูง สามารถหาค่าน้ำหนักได้อย่างรวดเร็ว
- เพื่อหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นและนำไปใช้กับระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ
- เพื่อหาค่าอัตราการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมกับระบบมากที่สุด

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ระบบชั่งน้ำหนักเป็นกระบวนการที่สำคัญในหลายกิจกรรม กิจกรรมบางอย่างต้องการความแม่นยำของ น้ำหนักสูง แต่ในสภาพแวดล้อมจริงที่ไม่สามารถควบคุมได้ พบว่าโหลดเซลล์ที่ใช้สำหรับการชั่งน้ำหนักจะมีการ ปนเปื้อนด้วยการสั่นสะเทือนจากภายนอก

การประยุกต์ใช้งานระบบแบบปรับตัวได้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากใน ปัจจุบันและเป็นวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวน [4] ที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ [5] [6] จึง มีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และอุปกรณ์การสื่อสาร เช่น เครื่องจักรกล โทรศัพท์เคลื่อนที่ [7] [8] เป็น ต้น อัลกอริทึมตัวกรองแบบปรับตัวได้ [9] ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มีหลายอัลกอริทึมด้วยกัน เช่น แอลเอ็มเอ สอัลกอริทึม (Least Mean Square Algorithm: LMS Algorithm) หรืออัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด, นอร์มอลไลซ์แอลเอ็มเอสอัลกอริทึม (The Normalised Least Mean Square: NLMS Algorithm) และรีเคอซีฟที ลีสต์สแควร์ (Recursive Least Square: RLS Algorithm) เป็นต้น ในการประยุกต์ใช้งานระบบแบบปรับตัวได้ควร

คำนึงถึงความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน แอลเอ็มเอสอัลกอริทึม เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่มีรูปแบบการคำนวณที่ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์ของสัญญาณอินพุตในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของระบบ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง และนำไปใช้งานสะดวก โดยค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ลดลงนั้นได้มาจากวิธีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบโดยใช้สมการภายในอัลกอริทึม

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขอบเขตรายละเอียดดังนี้

- โหลดเซลล์ที่ซึ่งน้ำหนักได้ในช่วง 0 ถึง 20 กิโลกรัม
- วงจรขยายอินสตรูเมนต์เซ็นอัตราการขยายเท่ากับ 295
- ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 หน่วยความจำแรม 320 กิโลไบต์ หน่วยความจำแฟลช 4 เมกะไบต์ สัญญาณนาฬิกา 240 เมกะเฮิรตซ์
- เซนเซอร์วัดความเร่ง ADXL335
- เครื่องสร้างแรงสั่นสะเทือน YYG-25-6

1.5 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงที่มา ความสำคัญ จุดมุ่งหมาย วัตถุประสงค์ สมมติฐาน ขอบเขต และโครงประกอบของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึง ทฤษฎีที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย ประวัติศาสตร์ของเครื่องซึ่งน้ำหนัก โหลดเซลล์ เซนเซอร์วัดความเร่ง วงจรขยายอินสตรูเมนต์เซ็น ระบบแบบปรับตัวได้ การชักรัดตัวอย่าง ค่าเฉลี่ยแบบสแตติก ค่าเฉลี่ยแบบไดนามิก ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบแบบปรับตัวได้ ค่าความแม่นยำและค่าความเที่ยงตรง

บทที่ 3 กล่าวถึง การดัดแปลงวงจขยายอินสตรูเมนต์เซ็น เซนเซอร์วัดความเร่งที่ใช้วัดแรงสั่นสะเทือน โครงสร้างของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอเพื่อใช้กับแอปพลิเคชันการซึ่งน้ำหนัก วิธีการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบแบบปรับตัวได้ ตัวเครื่องสร้างการสั่นสะเทือน และการออกแบบการทดลอง

บทที่ 4 ผลการทดลองประกอบด้วย ผลการทดลองของวงจขยายอินสตรูเมนต์เซ็น ผลการทดสอบของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ การทดลองสร้างโมเดลคณิตศาสตร์เพื่อหาสมการคำนวณค่าน้ำหนัก ผลการทดลองเพื่อหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดในการนำมากำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ ผลการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการนำค่าจากโหลดเซลล์โดยตรงมาคำนวณหาค่า

น้ำหนัก ผลการทดลองวัดประสิทธิภาพของระบบ ผลการทดลองเพื่อหาค่าความเที่ยงตรงและผลการทดลองเพื่อหาค่าความแม่นยำของระบบเครื่องชั่งน้ำหนัก

บทที่ 5 บทสรุป และข้อเสนอแนะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Weighing scale)

ประวัติความเป็นมา และวิวัฒนาการของเครื่องชั่งน้ำหนักมีมาตั้งแต่ยุคโบราณ โบราณวัตถุที่เก่าแก่ที่สุดของเครื่องชั่งน้ำหนักถูกค้นพบในหุบเขาแม่น้ำสินธุ ใกล้กับปากีสถานในปัจจุบัน ย้อนหลังไปถึงประมาณ 2,000 ปีก่อนคริสต์ศักราช เนื่องจากการค้าที่พัฒนาขึ้นในสมัยโบราณ พ่อค้าได้พัฒนาความจำเป็นในการประเมินมูลค่าของสินค้า เช่น พืชผล เสื้อผ้าและทองเพื่อแลกกับสินค้า เครื่องชั่งน้ำหนักในยุคโบราณจะอาศัยการปรับสมดุลของน้ำหนัก โดยจะประกอบไปด้วยแผ่นเพลตสองแผ่นติดกับคานเหนือศีรษะซึ่งยึดกับเสากลาง การวัดทำได้โดยการวางวัตถุบนเพลตและหินที่ทราบค่าน้ำหนักบนอีกแผ่นเพลตหนึ่ง

ในประมาณ 1,878 ปีก่อนคริสต์ศักราช ในอียิปต์มีหลักฐานการใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก โดยมีความสำคัญเชิงสัญลักษณ์และจิตวิญญาณ รวมถึงนักโบราณคดีได้ค้นพบภาพจิตรกรรมบนฝาผนัง ณ สุสานของเหล่าเทพ ซึ่งภาพเหล่านี้แสดงถึงการใช้งานของเครื่องชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในพิธีกรรมหลังความตายของคนที่ควรขึ้นสวรรค์ โดยการนำหัวใจมาชั่งวัดน้ำหนักดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องชั่งน้ำหนักของอารยธรรมอียิปต์ในยุคโบราณ

(ที่มา : Egyptian Book of the Dead, 2014)

ในประเทศจีนมีการค้นพบเครื่องชั่งน้ำหนักในหลุมฝังศพในภูเขาไซแจกอง (Zuo Jia Gong) ในมณฑลหูหนาน ตั้งแต่ศตวรรษที่ 3 ถึง 4 ก่อนคริสต์ศักราช โดยวัสดุของเครื่องชั่งเหล่านั้นสร้างจากไม้และทองสัมฤทธิ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องชั่งโลหะที่ใช้ในสมัยโรมันแสดงดังรูปที่ 2.2 และในรูปที่ 2.3 คือภาพแกะสลักของชาวโรมันที่แสดงคนขายเนื้อพร้อมเครื่องชั่งน้ำหนักของเขาอยู่ด้านหลัง



รูปที่ 2.2 ต้มน้ำหนักที่พิพิธภัณฑน์เนเปิ้ลส์ (Naples)
(ที่มา : National Archaeological Museum of Naples, 2017)

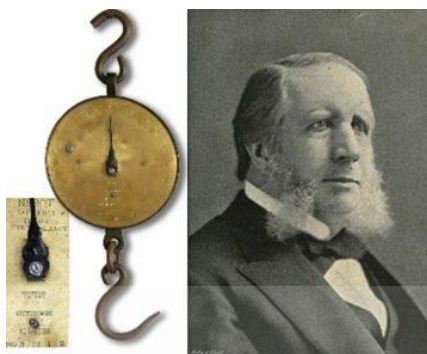


รูปที่ 2.3 ภาพแกะสลักของคนขายเนื้อชาวโรมัน
(ที่มา : National Archaeological Museum of Naples, 2017)

แต่ในระบบตราชั่งสมดุลนั้นมีปัญหาการโกงน้ำหนักเกิดขึ้น เนื่องจากพ่อค้าในยุคสมัยนั้นมักจะพกต้มน้ำหนักที่มีค่าน้ำหนักไม่เท่ากับสินค้า จนกระทั่งในราวปีค.ศ. 1770 ความก้าวหน้าในการออกแบบและการพัฒนาเครื่องชั่งน้ำหนักให้ดียิ่งขึ้นและแม่นยำยิ่งขึ้น เริ่มมีการใช้เทคโนโลยีมาปรับปรุงมากขึ้น หลังจากที่มีการประดิษฐ์เครื่องชั่งแบบสปริงโดย ริชาร์ด ซอลเตอร์ (Richard Salter) ผู้ผลิตเครื่องชั่งชาวอังกฤษแสดงดังรูปที่ 2.4 หลังจากนั้นเครื่องชั่งไม่ได้อาศัยต้มน้ำหนักตัวนับอีกต่อไป จึงทำให้เกิดการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งใหญ่ ซึ่งทำให้เครื่องชั่งสปริงถูกนำมาใช้กันมากที่สุดทั้งด้านเชิงพาณิชย์ และอุตสาหกรรมถึงจะถูกใช้มานานมากกว่า 200 ปี แต่เครื่องชั่งแบบสปริงยังสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในปัจจุบันดังรูปที่

2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 ริชาร์ด ซอลเตอร์ ผู้ประดิษฐ์เครื่องชั่งแบบสปริง

(ที่มา : Wikipedia, 2001)



รูปที่ 2.5 เครื่องชั่งสปริงในช่วงราวปี ค.ศ. 1770

(ที่มา : Grace's Guide To British Industrial History, 1995)

ซึ่งต่อมาหลังจาก ค.ศ. 1940 ได้มีการใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มาช่วยเพิ่มความแม่นยำให้กับเครื่องชั่งน้ำหนัก แต่ยังคงอาศัยหลักการยืดหรือหดของสปริงโดยใช้โหลดเซลล์ (Load Cell) ที่พัฒนามาจากสเตรนเกจเซลล์ (Strain Gauge Cells) และเกิดกฎหมายการควบคุมการใช้เครื่องชั่งน้ำหนัก โดยจะต้องมีการสอบเทียบ (Calibration) เพื่อตรวจสอบเครื่องชั่งเป็นระยะๆ และต้องสอบเทียบทุกครั้งเมื่อมีการย้ายตำแหน่งเครื่องชั่ง โดยกฎหมายทางการค้าระหว่างประเทศมักยอมรับการชั่งที่มีการทำซ้ำ (Repeatability) 10 ครั้ง เพื่อให้มั่นใจว่าความผิดพลาดซึ่งเกิดจากการชั่งมีไม่มากเกินกว่า 10 เปอร์เซ็นต์

ในศตวรรษที่ผ่านมา การพัฒนาล่าสุดของเครื่องชั่งดิจิตอลสมัยใหม่ได้เห็นการเปลี่ยนแปลงจากการคำนวณน้ำหนักทั่วไปเป็นความสามารถในการวัดน้ำหนักได้อย่างแม่นยำลงไปถึงระดับโมเลกุล โดยที่ความแม่นยำของเครื่องชั่งดิจิตอลไม่ได้รับผลกระทบจากการแปรผันของแรงโน้มถ่วงซึ่งต่างจากเครื่องชั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบสปริงและต่อมาในปี ค.ศ. 1980 ริชาร์ด รोजบราวด์ (Richard Loshbough) และเอ็ดเวิร์ด พายเออร์ (Edward Pryor) เป็นคนแรกที่ขอสิทธิบัตรสำหรับเครื่องชั่งดิจิตอล

ในยุคปัจจุบันเครื่องชั่งน้ำหนักได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องทั้งคุณภาพสูงขึ้นและราคาถูกลง เพื่อให้ประชาชนตามบ้านเรือนทั่วไปสามารถซื้อเครื่องชั่งน้ำหนักคุณภาพสูงได้ ยกตัวอย่างเครื่องชั่งน้ำหนักคุณภาพสูงที่ถูกนำมาขายและจำหน่ายให้ประชาชนในราคาที่ถูกลงอาทิเช่น เครื่องชั่งน้ำหนักเชิงวิเคราะห์ที่ออกแบบมาเพื่อวัดมวลขนาดเล็กในช่วงน้ำหนักระดับมิลลิกรัมดังรูปที่ 2.6 และเครื่องชั่งน้ำหนักเชิงวิเคราะห์ที่มีฐานวางวัสดุที่จะทำการชั่งเป็นลักษณะแบบจานเดี่ยวดังรูปที่ 2.7 ซึ่งทั้งสองชนิดนี้เป็นเครื่องชั่งชนิดแรกๆที่ใกล้เคียงกันกับที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์แต่ถูกนำมาจำหน่ายให้ประชาชนทั่วไปใช้ โดยผลิตขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1945



รูปที่ 2.6 เครื่องชั่งน้ำหนักเชิงวิเคราะห์มวลขนาดเล็ก

(ที่มา : Precisa, 2021)

รูปที่ 2.7 เครื่องชั่งน้ำหนักเชิงวิเคราะห์ที่มีฐานชั่งน้ำหนักเป็นลักษณะแบบจานเดี่ยว

(ที่มา : Precisa, 2021)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

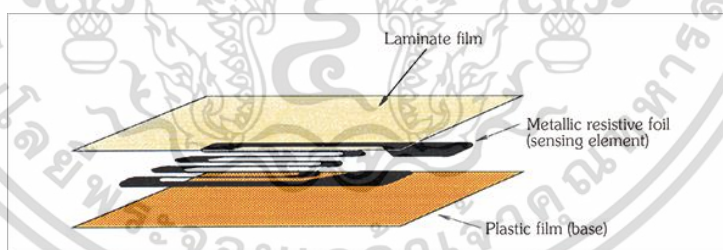
อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยีอย่างมาก โดยการผสมผสานการทำงานของเครื่องซึ่งนำหนักกับไมโครคอนโทรลเลอร์ และอินเทอร์เน็ต ซึ่งเป็นการพัฒนาอุปกรณ์ทางฮาร์ดแวร์ร่วมกับซอฟต์แวร์ หรือที่ในปัจจุบันเรียกว่า อินเทอร์เน็ตออฟติงส์ (Internet Of Things : IoT) ซึ่งช่วยให้การใช้งานสะดวกสบายมากขึ้น และยังสามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้มากขึ้นอีกด้วย

2.2 สเตรนเกจ (Strain Gauge)

สเตรนเกจเป็นเซ็นเซอร์ที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเครียดในเนื้อวัสดุ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงภายนอกที่มากระทำและทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้า สเตรนเกจสามารถตรวจวัดการยืดหรือหดตัวของเนื้อวัสดุ ซึ่งการยืดหรือหดตัวที่ตรวจวัดได้นี้ทำให้รู้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างได้ และความเค้นยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการประเมินความแข็งแรงและความปลอดภัยของโครงสร้างอีกด้วย

2.2.1 โครงสร้างของสเตรนเกจ

โครงสร้างของสเตรนเกจที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย มีโครงสร้างเป็นแถบของขดลวดตัวต้านทานทางไฟฟ้าที่ทำจากโลหะแผ่นบางมีความหนาประมาณ 3 ถึง 6 ไมโครเมตร ซึ่งยึดติดอยู่บนฐานที่เป็นแผ่นฟิล์มพลาสติกมีความหนาประมาณ 15 ถึง 16 ไมโครเมตร แล้วถูกเคลือบด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ด้านบน แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของสเตรนเกจ

(ที่มา : kyowa-ei, 2020)

2.2.2 หลักการทำงานของสเตรนเกจ

สเตรนเกจถูกยึดเข้ากับวัตถุที่ต้องการวัดความเครียดอย่างแน่นหนา จึงทำให้ตัวต้านทานทางไฟฟ้าจะยืดหรือหดตัวตามความเครียดของวัตถุ ซึ่งค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของโลหะส่วนใหญ่จะมีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงเมื่อตัวโลหะมีการยืดหรือหดตัวทางกล สเตรนเกจใช้หลักการนี้ในการวัดค่าความเครียดผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานทางไฟฟ้า โดยทั่วไปตัวรับสัญญาณของสเตรนเกจทำจากโลหะผสมแผ่นบางที่เป็นส่วนผสมระหว่างทองแดงกับนิกเกิล โลหะผสมแผ่นบางนี้มีอัตราการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าต่อความเครียดเป็นแบบเชิงเส้นที่มีค่าคงที่แน่นอนค่าหนึ่ง ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1)

$$\frac{\Delta R}{R} = K_s \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

โดยที่ R คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าเดิมของสเตรนเกจ, ΔR คือ ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อสเตรนเกจมีการยืดหรือหดตัว, K_s คือ ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ หรือ เกจแฟกเตอร์ และ ε คือ ความเครียด

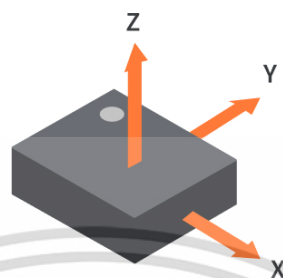
K_s จะมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของโลหะ อย่างไรก็ตามเนื่องจากความเครียดเป็นปรากฏการณ์ที่มีขนาดน้อยมากๆ จึงทำให้ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงของความเครียดมีค่าน้อยมากๆ เช่นกัน ในความเป็นจริงการวัดค่าเหล่านี้ให้ถูกต้องเป็นไปได้ยาก และไม่สามารถวัดค่าได้ด้วยเครื่องมือวัดความต้านทานทางไฟฟ้าทั่วไป ด้วยเหตุนี้การวัดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานทางไฟฟ้าจึงต้องใช้วงจรไฟฟ้าที่เรียกว่าวิทสโตนบริดจ์ หรือ โหลดเซลล์

โหลดเซลล์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยสเตรนเกจ 4 ตัว ซึ่งจัดเรียงวงจรในรูปแบบของวงจรวิทสโตนบริดจ์ แต่โหลดเซลล์ที่ประกอบด้วยสเตรนเกจเพียงหนึ่งหรือสองตัวก็มีเช่นกัน สัญญาณเอาต์พุตของโหลดเซลล์มักจะมีขนาดเพียงไม่กี่มิลลิโวลต์ และต้องการการขยายสัญญาณเอาต์พุตก่อนที่จะนำไปใช้งานได้ โหลดเซลล์เกือบ 80 เปอร์เซ็นต์ นั้นเป็นชนิดสเตรนเกจ โดยโหลดเซลล์แบบสเตรนเกจแบ่งเป็น 2 ประเภท ชนิดที่ 1 คือโหลดเซลล์แบบใช้แรงกดซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้แรงกดลงบนตัวโหลดเซลล์ และชนิดที่ 2 คือโหลดเซลล์แบบใช้แรงดึงซึ่งออกแบบมาเพื่อใช้แรงดึงตัวโหลดเซลล์ให้ออกจากกัน

2.3 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

เซนเซอร์วัดความเร่งคือ อุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์เชิงกลที่ใช้เพื่อวัดแรงในการเร่ง แรงนี้อาจเป็นแรงคงที่ อย่างเช่น แรงโน้มถ่วง หรือแรงพลวัตที่เกิดจากการเคลื่อนที่ หรือการสั่นสะเทือนของเซนเซอร์วัดความเร่ง โดยทั่วไปเซนเซอร์วัดความเร่งมีทั้งเอาต์พุตแบบแอนะล็อกและดิจิทัล ในส่วนของเอาต์พุตแบบแอนะล็อกจะเป็นแรงดันไฟต่อเนื่องตามความเร่ง และในส่วนของเอาต์พุตแบบดิจิทัลจะทำการมอดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) ซึ่งทำให้เอาต์พุตเป็นคลื่นรูปสี่เหลี่ยมตามปริมาณความเร่งที่เกิดขึ้น โดยเซนเซอร์วัด

ความเร่งมีสองชนิดคือ เซนเซอร์วัดความเร่งชนิดแบบโซลีสติกแมส และชนิดแบบเพียโซอิเล็กทริกส์ โดยตัวอย่างของ เซนเซอร์วัดความเร่งจะแสดงดังรูปที่ 2.9

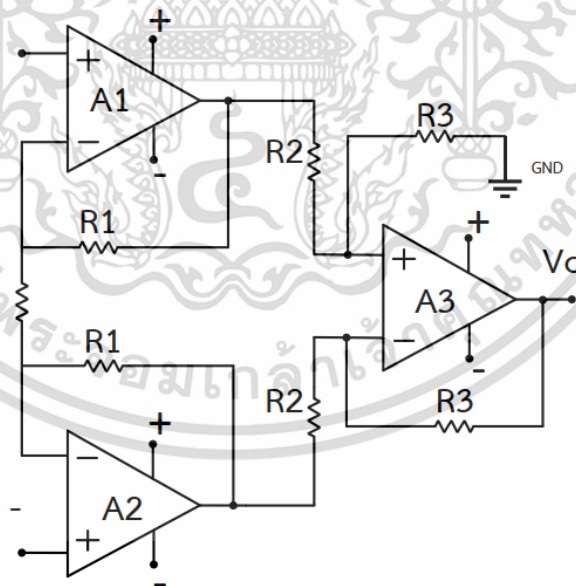


Accelerometer sensing axis orientation

รูปที่ 2.9 เซนเซอร์วัดความเร่ง
(ที่มา : circuitbread, 2022)

2.4 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ชัน (Instrumentation Amplifier)

วงจขยายอินสตรูเมนต์ชันเป็นวงจรวม (Integrated Circuit) โดยมีแผนผังวงจรดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 วงจขยายอินสตรูเมนต์ชัน

วงจขยายอินสตรูเมนต์ชันประกอบด้วยวงจขยายแรงดันผลต่างภาคที่ 1 ซึ่งมีออปแอมป์ A_1 และ A_2 ทำหน้าที่ขยายแรงดันผลต่างแบบไม่กลับเฟส และวงจภาคที่ 2 มีออปแอมป์ A_3 ทำหน้าที่ขยายแรงดันผลต่างระหว่าง V_2 และ V_1 ข้อดีของวงจขยายอินสตรูเมนต์ชันคือ 1) อัตราขยายแรงดันของวงจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่ามากซึ่งเหมาะสมกับการขยายสัญญาณที่มีขนาดเล็ก เช่น สัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor Signal), สัญญาณชีวภาพ (Bio Signal), สัญญาณจากวงจรปริตจ์ และสัญญาณจากวงจรส่วนหน้า (Front end) ที่มีขนาดเล็ก และ 2) อัตราการกำจัดสัญญาณโหมตรงร่วมสูง (Common Mode Rejection Ratio) ซึ่งโดยปกติแล้วสัญญาณชีวภาพ หรือสัญญาณรบกวนซึ่งขั้วบวกและลบมีลักษณะเหมือนกัน ดังนั้นวงจรขยายอินสตรูเมนต์ชั้นเหมาะสมที่ใช้ขยายสัญญาณขนาดเล็กและมีสัญญาณโหมตรงร่วมที่เราไม่ต้องการ การวิเคราะห์วงขยายอินสตรูเมนต์ชั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้

จากแรงดันผลต่างระหว่าง V_{O1} และ V_{O2} เป็นดังสมการที่ (2.2)

$$V_{O1} - V_{O2} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{Gain}}\right) (V_1 - V_2) \quad (2.2)$$

และจากแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ A_3 เป็นดังสมการที่ (2.3)

$$V_{out} = -\frac{R_3}{R_2} (V_{O1} - V_{O2}) \quad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) สามารถเขียนสมการแรงดันเอาต์พุตของวงจรได้ดังนี้

$$V_{out} = \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{2R_1}{R_{Gain}}\right) (V_2 - V_1) \quad (2.4)$$

ดังนั้นอัตราขยายของวงจรจะเป็นดังสมการที่ (2.5) ดังนี้

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{V_{out}}{V_2 - V_1} \\ &= \left(1 + \frac{2R_1}{R_{Gain}}\right) \frac{R_3}{R_2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

2.5 ระบบแบบปรับตัวได้ (Adaptive System)

2.5.1 กล่าวนำ

การประยุกต์ใช้งานระบบแบบปรับตัวได้ในการกำจัดสัญญาณรบกวนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน และเป็นวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวนที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ จึงมีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ และอุปกรณ์การสื่อสาร เช่น เครื่องจักรกล โทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น

ระบบแบบธรรมดาโดยทั่วไปจะมีค่าสัมประสิทธิ์คงที่ ทำให้บางสภาวะไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ทำให้ระบบแบบปรับตัวได้ถูกนำมาใช้งานแทนระบบแบบธรรมดา โดยที่ระบบแบบปรับตัวได้สามารถปรับเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองในลักษณะแบบอัตโนมัติ ทำให้ไม่จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์ของสัญญาณอินพุตเข้า

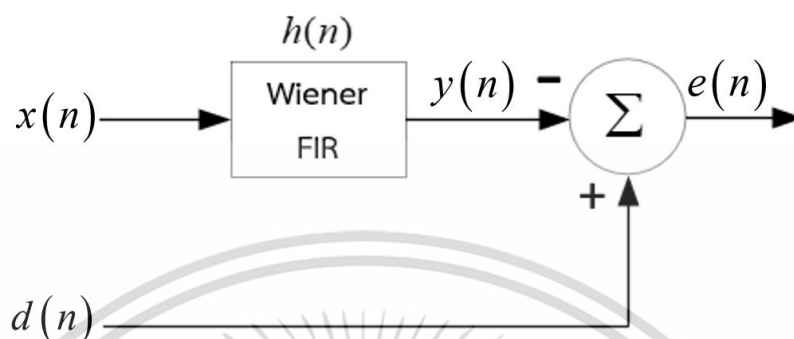
ในการเลือกใช้งานชนิดของระบบแบบปรับตัวได้ นิยมใช้แบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัด (Finite Impulse Response : FIR) มากกว่าแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัด (Infinite Impulse Response : IIR) เนื่องจากผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนจำกัดไม่ต้องกังวลเรื่องเสถียรภาพของระบบเพราะระบบไม่มีโพล (Pole) มีเพียงซีโร (Zero) เท่านั้น แต่ชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำนวนไม่จำกัดนั้นมีโพลอยู่ด้วย จึงทำให้ระบบจะขึ้นอยู่กับผลการตอบสนองทางธรรมชาติ

และเนื่องจากในกระบวนการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบแบบปรับตัวได้มีความสัมพันธ์กับความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีการเลือกใช้อัลกอริทึมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบแบบปรับตัวได้ แต่การอธิบายระบบแบบปรับตัวได้จำเป็นจะต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับระบบตัวกรองเชิงเส้นในสภาวะที่เหมาะสม (Linear Optimum Filter) ซึ่งตัวกรองเชิงเส้นในสภาวะที่เหมาะสมที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายคือ ตัวกรองแบบวินเนอร์

ซึ่งในส่วนแรกจะอธิบายถึงตัวกรองแบบวินเนอร์ ส่วนที่ 2 จะอธิบายถึงสภาวะที่เหมาะสมของระบบแบบปรับตัวได้ และในส่วนสุดท้ายจะอธิบายถึงระบบแบบปรับตัวได้โดยอาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด โดยในที่นี้จะขออธิบายระบบแบบปรับตัวได้อันดับหนึ่งก่อน โดยจะสรุปค่าต่างๆ ของระบบแบบปรับตัวได้ที่ไม่ใช่อันดับที่หนึ่งไว้ในตอนท้ายของส่วนที่ 1

2.5.2 ตัวกรองแบบวินเนอร์ (Wiener Filter)

โครงสร้างของตัวกรองแบบวินเนอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของตัวกรองแบบวินเนอร์

จากรูปที่ 2.11 จะได้ว่า

$d(n)$	คือ	สัญญาณอินพุต
$x(n)$	คือ	เวกเตอร์สัญญาณอินพุตขาเข้า (Input Signal Vector)
$h(n)$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองสัญญาณ (Wiener Filter Coefficient)
$y(n)$	คือ	สัญญาณที่ถูกประมาณค่าโดยตัวกรองวินเนอร์ (Estimated Signal)
$e(n)$	คือ	ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างสัญญาณอินพุตกับสัญญาณที่ถูกประมาณค่าโดยตัวกรองวินเนอร์ (Error Occurrence)

โดยที่ $y(n)$ มีค่าดังสมการที่ (2.6) และ $e(n)$ มีค่าดังสมการที่ (2.7) ดังนี้

$$y(n) = h(n)x(n) \quad (2.6)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.7)$$

โดยปกติการออกแบบระบบของระบบแบบปรับตัวได้ จะพยายามทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าต่ำที่สุด แต่ในบางครั้งค่าความผิดพลาดไม่ได้ถูกนำไปเป็นตัวชี้วัดความต้องการของระบบเสมอไป แต่เป็นประสิทธิภาพของระบบที่เป็นตัวชี้วัด ดังนั้นประสิทธิภาพของตัวกรองแบบวินเนอร์จะขึ้นอยู่กับค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด เนื่องจากค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดมีค่าเป็นบวกเสมอ ทำให้สามารถบ่งบอก

ประสิทธิภาพของระบบได้อย่างชัดเจน โดยตัววัดปริมาณความผิดพลาดจะถูกเรียกว่า ฟังก์ชัน
วัตถุประสงค์ (Cost Function) หรือ ε ดังสมการที่ (2.8) ดังนี้

$$\begin{aligned}\varepsilon &= E[e^2(n)] \\ &= E[e(n)e(n)] \\ &= E[(d(n) - y(n))^2] \\ &= E[d^2(n) - 2d(n)y(n) + y^2(n)]\end{aligned}\quad (2.8)$$

โดยที่ $E[\square]$ คือ ตัวดำเนินการหาค่าคาดหวัง (Expectation Operator)

จากสมการที่ (2.8) เมื่อแทนค่า $y(n)$ เท่ากับ $h(n)x(n)$ จะได้สมการที่ (2.9) ดังนี้

$$\begin{aligned}\varepsilon &= E[d^2(n)] - 2E[d(n)h(n)x(n)] + E[[h(n)x(n)]^2] \\ &= E[d^2(n)] - 2h(n)r_{dx} + h(n)R_{xx}h(n)\end{aligned}\quad (2.9)$$

โดยที่ $R_{xx} = E[x(n)x(n)]$ คือ เมทริกซ์สหสัมพันธ์ (Autocorrelation Matrix) ของ
สัญญาณ $x(n)$

$r_{dx} = E[d(n)x(n)]$ คือ เวกเตอร์สหสัมพันธ์ไขว้ (Cross-Correlation Vector)
ระหว่างสัญญาณขาเข้า $x(n)$ กับสัญญาณอ้างอิง $d(n)$

จากสมการที่ (2.9) เมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งสามารถหาได้จากการ
ทำอนุพันธ์ของ ε เทียบกับ h จะได้สมการที่ (2.10) ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{\partial \varepsilon(h)}{\partial h} &= \frac{\partial}{\partial h} (E[d^2(n)] - 2h(n)r_{dx} + h(n)R_{xx}h(n)) \\ &= -2r_{dx} + 2R_{xx}h(n)\end{aligned}\quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.10) ถ้ากำหนดให้ $\frac{\partial \varepsilon(h)}{\partial h} = 0$ จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมที่สุด
กับระบบ $h_o(n)$ ดังสมการที่ (2.11)

$$h_o(n) = R_{xx}^{-1}r_{dx}\quad (2.11)$$

โดยสมการที่ (2.11) จะถูกเรียกว่า สมการวินเนอร์ฮอฟ ซึ่งถ้าแทนค่า $h_o(n)$ จากสมการที่
(2.11) ลงในสมการที่ (2.10) จะสามารถหาค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดได้ดังสมการที่ (2.12)

$$\mathcal{E}_{\min} = \mathbf{R}_{dd} - \mathbf{r}_{dx}^2 \mathbf{R}_{xx}^{-1} \quad (2.12)$$

เมื่อระบบแบบปรับตัวได้ที่ไม่ใช่อันดับที่หนึ่ง เราสามารถเขียน $\hat{x}(n)$ ในรูปแบบเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.13)

$$y(n) = [h_0 \ h_1 \ \dots \ h_m] \begin{bmatrix} x(n) \\ x(n-1) \\ \vdots \\ x(n-m) \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{h}}^T \bar{\mathbf{x}} \quad (2.13)$$

$$\text{เมื่อ } \bar{\mathbf{x}} = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-m)]$$

$$\bar{\mathbf{h}} = [h_0 \ h_1 \ \dots \ h_m]^T$$

โดยที่ m คือ จำนวนสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง และเมื่อต้องการหาเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณ $\bar{\mathbf{x}}$ เวกเตอร์สหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างสัญญาณ $d(n)$ กับสัญญาณอ้างอิง $x(n)$ ของระบบแบบปรับตัวได้ที่ไม่ใช่อันดับที่หนึ่ง สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

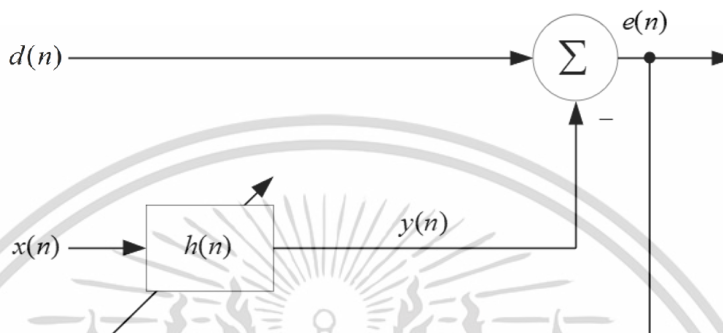
$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{xx} = \mathbf{E}[x(n)x^T(n)] &= \begin{bmatrix} x(n) \\ x(n-1) \\ \vdots \\ x(n-m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n) & x(n-1) & \dots & x(n-m) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} r_{0,0} & r_{0,1} & \dots & r_{0,m} \\ r_{1,0} & r_{1,1} & \dots & r_{1,m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m,0} & r_{m,1} & \dots & r_{m,m} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\mathbf{r}_{dx} = \mathbf{E}[d(n)x(n)] = \begin{bmatrix} d(n)x(n) \\ d(n)x(n-1) \\ d(n)x(n-2) \\ \vdots \\ d(n)x(n-m) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

ในส่วนถัดไปจะอธิบายถึงกลไกในการหาสภาวะที่เหมาะสมของระบบแบบปรับตัวได้

2.5.3 กลไกในการหาสถานะที่เหมาะสมของระบบแบบปรับตัวได้

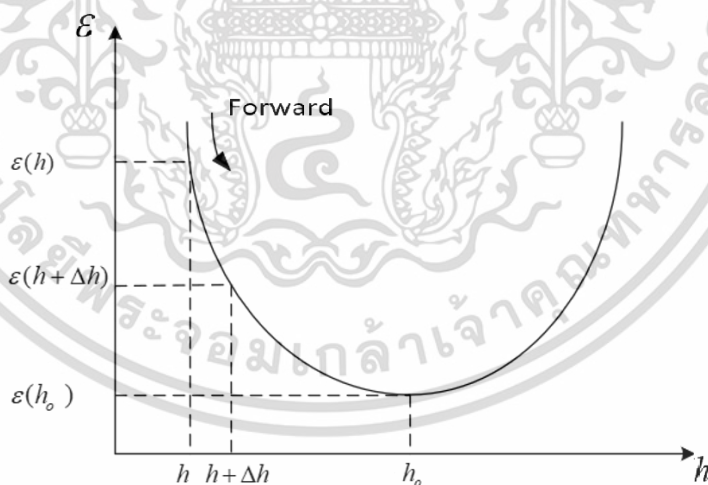
จากโครงสร้างของตัวกรองแบบวินเนอร์ที่ได้อธิบายไปในส่วนที่ 1 ในส่วนนี้จะอธิบายถึงโครงสร้างของระบบแบบปรับตัวได้ที่เกิดขึ้นจากตัวกรองแบบวินเนอร์แบบปรับตัวได้จะแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างระบบแบบปรับตัวได้

จากสมการที่ (2.11) ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมที่สุด $h_0(n)$ ของระบบแบบปรับตัวได้ จะปรับค่าสัมประสิทธิ์ภายใต้วิธีแบบเกรเดียนต์เดสเซนต์ด้วยวิธีการแบบไปข้างหน้า (Forward) ซึ่งก็คือเมื่อเพิ่มค่า h มากขึ้นจะทำให้ค่า ε ลดลง และค่า ε จะเข้าสู่จุดเหมาะสมที่สุดคือ $\varepsilon(h_0)$ ดังรูปที่

2.13



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงการปรับค่าความผิดพลาดด้วยวิธีแบบเกรเดียนต์เดสเซนต์

จากรูปที่ 2.13 ถ้าพิจารณาการเข้าสู่จุด $\varepsilon(h_0)$ ด้วยวิธีแบบไปข้างหน้าจะสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2.16) ดังนี้

$$\varepsilon(h + \Delta h) \leq \varepsilon(h) \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.16) ทำการกระจายอนุกรมเทเลอร์จะได้สมการที่ (2.17) ดังนี้

$$\varepsilon(h + \Delta h) = \varepsilon(h) + \Delta h \frac{\partial \varepsilon(h)}{\partial h} + \varepsilon(0) \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) แทนค่า $\varepsilon(h + \Delta h)$ ลงในสมการที่ (2.16) จะได้สมการที่ (2.18)

$$\varepsilon(h) + \Delta h \frac{\partial \varepsilon(h)}{\partial h} + \varepsilon(0) \leq \varepsilon(h) \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.18) ถ้าค่า $\varepsilon(0)$ มีค่าน้อยกว่า $\varepsilon(h)$ และ $\Delta h \frac{\partial \varepsilon(h)}{\partial h}$ มากๆ ดังนั้นจึงสามารถตัดส่วนของ $\varepsilon(0)$ ที่ทิ้งไปได้ สามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการที่ (2.19) ดังนี้

$$\varepsilon(h) + \Delta h \frac{\partial \varepsilon(h)}{\partial h} \leq \varepsilon(h) \quad (2.19)$$

จากสมการที่ (2.19) เพื่อให้เงื่อนไขของสมการเป็นจริง จึงจำเป็นต้องกำหนดค่า Δh ขึ้นมา ดังนี้

$$\Delta h = -\mu \frac{\partial \varepsilon(h)}{\partial h} \quad (2.20)$$

โดยที่ μ คือ ค่าเกณฑ์การปรับตัว (Adaptation Gain) หรือขนาดขั้น (Step Size) และเมื่อแทนค่า Δh จากสมการที่ (2.20) ลงในสมการที่ (2.19) จะเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\varepsilon(h) - \mu \left[\frac{\partial \varepsilon(h)}{\partial h} \right]^2 \leq \varepsilon(h) \quad (2.21)$$

หลังจากระบบมีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีแบบเกรเดียนท์เดสเซนต์ ซึ่งจะเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2.22)

$$h(n+1) = h(n) + \Delta h(n) \quad (2.22)$$

เมื่อแทนค่า Δh จากสมการที่ (2.20) ลงในสมการที่ (2.22) จะสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} h(n+1) &= h(n) - \mu \left[\frac{\partial \varepsilon(h(n))}{\partial h(n)} \right] \\ &= h(n) - \mu \left[-2E[d(n)x(n)] + 2h(n)E[x(n)x(n)] \right] \\ &= h(n) + 2\mu r_{dx} - 2\mu h(n)R_{xx} \\ &= h(n)(1 - 2\mu R_{xx}) + 2\mu r_{dx} \end{aligned} \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.23) นั้นไม่สามารถใช้งานจริงได้ เนื่องจากเป็นนอนคอสอล (Non-causal) จึงต้องทำให้สมการที่ (2.23) นั้นมีคุณสมบัติคอสอลิตี (Causality) โดยจะเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการที่ (2.24)

$$h(n) = (1 - 2\mu R_{xx})h(n-1) + 2\mu r_{dx} \quad (2.24)$$

โดยระบบจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ

$$0 < \mu < R_{xx}^{-1} \quad (2.25)$$

จากสมการที่ (2.25) เมื่อจัดรูปฟอร์มจะได้สมการผลต่างดังนี้

$$h(n) - (1 - 2\mu R_{xx})h(n-1) = 2\mu r_{dx} \quad (2.26)$$

จากสมการที่ (2.26) สามารถหาผลตอบสนองทางธรรมชาติได้ดังสมการที่ (2.27)

$$h_n(n) - (1 - 2\mu R_{xx})h_n(n-1) = 0 \quad (2.27)$$

เมื่อแทนค่า $h_n(n)$ เท่ากับ $r^n C$ จะสามารถหาค่า r ได้ดังสมการที่ (2.28)

$$r = 1 - 2\mu R_{xx} \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.28) สามารถเขียนสมการผลตอบสนองทางธรรมชาติได้ดังสมการที่ (2.29) ดังนี้

$$h_n(n) = (1 - 2\mu R_{xx})^n C \quad (2.29)$$

จากสมการที่ (2.29) สามารถหาผลตอบสนองบังคับได้ดังสมการที่ (2.30) ดังนี้

$$h_f(n) - (1 - 2\mu R_{xx})h_f(n-1) = 2\mu r_{dx} \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.30) เมื่อกำหนดให้ $h_f(n)$ เท่ากับ A สามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังสมการที่ (2.31)

$$A - (1 - 2\mu R_{xx})A = 2\mu r_{dx} \quad (2.31)$$

จากสมการที่ (2.31) สามารถหาผลตอบสนองบังคับได้ดังสมการที่ (2.32) ดังนี้

$$A = R_{xx}^{-1} r_{dx} \quad (2.32)$$

เพราะฉะนั้นจะได้สมการผลตอบสนองสมบูรณ์ของระบบแบบปรับตัวได้ดังสมการที่ (2.33)

ดังนี้

$$h(n) = h_n(n) + h_f(n)$$

$$= (1 - 2\mu R_{xx})^n C + R_{xx}^{-1} r_{dx} \quad (2.33)$$

จากสมการที่ (2.33) แทนค่า n เท่ากับ 0 เพื่อหาค่า C ได้สมการที่ (2.34) ดังนี้

$$\begin{aligned} h(0) &= (1 - 2\mu R_{xx})^0 C + R_{xx}^{-1} r_{dx} \\ C &= h(0) - R_{xx}^{-1} r_{dx} \end{aligned} \quad (2.34)$$

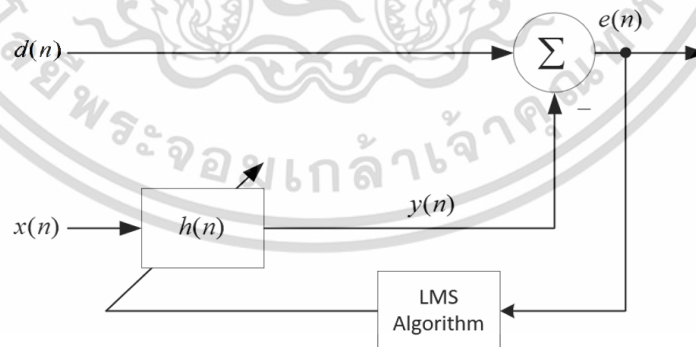
จากสมการที่ (2.34) เมื่อแทนค่า C ลงในสมการที่ (2.33) จะได้สมการการปรับสัมประสิทธิ์ของระบบแบบปรับตัวได้ดังสมการที่ (2.35) ดังนี้

$$h(n) = (h(0) - R_{xx}^{-1} r_{dx})(1 - 2\mu R_{xx})^n + R_{xx}^{-1} r_{dx} \quad (2.35)$$

จากสมการที่ (2.35) จะเห็นได้ว่าเมื่อ $h(0)$ มีค่าเท่ากับ $R_{xx}^{-1} r_{dx}$ จะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมในทันที แต่ในทางกลับกันการกำหนดค่า μ นั้นต้องคำนึงถึงค่าความผิดพลาดและความเร็วในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบ จึงทำให้การกำหนดค่า $h(0)$ มีความสำคัญอย่างมาก โดยในส่วนต่อไปจะอธิบายระบบแบบปรับตัวได้โดยอาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด

2.5.4 อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Least Mean Square Algorithm)

อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดเป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่มีรูปแบบการคำนวณที่ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์ของสัญญาณอินพุตในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของระบบ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง และนำไปใช้งานสะดวก โดยค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ลดลงนั้นได้มาจากวิธีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบโดยใช้สมการภายในอัลกอริทึม โดยโครงสร้างระบบแบบปรับตัวได้ที่อาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างระบบแบบปรับตัวได้ที่อาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด

จากสมการที่ (2.11) เมื่ออาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดจะเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{\partial \varepsilon(h(n))}{\partial h(n)} = -2r_{dx} + 2h(n)R_{xx}$$

$$\begin{aligned}
&= -2E[d(n)x(n)] + 2h(n)E[x(n)x(n)] \\
&= 2E[h(n)x(n)x(n) - d(n)x(n)] \\
&= 2E[y(n)x(n) - d(n)x(n)] \\
&= 2E[x(n)[y(n) - d(n)]] \\
&= 2E[x(n)[-d(n) - y(n)]] \\
&= -2E[x(n)e(n)] \tag{2.36}
\end{aligned}$$

เมื่อแทนค่า $\frac{\partial \varepsilon(h(n))}{\partial h(n)}$ จากสมการที่ (2.36) ลงในสมการที่ (2.23) จะได้สมการที่ (2.37) ดังนี้

$$\begin{aligned}
h(n+1) &= h(n) + \Delta h(n) \\
&= h(n) - \mu \left[\frac{\partial \varepsilon(h(n))}{\partial h(n)} \right] \\
&= h(n) + 2\mu E[x(n)e(n)] \tag{2.37}
\end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.37) โดยค่า $E[x(n)e(n)]$ จะถูกประมาณค่าให้เท่ากับ $x(n)e(n)$ ดังนั้นจะเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$h(n+1) \approx h(n) + 2\mu x(n)e(n) \tag{2.38}$$

และเมื่อทำให้สมการที่ (2.38) มีคุณสมบัติคอซอลิตีจะได้สมการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของระบบแบบปรับตัวได้โดยอาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดดังสมการที่ (2.36)

$$h(n) \approx h(n-1) + 2\mu x(n-1)e(n) \tag{2.39}$$

จากสมการที่ (2.39) จะเห็นว่าค่าคาดหวังได้ถูกนำออกไปจากสมการการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวิธีที่ใช้อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด แต่การนำค่าคาดหวังออกนี้ส่งผลให้ค่าความผิดพลาดไม่เข้าสู่จุดต่ำที่สุดอย่างแท้จริง

2.6 การซัดตัวอย่าง (Sampling)

การวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณต่างๆ ส่วนใหญ่จะทำในรูปของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา แต่สัญญาณที่ใช้กันส่วนมากจะอยู่ในรูปของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา ดังนั้นกระบวนการแปลงสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาให้อยู่ในรูปของสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องทางเวลา หรือเรียกว่า กระบวนการซัดตัวอย่าง (Sampling Process) จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่สุดของระบบวิศวกรรมสื่อสาร

กระบวนการซัดตัวอย่างจะทำการซัดตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา โดยทั่วไปข้อมูลแต่ละตัวอย่างจะถูกเรียกว่า แซมเปิล (Sample) และสิ่งที่ต้องการทางปฏิบัติจากกระบวนการซัดตัวอย่างคือ สัญญาณที่ผ่านกระบวนการซัดตัวอย่างต้องไม่สูญเสียสัญญาณดั้งเดิมเลย เพื่อสามารถสร้างสัญญาณดั้งเดิมกลับคืนมาได้อย่างสมบูรณ์ อย่างไรก็ตามข้อกำหนดนี้เป็นจริงได้ก็ต่อเมื่อกระบวนการซัดตัวอย่างสอดคล้องกับทฤษฎีบทการซัดตัวอย่างของไนควิสต์ (Nyquist's Sampling Theorem)

ทฤษฎีบทการซัดตัวอย่างของไนควิสต์ได้กล่าวถึงเงื่อนไขเมื่อไม่มีการสูญเสียแซมเปิลที่ได้จากการซัดตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา จึงทำให้แซมเปิลเหล่านี้สามารถนำกลับมาสร้างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาให้กลับเป็นเหมือนสัญญาณดั้งเดิมได้โดยไม่ผิดเพี้ยน ซึ่งสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาต้องเป็นสัญญาณที่มีแถบความถี่จำกัด (Band-Limited Signal) และความถี่ของการซัดตัวอย่างต้องมากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความถี่สูงสุดของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลานั้น

โดยการซัดตัวอย่างสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลา ถ้ากำหนดให้ $x(t)$ คือสัญญาณไม่เป็นคาบที่ต่อเนื่องทางเวลาและเป็นฟังก์ชันค่าจริง โดยมีผลการแปลงฟูเรียร์เท่ากับ $X(j\omega)$ ดังนั้นสัญญาณ $x(t)$ จะเป็นสัญญาณที่มีแถบความถี่จำกัดก็ต่อเมื่อเป็นดังสมการที่ (2.40)

$$X(j\omega) = 0, \text{ สำหรับ } |\omega| > \omega_m \quad (2.40)$$

เมื่อ ω_m คือความถี่สูงสุดของสัญญาณ $x(t)$ มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อวินาที ดังนั้นถ้าต้องการให้ชุดสัญญาณที่เก็บแซมเปิลจากการซัดตัวอย่างของสัญญาณที่ต่อเนื่องทางเวลาโดยไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น ดังนั้นต้องทำการซัดตัวอย่างสัญญาณ $x(t)$ ด้วยความถี่ดังสมการที่ (2.41)

$$\omega_s \geq 2\omega_m \quad (2.41)$$

เมื่อ $\omega_s = 2\pi/T_s$ คือความถี่การซัดตัวอย่าง โดยที่ความถี่การซัดตัวอย่างต่ำสุดคือ $\omega_s = 2\omega_m$ ซึ่งเรียกว่า อัตราไนควิสต์ (Nyquist Rate) แต่ถ้าทำการซัดตัวอย่างสัญญาณ $x(t)$ ด้วยความถี่ $\omega_s < 2\omega_m$ จะทำให้เกิดความผิดเพี้ยนภาพ (Aliasing) ซึ่งก็คือจะทำให้สัญญาณ $x(t)$ ที่กลับคืนมานั้นมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณ $x(t)$ ดั้งเดิม

2.7 ค่าเฉลี่ยแบบสถิต (Static Average)

เมื่อต้องการเก็บข้อมูลตัวเลขที่สำคัญในปริมาณมากมาวิเคราะห์ โดยที่ข้อมูลทั้งหมดไม่สามารถตัดทิ้งออกไปได้แม้แต่ค่าเดียว ดังนั้นการใช้ค่าเฉลี่ยเพื่อสรุปค่าตัวเลขของข้อมูลทั้งหมดให้เหลือเพียงแค่ค่า

เดียว จึงเป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ แต่ถ้ามีข้อมูลบางตัวมีค่าแปลกจากข้อมูลส่วนใหญ่ไปมาก อาจจะทำให้มีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยเช่นกัน โดยทั่วไปค่าเฉลี่ยจะมีสูตรดังสมการที่ (2.42)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.42)$$

โดยที่

\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

$\sum_{i=1}^n x_i$ คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ตัวแปรที่สำคัญที่สุดของค่าเฉลี่ยคือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด เนื่องจากการเก็บจำนวนข้อมูลที่ไม่มากพอ จะทำให้ไม่ได้ค่าเฉลี่ยที่ดีที่สุด ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ยกตัวอย่างอาทิเช่น ในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ถ้าจำนวนข้อมูลมีมาก ส่งผลให้การทดลองนั้นจะมีความน่าเชื่อถือ ดังนั้นจำนวนข้อมูลจึงมีความสำคัญต่อการหาค่าเฉลี่ยเป็นอย่างมาก

2.8 ค่าเฉลี่ยแบบไดนามิก (Dynamic Average)

ค่าเฉลี่ยแบบไดนามิกที่ทั่วโลกนิยมนำมาใช้คือ ค่าเฉลี่ยแบบเคลื่อนที่ (Moving Average: MA) ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้ในการพยากรณ์สิ่งต่างๆ อาทิเช่น ราคาหุ้น (Stock), ราคาสินค้าโภคภัณฑ์ (Commodity) และราคาคริปโทเคอร์เรนซี (Cryptocurrency) เป็นต้น ซึ่งในที่นี้จะอธิบายถึงการหาค่าเฉลี่ยในปัจจุบันที่ใช้ค่าเฉลี่ยจากอดีต และเมื่อต้องการหาค่าเฉลี่ยในอดีตจะสามารถหาได้ดังสมการที่ (2.43)

$$\bar{x}_{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} x_i}{n-1} \quad (2.43)$$

โดยที่ \bar{x}_{n-1} คือ ค่าเฉลี่ยในอดีตของข้อมูล

$\sum_{i=1}^{n-1} x_i$ คือ ผลรวมของข้อมูลในอดีตทั้งหมด

n คือ จำนวนข้อมูลในปัจจุบันทั้งหมด

นำสมการที่ (2.43) มาเขียนใหม่จะได้สมการที่ (2.44) ดังนี้

$$\sum_{i=1}^{n-1} x_i = (n-1)\bar{x}_{n-1} \quad (2.44)$$

เมื่อแทนสมการที่ (2.44) ลงในสมการที่ (2.42) จะสามารถเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} \bar{x}_n &= \frac{1}{n}((n-1)\bar{x}_{n-1} + x_n) \\ &= \frac{n\bar{x}_{n-1} - \bar{x}_{n-1} + x_n}{n} \\ &= \frac{n\bar{x}_{n-1}}{n} + \frac{x_n - \bar{x}_{n-1}}{n} \\ &= \bar{x}_{n-1} + \frac{x_n - \bar{x}_{n-1}}{n} \end{aligned} \quad (2.45)$$

โดยที่

\bar{x}_n คือ ค่าเฉลี่ยปัจจุบันของข้อมูล

x_n คือ ค่าปัจจุบันของข้อมูล

2.9 ความสัมพันธ์ของค่าเฉลี่ยแบบไดนามิกกับค่าสัมประสิทธิ์ของการปรับตัวของระบบแบบปรับตัวได้ที่ใช้อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (Dynamic Averaging and Adaptive Coefficient)

ในการหาค่าเฉลี่ยแบบไดนามิกด้วยสมการที่ (2.45) มีข้อจำกัดเมื่อนำไปใช้งานจริง นั่นคือถ้าจำนวนข้อมูลมีอย่างไม่จำกัด ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถคำนวณหาค่าเฉลี่ยแบบไดนามิกได้ ซึ่งในหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นว่าปัญหาของการหาค่าเฉลี่ยแบบไดนามิกนั้น สามารถถูกแก้ไขได้โดยใช้สมการที่ (2.37) ซึ่งเป็นสมการหาค่าสัมประสิทธิ์ของระบบแบบปรับตัวได้ โดยสามารถพิจารณาได้ดังต่อไปนี้

จากสมการที่ (2.37) ทำให้เป็นคอซอล และให้สัญญาณ $x(n-1)$ เป็นค่าคงที่ k จะเขียนสมการได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned}
h(n) &= h(n-1) + 2\mu E[x(n-1)e(n-1)] \\
&= h(n-1) + 2\mu k E[e(n-1)] \\
&= h(n-1) + 2\mu k E[d(n-1) - y(n-1)] \\
&= h(n-1) + 2\mu k E[d(n-1) - h(n-1)x(n-1)] \\
&= h(n-1) + 2\mu k E[d(n-1) - h(n-1)k] \tag{2.46}
\end{aligned}$$

จากสมการที่ (2.45) และสมการที่ (2.46) เมื่อนำมาพิจารณาเปรียบเทียบกัน โดยแยกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 พิจารณาเฉพาะเทอมแรกของสมการทั้งสอง และในส่วนที่ 2 พิจารณาเทอมหลังของสมการ แสดงได้ดังรูปที่ (2.15)

$$\begin{aligned}
h(n) &= h(n-1) + 2\mu k E[d(n-1) - h(n-1)k] \\
x_n &= x_{n-1} + \frac{x_n - x_{n-1}}{n}
\end{aligned}$$

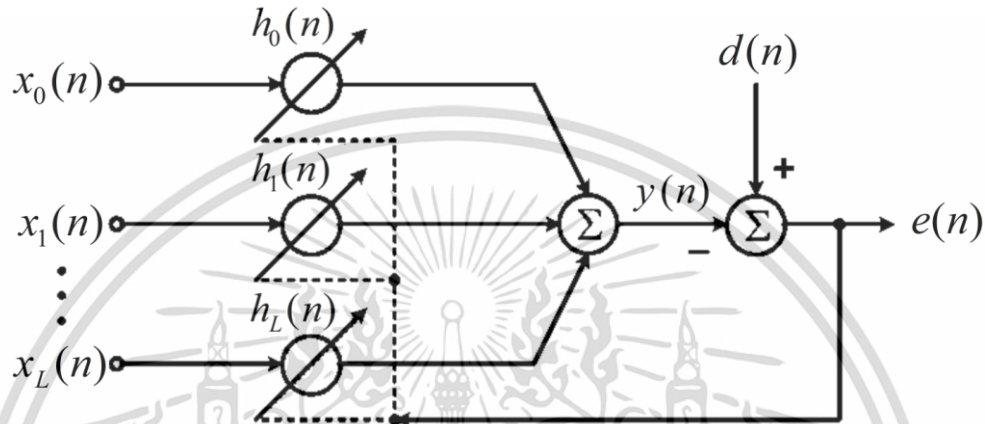
รูปที่ 2.15 เปรียบเทียบสมการที่ (2.45) และสมการที่ (2.46)

จากรูปที่ 2.15 เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่าเหมือนกันอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในส่วนที่ 1 ซึ่งก็คือ ค่าเฉลี่ยในอดีตของทั้งสองสมการ ซึ่งทำให้สามารถสรุปได้ว่าสมการทั้งสอง คือสมการการหาค่าเฉลี่ยที่เหมือนกันแต่สมการที่ (2.45) จะเป็นการหาค่าเฉลี่ยด้วยวิธีการทางสถิติแบบสืบเนื่อง ในขณะที่สมการที่ (2.46) จะเป็นการหาค่าการคาดหมาย ซึ่งมีค่าเทียบเท่าหรือเท่ากับค่าเฉลี่ยที่หาจากวิธีการทางสถิติแบบสืบเนื่อง

2.10 ค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมของระบบแบบปรับตัวได้

จากสมการวินเนอร์ฮอฟทำให้ทราบผลการตอบสนองของอิมพัลส์ในสภาวะที่ระบบมีความเหมาะสม โดยผลการตอบสนองอิมพัลส์ของมันจะมีค่าเท่ากับเวกเตอร์สหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างสัญญาณ $d(n)$ กับ สัญญาณอ้างอิง $x(n)$ ทหารด้วยเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณ $x(n)$ ($\mathbf{R}_{xx}^{-1}\mathbf{r}_{dx}$) แต่ในการทำงานของระบบแบบปรับตัวได้จะมีการปรับตัวของค่าผลตอบสนองอิมพัลส์เข้าสู่ค่า $\mathbf{R}_{xx}^{-1}\mathbf{r}_{dx}$ จากสมการที่ (2.35) ซึ่งเป็นสมการผลตอบสนองอิมพัลส์ของระบบ ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นของผลตอบสนองอิมพัลส์ในสภาวะที่เหมาะสม ($\mathbf{R}_{xx}^{-1}\mathbf{r}_{dx}$) และในส่วนเทอมของเอกซ์โพเนนเชียลถ้ามีค่า n มากขึ้น เทอมนี้ก็จะลู่เข้าสู่ค่าศูนย์ ซึ่งก็จะทำให้ระบบอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเทอมดังกล่าวจะพบว่า มีเทอมผลต่าง ($h(0) - \mathbf{R}_{xx}^{-1}\mathbf{r}_{dx}$) หากเราทำให้เทอมนี้มีค่าเป็นศูนย์ หรือ

$h(0) = \mathbf{R}_{xx}^{-1} \mathbf{r}_{dx}$ ได้ก็ทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมได้ในทันที ดังนั้นในบทความที่ [10] จึงได้นำเสนอการหาค่า $h(0)$ โดยการเก็บค่าตัวอย่างของสัญญาณ $d(n)$ และ $x(n)$ บางส่วนให้ได้ตามที่ต้องการก่อน จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า \mathbf{R}_{xx} และ \mathbf{r}_{dx} เพื่อใช้เป็นค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบตามสมการของวินเนอร์ฮอฟ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.16 โครงสร้างระบบแบบ Linear Combiner

จากรูปที่ 2.16 เมื่อมีสัญญาณ $d(n)$ และสัญญาณอ้างอิง $\mathbf{X}(n)$ เข้ามาเป็นอินพุตของระบบ แต่ระบบจะยังไม่ทำงานจนกว่าจะเก็บค่าตัวอย่างของสัญญาณ $\mathbf{X}(n)$ และ $d(n)$ ได้ตามที่ต้องการก่อน โดยที่ระบบต้องการจำนวนตัวอย่าง M ตัวอย่างดังนี้

$$\mathbf{d} = [d(1) \ d(2) \ \dots \ d(M)] \quad (2.47)$$

$$\mathbf{X}(n) = [x_0(n) \ x_1(n) \ \dots \ x_L(n)]^T \quad (2.48)$$

จากสมการที่ 2.48 เมื่อนำค่าตัวอย่างสัญญาณ $\mathbf{X}(n)$ มาประมาณค่าอัตโนมัติสหสัมพันธ์ของสัญญาณขาเข้าอินพุต $\hat{\mathbf{R}}_{xx}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{R}}_{xx} &= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \mathbf{X}(n) \mathbf{X}^T(n) \\ &= \frac{1}{M} \{ \mathbf{X}(1) \mathbf{X}^T(1) + \mathbf{X}(2) \mathbf{X}^T(2) + \dots + \mathbf{X}(M) \mathbf{X}^T(M) \} \\ &= \frac{1}{M} \begin{bmatrix} x_0(1) \\ x_1(1) \\ \vdots \\ x_L(1) \end{bmatrix} [x_0(1) \ x_1(1) \ \dots \ x_L(1)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} x_0(2) \\ x_1(2) \\ \vdots \\ x_L(2) \end{bmatrix} [x_0(2) \ x_1(2) \ \dots \ x_L(2)] + \dots \\
& + \begin{bmatrix} x_0(M) \\ x_1(M) \\ \vdots \\ x_L(M) \end{bmatrix} [x_0(M) \ x_1(M) \ \dots \ x_L(M)] \\
& = \frac{1}{M} \left\{ \begin{bmatrix} x_0^2(1) & x_0(1)x_1(1) & \dots & x_0(1)x_L(1) \\ x_1(1)x_0(1) & x_1^2(1) & \dots & x_1(1)x_L(1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L(1)x_0(1) & x_L(1)x_1(1) & \dots & x_L^2(1) \end{bmatrix} + \dots \right. \\
& \left. \begin{bmatrix} x_0^2(M) & x_0(M)x_1(M) & \dots & x_0(M)x_L(M) \\ x_1(M)x_0(M) & x_1^2(M) & \dots & x_1(M)x_L(M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_L(M)x_0(M) & x_L(M)x_1(M) & \dots & x_L^2(M) \end{bmatrix} \right\} \quad (2.49)
\end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.49 เมื่อนำค่าตัวอย่างสัญญาณ $\mathbf{X}(n)$ และ $d(n)$ มาประมาณค่าสหสัมพันธ์ไขว้

ดังนี้

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{r}}_{dx} &= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M d(n)\mathbf{X}(n) \\
&= \frac{1}{M} \{d(1)\mathbf{X}(1) + d(2)\mathbf{X}(2) + \dots + d(M)\mathbf{X}(M)\} \\
&= \frac{1}{M} \left\{ d(1) \begin{bmatrix} x_0(1) \\ x_1(1) \\ \vdots \\ x_L(1) \end{bmatrix} + d(2) \begin{bmatrix} x_0(2) \\ x_1(2) \\ \vdots \\ x_L(2) \end{bmatrix} + \dots + d(M) \begin{bmatrix} x_0(M) \\ x_1(M) \\ \vdots \\ x_L(M) \end{bmatrix} \right\} \\
&= \frac{1}{M} \left\{ \begin{bmatrix} d(1)x_0(1) \\ d(1)x_1(1) \\ \vdots \\ d(1)x_L(1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d(2)x_0(2) \\ d(2)x_1(2) \\ \vdots \\ d(2)x_L(2) \end{bmatrix} + \dots + \begin{bmatrix} d(M)x_0(M) \\ d(M)x_1(M) \\ \vdots \\ d(M)x_L(M) \end{bmatrix} \right\} \quad (2.50)
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.49 และสมการที่ 2.50 เมื่อนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ตามสมการของวินเนอร์ฮอฟ จะได้สมการดังนี้

$$h(0) = \hat{\mathbf{R}}_{xx}^{-1}(M)\hat{\mathbf{r}}_{dx}(M) \quad (2.51)$$

โดยที่จำนวนตัวอย่างที่นำมาใช้คำนวณนั้นจะมีผลต่อค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย อีกทั้งยังส่งผลถึงเวลาในการคำนวณเชิงเลขของระบบอีกด้วย ทำให้การเลือกใช้จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมในการคำนวณหาเงื่อนไขเริ่มต้นมีความสำคัญอย่างมาก เพราะถ้าใช้น้อยเกินไปก็จะเป็นตัวแทนสัญญาณไม่ได้ หรือถ้าใช้มากเกินไปก็อาจจะเกิดการคำนวณที่เกินความจำเป็นทำให้เป็นภาระในการทำงานของระบบได้

ซึ่งในการหาค่าตัวอย่างที่เหมาะสมนั้น จำเป็นจะต้องหาค่ามิสแอดจัสเมนต์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2.52) ดังนี้

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{E}[\varepsilon_{ex}]}{\varepsilon_{\min}} \quad (2.52)$$

โดยที่

ε_{\min} คือ ค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุดซึ่งหาได้จากวิธีของวินเนอร์ฮอฟ

ε_{ex} คือ ผลต่างระหว่างค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยของระบบกับค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่น้อยที่สุดซึ่งหาได้จากวิธีของวินเนอร์ฮอฟ

โดยที่ค่าของ $\mathbf{E}[\varepsilon_{ex}]$ มีค่าดังสมการที่ (2.53)

$$\mathbf{E}[\varepsilon_{ex}] = \text{tr}(\mathbf{R}_{xx})\mu\varepsilon_{\min} \quad (2.53)$$

แทนค่า $\mathbf{E}[\varepsilon_{ex}]$ จากสมการที่ (2.53) ลงในสมการที่ (2.52) จะได้สมการเพื่อหาค่ามิสแอดจัสเมนต์ดังนี้

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \frac{\text{tr}(\mathbf{R}_{xx})\mu\varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\min}} \\ &= \text{tr}(\mathbf{R}_{xx})\mu \end{aligned} \quad (2.54)$$

และสัญญาณผลต่างความผิดพลาดกำลังสอง (e_{ex}^2) สามารถหาได้จากการนำค่าความผิดพลาดกำลังสองของระบบที่กำลังพิจารณาด้วยค่าผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุดของตัวกรอง (e_{\min}^2) ซึ่ง e_{\min}^2 สามารถหาได้จากสมการดังนี้

$$e_{\min}^2 = x^2(n) + h_o^T y(n)y(n)^T h_o - 2x(n)y(n)^T h_o \quad (2.55)$$

2.11 ตัวแปรที่ใช้เปรียบเทียบ

สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของระบบแบบปรับตัวได้ที่น่าเสนอ ซึ่งวัดประสิทธิภาพโดยใช้ค่าความผิดพลาดเป็นค่าสำคัญในการคำนวณดังนี้

2.11.1 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error)

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ คือค่าผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้ในทางปฏิบัติกับค่าที่คำนวณจากทางทฤษฎี โดยค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ยังมีค่าน้อยนั้น มีความหมายว่าค่าที่วัดได้จะมีความถูกต้องมาก ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.56

$$\text{Error} = \frac{|\text{reference} - \text{measurement}|}{\text{reference}} \times 100\% \quad (2.56)$$

โดยที่

Error คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

reference คือ ค่าอ้างอิงหรือค่าทางทฤษฎี

measurement คือ ค่าที่วัดได้ทางปฏิบัติ

2.11.2 ค่าความแม่นยำสัมพัทธ์ (Relative Accuracy)

ค่าความแม่นยำสัมพัทธ์เป็นค่าที่บอกความถูกต้องของข้อมูล ซึ่งจะตรงข้ามกับค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ โดยหาได้จากสมการที่ 2.57

$$\text{Accuracy} = |100 - \text{Error}| \times 100\% \quad (2.57)$$

โดยที่

Accuracy คือ ค่าความแม่นยำสัมพัทธ์

2.11.3 ค่าความเที่ยงตรง (Precision)

ค่าความเที่ยงตรงเป็นค่าที่สำคัญสำหรับเครื่องมือวัด ความสามารถของเครื่องมือวัดส่วนมากจะวัดกันที่ค่าความเที่ยงตรงของเครื่องนั้นๆ ซึ่งค่าความเที่ยงตรงเกิดจากการทดสอบวัดค่าในลักษณะเดียวกันหลายๆ ครั้ง และนำค่าแต่ละครั้งมา พิจารณาว่าค่าที่วัดได้ใกล้เคียงกันทุกค่าหรือไม่ โดยค่าความเที่ยงตรงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.58

$$\mathbf{SD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2.58)$$

โดยที่

SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

x_i คือ ค่าที่วัดได้ทางปฏิบัติ

\bar{x} คือ ค่าเฉลี่ยของค่าที่วัดได้ทางปฏิบัติ

N คือ จำนวนครั้งที่วัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบระบบของเครื่องชั่งน้ำหนักที่สามารถกำจัดสัญญาณ การสั่นสะเทือน

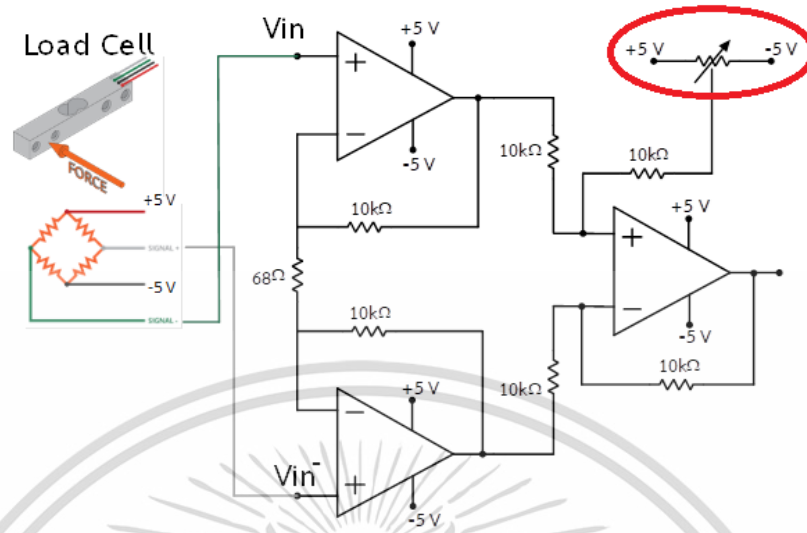
3.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 2 ที่ผ่านมามีได้อธิบายทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และในบทนี้จะเป็นการอธิบายวิธีการที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ คือ การออกแบบวงจรมายสัญญาณที่นำไปใช้งานกับไมโครคอนโทรลเลอร์ อีเอสพี32 การเลือกใช้เซนเซอร์วัดความเร่งที่เหมาะสม ลักษณะของเครื่องที่ใช้ทำการสั่นสะเทือน โครงสร้างของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอเพื่อใช้กับแอปพลิเคชันการชั่งน้ำหนักและแผนผังการทำงานของโปรแกรม รวมไปถึงวิธีการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบแบบปรับตัวได้และแผนผังการทำงานของโปรแกรม รายละเอียดของการออกแบบระบบและการออกแบบการทดลอง

3.2 การออกแบบวงจรมายสัญญาณอินสตรูเมนต์ชันใช้งานร่วมกับโหลดเซลล์

3.2.1 กล่าวนำ

เนื่องจากสัญญาณเอาต์พุตของโหลดเซลล์มีแอมพลิจูดของสัญญาณขนาดเล็กน้อยมาก จึงจำเป็นต้องขยายแอมพลิจูดด้วยวงจรมายสัญญาณอินสตรูเมนต์ชัน และเนื่องจากอินพุตรับสัญญาณอนาล็อกของไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 ไม่สามารถรับแรงดันไฟต่ำกว่า 150 มิลลิโวลต์ได้ จึงต้องมีการตัดแปลงวงจรเพื่อยกระดับสัญญาณไฟของเอาต์พุตให้เริ่มต้นที่ 150 มิลลิโวลต์โดยการใส่ตัวต้านทานเพิ่ม ซึ่งแสดงในวงกลมสีแดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 วงจรขยายอินสตรูเมนต์ชั้นที่มีการยกระดับสัญญาณไฟตรง
จากรูปที่ 3.1 สามารถคำนวณอัตราการขยายจากสมการที่ 2.5 ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 A_v &= \frac{V_{out}}{V_2 - V_1} \\
 &= \left(1 + \frac{2R_1}{R_{Gain}} \right) \frac{R_3}{R_2} \\
 &= \left(1 + \frac{2(10 \times 10^3)}{68} \right) \frac{10 \times 10^3}{10 \times 10^3} \\
 &= 295.12
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

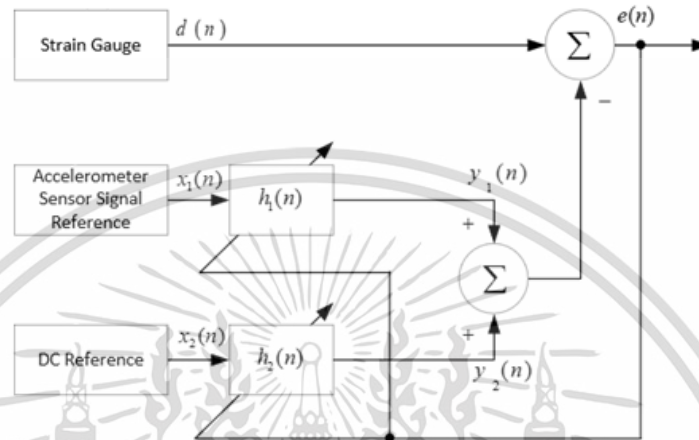
โดยในส่วนของสัญญาณเอาต์พุตจากโหนดเซลล์ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไปทั้งหมดนั้น ขอให้เข้าใจตรงกันว่าสัญญาณเอาต์พุตจากโหนดเซลล์นี้ได้ถูกขยายสัญญาณที่อัตราการขยาย 295.12 เท่าโดยวงจขยายอินสตรูเมนต์ชั้นแล้ว เพื่อให้กระชับและง่ายต่อความเข้าใจในการอธิบายในหัวข้อถัดๆไป

3.3 การออกแบบระบบแบบปรับตัวได้นำเสนอ

3.3.1 กล่าวนำ

ในการออกแบบระบบแบบปรับตัวได้จะถูกออกแบบบนโปรแกรมแมทแลปก่อน เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดการรบกวนจากสิ่งต่างๆ อาทิเช่น สัญญาณไฟรบกวน 50 เฮิร์ตซ์ และความผิดพลาดของการเชื่อมต่อสายไฟต่างๆ ที่ถูกกระเทือน หลังจากนั้นจะมาทำการทดสอบกับระบบที่ปฏิบัติการจริงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32

โครงสร้างที่นำเสนอจะใช้สัญญาณอ้างอิง 2 สัญญาณ โดยสัญญาณที่ 1 คือสัญญาณจากเซนเซอร์วัดความเร่งแทนด้วย $x_1(n)$ และสัญญาณที่ 2 คือจะใช้ค่าคงที่แทนสัญญาณไฟตรง ซึ่งแทนด้วย $x_2(n)$ และสัญญาณ $d(n)$ คือสัญญาณเอาต์พุตจากโพลิตเซลล์ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ

สามารถวิเคราะห์ระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอเพื่อดูสมการการปรับตัวของระบบได้ดังนี้

$$y_1(n) = h_1(n)x_1(n) \quad (3.2)$$

$$y_2(n) = h_2(n)x_2(n) \quad (3.3)$$

$$e(n) = d(n) - y_1(n) - y_2(n) \quad (3.4)$$

$$h_1(n) = h_1(n-1) + 2\mu e(n-1)x_1(n-1) \quad (3.5)$$

$$h_2(n) = h_2(n-1) + 2\mu e(n-1)x_2(n-1) \quad (3.6)$$

โดยที่

$d(n)$ คือ สัญญาณที่ได้จากโพลิตเซลล์ ซึ่งประกอบไปด้วย แรงดันไฟตรงที่แสดงค่าน้ำหนักรวมมากับสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการสั่นสะเทือนที่ผ่านวงจรมอนิเตอร์แมนเตชัน

$x_1(n)$ คือ สัญญาณอ้างอิงจากเซนเซอร์วัดความเร่งซึ่งแปรผันตรงกับการสั่นสะเทือน

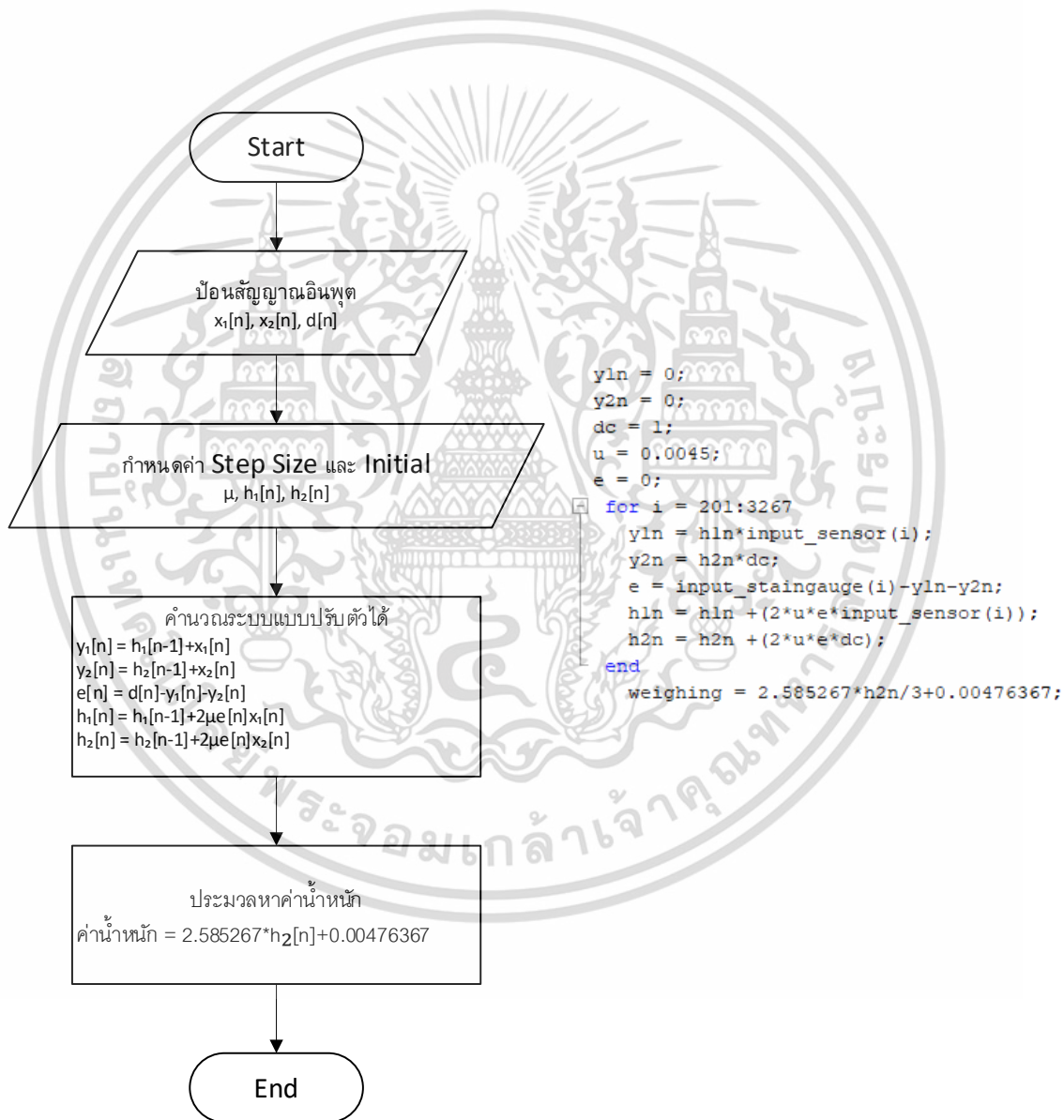
$x_2(n)$ คือ ค่าคงที่ที่ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อหาค่าน้ำหนักของวัตถุ

$e(n)$ คือ ค่าความแตกต่างระหว่าง $d(n)$ กับสัญญาณ $y_1(n)$ และ $y_2(n)$

$y_1(n)$ คือ สัญญาณเอาต์พุตของการปรับสัญญาณรบกวนอ้างอิง

$y_2(n)$ คือ สัญญาณเอาต์พุตของการปรับค่าคงที่(ค่าน้ำหนัก) อ้างอิง

โดยการทำงานส่วนของโปรแกรมของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอในแมทแลป สามารถอธิบายได้ดังแผนผังการเขียนโปรแกรมดังรูปที่ 3.3

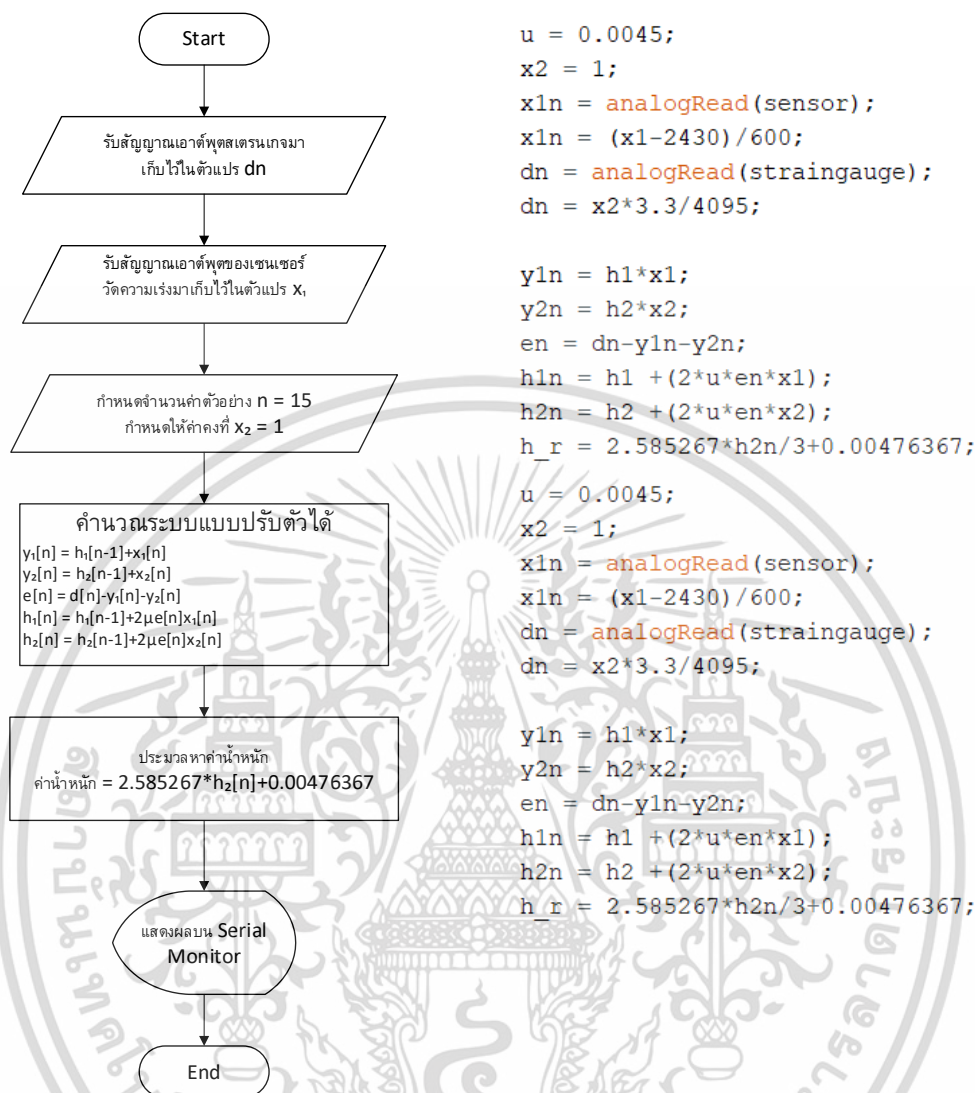


รูปที่ 3.3 แผนผังโปรแกรมการทำงานของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.3 ทางด้านซ้ายจะแสดงแผนผังโปรแกรมในทำงานของระบบแบบปรับตัวได้ที่อาศัย อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด เริ่มจากรับสัญญาณอินพุต $x_1(n)$, $x_2(n)$ และ $d(n)$ ก่อน จากนั้นกำหนดค่าขนาดขั้นเท่ากับ 0.0045 และกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $h_1(n)$ และ $h_2(n)$ จากนั้นจะเข้าสู่การประมวลผลของอัลกอริทึมเพื่อให้ระบบแบบปรับตัวได้เข้าสู่สภาวะที่เหมาะสม และนำค่าสัมประสิทธิ์ $h_2(n)$ ไปคำนวณหาค่าน้ำหนักจริง โดยในส่วนตัวทางด้านขวาของรูปที่ 3.3 จะเป็นตัวอย่างของโค้ดที่ใช้ในโปรแกรมแมทแลป ซึ่งในส่วนของการเตรียมสัญญาณอินพุตนั้นจะไม่นำมาแสดงในรูปเนื่องจากเป็นตัวแปรอาร์เรย์ที่มีจำนวนมาก

ในส่วนของการทดลองด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32ต้องกำหนดพอร์ต 2 พอร์ต เพื่อแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยพอร์ตแรกจะรับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรถ่ายอินสตรูเมนต์ ชั้น และพอร์ตที่ 2 จะรับสัญญาณเอาต์พุตแกน z ของเซนเซอร์วัดความเร่ง ซึ่งในส่วน of สัญญาณอ้างอิง ไฟตรงจะใช้ค่าคงที่แทนเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดจากส่วนของฮาร์ดแวร์ โดยแผนผังการทำงานของโปรแกรมจะถูกแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนผังโปรแกรมการทำงานของระบบแบบปรับตัวได้โดยใช้คอมพิวเตอร์อาร์ดูโน้

จากรูปที่ 3.4 ทางด้านซ้ายจะแสดงแผนผังโปรแกรมการทำงานของระบบแบบปรับตัวได้โดยอาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุดที่ใช้คอมพิวเตอร์อาร์ดูโน้ เริ่มจากรับสัญญาณอินพุตเซนเซอร์วัดความเร็ว $x_1(n)$ กำหนดค่าคงที่เพื่อแทนสัญญาณไฟตรง $x_2(n)$ และสัญญาณอินพุตที่มาจากโพลด์เซลล์ $d(n)$ กำหนดค่าขนาดขั้นเท่ากับ 0.0045 และค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $h_1(n)$ และ $h_2(n)$ จากนั้นจะเข้าสู่การประมวลผลของอัลกอริทึมเพื่อให้ระบบแบบปรับตัวได้เข้าสู่สภาวะที่เหมาะสม ในตอนสุดท้ายหลังจากที่เข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมแล้วให้นำค่าสัมประสิทธิ์ $h_2(n)$ ไปคำนวณและแสดงผลค่าน้ำหนักจริงผ่านซีเรียลมอนิเตอร์(Serial Monitor) ในส่วนทางด้านขวาของรูปที่ 3.4 จะเป็นตัวอย่างของโค้ดที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์อาร์ดูโน้ ซึ่งจะเป็นการรับค่าอินพุตและประมวลผลแบบเรียลไทม์ทั้งหมด

ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงกระบวนการการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบแบบปรับตัวได้ที่มีสัมประสิทธิ์ 2 ตัว

3.4 วิธีการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ

3.4.1 กล่าวนำ

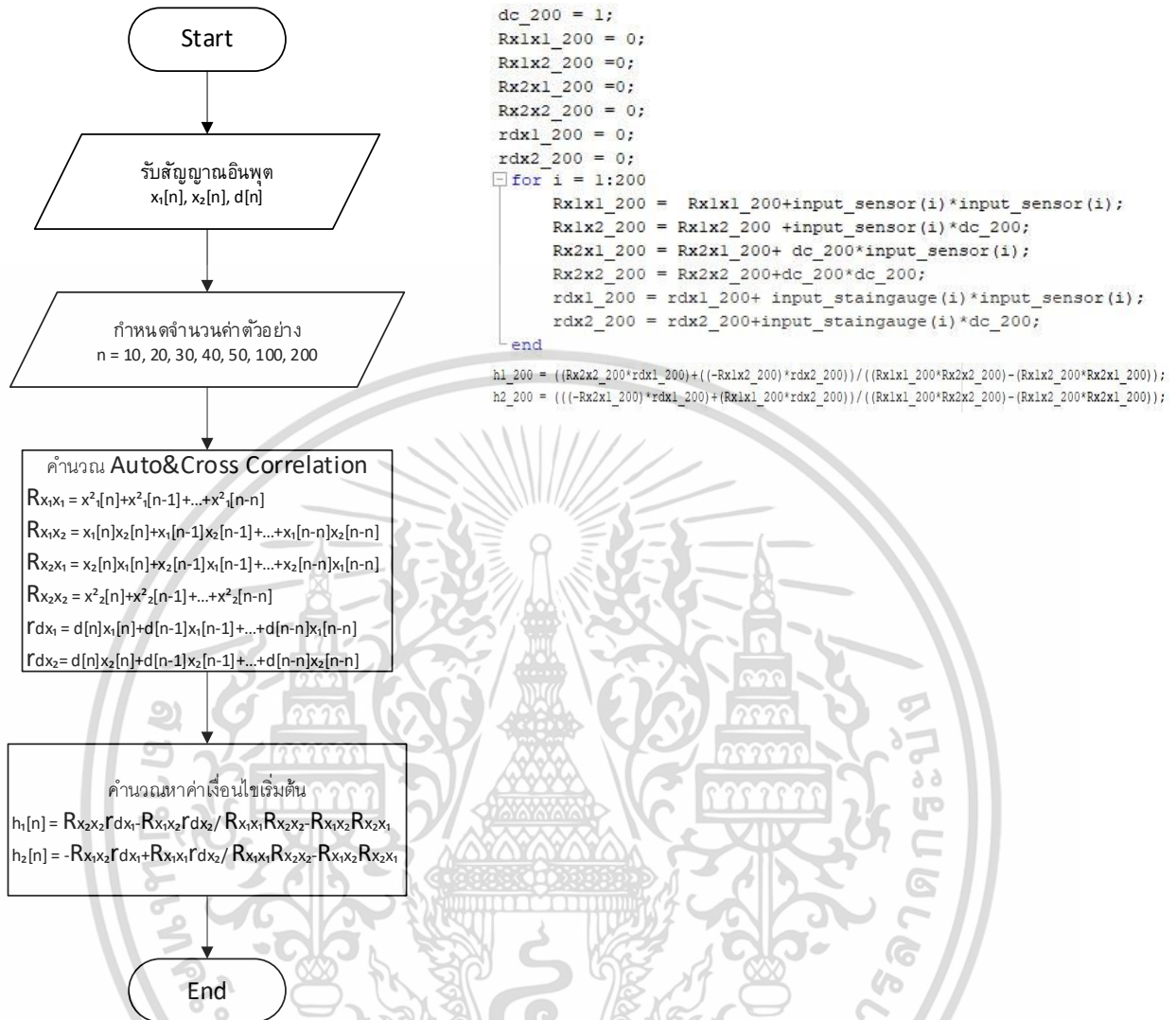
การหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ จำเป็นจะต้องหาสมการค่าสัมประสิทธิ์ก่อน จากนั้นจะกำหนดจำนวนตัวอย่างเพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น

โดยสัมประสิทธิ์ของระบบที่นำเสนอมี 2 ตัว นั่นคือ $h_1(n)$ และ $h_2(n)$ จากสมการที่ 2.12 สัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมของระบบคือ $h(n)$ มีค่าเท่ากับ $R_{xx}^{-1}r_{dx}$ เมื่อพิจารณาในรูปแบบเมตริกซ์จะเป็นสมการดังนี้

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} h_1(n) \\ h_2(n) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_{x1x1} & R_{x1x2} \\ R_{x2x1} & R_{x2x2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} r_{dx1} \\ r_{dx2} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{R_{x2x2}R_{x1x1} - R_{x2x1}R_{x1x2}} \begin{bmatrix} R_{x2x2} & -R_{x1x2} \\ -R_{x2x1} & R_{x1x1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{dx1} \\ r_{dx2} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{R_{x2x2}R_{x1x1} - R_{x2x1}R_{x1x2}} \begin{bmatrix} R_{x2x2}r_{dx1} - R_{x1x2}r_{dx2} \\ -R_{x2x1}r_{dx1} + R_{x1x1}r_{dx2} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{R_{x2x2}r_{dx1} - R_{x1x2}r_{dx2}}{R_{x2x2}R_{x1x1} - R_{x2x1}R_{x1x2}} \\ \frac{-R_{x2x1}r_{dx1} + R_{x1x1}r_{dx2}}{R_{x2x2}R_{x1x1} - R_{x2x1}R_{x1x2}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.7 $h_1(n)$ จะมีค่าเท่ากับ $\frac{R_{x2x2}r_{dx1} - R_{x1x2}r_{dx2}}{R_{x2x2}R_{x1x1} - R_{x2x1}R_{x1x2}}$ และ $h_2(n)$ จะมีค่าเท่ากับ $\frac{-R_{x2x1}r_{dx1} + R_{x1x1}r_{dx2}}{R_{x2x2}R_{x1x1} - R_{x2x1}R_{x1x2}}$

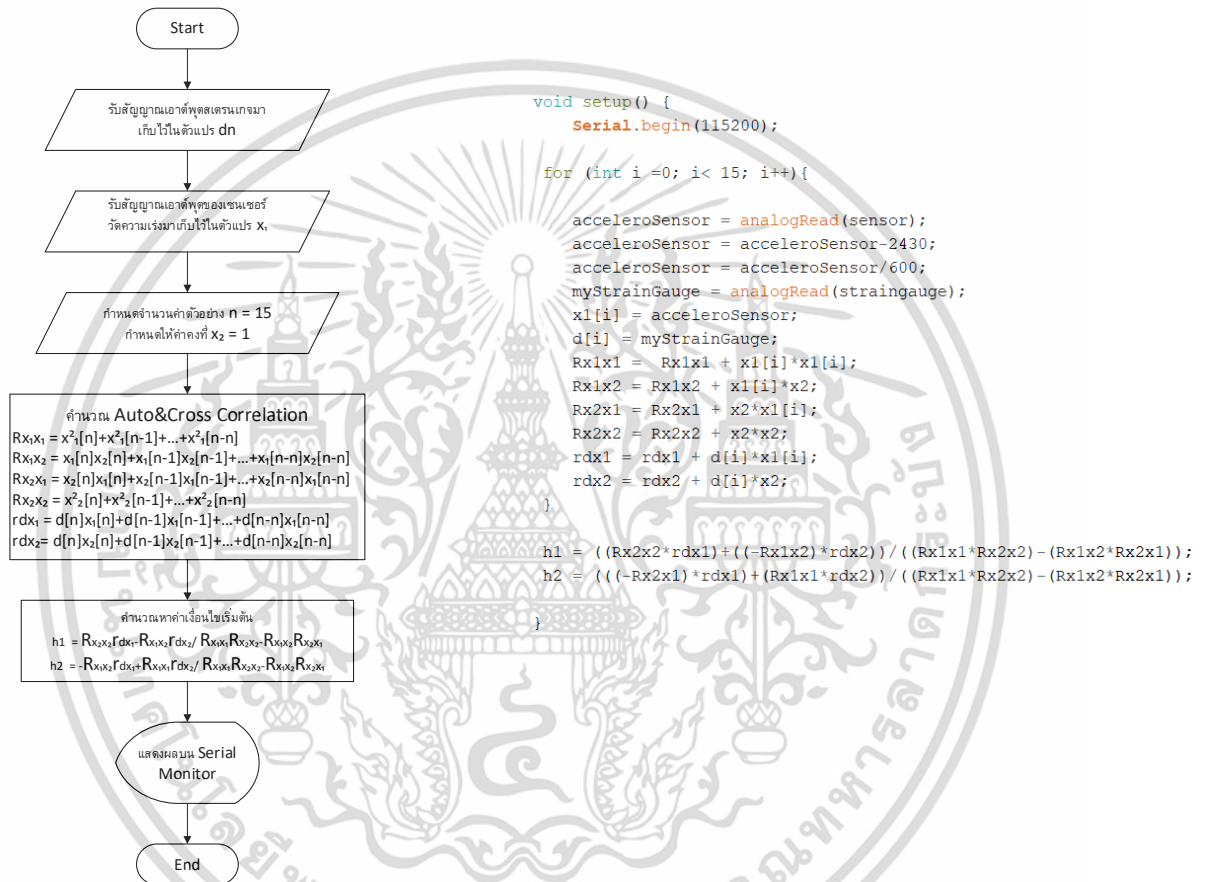
โดยการหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมในการนำมาใช้กับระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอในทางปฏิบัติ จะหาจากวิธีการเปรียบเทียบจำนวนตัวอย่างระหว่าง 200, 100, 50, 40, 30, 20, 15, 10 และ 5 ตัวอย่าง ดังจะอธิบายในแผนผังการเขียนโปรแกรมการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แผนผังโปรแกรมในการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นโดยใช้โปรแกรมแมทแลป

จากรูปที่ 3.5 ทางด้านซ้ายจะแสดงแผนผังโปรแกรมในการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น เริ่มจากรับสัญญาณอินพุต $x_1(n)$, $x_2(n)$ และ $d(n)$ ก่อน จากนั้นกำหนดค่าจำนวนตัวอย่างที่จะนำไปใช้คำนวณหาค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติ $R_{x_1x_1}$, $R_{x_1x_2}$, $R_{x_2x_1}$, $R_{x_2x_2}$ และค่าสหสัมพันธ์ไขว้ r_{dx_1} และ r_{dx_2} เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $h_1(n)$ และ $h_2(n)$ ส่วนทางด้านขวาของรูปที่ 3.5 จะยกตัวอย่างของโค้ดที่ใช้โปรแกรมแมทแลป ซึ่งในส่วนของการเตรียมสัญญาณอินพุตนั้นจะไม่นำมาแสดงในรูปเนื่องจากเป็นตัวแปรอาร์เรย์ที่มีจำนวนมาก

ในส่วนของการทดสอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32ต้องกำหนดพอร์ต 2 พอร์ต เพื่อแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยพอร์ตแรกจะรับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรถ่ายอินสตรูเมนต์ชั้น และพอร์ตที่ 2 จะรับสัญญาณเอาต์พุตแกน z ของเซนเซอร์วัดความเร่ง ซึ่งในส่วน of สัญญาณอ้างอิงไฟตรงจะใช้ค่าคงที่แทนเพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดจากส่วนของฮาร์ดแวร์ โดยแผนผังการทำงานของโปรแกรมจะถูกแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังโปรแกรมในการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นโดยใช้คอมพิวเตอร์อาร์ดูโน้

จากรูปที่ 3.6 ทางด้านซ้ายจะแสดงแผนผังโปรแกรมในการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นโดยใช้คอมพิวเตอร์อาร์ดูโน้ เริ่มจากรับสัญญาณอินพุตเซนเซอร์วัดความเร่ง $x_1(n)$ กำหนดค่าคงที่เพื่อแทนสัญญาณไฟตรง $x_2(n)$ และสัญญาณอินพุตที่มาจากโหลดเซลล์ $d(n)$ ก่อน จากนั้นเก็บจำนวนตัวอย่าง 15 ตัวอย่าง เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติ R_{x1x1} , R_{x1x2} , R_{x2x1} , R_{x2x2} และค่าสหสัมพันธ์ไขว้ r_{dx1} และ r_{dx2} และคำนวณหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $h_1(n)$ และ $h_2(n)$ และแสดงผลค่าผ่านซีเรียลมอนิเตอร์ ในส่วนทางด้านขวาของรูปที่ 3.6 จะเป็นตัวอย่างของโค้ดที่ใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์อาร์ดูโน้

3.5 ค่าความละเอียดในการชั่งน้ำหนักของระบบ

การหาค่าความละเอียดในการชั่งน้ำหนักของระบบที่นำเสนอ จำเป็นที่ต้องทราบถึงค่าขนาดขั้นของพอร์ตแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32เสียก่อน โดยพอร์ตแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลสามารถรับแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด(Maximum)คือ 3.3 โวลต์ และค่าความละเอียดที่มากที่สุดในการอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 12 บิต(0-4096) สามารถคำนวณค่าขนาดขั้นได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าขนาดขั้น} &= \frac{3.3}{4096} \\ &= 0.0008057 \end{aligned} \quad (3.8)$$

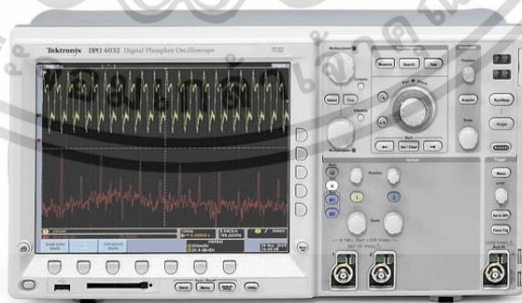
ดังนั้นค่าขนาดขั้นของพอร์ตจะมีค่าเท่ากับ 805.7 ไมโครโวลต์

3.6 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ มีอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง ดังนี้

3.6.1 เครื่องออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)

เครื่องออสซิลโลสโคปเป็นเครื่องทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ประเภทหนึ่งที่จะช่วยให้มองเห็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้อย่างแม่นยำ ทำงานโดยแสดงกราฟสัญญาณไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลา และมักใช้ในสาขาต่างๆ เช่น อิเล็กทรอนิกส์ โทรคมนาคม และการแพทย์ เพื่อแก้ปัญหาและวิเคราะห์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยทั่วไปแล้วออสซิลโลสโคปจะมีคุณสมบัติที่หลากหลายประการ รวมถึงหน้าจอแสดงผล ขั้วต่ออินพุตสำหรับเชื่อมต่อกับสัญญาณที่กำลังวัด และส่วนควบคุมสำหรับการปรับสเกลเวลาและแรงดันไฟฟ้าของสัญญาณที่แสดง โดยสามารถใช้วัดแรงดันไฟฟ้า เวลา และความถี่ของสัญญาณได้ โดยยี่ห้อและรุ่นของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองคือ TEKTRONIX DPO4032 แสดงได้ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องออสซิลโลสโคป TEKTRONIX DPO4032

(ที่มา : Axitest.com, 2022)

3.6.2 เครื่องจ่ายไฟ (Power Supply)

เครื่องจ่ายไฟเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโหลดไฟฟ้า หน้าที่หลักของเครื่องจ่ายไฟคือการแปลงพลังงานไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งไปเป็นพลังงานไฟฟ้ารูปแบบอื่น เช่น การแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟตรงซึ่งส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่วนใหญ่ เช่น คอมพิวเตอร์ โทรทัศน์ และเครื่องใช้ในครัวเรือนอื่น ๆ ตลอดจนการใช้งานในอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์

เครื่องจ่ายไฟแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ตามแรงดันเอาต์พุต กระแส และรูปคลื่น ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์จ่ายไฟตรงให้แรงดันเอาต์พุตไฟตรงคงที่ ในขณะที่อุปกรณ์จ่ายไฟกระแสสลับให้แรงดันเอาต์พุตไฟกระแสสลับที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา แหล่งจ่ายไฟบางชนิดยังมีคุณสมบัติเพิ่มเติม เช่น การควบคุมแรงดันไฟฟ้าและการป้องกันกระแสเกินและแรงดันไฟเกิน โดยยี่ห้อและรุ่นของเครื่องที่ใช้ในการทดลองคือ HP Agilent E3630A แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 เครื่องจ่ายไฟ HP Agilent E3630A

(ที่มา : Valuetronics.com, 2022)

3.6.3 เครื่องสร้างสัญญาณ (Signal Generator)

เครื่องกำเนิดสัญญาณสามารถสร้างรูปคลื่นไซน์ สี่เหลี่ยมจัตุรัส สามเหลี่ยม และรูปแบบอื่นๆ ได้ และยังสามารถมอดูเลตสัญญาณด้วยสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณมอดูเลตอื่นๆ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เพื่อสร้างรูปคลื่นตามอำเภอใจโดยใช้เทคนิคการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล มักใช้ในห้องปฏิบัติการและสภาพแวดล้อมการทดสอบ ตลอดจนการผลิตและการซ่อมแซมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยยี่ห้อและรุ่นของเครื่องที่ใช้ในการทดลองคือ HP Agilent 33120A แสดงได้ดังรูปที่ 3.9



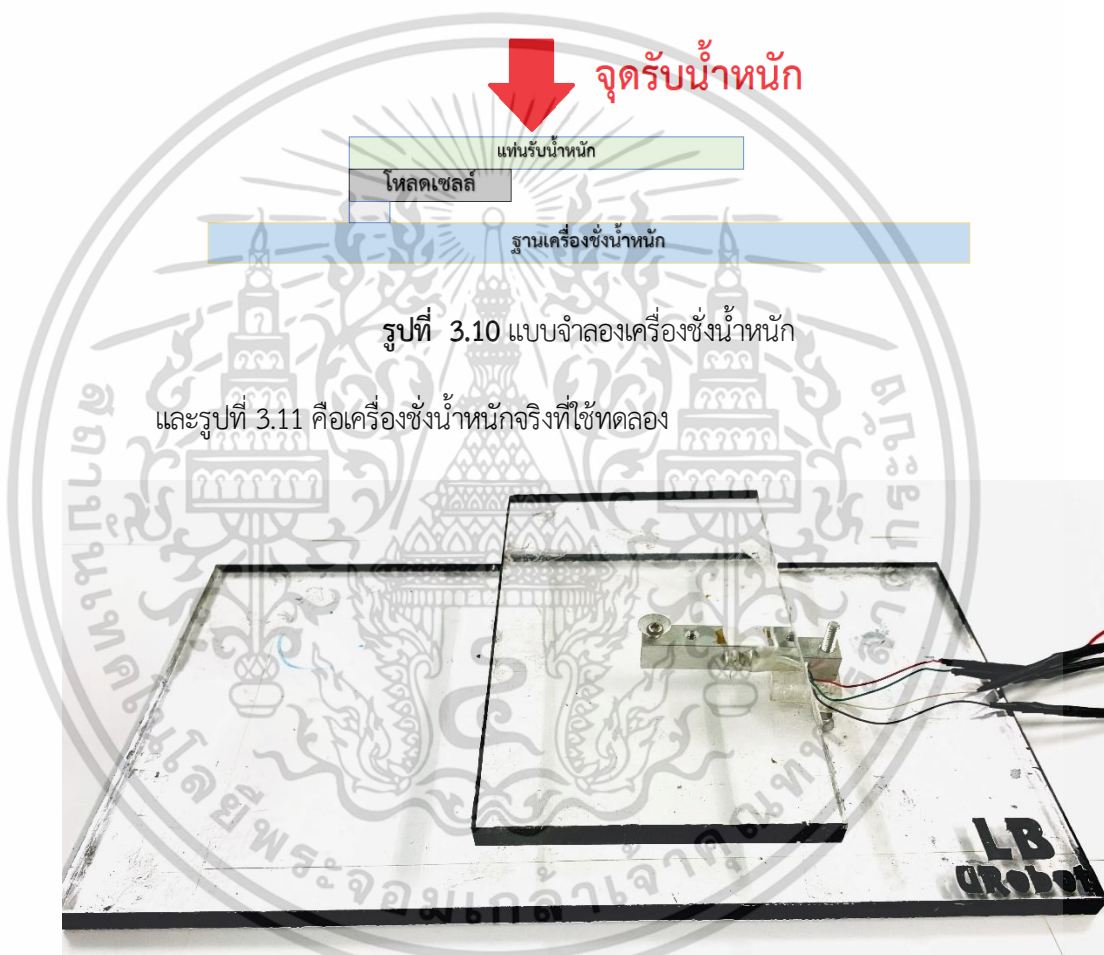
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 เครื่องสร้างสัญญาณ HP Agilent 33120A

(ที่มา : Ebay.com, 2022)

3.6.4 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักจะประกอบไปด้วยโพลดเซลล์, แทนรับน้ำหนักและฐานรับน้ำหนัก โดยมีกรอกแบบดังรูปที่ 3.10



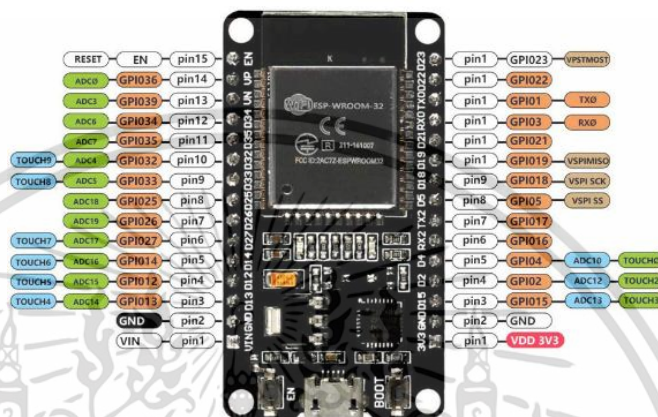
รูปที่ 3.11 เครื่องชั่งน้ำหนักที่ใช้ทดลอง

3.6.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 (Microcontroller ESP32)

ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ราคาประหยัดและใช้พลังงานต่ำที่ใช้ไอเอสพี32เอสโอซี(ESP32 SoC : System-on-Chip) ที่ผสานรวมโปรเซสเซอร์ดูอัลคอร์(Processor Dual Core) Wi-Fi บลูทูธ และอินเทอร์เฟซอุปกรณ์ต่อพ่วงต่างๆ โดยทั่วไปจะใช้สำหรับโครงการ Internet of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Things (IoT) และสามารถตั้งโปรแกรมโดยใช้ฮาร์ดแวร์ไอดีอีหรือ เอสเพรสซิฟไอโอทีทีเวลลอปเมนท์เฟรมเวิร์ค (ESP-IDF) ซึ่งรองรับอินเทอร์เฟซอุปกรณ์ต่อพ่วงที่หลากหลายเช่น GPIO, ADC, DAC, PWM, I2C, SPI, UART และอื่นๆ โดยมีหน่วยความจำแรม 320 กิโลไบต์ หน่วยความจำแฟลช 4 เมกะไบต์ สัญญาณนาฬิกา 240 เมกะเฮิรตซ์ แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32

(ที่มา : Aliexpress.com, 2022)

3.6.6 เซนเซอร์วัดความเร่งที่ถูกนำมาใช้งานในการวัดแรงสั่นสะเทือน

ใช้เซนเซอร์วัดความเร่งเบอร์ ADXL335 ดังรูปที่ 3.13 เป็นตัววัดสัญญาณจากการสั่นสะเทือน ในขณะที่ชั่งน้ำหนัก เพื่อนำไปใช้เป็นสัญญาณอินพุตอ้างอิงให้กับระบบแบบปรับตัวได้ โดยจะใช้ค่าจากแกน z ในการนำไปประมาณผลสัญญาณ



รูปที่ 3.13 เซนเซอร์วัดความเร่งเบอร์ ADXL335

(ที่มา : Electronicwings.com, 2022)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

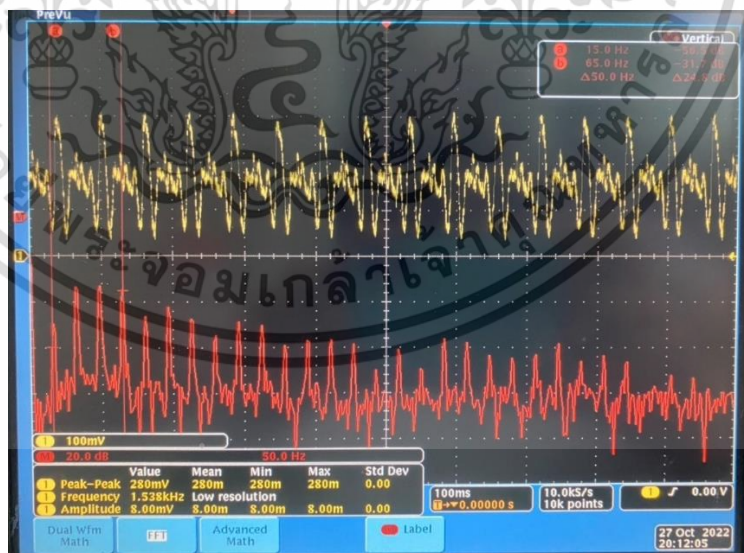
3.6.7 เครื่องสร้างการสั่นสะเทือน

ลักษณะของเครื่องสร้างการสั่นสะเทือนที่นำมาใช้เป็นเครื่องสร้างสัญญาณรบกวนให้กับการชั่งน้ำหนักเป็นดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 เครื่องสร้างการสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 3.14 เครื่องดังกล่าวจะสร้างสัญญาณรบกวนที่มีความถี่มูลฐานประมาณ 16 เฮิรตซ์ดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 กราฟสัญญาณรบกวนในโดเมนเวลา และกราฟสัญญาณรบกวนในโดเมนความถี่ของเครื่องสร้างการสั่นสะเทือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.8 โปรแกรมอาร์ดูโนไอดีอี (Arduino IDE)

อาร์ดูโนไอดีอีย่อมาจาก Arduino Integrated Development Environment เป็นซอฟต์แวร์แอปพลิเคชันแพลตฟอร์มสำหรับเขียน คอมไพล์ และอัปโหลดโค้ดไปยังบอร์ดอาร์ดูโน่ โดยบอร์ดอาร์ดูโน่เป็นแพลตฟอร์มที่ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งสามารถตั้งโปรแกรมให้ควบคุมอุปกรณ์และระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ อาร์ดูโนไอดีอีมีให้ใช้งานฟรีและสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์อาร์ดูโน่

อาร์ดูโนไอดีอีมีอินเทอร์เฟซที่เรียบง่ายและเป็นมิตรกับผู้ใช้สำหรับการเขียน แก้ไข และดีบั๊กโค้ด นอกจากนี้ยังมีคลังรหัสที่เขียนไว้ล่วงหน้าเรียกว่า สเก็ตช์ (Sketches) ที่สามารถใช้เพื่อทำงานเฉพาะอย่าง เช่น การควบคุมมอเตอร์หรือการอ่านเซ็นเซอร์

ผู้ใช้อาร์ดูโนไอดีอีสามารถเขียนโค้ดในภาษา C หรือ C++ จากนั้นอัปโหลดโค้ดไปยังบอร์ดอาร์ดูโน่โดยใช้สายยูเอสบี(USB) เมื่ออัปโหลดโค้ดแล้วบอร์ดอาร์ดูโน่จะสามารถเปิดและรันโค้ดได้ ทำให้ผู้ใช้สามารถควบคุมหรือตรวจสอบอุปกรณ์และระบบต่างๆได้ นอกจากนี้อาร์ดูโนไอดีอี ยังมีเครื่องมือซีเรียลมอนิเตอร์ ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบข้อมูลที่ส่งและรับโดยบอร์ดอาร์ดูโน่ และเครื่องมือซีเรียลพล็อตเตอร์(Serial Plotter) ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้สามารถแสดงภาพข้อมูลในรูปแบบกราฟิกได้ โดยผู้วิจัยเลือกใช้อาร์ดูโนไอดีอีเวอร์ชัน 1.8.19 ซึ่งเป็นเวอร์ชันที่ดาวน์โหลดจากไมโครซอฟส์ไตร์ 1.8.57.0



รูปที่ 3.16 โลโก้โปรแกรมอาร์ดูโนไอดีอี

(ที่มา : Wikimedia, 2022)

3.6.9 โปรแกรมอัลเทียมดีไซน์เนอร์(Altium Designer)

โปรแกรมอัลเทียมดีไซน์เนอร์เป็นซอฟต์แวร์ออกแบบลายวงจรไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า แผ่นวงจรพิมพ์(Print Circuit Board: PCB) ซอฟต์แวร์มีส่วนต่อประสานที่ใช้งานง่ายและรองรับการออกแบบหลากหลายรูปแบบ นอกจากนี้ยังรองรับการสร้างภาพวงจรแบบ 3 มิติ ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจสอบปัญหาการออกแบบที่อาจเกิดขึ้นก่อนการผลิตบอร์ดได้ โดยผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมอัลเทียมดีไซน์เนอร์เวอร์ชัน 20.1.7(Build 139)



รูปที่ 3.17 โลโก้โปรแกรมอัลเทียมดีไซน์เนอร์

(ที่มา : Wikimedia, 2022)

3.6.10 โปรแกรมแมทแลป(MATLAB)

โปรแกรมแมทแลปย่อมาจาก Matrix Laboratory เป็นแพลตฟอร์มการเขียนโปรแกรมและภาษาโปรแกรมที่พัฒนาโดยแมทเวิร์ค(MathWorks) โปรแกรมแมทแลปถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในด้านวิชาการและอุตสาหกรรมสำหรับงานต่างๆ รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูล การจำลองเชิงตัวเลข และการพัฒนาอัลกอริทึม โดยส่วนใหญ่โปรแกรมแมทแลปจะใช้งานที่มีลักษณะเฉพาะอย่างสูงเช่น

- การประมวลผลสัญญาณและภาพระบบควบคุม
- การเพิ่มประสิทธิภาพ
- การสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์
- การทดสอบและการวัด

โดยผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมแมทแลปเวอร์ชัน R2019a



รูปที่ 3.18 โลโก้โปรแกรมแมทแลป

(ที่มา : Kmutnb, 2022)

3.6.11 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในงานวิจัย

ผู้วิจัยได้ใช้คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กยี่ห้อ ASUS รุ่น K556UR-XX134T ดังรูปที่ 3.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Asus K556UR-XX134T		
CPU	GPU	RAM
Intel Core i7-6500U	NVIDIA GeForce GT 930MX	12 GB DDR4 1064 MHz
DISPLAY	STORAGE	OS
15.6 inch (1366x768) HD	256 GB SSD	Windows 10 Home (64 Bit)



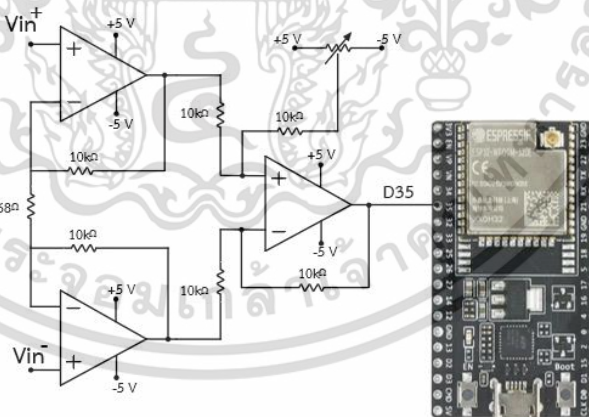
รูปที่ 3.19 Asus K556UR-XX134T

(ที่มา : ASUS, 2023)

3.7 การออกแบบการทดลอง

3.7.1 การออกแบบการทดลองของวงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน

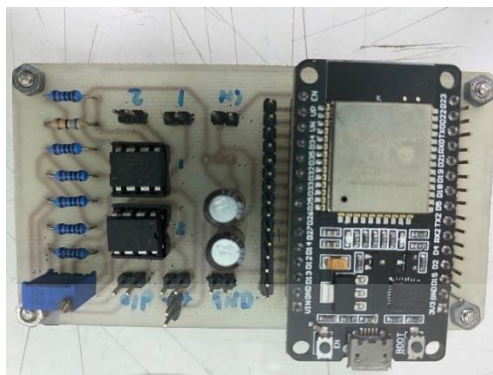
แผ่นวงจรพิมพ์ในการทดลองจะนำส่วนของวงจรขยายอินสตรูเมนเตชันรวมกันกับไมโครคอนโทรลเลอร์ไอเอสพี32 โดยมีแผนผังวงจรดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แผงวงจรรวมของวงจรขยายอินสตรูเมนเตชันรวมกันกับไมโครคอนโทรลเลอร์ไอเอสพี32

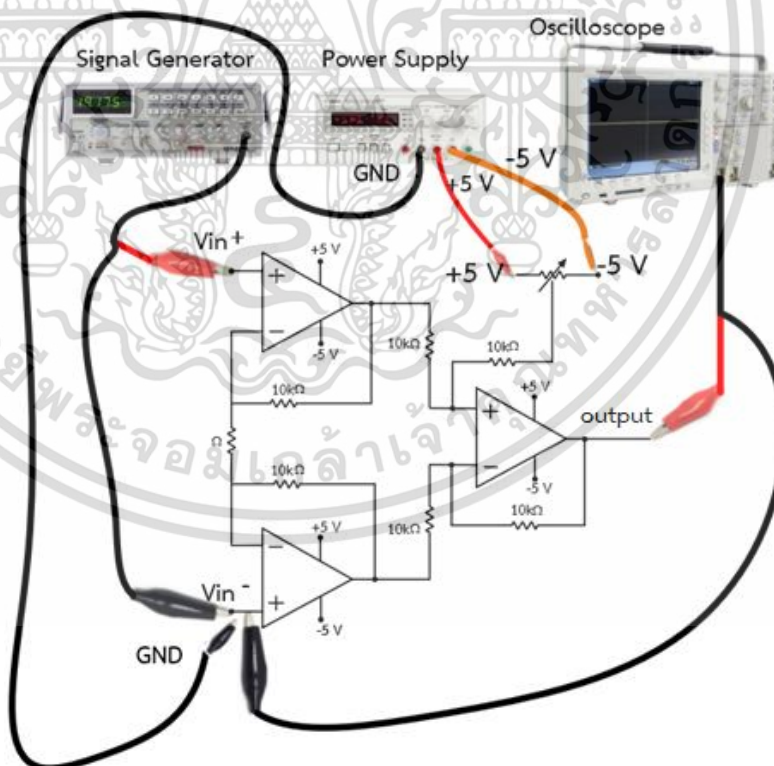
และมีแผ่นวงจรพิมพ์รวมของวงจรขยายอินสตรูเมนเตชันรวมกันกับไมโครคอนโทรลเลอร์ไอเอสพี32 ดังรูปที่ 3.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แผงวงจรพิมพ์รวมของวงจรขยายอินสตรูเมนเตชันรวมกันกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ไอเอสพี32

จากหัวข้อ 3.2 วงจรขยายอินสตรูเมนเตชันมีอัตราการขยายเท่ากับ 295 ทำการทดลองโดยป้อน อินพุต 5 มิลลิโวลต์ที่ความถี่ตั้งแต่ 100 มิลลิเฮิรตซ์ ถึง 4 เมกะเฮิรตซ์ และบันทึกแอมพลิจูดของสัญญาณ เอาต์พุตของแต่ละความถี่หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปพลอตกราฟเพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่ โดยมีแผนผัง การเชื่อมต่อดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดสอบผลตอบสนองความถี่ของวงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

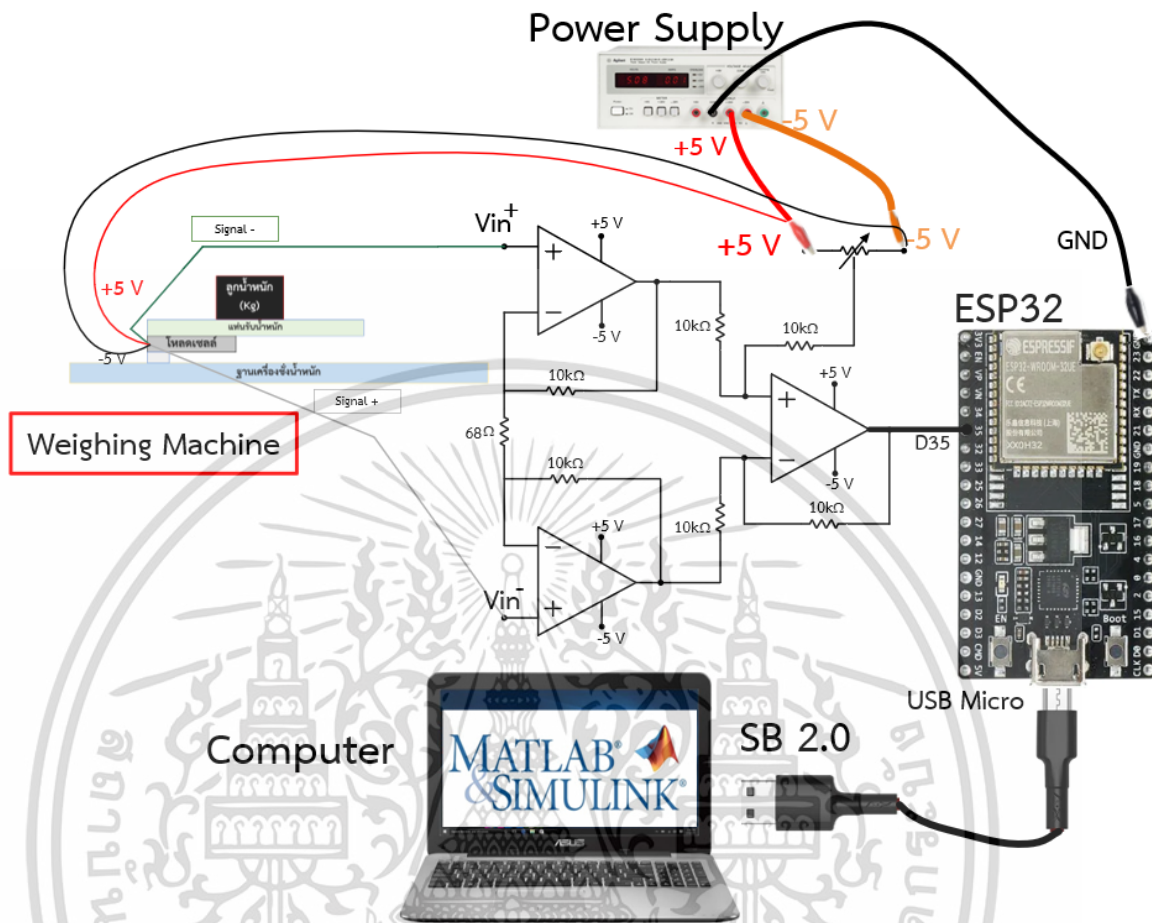
3.7.2 การออกแบบการทดลองของระบบแบบปรับตัวได้นำเสนอ

การทดลองเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนของระบบที่นำเสนอโดยใช้โปรแกรมแมทแลปและมีแผนผังการทำงานของโปรแกรมดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจากโครงสร้างที่นำเสนอในรูปที่ 3.2 กำหนดให้ $x_1(n)$ คือ สัญญาณอ้างอิงขนาด 2 โวลต์พีคทูพีค, $x_2(n)$ คือสัญญาณอ้างอิงไฟตรง 1 โวลต์ และ $d(n)$ คือ สัญญาณไซน์ขนาด 2 โวลต์พีคทูพีคถูกยกกระดับ 1 โวลต์ ซึ่ง $d(n)$ จะเป็นเหมือนการจำลองสัญญาณเอาต์พุตจากโหลดเซลล์ที่รวมมากับสัญญาณรบกวน โดยทดลองเป็นระยะเวลา 8 วินาที

3.7.3 การออกแบบการทดลองสร้างโมเดลคณิตศาสตร์เพื่อหาสมการคำนวณค่าน้ำหนัก

ในการทดลองสร้างโมเดลคณิตศาสตร์ จะทำการชั่งน้ำหนัก 0.125 ถึง 5 กิโลกรัม โดยเพิ่มทีละ 0.125 กิโลกรัม ซึ่งค่าที่นำมาทำโมเดลจะไม่ตรงกับการทดลองจริง

ในการสร้างโมเดลจะชั่งน้ำหนักแบบไม่มีแรงสั่นสะเทือน เป็นระยะเวลา 8 วินาที โดยมีแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.23 และใช้แผนผังโปรแกรมในรูปที่ 3.3 จากนั้นนำค่าผลการทดลองมาประมวลผลเพื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) ด้วยโปรแกรมแมทแลป เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า $h_2(n)$ (ค่าจากระบบที่นำเสนอ) กับค่าน้ำหนัก และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัญญาณเอาต์พุตจากโหลดเซลล์กับค่าน้ำหนัก



รูปที่ 3.23 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองสร้างโมเดลคณิตศาสตร์เพื่อหาสมการคำนวณค่าน้ำหนัก

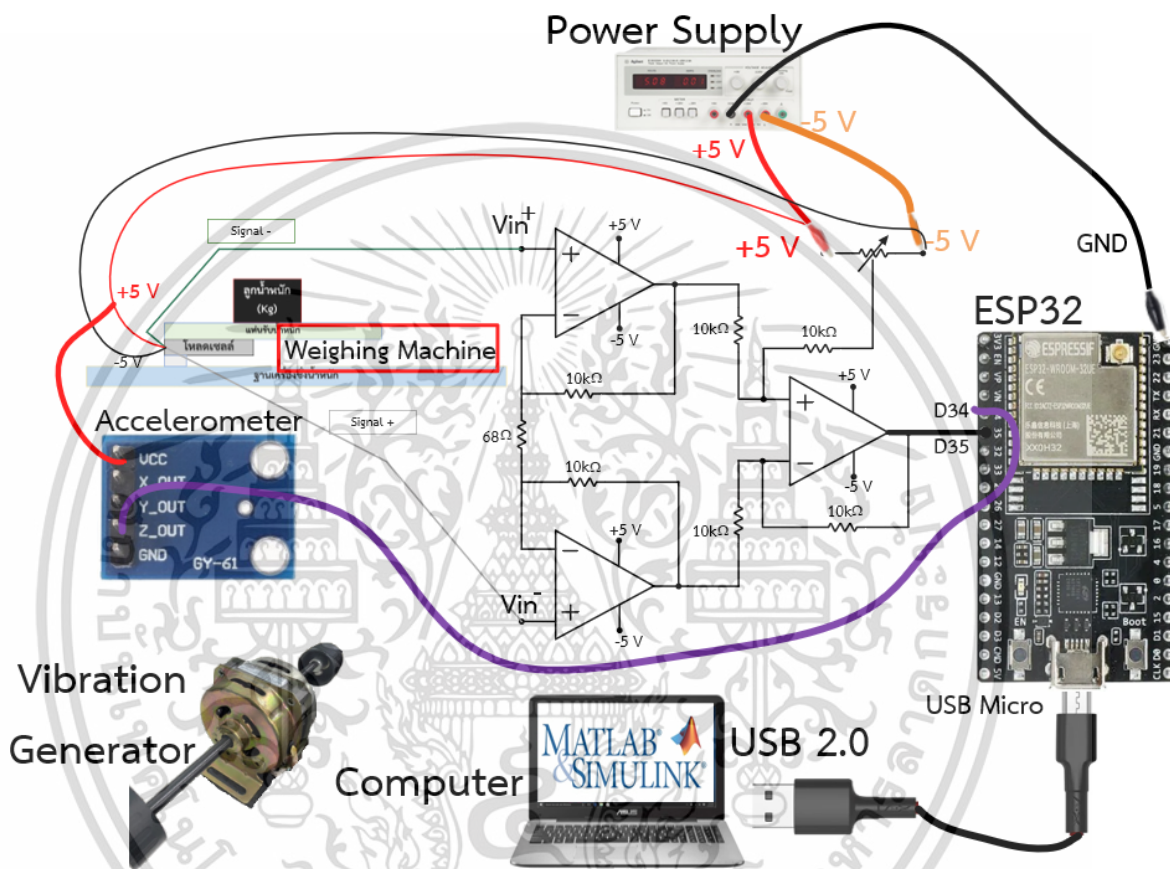
3.7.4 การออกแบบการทดลองเพื่อหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบที่นำเสนอ

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้เลือกค่าน้ำหนักมาทดลองซึ่ง 3 ค่าน้ำหนัก คือ 0.305 กิโลกรัม, 1.315 กิโลกรัม และ 2.615 กิโลกรัม โดยที่ 0.305 กิโลกรัม จะเป็นตัวแทนของค่าน้ำหนักที่น้อย, 1.315 กิโลกรัม คือตัวแทนค่าน้ำหนักระดับปานกลาง และ 2.615 กิโลกรัม จะเป็นตัวแทนของค่าน้ำหนักที่สูง

ทำการทดลองโดยใช้แผนผังโปรแกรมดังรูปที่ 3.5 และมีแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.24 โดยชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บค่าตัวอย่างจำนวน 200, 100, 50, 40, 30, 20, 15, 10 และ 5 ตัวอย่างก่อนที่ระบบจะเริ่มทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์เอสพี32และใช้เครื่องสร้างแรงดันสะเทือนเก็บผลเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะเวลา 8 วินาที และนำผลการทดลองไปหาค่าเฉลี่ย(Moving Average)บนโปรแกรมแมทแลปและพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบจำนวนตัวอย่างแต่ละค่า และหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาเลือกใช้งาน



รูปที่ 3.24 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองเพื่อหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาหาค่าเฉลี่ยเริ่มต้นของระบบที่นำเสนอ

3.7.5 การออกแบบการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการนำค่าจากวงจรอินสตรูเมนต์เซ็นโดยตรงมาคำนวณหาค่าน้ำหนัก

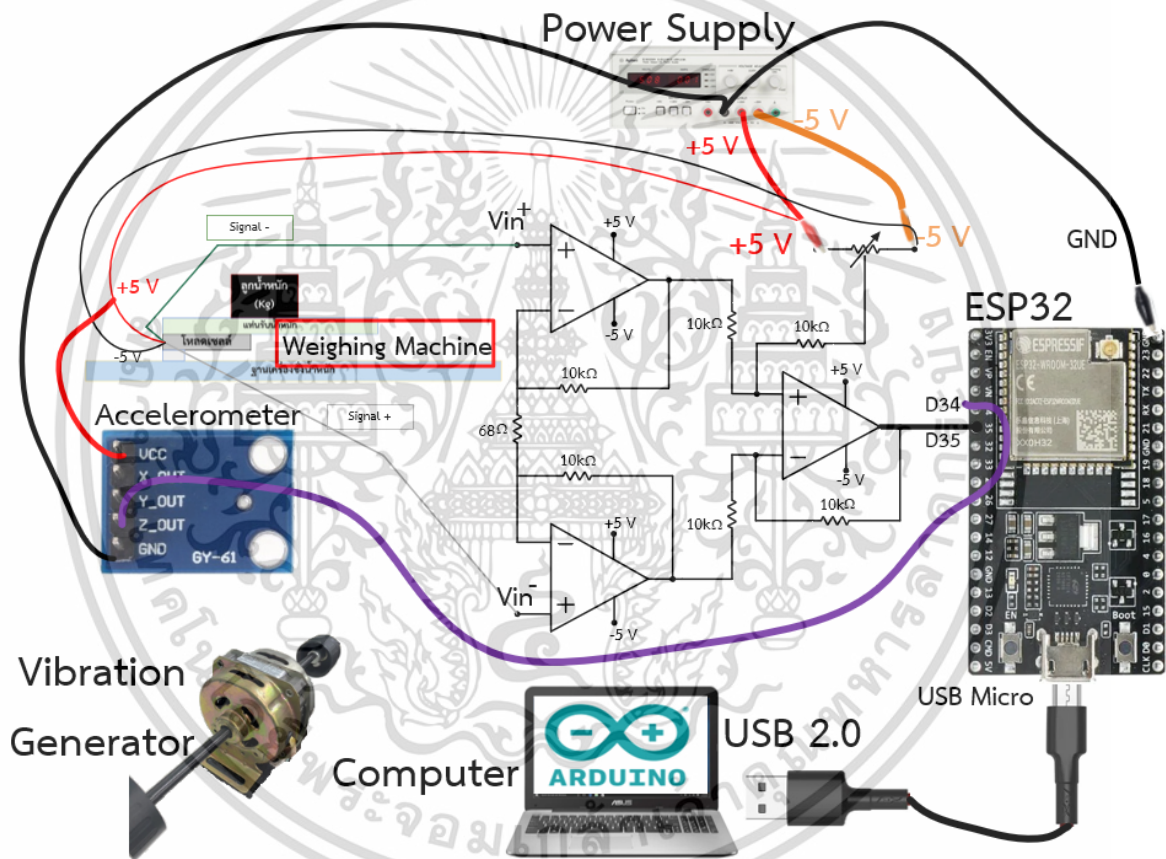
ในการทดลองนี้จะชั่งน้ำหนัก 0.305, 0.480, 0.545, 0.615, 1.115, 1.315, 1.615, 2.305, 2.545 และ 2.615 กิโลกรัม โดยผู้วิจัยต้องการเปรียบเทียบ 2 วิธีการด้วยกันดังนี้

- วิธีที่ 1 จะเรียกว่า วิธีการสุ่ม โดยจะใช้ 1 ตัวอย่างทุก ๆ 1 วินาที เป็นระยะเวลา 8 วินาทีและนำมาหาร 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิธีที่ 2 จะเรียกว่าวิธีการเฉลี่ย เป็นการหาค่าเฉลี่ยทุกค่า(เฉลี่ยด้วยจำนวนตัวอย่างทั้งหมด)ในช่วงเวลา 8 วินาที

โดยใช้แผนผังโปรแกรมในรูปที่ 3.6 และมีแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.25 และใช้เครื่องสร้างแรงสั่นสะเทือน ซึ่งจะนำผลการทดลองมาคำนวณหาค่าความผิดพลาด RMSE (Root Mean Square Error) และนำค่า RMSE ที่ได้จากเอาต์พุตของระบบที่นำเสนอมาเปรียบเทียบกับ RMSE ของน้ำหนักที่ได้จากวงจรรีจิสเตอร์แมนเดชั่น



รูปที่ 3.25 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการนำค่าจากโหลดเซลล์โดยตรงมาคำนวณหาค่าน้ำหนักระบบที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.6 การออกแบบการทดลองวัดประสิทธิภาพของระบบ

3.7.6.1 การออกแบบผลการทดลองอัตราการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมกับการทดลอง

เพื่อเป็นการแสดงสมรรถนะการทำงานของตัวระบบที่นำเสนอ การเลือกอัตราการสุ่มตัวอย่างเพื่อนำมาทดลองเป็นสิ่งที่สำคัญเช่นกัน โดยประสิทธิภาพของระบบจะพิจารณาจากความเร็วในการประมวลผลและค่าความผิดพลาดของระบบ จึงทำให้การเลือกใช้อัตราการสุ่มตัวอย่างที่มากเกินไปอาจจะทำให้ส่วนของการประมวลผลเกิดภาวะที่ไม่จำเป็นเกิดขึ้น

ทำการทดลองเลือกอัตราการสุ่มตัวอย่างสัญญาณโดยใช้แผนผังโปรแกรมดังรูปที่ 3.6 และมีแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.25 และค่าอัตราการสุ่มตัวอย่างที่นำมาทดลองได้แก่ 619, 502, 335, 201, 101, 66, 14 และ 8 ตัวอย่างต่อวินาที

โดยทดลองชั่งน้ำหนัก 3 ค่าน้ำหนัก คือ 0.465, 0.77 และ 1.465 กิโลกรัม เก็บผลการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 เก็บผลทำซ้ำ 5 ครั้งเป็นระยะเวลา 8 วินาทีและนำมาเฉลี่ย เพื่อหาค่า RMSE และนำผลการทดลองมาพลอตกราฟ

3.7.6.2 การออกแบบผลการทดลองเพื่อดูประสิทธิภาพและเวลาของระบบที่นำเสนอ

การทดลองนี้จะเป็นการนำค่าจากการทดลองจริงมาเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทางทฤษฎี ซึ่งจะทำให้การทดลองโดยใช้แผนผังโปรแกรมดังรูปที่ 3.5 และมีแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังรูปที่ 3.25

โดยทดลองชั่งน้ำหนัก 3 ค่าน้ำหนัก คือ 0.305, 1.315 และ 2.615 กิโลกรัม เก็บผลการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 เก็บผลทำซ้ำ 5 ครั้งเป็นระยะเวลา 8 วินาทีและนำมาเฉลี่ย จากนั้นนำค่า $h_2(n)$ และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยไปพลอตกราฟด้วยโปรแกรมแมทแลบ

และผู้วิจัยต้องการเลือกใช้เวลาที่เร็วที่สุดเพื่อนำมาแสดงผลค่าน้ำหนัก ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการตัดสินใจจากการหาความชันของกราฟค่าน้ำหนัก โดยค่าความชันควรจะมีค่าเท่ากับ 0 เพื่อเป็นการบ่งบอกว่าระบบที่นำเสนอเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมแล้วนั่นเอง

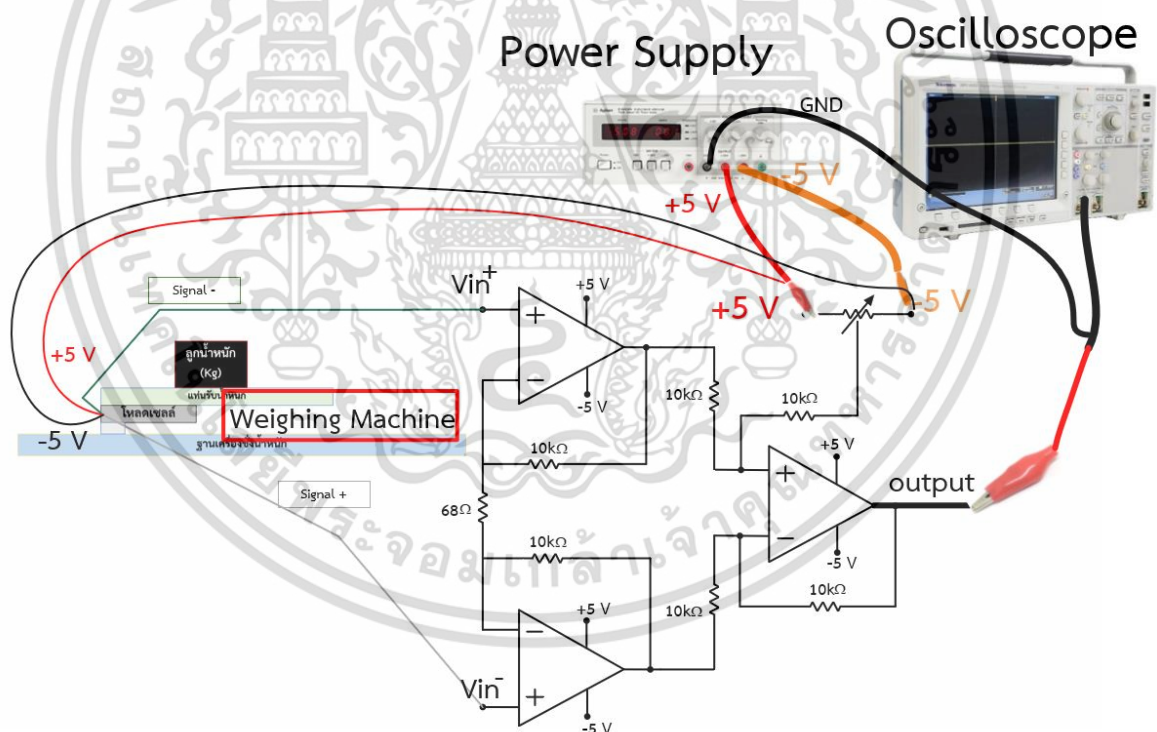
3.7.6.3 การออกแบบผลการทดลองทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ ค่าความแม่นยำสัมพัทธ์และค่าความเที่ยงตรง

ในการทดลองจะชั่งน้ำหนัก 3 ค่าน้ำหนัก คือ 0.305, 1.315 และ 2.615 กิโลกรัม ซึ่งจะทำให้การทดลองโดยใช้แผนผังโปรแกรมดังรูปที่ 3.5 และมีแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์

ดังรูปที่ 3.25 เก็บผลการทดลองโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 เก็บผลทำซ้ำ 5 ครั้ง เป็นระยะเวลา 8 วินาทีและนำมาเฉลี่ย นำค่าที่ได้จากการทดลองมาคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์, ค่าความแม่นยำสัมพัทธ์และค่าความเที่ยงตรงจากสมการที่ 2.55, 2.56 และสมการที่ 2.57

3.7.6.4 การออกแบบการทดลองเพื่อหาการชั่งน้ำหนักที่ควรจะไปใช้งาน

โดยในการทดลองเพื่อหาค่าความละเอียดของระบบที่นำเสนอ โดยค่ากำหนดแรงดันไฟต่อนที่ยังไม่ชั่งน้ำหนักอยู่ที่ 150 มิลลิโวลต์ และชั่งน้ำหนักจาก 0 กิโลกรัม และเพิ่มขึ้นทีละ 0.25 กิโลกรัม ชั่งไปจนถึง 9 กิโลกรัม ซึ่งเก็บผลการทดลองโดยการวัดสัญญาณเอาต์พุตจากโหนดเซลล์โดยตรง เพื่อนำผลมาคำนวณหาค่าความละเอียดของระบบที่นำเสนอ โดยแผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์เป็นดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แผนผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในการทดลองเพื่อหาค่าความละเอียดในการชั่งน้ำหนักของระบบ

ในหัวข้อต่อไป จะเป็นการแสดงผลการทดลอง และลักษณะของสัญญาณ ที่ได้ทำการทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

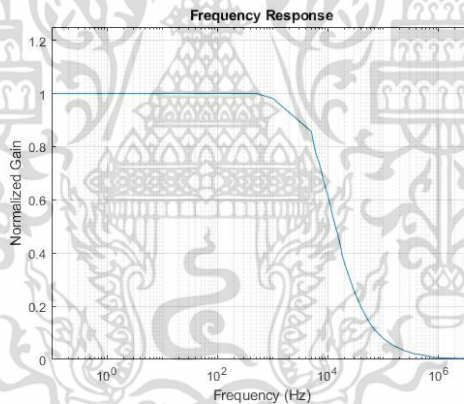
4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะแสดงให้เห็นถึงผลการทดลองที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งจะสอดคล้องกับที่ได้ อธิบายไว้แล้วในบทที่ 3 โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 แปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัลขนาด 12 บิต อัตราการสุ่มตัวอย่างที่ 170 ตัวอย่างต่อวินาที โดยที่อัตราการสุ่มตัวอย่างไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านทรัพยากรของโปรแกรม

4.2 ผลการทดลองของวงจรมอนิเตอร์

จากหัวข้อ 3.7.1 จะได้กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรมอนิเตอร์ได้ดังรูปที่

4.1

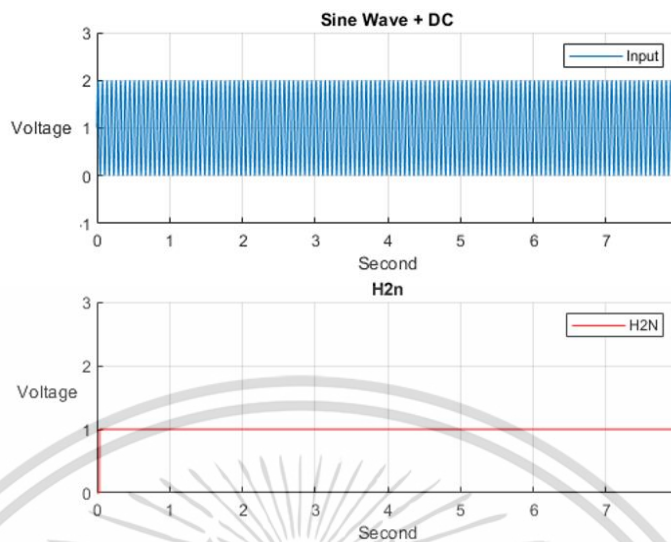


รูปที่ 4.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรมอนิเตอร์

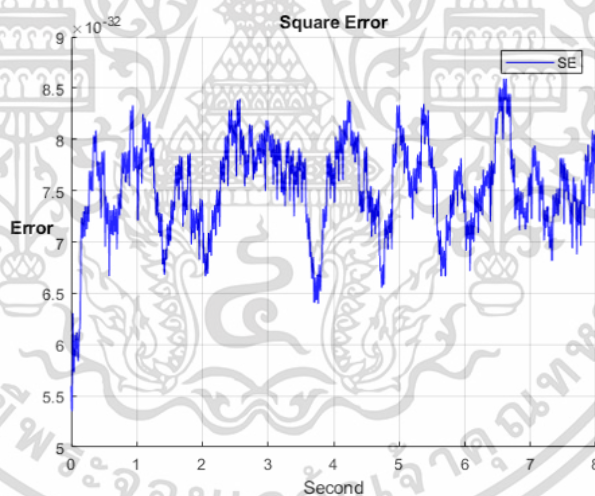
จากรูปที่ 4.1 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรมอนิเตอร์ใช้งานอยู่ที่ 0 ถึง 8 กิโลเฮิรตซ์

4.3 ผลการทดลองทดสอบระบบแบบปรับตัวได้นำเสนอ

จากหัวข้อ 3.7.2 ได้กราฟผลการทดลองของระบบดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สัญญาณเอาต์พุตของระบบแบบปรับตัวได้ที่ถูกจำกัดสัญญาณรบกวน
จากรูป 4.2 สัญญาณที่ผ่านระบบที่นำเสนอสามารถจำกัดสัญญาณรบกวนได้ทั้งหมดและมี
ค่าความผิดพลาดกำลังสองแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

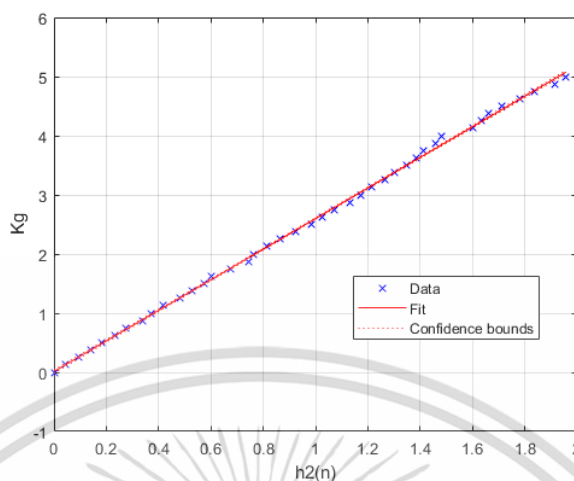


รูปที่ 4.3 ค่าความผิดพลาดกำลังสองของการทดลองระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ

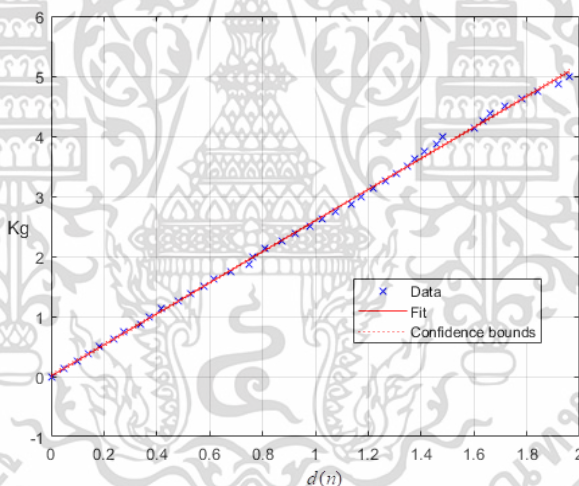
4.4 การทดลองสร้างโมเดลคณิตศาสตร์เพื่อหาสมการคำนวณค่าน้ำหนัก

จากหัวข้อ 3.7.3 จะได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $h_2(n)$ กับค่าน้ำหนัก และความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตจากวงจรขยายอินสตรูเมนเตชันกับค่าน้ำหนักแสดงได้ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $d(n)$ กับค่าน้ำหนัก โดยโมเดลคณิตศาสตร์ของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ มีการรับเอาต์พุตมาจากโหนดเซลล์ และเซนเซอร์วัดความเร่งเป็นดังสมการที่ 4.1

$$w_1 = 2.5853 \cdot h_2(n) + 0.0047637 \quad (4.1)$$

โดยที่ 7.7558 คือ ค่าความชัน, 0.014291 คือค่าคงที่ และ w_1 คือค่าน้ำหนักที่ได้จากการสร้าง โมเดลของ $h_2(n)$ ค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือ R^2 เท่ากับ 0.999

โมเดลคณิตศาสตร์ในส่วนของการนำสัญญาณเอาต์พุตโดยตรงจากวงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน มาคำนวณหาค่าน้ำหนักเป็นดังสมการที่ 4.2

$$w_2 = 2.5864 \cdot d(n) + 0.0092344 \quad (4.2)$$

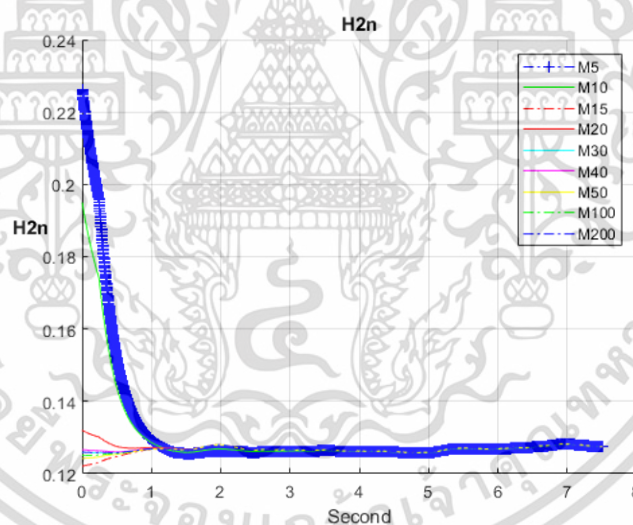
โดยที่ 2.5864 คือ ค่าความชัน, 0.0092344 คือค่าคงที่ และ w_2 คือค่าน้ำหนักที่ได้มาจากการสร้างโมเดลของ $d(n)$ ค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือ R^2 เท่ากับ 0.999

4.5 ผลการทดลองเพื่อหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบแบบปรับตัวได้น้ำเสนอ

จากหัวข้อ 3.7.4 ได้ผลการทดลองดังนี้

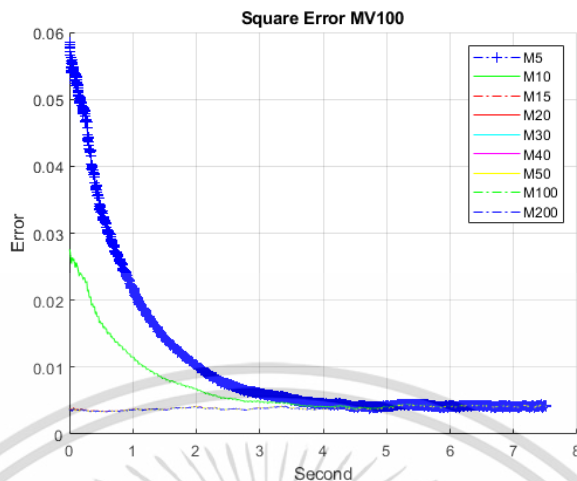
4.5.1 ผลการทดลองโดยใช้น้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม

ค่าตัวอย่าง 200 คือเส้นปะสีน้ำเงิน, 100 คือเส้นปะสีเขียว, 50 คือเส้นปะสีเหลือง, 40 คือเส้นทึบสีชมพู, 30 คือเส้นทึบสีฟ้า, 20 คือเส้นทึบสีแดง, 15 คือเส้นปะสีแดง, 10 คือเส้นทึบสีเขียว และ 5 คือเส้นปะมีสัญลักษณ์บวกสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า $h_2(n)$ ของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.6 เมื่อพิจารณากราฟจำนวนตัวอย่าง 5 และ 10 มีค่า $h_2(n)$ ณ เวลาที่ระบบเริ่มต้นทำงาน จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ ณ จุดเวลาเริ่มต้นไม่ได้อยู่ในกลุ่มที่เข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมแบบค่าที่ได้จากจำนวนตัวอย่างอื่นๆ และค่าความผิดพลาดกำลังสองแสดงได้ดังรูปที่ 4.7

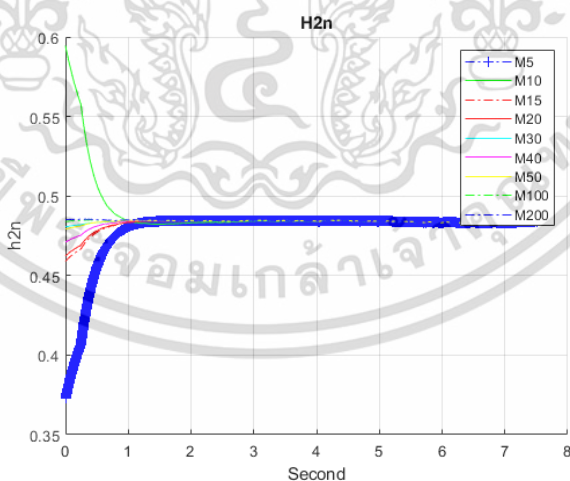


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดกำลังสอง ณ เวลาเริ่มต้นของจำนวนตัวอย่าง 5 และ 10 มีค่าสูงกว่าค่าความผิดพลาดของจำนวนตัวอย่างอื่นๆ อย่างชัดเจน

4.5.2 ผลการทดลองโดยใช้น้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม

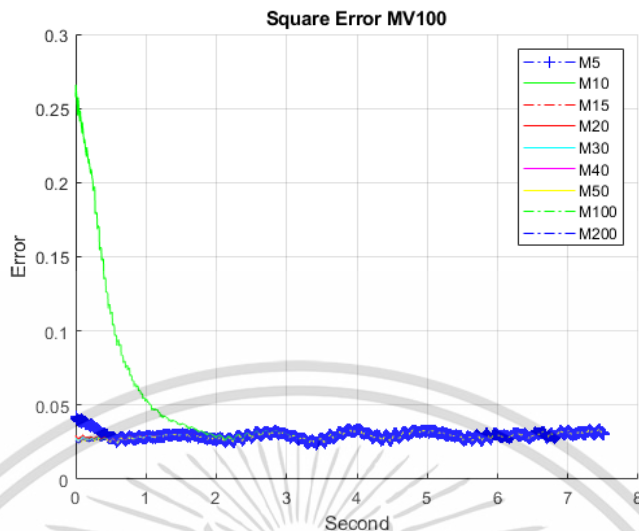
ค่าตัวอย่าง 200 คือเส้นปะสีน้ำเงิน, 100 คือเส้นปะสีเขียว, 50 คือเส้นปะสีเหลือง, 40 คือเส้นทึบสีชมพู, 30 คือเส้นทึบสีฟ้า, 20 คือเส้นทึบสีแดง, 15 คือเส้นปะสีแดง, 10 คือเส้นทึบสีเขียว และ 5 คือเส้นปะมีสัญลักษณ์บวกสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่า $h_2(n)$ ของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.8 เมื่อพิจารณารูปจำนวนตัวอย่าง 5 และ 10 มีค่า $h_2(n)$ ณ เวลาที่ระบบเริ่มต้นทำงาน จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์ ณ จุดเวลาเริ่มต้นไม่ได้อยู่ในกลุ่มที่เข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมแบบค่าที่ได้จากจำนวนตัวอย่างอื่นๆ และค่าความผิดพลาดกำลังสองแสดงได้ดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

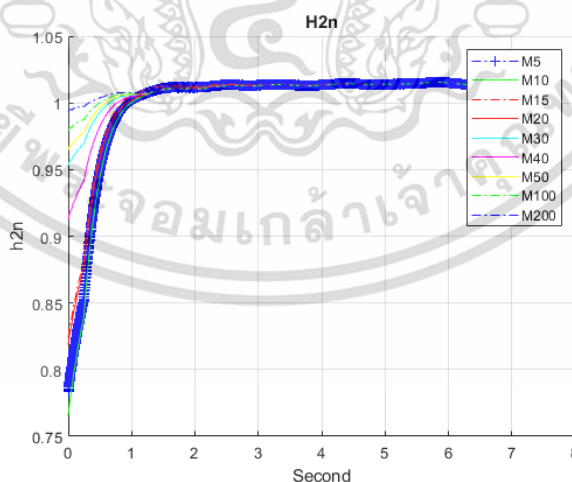


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.9 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดกำลังสอง ณ เวลาเริ่มต้นของจำนวนตัวอย่าง 5 และ 10 มีค่าสูงกว่าค่าความผิดพลาดของจำนวนตัวอย่างอื่นๆ อย่างชัดเจน

4.5.3 ผลการทดลองโดยใช้น้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม

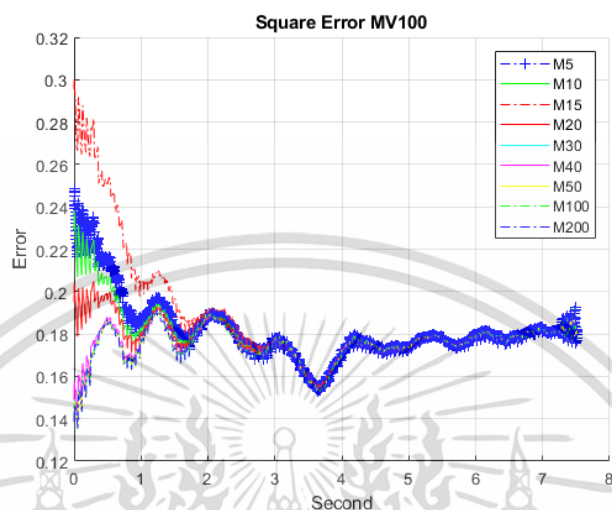
ค่าตัวอย่าง 200 คือเส้นปะสีน้ำเงิน, 100 คือเส้นปะสีเขียว, 50 คือเส้นปะสีเหลือง, 40 คือเส้นทึบสีชมพู, 30 คือเส้นทึบสีฟ้า, 20 คือเส้นทึบสีแดง, 15 คือเส้นปะสีแดง, 10 คือเส้นทึบสีเขียว และ 5 คือเส้นปะมีสัญลักษณ์บวกสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่า $h_2(n)$ ของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้น้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.10 เมื่อน้ำหนักมีค่ามากขึ้นจะเห็นว่าค่า $h_2(n)$ ของแต่ละค่าตัวอย่างจะห่างออกจากกันไม่มาก แต่ค่าตัวอย่าง 5, 10, 15 และ 20 มีค่า ณ เวลาที่ระบบเริ่มต้น

ทำงานอยู่ในกลุ่มเดียวกัน ส่วนค่าอื่นๆ เกือบจะเข้าใกล้ค่า $h_2(n)$ ที่เหมาะสมในทันที และค่าความผิดพลาดกำลังสองแสดงได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของแต่ละค่าจำนวนตัวอย่างต่างๆ โดยใช้จำนวน 2.615 กิโลกรัม

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.11 จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดกำลังสอง ณ เวลาเริ่มต้นของจำนวนตัวอย่างดูกระจุกกระจาย แต่หลังจากเวลาผ่านไปค่าความผิดพลาดก็กลับเข้าสู่ค่าที่เหมาะสม

4.6 ผลการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการนำค่าจากวงจรอินสตรูเมนต์ชันโดยตรงมาคำนวณหาค่าน้ำหนัก

จากหัวข้อ 3.7.5 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางการหาค่า RMSE เฉลี่ยของทุกน้ำหนักที่นำเสนอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (Kg)	RMSE ของวิธีการสุ่ม				RMSE ของวิธีการเฉลี่ย			
	$d(n)(Kg)$ คอลัมน์ที่ 1	$Error\ d(n)$ คอลัมน์ที่ 2	$h_2(n)(Kg)$ คอลัมน์ที่ 3	$Error\ h_2(n)$ คอลัมน์ที่ 4	$d(n)(Kg)$ คอลัมน์ที่ 5	$Error\ d(n)$ คอลัมน์ที่ 6	$h_2(n)(Kg)$ คอลัมน์ที่ 7	$Error\ h_2(n)$ คอลัมน์ที่ 8
0.305	0.336987	0.21858	0.333059	0.028165	0.335609	0.030609	0.331948	0.026948
0.48	0.520401	0.59002	0.523249	0.043892	0.516335	0.036335	0.520294	0.040294
0.545	0.626441	0.44547	0.564797	0.020331	0.55893	0.01393	0.564625	0.019625
0.615	0.624618	0.46733	0.624309	0.011918	0.622223	0.007223	0.632892	0.017892
1.115	0.858839	0.53675	1.103176	0.015949	1.105755	0.009245	1.099338	0.015662
1.315	1.292629	0.33034	1.256103	0.059294	1.257941	0.057059	1.252708	0.062292
1.615	1.613607	0.57208	1.575839	0.041304	1.580043	0.034957	1.580866	0.034134
2.305	2.226907	0.84117	2.258993	0.053219	2.261058	0.043942	2.270619	0.034381
2.545	2.623441	0.74424	2.514897	0.040614	2.528715	0.016286	2.502668	0.042332
2.615	2.487702	1.10777	2.624339	0.034011	2.633355	0.018355	2.599279	0.015719
RMSE เฉลี่ย ของทุก น้ำหนัก		0.58538		0.034869		0.026794		0.030928

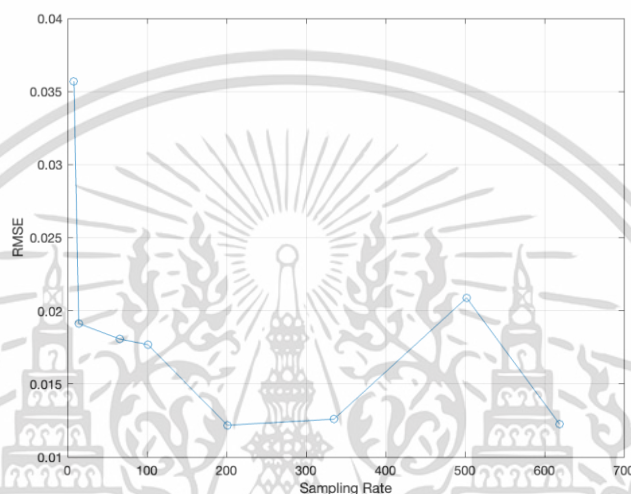
จากตารางที่ 4.1 คอลัมน์ที่ 1 คือค่าน้ำหนักที่ใช้ในการทดลอง คอลัมน์ที่ 2 คือ ค่าน้ำหนักจากโพลีเซลล์โดยตรงด้วยวิธีการสุ่ม คอลัมน์ที่ 3 คือ ค่า RMSE เฉลี่ย ของค่าน้ำหนักที่มาจากโพลีเซลล์โดยตรงด้วยวิธีการสุ่ม คอลัมน์ที่ 4 คือ ค่าน้ำหนักโดยใช้ระบบที่นำเสนอด้วยวิธีการสุ่ม คอลัมน์ที่ 5 คือ ค่า RMSE เฉลี่ย โดยใช้ระบบที่นำเสนอด้วยวิธีการสุ่ม คอลัมน์ที่ 6 คือ ค่าน้ำหนักจากโพลีเซลล์โดยตรงด้วยวิธีการเฉลี่ย คอลัมน์ที่ 7 คือ ค่า RMSE เฉลี่ย ของค่าน้ำหนักที่มาจากโพลีเซลล์โดยตรงด้วยวิธีการเฉลี่ย คอลัมน์ที่ 8 คือ ค่าน้ำหนักโดยใช้ระบบที่นำเสนอด้วยวิธีการเฉลี่ย ในขณะที่คอลัมน์ที่ 9 คือ ค่า RMSE เฉลี่ย โดยใช้ระบบที่นำเสนอด้วยวิธีการเฉลี่ย

4.7 ผลการทดลองประสิทธิภาพของระบบ

จากหัวข้อที่ 3.7.6 จะได้ผลการทดลองดังนี้

4.7.1 อัตราการสุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมกับระบบที่นำเสนอ

จากหัวข้อที่ 3.7.6.1 ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.12



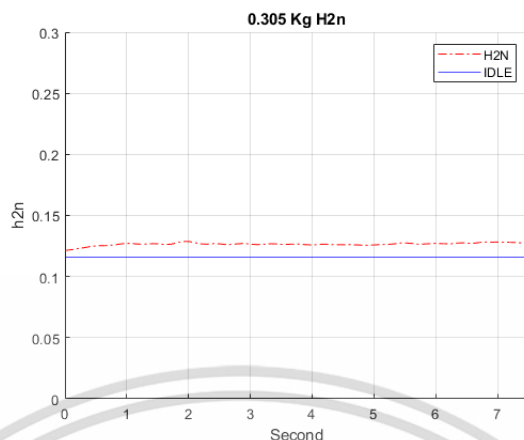
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาด RMSE กับค่าอัตราการสุ่มตัวอย่าง เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าอัตราการสุ่มตัวอย่างที่ 8 ตัวอย่างต่อวินาที เริ่มแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยมีลักษณะเบี่ยงเบนออกไปจากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยทั่วไปมากขึ้นอย่างชัดเจน

4.7.2 ผลการทดลองเพื่อดูประสิทธิภาพและเวลาของระบบแบบปรับตัวได้ที่นำเสนอ

จากหัวข้อที่ 3.7.6.2 ได้ผลการทดลองดังนี้

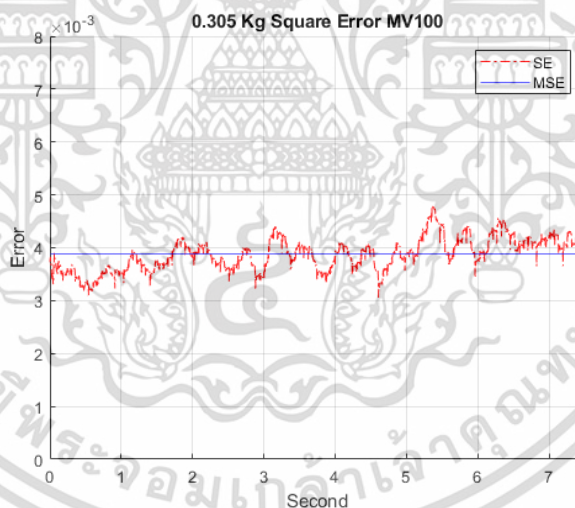
4.7.2.1 ผลการทดลองเพื่อดูประสิทธิภาพของน้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม

ค่า $h_2(n)$ ในทางปฏิบัติ และ $h_2(n)$ ในทางทฤษฎี (IDLE) ที่ได้จากสมการที่ 4.1 แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ $h_2(n)$ ที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎี
ของน้ำหนัก 0.305 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.13 กราฟสีแดงคือ $h_2(n)$ ที่เกิดจากการทดลอง กราฟสีน้ำเงินคือค่า $h_2(n)$ ในทางทฤษฎีที่คำนวณจากสมการที่ 4.1 และแสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองดัง
รูปที่ 4.14



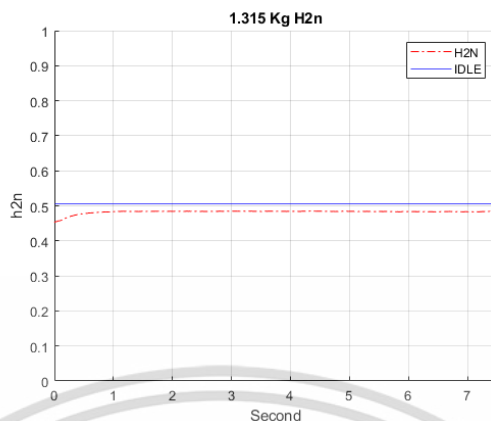
รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดในทางปฏิบัติและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของน้ำหนัก
0.305 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.14 กราฟสีแดงคือค่าความผิดพลาดกำลังสองที่เกิดจากการทดลอง
กราฟสีน้ำเงินค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย

4.7.2.2 ผลการทดลองเพื่อดูประสิทธิภาพของน้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม

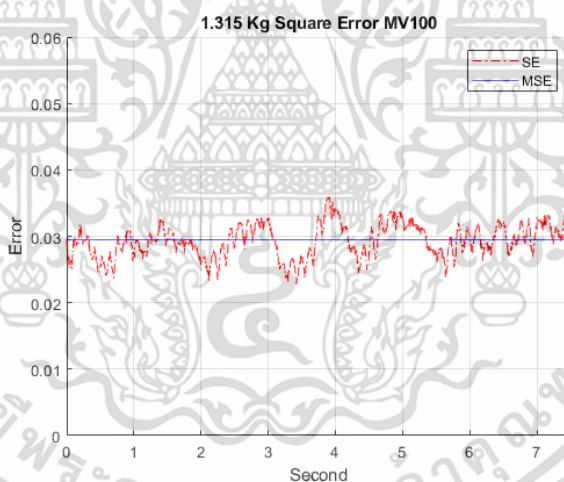
ค่า $h_2(n)$ ในทางปฏิบัติ และ $h_2(n)$ ในทางทฤษฎีจากสมการที่ 4.1 แสดงได้ดัง
รูปที่ 4.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ $h_2(n)$ ที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎีของน้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.15 กราฟสีแดงคือ $h_2(n)$ ที่เกิดจากการทดลอง กราฟสีน้ำเงินคือค่า $h_2(n)$ ในทางทฤษฎีที่คำนวณจากสมการที่ 4.1 และแสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองดังรูปที่ 4.16

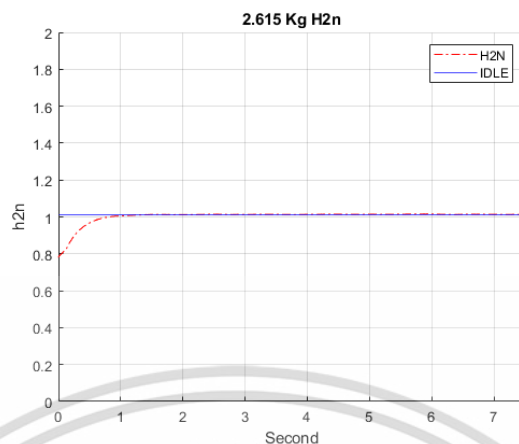


รูปที่ 4.16 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของน้ำหนัก 1.315 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.16 กราฟสีแดงคือค่าความผิดพลาดกำลังสองที่เกิดจากการทดลอง กราฟสีน้ำเงินคือค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย

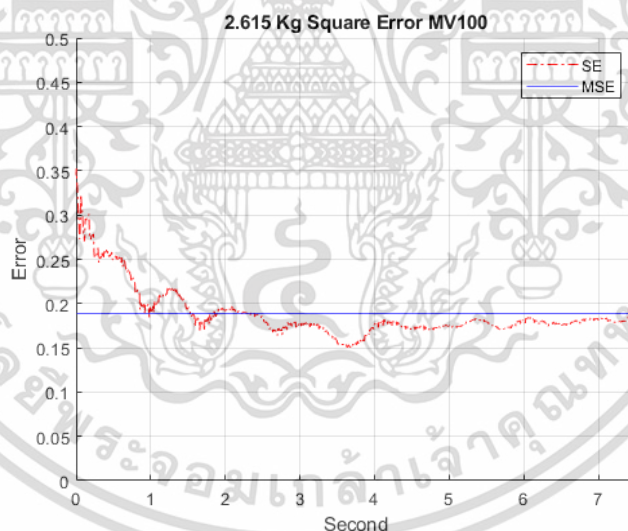
4.7.2.3 ผลการทดลองเพื่อดูประสิทธิภาพของน้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม

ค่า $h_2(n)$ ในทางปฏิบัติ และ $h_2(n)$ ในทางทฤษฎีจากสมการที่ 4.1 แสดงได้ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ $h_2(n)$ ที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าสัมประสิทธิ์จากทฤษฎีของน้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม

จากรูปที่ 4.17 กราฟสีแดงคือ $h_2(n)$ ที่เกิดจากการทดลอง กราฟสีน้ำเงินคือค่า $h_2(n)$ ในทางทฤษฎีที่คำนวณจากสมการที่ 4.1 และแสดงค่าความผิดพลาดกำลังสองดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดกำลังสองที่ได้ในทางปฏิบัติและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของน้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม

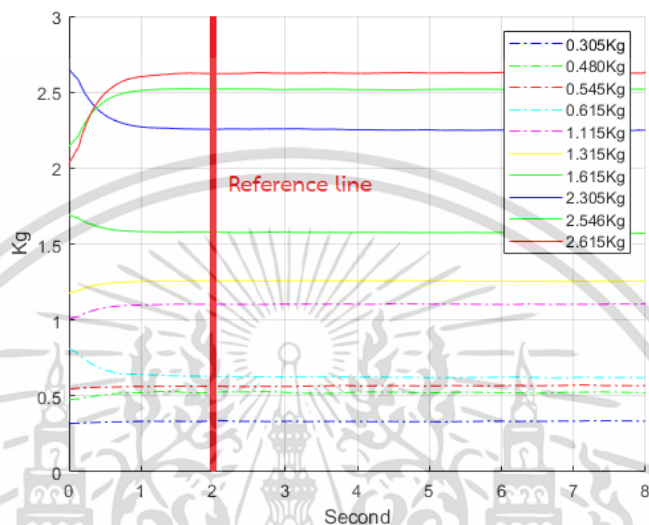
จากรูปที่ 4.18 กราฟสีแดงคือค่าความผิดพลาดกำลังสองที่เกิดจากการทดลอง กราฟสีน้ำเงินคือค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย

จากผลการทดลองค่าในทางปฏิบัติแม้จะไม่ได้มีค่าเท่ากับค่าทางทฤษฎี แต่ไม่ได้มีผลมากนักในการแสดงผลค่าน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2.4 ผลการทดลองหาเวลาที่เหมาะสมของระบบแบบปรับตัวได้

จากผลการทดลอง 3.7.6.2 เมื่อชั่งน้ำหนัก 10 ค่าตามตารางที่ 4.1 สามารถพลอตกราฟได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าน้ำหนัก 10 น้ำหนักที่ผ่านระบบที่นำเสนอกับระยะเวลา จากรูปที่ 4.19 ช่วงที่มีความชันเท่ากับ 0 ควรจะอยู่ที่ตำแหน่งเมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาทีดังเส้นสีแดงในรูป(Reference line) ซึ่งระบบทั้งหมดจะเข้าสู่สภาวะคงตัว

4.7.3 ทดสอบค่าความแม่นยำและค่าความเที่ยงตรง(Accuracy and Precision Test)

จากหัวข้อ 3.7.6.3 ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ตารางทดสอบค่าความเที่ยงตรงและค่าความแม่นยำ

น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)					ค่าความแม่นยำ (เปอร์เซ็นต์)					ค่าความ เที่ยงตรง (กิโลกรัม)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
0.305	6.885	2.032	3.049	4.032	2.984	93.115	97.968	96.951	95.968	97.016	0.0098
1.315	0.913	1.034	2.479	3.087	1.148	99.087	98.966	97.521	96.913	98.852	0.0286
2.615	4.073	4.314	5.637	3.243	2.249	95.927	95.686	94.363	96.757	97.751	0.0330

4.7.4 การทดลองเพื่อหาช่วงการชั่งน้ำหนักที่ควรนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

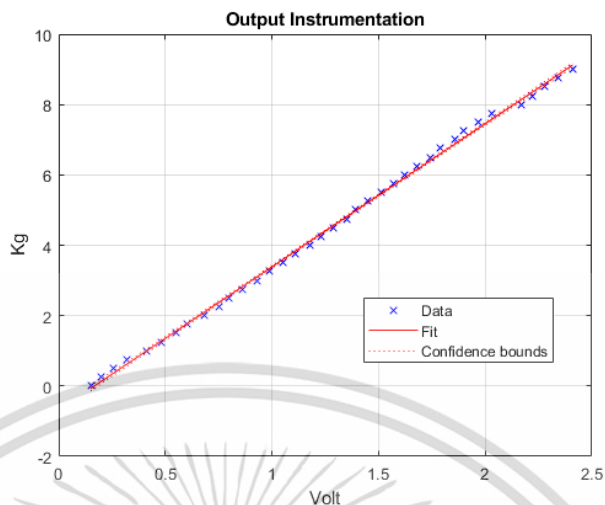
จากหัวข้อ 3.7.6.4 ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ตารางการทดลองเพื่อหา्यानการชั่งน้ำหนักของระบบที่สร้างขึ้น

น้ำหนัก (กิโลกรัม)๘	แรงดันไฟ (โวลต์)๘	น้ำหนัก (กิโลกรัม)๘	แรงดันไฟ (โวลต์)๘
0.25	0.2	4.75	1.35
0.5	0.257	5	1.39
0.75	0.32	5.25	1.45
1	0.41	5.5	1.51
1.25	0.48	5.75	1.57
1.5	0.55	6	1.62
1.75	0.6	6.25	1.68
2	0.68	6.5	1.74
2.25	0.75	6.75	1.79
2.5	0.8	7	1.86
2.75	0.86	7.25	1.9
3	0.93	7.5	1.97
3.25	0.99	7.75	2.03
3.5	1.05	8	2.17
3.75	1.11	8.25	2.22
4	1.18	8.5	2.28
4.25	1.23	8.75	2.34
4.5	1.29	9	2.41

จากตารางที่ 4.3 นำค่าไปพอร์ตกราฟได้ดังรูปที่ 4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักกับแรงดันจากโพลดเซลล์จากตารางที่ 4.3

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.20 ช่วงน้ำหนักที่ 7 กิโลกรัมขึ้นไปค่าโวลต์เริ่มมีการเบี่ยงเบนอย่างชัดเจน ทำให้การชั่งน้ำหนักของโพลดเซลล์ที่แม่นยำควรจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 7 กิโลกรัม

โดยจากการทดลอง พอร์ตแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลของ ไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 สามารถรับแรงดันไฟได้มากที่สุดคือ 3.3 โวลต์ หรือขนาด 12 บิต (จำนวนขั้นสูงสุดเท่ากับ 4096) นั่นหมายความว่าค่าน้ำหนักสูงสุดที่ระบบจะสามารถชั่งได้คือ $d(n)$ จะต้องมีค่า 3.3 โวลต์เท่านั้น ซึ่งนำไปแทนในสมการที่ 4.2 จะได้ค่าน้ำหนักที่สูงที่สุดที่ระบบสามารถชั่งได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 w_{\max} &= 2.5864 \cdot d_{\max}(n) + 0.0092344 \\
 &= 2.5864 \cdot (3.3) + 0.0092344 \\
 &= 8.5443544
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการออกแบบการทดลองที่อธิบายไว้ในบทที่ 3 และผลการทดลองจากบทที่ 4 สามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

สรุปผลการทดลองของวงจรขยายอินสตรูเมนต์ชั้นมีความสำคัญที่สุด เนื่องจากเป็นวงจรที่รับสัญญาณจากโพลิตเซอร์โดยตรง ทำให้การทดลองของส่วนนี้ผิดพลาดไม่ได้ ค่าสัญญาณเอาต์พุตที่นำเข้าพอร์ตแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์อีเอสพี32 จะต้องสอบเทียบทุกครั้งก่อนทำการทดลอง

สรุปผลการทดลองการทดสอบของระบบแบบปรับตัวได้โดยเลือกจำนวนตัวอย่างมาจำนวนหนึ่งเพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น โดยจะเห็นว่ากราฟเอาต์พุตจำกัดสัญญาณขึ้นออกไปเหลือแต่เพียงสัญญาณไฟตรง DC

สรุปผลการทดลองการสร้างโมเดลคณิตศาสตร์ เนื่องจากเอาต์พุต $h_2(n)$ จากระบบแบบปรับตัวได้ไม่ใช่ค่าน้ำหนักของวัตถุ จึงต้องมีการสร้างโมเดลคณิตศาสตร์เพื่อหาสมการมาคำนวณหาค่าน้ำหนัก และเมื่อวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแล้วจะได้สมการเชิงเส้นที่มีค่าความชัน และค่าคงที่เพื่อนำไปใช้เป็นสมการหาค่าน้ำหนัก โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ความน่าเชื่อถือ R^2 เท่ากับ 0.999

สรุปผลการทดลองเพื่อหาค่าจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสม ซึ่งจะนำมาใช้คำนวณหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบแบบปรับตัวได้ พบว่าค่าที่เหมาะสมคือ 15 ตัวอย่าง สำหรับค่าน้ำหนักที่ 0.305 กิโลกรัม และ 1.315 กิโลกรัม เนื่องจากค่า $h_2(n)$ เข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมในทันทีเมื่อระบบเริ่มทำงาน แต่ค่าน้ำหนัก 2.615 กิโลกรัม ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่ค่อนข้างหนัก และทำให้เวลาเกิดการสั่นแทนซึ่งน้ำหนักจะสั่นไหวอย่างรุนแรง ทำให้จำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมควรจะเป็น 40 ตัวอย่างดังรูปที่ 4.10

สรุปผลการทดลองของการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดระหว่างวิธีการสุ่มกับวิธีการเฉลี่ย จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าวิธีการใช้ค่าน้ำหนักเฉลี่ยภายในช่วงเวลา 8 วินาทีนั้น ระบบที่นำเสนอ มีค่า RMSE ที่สูงกว่าค่า RMSE ที่คำนวณจากเอาต์พุตโดยตรงจากโพลิตเซอร์เล็กน้อยอย่างไม่ค่อยสำคัญ อย่างไรก็ตามเมื่อใช้วิธีการสุ่มค่าตัวอย่าง 1 ตัวอย่างทุกๆ 1 วินาที วิธีที่นำเสนอจะมีค่า RMSE ต่ำกว่าค่า RMSE ที่ได้จากเอาต์พุตโดยตรงของ

โพลีเซลล์อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากค่า RMSE ที่ได้จากโพลีเซลล์ยังไม่ถูกกำจัดสัญญาณรบกวน ซึ่งมีผลทำให้ค่าการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัลมีค่าของสัญญาณอินพุตรวมกับสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนเข้ามาด้วย ซึ่งจะทำให้ค่า RMSE มีค่าสูง

สรุปผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอัตราการสูมตัวอย่างและค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่ใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนักไม่ควรน้อยกว่า 8 ตัวอย่าง ซึ่งอัตราการสูมตัวอย่างที่น้อยที่สุด จึงไม่ควรน้อยกว่า 8 ตัวอย่างต่อวินาที เพราะจะทำให้สูญเสียรายละเอียดของสัญญาณอินพุตและทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่มากเกินไปดังรูปที่ 4.12

สรุปผลการทดลองประสิทธิภาพของระบบ โดยเปรียบเทียบค่า $h_2(n)$ และค่าความผิดพลาดกำลังสองในทางปฏิบัติกับค่าความผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ย จากหัวข้อที่ 4.7.2 จะเห็นว่าค่าของผลการทดลองที่ได้นั้นมีค่าเกือบจะเท่ากับค่าที่คำนวณจากทฤษฎี

นอกจากนี้จากรูปที่ 4.19 เมื่อทำการชั่งน้ำหนัก 10 ค่าน้ำหนัก และดูเวลาเมื่อความชันของกราฟมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ 0 จะพบว่าช่วงวินาทีที่ 2 ระบบจะเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมโดยสมบูรณ์ทุกย่านค่าน้ำหนัก

สรุปผลการทดลองของค่าความเที่ยงตรงและค่าความแม่นยำของระบบที่น่าเสนอ เนื่องจากผู้วิจัยทำเครื่องชั่งน้ำหนัก ซึ่งจำเป็นต้องมีตัวชี้วัดคุณภาพว่าระบบชั่งน้ำหนักที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นมานั้นดีหรือแย่อย่างใด และตัวชี้วัดตามหลักสากลของเครื่องมือวัด(Measurement instrument) คือค่าความเที่ยงตรงและค่าความแม่นยำ

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าความแม่นยำที่ต่ำสุดนั้นคือ 93.115 เปอร์เซ็นต์ (0.305 กิโลกรัม ในการชั่งครั้งที่ 1) และมากที่สุดคือ 99.087 เปอร์เซ็นต์ (1.315 กิโลกรัม ในการชั่งครั้งที่ 1) ในส่วนของค่าความเที่ยงตรงตามทฤษฎีควรจะมีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งค่าความเที่ยงตรงของน้ำหนักทั้ง 3 ค่า มีค่า 0.0098, 0.0286 และ 0.0330 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่าน้ำหนักทั้ง 3 นั้น มีค่าความเที่ยงตรงไม่เท่ากัน ซึ่งโดยปกติควรจะมีค่าใกล้เคียงกัน อาจจะเนื่องมาจากแรงสั่นสะเทือนที่รุนแรง รวมถึงแท่นรับน้ำหนักที่รองรับแรงสั่นไม่ไหว จึงทำให้ค่าความเที่ยงตรงไม่สอดคล้องกันกับค่าทางทฤษฎี

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จากผลการทดสอบและผลการทดลอง ได้แสดงให้เห็นว่า ระบบที่น่าเสนอเหมาะสมกับการชั่งน้ำหนักในลักษณะของงานที่ต้องการค่าน้ำหนักอย่างรวดเร็ว มีค่าความเที่ยงตรงและค่าความแม่นยำสูง อย่างเช่นระบบการชั่งน้ำหนักในอุตสาหกรรม ระบบการชั่งน้ำหนักรถบรรทุกในขณะที่มีการเคลื่อนที่(Weight In Motion) โดยระบบมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนและไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรเนื่องจากใช้การคำนวณเพียง 7 สมการเท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของการหาค่าจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้คำนวณหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้นของระบบแบบปรับตัวได้ ถ้าต้องการให้เข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมในทุกๆ ช่วงของค่าน้ำหนัก สามารถทำได้โดยหาอัลกอริทึมในการที่จะเลือกว่าจะชั่งน้ำหนักที่ช่วงใดและควรใช้จำนวนตัวอย่างเท่าไรในการนำไปหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น ก็จะทำให้การชั่งน้ำหนักใช้เวลาที่เหมาะสมทุกย่านของการชั่ง



เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Zhang, W. Lv and Y. Guo, "A Vehicle Weigh-In-Motion System Based on Hopfield Neural Network Adaptive filter," in Conference on Communications and Mobile Computing, pp.123-127, 2015.
- [2] Dhanesh and L. Mathew, "Design of an Adaptive LMS Second Order Volterra Series Filter for Removing Noise from Vibration Signal of Faulty Bearing," in Communication and Information, pp.1-5, 2017.
- [3] Q.M. Yang and J.M. Sun, "Study on vibration control based on adaptive filtering algorithm," in Mechatronics and Automation, pp.4018-4022, 2009.
- [4] A. Rafique and S.S. Ahmed, "Performance Analysis of a Series of Adaptive Filters in Non-Stationary Environment for Noise Cancelling Setup," World Academy of Science, Engineering and Technology, No.74, p.332, 2013.
- [5] M. Sambur, "Adaptive noise canceling for speech signals," in *Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, Vol.26, pp.419-423, 1978.
- [6] B. Widrow, S.D. Stearns and J.C. Burgess, "Adaptive signal processing edited by bernard widrow and samuel d.stearns," in *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1986.
- [7] W. Hernández, "Improving the response of a wheel speed sensor using an adaptive line enhancer," *Measurement*, Vol. 33 pp. 229-240, 2003.
- [8] J.D. Wu and S.L. Lin, "Audio Quality Improvement of Vehicular Hands-Free Communication Using Variable Step-Size Affine-Projection Algorithm," *International Journal of Wavelets Multiresolution and Information Processing*, Vol. 8, pp. 875-894, 2010.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[9] C. Chandrakar and M.K. Kowar, "Denoising ECG signals using adaptive filter algorithm," in *International Journal of Soft Computing and Engineering*, Vol. 2, pp. 120-123, 2012.

[10] P. Koseeyaporn, J. Koseeyaporn, P. Wardkein and A. Manosueb, "PLI cancellation in ECG signal based on adaptive filter by using Wiener-Hopf equation for providing initial condition," *Hindawi J. Computational and Math. Methods in Medicine*, vol.2014, 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. N. Moonthongnoi, S. Boonjun, P. Wardkein, A Manosueb, “Vibration Noise Cancellation of Weighing with Adaptive Filter Base on Reference Signal AC from Accelerometer and DC with Constant,”. Ladkrabang Engineering Journal, Vol. 38, pp15-22, 2021.





ISSN 0125-1724

วิศวกรรม
ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 38 ฉบับที่ 1

มีนาคม 2564

บทความวิจัย

1. การวิเคราะห์ระบบเก็บค่าผ่านทางแบบผสมผสานโดยใช้แบบจำลองสภาพจราจรระดับจุลภาค

กรณีศึกษาด่านเก็บค่าผ่านทางพิเศษดินแดง

1

ธีรศันย์ อินดี และ จำรัส พิทักษ์ศฤงคาร

2. การทำจัดสัญญาณรบกวนการสั่นในการชั่งด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ ที่อาศัยสัญญาณอ้างอิง

AC จากเซนเซอร์ความเร่ง และ DC จากค่าคงที่

15

นทีกานต์ มุลทองน้อย สุรพล บุญจันทร์ ปราโมทย์ วาดเขียน และ อัญชลี มโนสืบ

3. สายอากาศไดโพลแผ่นวงจรมิซึเนอโรแกรมพร้อมร่องสี่เหลี่ยมสำหรับการรับสัญญาณโทรทัศน์

ระบบดิจิทัล

23

สมภพ ทิมพล และ รังสรรค์ วงศ์สรศรี

4. ปัจจัยที่ส่งผลต่อความก้าวร้าวในการแข่งขันของผู้รับเหมาขนาดเล็กและขนาดกลางที่ก่อสร้าง

บ้านพักอาศัยในกรุงเทพมหานคร

34

ศตพร วัฒนาวัตถุ และ แผลมทอง เหล่าคงถาวร

การกำจัดสัญญาณรบกวนการสั่นในการชั่งด้วยตัวกรองแบบปรับตัวได้ ที่อาศัยสัญญาณอ้างอิง AC จากเซนเซอร์ความเร่ง และ DC จากค่าคงที่

Vibration Noise Cancellation of Weighing with Adaptive Filter Base on Reference Signal AC from Accelerometer and DC with Constant

นทีกานต์ มุลทองน้อย^{1*} สุรพล บุญจันทร์¹ ปราโมทย์ วาดเขียน¹ อัญชลี มโนสิบ²
¹ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
 Nateekan Moonthongnoi¹ Surapol Boonjun¹ Paramote Wardkein¹ Anchalee Manosueb²
¹Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon
 *Corresponding Author E-mail: moonthongnoi.n@gmail.com

Received: December 3, 2020 Revised: March 2, 2021 Accepted: March 3, 2021

บทคัดย่อ

ระบบชั่งน้ำหนักเป็นกระบวนการที่สำคัญในหลายกิจกรรม กิจกรรมบางอย่างต้องการความแม่นยำของน้ำหนักสูง แต่ในสภาพแวดล้อมจริงที่ไม่สามารถควบคุมได้ พบว่าสเตรนเกจที่ใช้สำหรับการชั่งน้ำหนักจะมีการปนเปื้อนด้วยการสั่นสะเทือนจากภายนอก ตัวอย่างเช่น รถบรรทุกที่บรรทุกพืชผลที่ไม่ได้ดับเครื่องยนต์ขณะทำการชั่งหรือขณะเคลื่อนที่ งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการใช้อัลกอริทึม LMS ของตัวกรองแบบปรับตัวได้พร้อมกับตัวตรวจจับความเร่ง และค่าคงที่ DC ถูกใช้เป็นตัวสร้างสัญญาณอ้างอิงสองตัว ให้กับตัวกรองแบบปรับตัวได้ในการกำจัดการปนเปื้อนจากการสั่นสะเทือน และเป็นสัญญาณน้ำหนักเป้าหมายที่คงที่ตามลำดับ ส่งผลทำให้ระบบที่นำเสนอสามารถกำจัดอิทธิพลของการสั่น และมีความแม่นยำในการวัดที่สูงขึ้นได้ นอกจากนั้นแล้วระบบยังใช้เวลา และทรัพยากรในการคำนวณน้อยอีกด้วย

คำสำคัญ: การชั่งน้ำหนัก การสั่นสะเทือนจากสภาวะแวดล้อมภายนอก ตัวกรองแบบปรับตัวได้ เซนเซอร์วัดความเร่ง

Abstract

The weighing system is a crucial part of the process in many activities. Some activities demand high accuracy, which is a real environment that cannot be controlled. We found that the strain gauge for weighing is interfered with external vibration, for example, a truck drives through the weighing system with a turned-on engine. Our research presents the use of the LMS algorithm of the adaptive filter and accelerometer. DC constant was used as a reference for the adaptive filter to eliminate vibratory noise and for the true weight assessment. Therefore, the weighing system we propose can improve the accuracy and requires less time and computing resources.

Keywords: Weighting, Vibration, Adaptive Filter, Accelerometer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. บทนำ

ในภาคอุตสาหกรรม ระบบการชั่งน้ำหนักต้องการความแม่นยำ ความถูกต้อง และความรวดเร็วในการหาค่าน้ำหนัก จากการศึกษางานวิจัยต่างๆ พบว่าปัญหาหลักจะเกิดขึ้นในระบบการชั่งน้ำหนักคือ สัญญาณเอาต์พุตของการชั่งน้ำหนักที่ได้รับมาจากเซนเซอร์จะมีการปนเปื้อนจากการสั่นสะเทือน ทำให้ค่าน้ำหนักที่ได้ไม่มีความแม่นยำ ถูกต้อง ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทางด้านต้นทุน และคุณภาพของสินค้า เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาวิธีการกำจัดสัญญาณปนเปื้อนจากการสั่นสะเทือนจำนวนมาก โดยมีการนำเสนอวิธีการต่างๆ เช่น

ปี ค.ศ. 2010 Zhang ได้นำเสนอวิธีการกำจัดสัญญาณปนเปื้อนในระบบการชั่งน้ำหนักขนพาหนะ โดยใช้การปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองแบบปรับตัวได้ แอลเอ็มเอสที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดขึ้นในการคำนวณที่อยู่บนพื้นฐานของโครงข่ายประสาทเทียมฮอปฟิลด์ เปรียบเทียบกับวิธีการหาค่าเฉลี่ย โดยผลของการทำงานของตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่ Rui Zhang นำเสนอได้ผลที่ดีกว่าวิธีการหาค่าเฉลี่ย [1]

ในปี ค.ศ. 2017 Dhanech นำเสนอการออกแบบตัวกรองอนุกรมของวอลเตอร์ราแบบปรับตัวได้อันดับที่สอง (Adaptive Second Order Volterra Series Filter) เพื่อลดสัญญาณรบกวนของระบบไม่เชิงเส้น (nonlinear system) โดยอาศัยโครงสร้างแลตทิซแชนเนล (lattice-channel structure) กับกรณช่วงเวลาของตัวกรองอนุกรมวอลเตอร์ราแบบปรับตัวได้อันดับที่สอง โดยใช้อัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด (ASVSF-LMS) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนจากสัญญาณการสั่นสะเทือนของค่าความผิดพลาดจากแบร์ริง โดยให้ผลลัพธ์ของค่าความผิดพลาดต่ำกว่าการใช้ตัวกรองปรับตัวแบบดั้งเดิม [2]

ในปี ค.ศ. 2009 Yang และคณะได้ทำการศึกษาการใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้กำจัดการสั่นสะเทือนของระบบรับน้ำหนักของขนพาหนะ โดยใช้การจำลองแบบการทำงานระบบรองรับน้ำหนักด้วยระบบมวลสปริงที่มี

ค่าน้ำหนักที่ไม่คงที่ระหว่างล้อและถนน โดยใช้ตัวแปรอิสระ 2 ตัว two-DOF (Degree of Freedom) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้ให้ผลการควบคุมที่ดีกว่า [3]

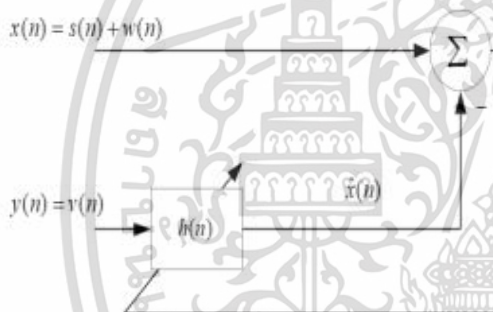
งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการกำจัดสัญญาณปนเปื้อนจากการสั่นสะเทือนด้วยการใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้โดยอาศัยอัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด ร่วมกับการใช้เซนเซอร์ความเร่ง และค่าคงที่ไฟตรง ถูกใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงสองตัว ให้กับตัวกรองแบบปรับตัวได้ในการกำจัดกรรปนเปื้อนจากการสั่นสะเทือนที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา และเป็นสัญญาณน้ำหนักเป้าหมายที่คงตัวค่าลบ นอกจากนั้นแล้วการติดตั้งตัวเซนเซอร์วัดความเร่งยังไม่จำเป็นต้องติดตั้งอยู่ระหว่างตัวโหลด (Load) กับสเตรนเกจ จึงไม่ก่อให้เกิดการเสียหาย และรบกวนสัญญาณที่ได้รับจากสเตรนเกจขณะที่ทำการชั่งน้ำหนัก

บทความนี้ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 กล่าวถึงวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ส่วนที่ 2 กล่าวถึงตัวกรองแบบปรับตัวได้ ส่วนที่ 3 กล่าวถึงหลักการที่นำเสนอ ส่วนการทดลองและผลการทดลองรวมถึงการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองได้แสดงไว้ในส่วนที่ 4 และ 5

2. ตัวกรองแบบปรับตัวได้ (Adaptive Filter)

การประยุกต์ใช้งานตัวกรองแบบปรับตัวได้ใน การกำจัดสัญญาณรบกวนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน และเป็นวิธีการกำจัดสัญญาณรบกวน [4] ที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ [5-6] จึงมีการนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่าง ๆ และอุปกรณ์การสื่อสาร เช่น เครื่องจักรกล โทรศัพท์เคลื่อนที่ [7-8] เป็นต้น อัลกอริทึมตัวกรองแบบปรับตัวได้ [9] ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย มีหลายอัลกอริทึมด้วยกัน เช่น แอลเอ็มเอสอัลกอริทึม (Least Mean Square Algorithm: LMS Algorithm) หรืออัลกอริทึมค่าเฉลี่ยกำลังสองน้อยที่สุด, นอร์มอลไลซ์แอลเอ็มเอสอัลกอริทึม (The Normalized Least Mean Square: NLMS Algorithm) และรีเคอซีฟ

ลีสต์สแควร์ (Recursive Least Square: RLS Algorithm) เป็นต้น ในการประยุกต์ใช้งานตัวกรองแบบปรับตัวได้ ควรคำนึงถึงความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน แอลเอ็มเอสอัลกอริทึม เป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่มีรูปแบบการคำนวณที่ง่าย โครงสร้างไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องรู้พารามิเตอร์ของสัญญาณอินพุตในการค้นหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง และนำไปใช้งานสะดวก โดยค่าผิดพลาดกำลังสองเฉลี่ยที่ลดลงนั้น ได้มาจากวิธีการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองโดยใช้สมการภายในอัลกอริทึม ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของตัวกรองแบบปรับตัวได้โดยอาศัยแอลเอ็มเอสอัลกอริทึม แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โครงสร้างตัวกรองแบบปรับตัวได้แอลเอ็มเอสอัลกอริทึมในการกำจัดสัญญาณรบกวน

โดยที่ $x(n)$ คือ สัญญาณอินพุต $s(n)$ คือ สัญญาณที่ต้องการ $w(n)$ คือ สัญญาณรบกวน $y(n)$ คือ สัญญาณอ้างอิง $v(n)$ คือ สัญญาณรบกวนอ้างอิง $\hat{x}(n)$ คือ สัญญาณเอาต์พุตของระบบส่วนการปรับตัว $e(n)$ คือ ค่าความผิดพลาด

ในการทำงานของตัวกรองแบบปรับตัวได้จะอาศัยสมการที่ 1, 2 และ 3 ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ $h(n)$ ของตัวกรอง

$$\hat{x}(n) = h(n)y(n) \quad (1)$$

$$e(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad (2)$$

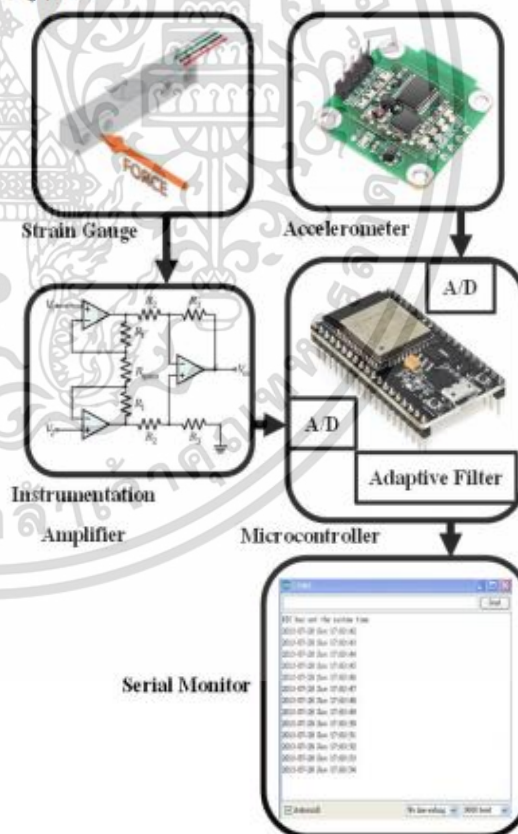
$$h(n+1) = h(n) + 2\mu e(n)y(n) \quad (3)$$

โดยที่ μ คือ ค่าอัตราขยายการปรับตัว (Adaptation Gain) หรือขนาดขั้น (Step Size)

การนำตัวกรองแบบปรับตัวได้โดยอาศัยแอลเอ็มเอสอัลกอริทึมไปประยุกต์ใช้งานในการลดสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนที่นำเสนอมานี้ จะมีสัญญาณอ้างอิง 2 สัญญาณ ซึ่งจะกล่าวถึงในส่วนต่อไป

3. หลักการทำงานของวงจรขั้วนำหนักที่มีการลดสัญญาณรบกวนจากการสั่นสะเทือนโดยใช้ตัวกรองแบบปรับตัวได้โดยอาศัยแอลเอ็มเอสอัลกอริทึมที่นำเสนอนี้

โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของระบบที่นำเสนอมานี้ แสดงดังรูปที่ 2 และมีการทำงานแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ ดังนี้



รูปที่ 2 โครงสร้างทางฮาร์ดแวร์ของระบบที่นำเสนอนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนเตรียมสัญญาณก่อนการประมวลผล

สัญญาณจากสเตรนเกจ ซึ่งประกอบด้วย แรงดันไฟตรงที่แปรผันตรงกับน้ำหนักของวัตถุ และ แรงดันไฟสลับที่เกิดจากการสั่นสะเทือนจากสภาวะแวดล้อมภายนอก สัญญาณนี้จะถูกนำไปผ่านวงจรขยาย อินสตรูเมนเตชัน เพื่อยกระดับสัญญาณให้อยู่ในระดับที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์สามารถประมวลผลได้ โดยจะยกระดับสัญญาณด้วยการบ่อนแรงดันไฟตรงเป็นแรงดันอ้างอิงให้กับวงจรอินสตรูเมนเตชัน ดังรูปที่ 3

สัญญาณปนเปื้อนจากการสั่นสะเทือน สัญญาณนี้เป็นสัญญาณไฟสลับที่มีแอมพลิจูดขึ้นอยู่กับแรงจากการสั่นสะเทือน จะถูกตรวจจับได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง โดยก่อนหน้านี้นี้ได้เลือกใช้เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) แต่สัญญาณที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกนั้นมีค่าน้ำหนักปะปนมาด้วย ทำให้การกำจัดสัญญาณทำได้ยาก

ส่วนประมวลผล

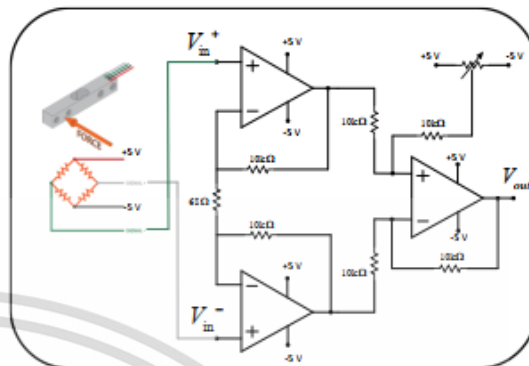
ในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เอสพี32 ในการประมวลผลสัญญาณ โดยพอร์ตแอนะล็อกอินพุตของไมโครคอนโทรลเลอร์เอสพี 32 นั้นสามารถรับแรงดันได้ 0 ถึง 3.3 โวลต์ ในการประมวลผลใช้ส่วนซอฟต์แวร์ของตัวกรองแบบปรับตัวได้ และ โมเดลทางคณิตศาสตร์ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองให้เป็นค่าน้ำหนักของวัตถุ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของซอฟต์แวร์ในหัวข้อถัดไป

ส่วนการแสดงผล

ในการแสดงผลค่าน้ำหนักของวัตถุจะแสดงผลผ่านหน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์บนคอมพิวเตอร์แบบเรียลไทม์

การทำงานของซอฟต์แวร์ สามารถแบ่งเป็น 3

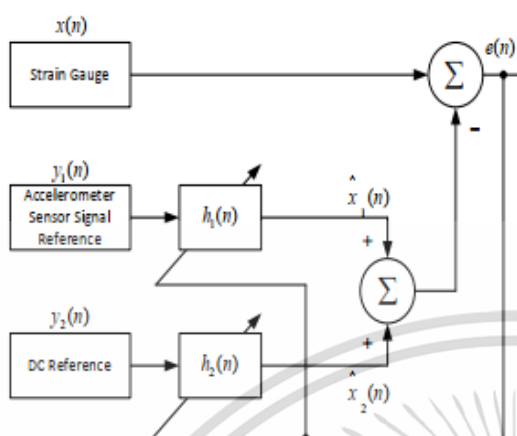
ส่วนคือ



รูปที่ 3 วงจรอินสตรูเมนเตชันที่มีการยกระดับสัญญาณไฟตรง

การปรับระดับสัญญาณ เป็นการปรับระดับสัญญาณจากสเตรนเกจที่ผ่านวงจรขยาย และสัญญาณจากเซนเซอร์วัดความเร่ง ให้มีระดับสัญญาณที่เหมาะสมในการประมวลผลของไมโครคอนโทรลเลอร์เอสพี 32 เพื่อไม่ให้เกิดการโอเวอร์โวลของข้อมูล ด้วยการนำสัญญาณจากสเตรนเกจและสัญญาณจากเซนเซอร์วัดความเร่งมาคูณกับ $\frac{5}{4095}$ และ $\frac{1}{1000}$ ตามลำดับ

การปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองแบบปรับตัวได้ ตัวกรองแบบปรับตัวได้ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสัญญาณอ้างอิง 2 สัญญาณ สัญญาณที่ 1 คือ สัญญาณอ้างอิงที่มาจากเซนเซอร์วัดความเร่งถูกนำไปใช้เพื่อกำจัด การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากสภาวะแวดล้อมภายนอก สัญญาณที่ 2 คือสัญญาณแรงดันไฟตรง เพื่อนำไปใช้หาค่าน้ำหนัก โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 4 ในการทำงานของตัวกรองแบบปรับตัวได้จะอาศัยสมการที่ 4, 5, 6 และมีสมการใน การปรับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง $h_1(n)$ และ $h_2(n)$ ดังสมการที่ 7 และ 8 ตามลำดับ



5
 กิโลกรัม และนำข้อมูลที่ได้นำไปสร้างความสัมพันธ์ด้วยกร
 วิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น(Linear Regression Analysis)
 การทำงานของซอฟต์แวร์โดยรวมแสดงดังรูปที่

รูปที่ 4 โครงสร้างของตัวกรองแบบปรับตัวได้ของ
 วิธีการที่นำเสนอ

$$\hat{x}_1(n) = h_1(n)y_1(n) \quad (4)$$

$$\hat{x}_2(n) = h_2(n)y_2(n) \quad (5)$$

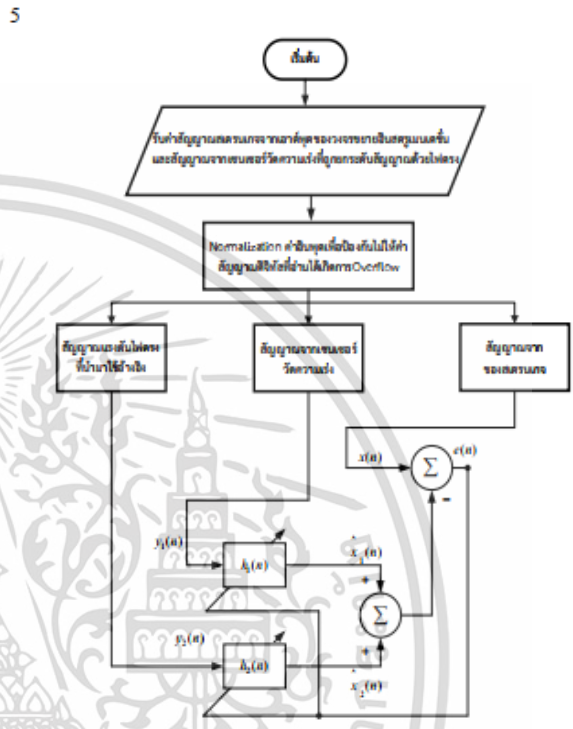
$$e(n) = x(n) - \hat{x}_1(n) - \hat{x}_2(n) \quad (6)$$

$$h_1(n+1) = h_1(n) + 2\mu e(n)y_1(n) \quad (7)$$

$$h_2(n+1) = h_2(n) + 2\mu e(n)y_2(n) \quad (8)$$

โดยที่ $x(n)$ คือ สัญญาณที่ได้จากสเตรนเกจ
 ซึ่งประกอบไปด้วย แรงดัน ไฟตรงที่แสดงค่าน้ำหนักรวม
 มากับสัญญาณปนเปื้อนที่เกิดจากการ สั่นสะเทือนที่ผ่าน
 วงจรขยายอินสตรูเมนเตชัน, $y_1(n)$ คือ สัญญาณอ้างอิง
 จากเซนเซอร์วัดความเร่งซึ่งแปรผันตรงกับ การ
 สั่นสะเทือน, $y_2(n)$ คือ สัญญาณแรงดันไฟตรงที่ใช้เป็น
 สัญญาณอ้างอิงเพื่อกำหนดน้ำหนักของวัตถุ, $e(n)$ คือ ค่า
 ความแตกต่างระหว่าง $x(n)$ กับสัญญาณ $\hat{x}_1(n)$ และ
 $\hat{x}_2(n)$ μ คือ ขนาดขั้นโดยที่ $\hat{x}_1(n)$ และ $\hat{x}_2(n)$ คือ
 สัญญาณเอาต์พุต ของการปรับสัญญาณปนเปื้อนอ้างอิง
 และแรงดันไฟตรง(ค่าน้ำหนัก) อ้างอิง ตามลำดับ

การประมาณค่าค่าน้ำหนัก จะใช้โมเดลทาง
 คณิตศาสตร์ในการประมาณค่า โดยหาความสัมพันธ์
 ระหว่างค่าน้ำหนักกับเอาต์พุตสเตรนเกจ $x(n)$ และ
 สัมประสิทธิ์ตัวกรอง $h_2(n)$ จากการทดลองโดยทำการ
 ชั่งน้ำหนัก 0.125 ถึง 5 กิโลกรัม โดยเพิ่มทีละ 0.125

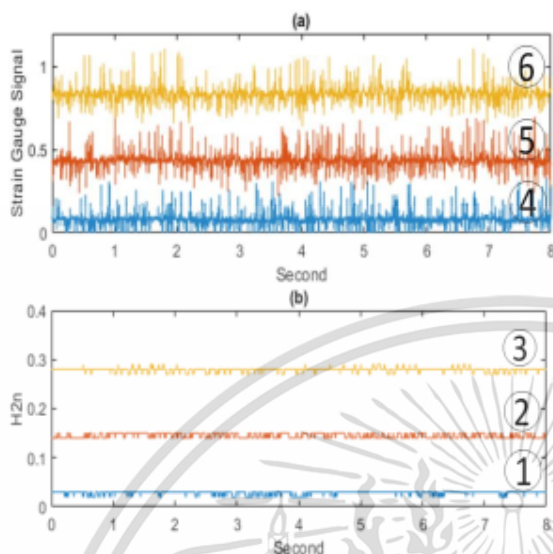


รูปที่ 5 แผนภูมิการทำงานของซอฟต์แวร์ของวิธีการที่นำเสนอ

4. การทดลองและผลการทดลอง

ในบทความนี้การทดลองได้ถูกออกแบบ โดยมี
 การแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบ
 การกำจัดสัญญาณรบกวนโดยใช้น้ำหนัก 0.28, 1.42 และ
 2.7 กิโลกรัม ด้วยการสร้างแรงสั่นสะเทือนในแนวนอน
 ขนานกับตัวฐานจากการใช้แรงกระทำของมนุษย์เพื่อ
 จำลองการเกิดการสั่นสะเทือนด้วยการขยับฐานของเครื่อง
 ชั่งเป็นเวลา 8 วินาที ได้ผลแสดงดังรูปที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

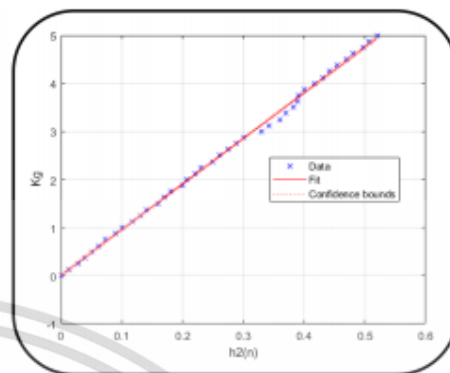


รูปที่ 6 กราฟเปรียบเทียบสัญญาณที่มีการปนเปื้อนจากการสั่นสะเทือนกับสัญญาณที่ผ่านระบบที่นำเสนอ

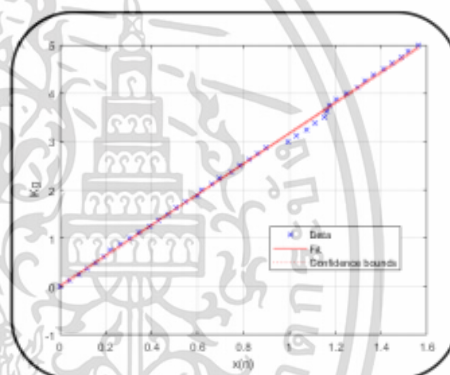
รูป 6(a) แสดงสัญญาณจากสเตรนเกจโดยตรง โดยที่เส้นกราฟ 4, 5 และ 6 คือสัญญาณจากสเตรนเกจของการชั่งวัตถุที่มีน้ำหนัก 0.28 กิโลกรัม, 1.42 กิโลกรัม และ 2.7 กิโลกรัม ตามลำดับ

รูป 6(b) แสดงสัญญาณจาก $h_2(n)$ โดยที่เส้นกราฟ 1, 2 และ 3 คือสัญญาณ $h_2(n)$ ที่เกิดจากการชั่งวัตถุที่มีน้ำหนัก 0.28 กิโลกรัม, 1.42 กิโลกรัม และ 2.7 กิโลกรัม ตามลำดับ

ส่วนที่ 2 ทำการสร้างโมเดลคณิตศาสตร์ โดยทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาสมการของความสัมพันธ์ของค่า $h_2(n)$ กับค่าน้ำหนักของวัตถุและความสัมพันธ์ของเอาต์พุตจากสเตรนเกจกับค่าน้ำหนักของวัตถุ โดยทำการชั่งน้ำหนัก 0.125 ถึง 5 กิโลกรัม โดยเพิ่มทีละ 0.125 กิโลกรัม โดยผลลัพธ์แสดงได้ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $h_2(n)$ กับค่าน้ำหนักของวัตถุ



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า $x(n)$ กับค่าน้ำหนักของวัตถุ

โดยโมเดลคณิตศาสตร์ของระบบที่นำเสนอที่มีการกำจัดสัญญาณรบกวนกับระบบสเตรนเกจที่ไม่มีการกำจัดสัญญาณรบกวนเป็นดังสมการที่ 10 และ 11 ตามลำดับ

$$w_1 = 9.4853 \cdot h_2(n) + 0.0097871 \quad (10)$$

โดยที่ 9.4853 คือ ค่าความชัน, 0.0097871 คือ ค่าคงที่ และ w_1 คือค่าน้ำหนักที่ได้จากการสร้างโมเดลของ $h_2(n)$

$$w_2 = 3.1605 \cdot x(n) + 0.0087197 \quad (11)$$

โดยที่ 3.1605 คือ ค่าความชัน, 0.0087197 คือ ค่าคงที่ และ w_2 คือค่าน้ำหนักที่ได้จากการสร้างโมเดลของ $x(n)$

ส่วนที่ 3 ทำการทดลองเพื่อทดสอบระบบ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่นำเสนอกับวิธีการนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าจากสเตรนเกจโดยตรงมาคำนวณหาค่าน้ำหนัก โดยการคำนวณค่าน้ำหนักจะใช้วิธีการ 2 วิธีด้วยกัน วิธีที่ 1 คำนวณค่าตัวอย่าง 1 ตัวอย่างทุก ๆ 1 วินาที และนำไปคำนวณหาค่าน้ำหนัก เป็นระยะเวลา 8 วินาที วิธีที่ 2 ใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยของตัวอย่างการสุ่ม 1,125 ตัวอย่าง ซึ่งเท่ากับช่วงเวลา 1 วินาที และนำมาหาค่าเฉลี่ยทุก ๆ 1 วินาที เป็นระยะเวลา 8 วินาที นำผลการทดลองที่ได้มาหาค่า RMSE (Root Mean Square Error) เฉลี่ย ได้ผลดังตารางที่ 1

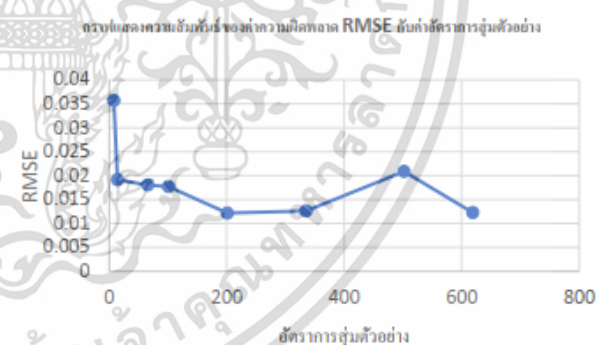
จากตารางที่ 1 คอลัมน์ที่ 1 คือค่าน้ำหนักที่ใช้ในการทดสอบ คอลัมน์ที่ 2 คือ ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาด (RMSE) ในการชั่งแต่ละน้ำหนักของสเตรนเกจ โดยตรง ในขณะที่คอลัมน์ที่ 3 คือค่าเฉลี่ยของค่า RMSE ในการชั่งแต่ละน้ำหนักของระบบที่นำเสนอด้วยวิธีที่ 1 คอลัมน์ที่ 4 คือ ค่าเฉลี่ยของค่า RMSE ในการชั่งแต่ละน้ำหนักของสเตรนเกจโดยตรง ในขณะที่คอลัมน์ที่ 5 คือ ค่าเฉลี่ยของค่า RMSE ในการชั่งแต่ละน้ำหนักของระบบที่นำเสนอด้วยวิธีที่ 2

ตารางที่ 1 ตารางการหาค่า RMSE เฉลี่ยของทุกน้ำหนักที่นำเสนอ

น้ำหนักจริง (±g)	RMSE ของวิธีการสุ่ม		RMSE ของวิธีการเฉลี่ย	
	$x(n)$	$h_2(n)$	$x(n)$	$h_2(n)$
0.28	0.231095	0.031468	0.019330	0.009682
0.42	0.087836	0.036646	0.013831	0.021315
0.7	0.048243	0.041150	0.018100	0.019002
1.42	0.149866	0.058851	0.035830	0.041000
1.7	0.171169	0.062327	0.025905	0.029984
2.42	0.047160	0.041410	0.037185	0.039552
2.7	0.062017	0.034329	0.044859	0.044779
2.95	0.265051	0.081945	0.058614	0.064814
3.28	0.199365	0.080234	0.069116	0.069377
3.7	0.149961	0.085799	0.066921	0.067272
3.95	0.072111	0.084938	0.051833	0.051039
RMSE เฉลี่ยของทุกน้ำหนัก	0.134898	0.058100	0.040139	0.041620

เพื่อเป็นการแสดงสมรรถนะการทำงานของตัวระบบที่นำเสนอ จึงได้ทำการทดลองเพิ่มเติม โดยการเปลี่ยนแปลงอัตราการสุ่มตัวอย่าง เพื่อดูผลของประสิทธิภาพของระบบ โดยได้พิจารณาเรื่องความเร็วและค่าความผิดพลาดของระบบให้มีความเหมาะสม และมีประสิทธิภาพสำหรับนำมาใช้กับงานที่นำเสนอมากที่สุด

โดยได้นำการทดลองสุ่มอัตราการสุ่มที่ 619, 502, 335, 201, 101, 66, 14 และ 8 ตัวอย่างต่อวินาที ใช้น้ำหนัก 3 น้ำหนัก คือ 0.465, 0.77 และ 1.465 กิโลกรัม และได้ใช้วิธีการที่ 2 จากส่วนที่ 3 ในหัวข้อการทดลองและผลการทดลอง เพื่อหาค่าความผิดพลาดของแต่ละอัตราการสุ่ม เพื่อนำมาแสดงให้เห็นถึงค่าอัตราการสุ่มที่ควรเลือกใช้ในงานที่นำเสนอ จะเห็นว่าอัตราการสุ่มที่ 8 ตัวอย่างต่อวินาที เริ่มแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่เบี่ยงเบนออกไปจากค่าความผิดพลาดเฉลี่ยโดยทั่วไปมากขึ้นอย่างชัดเจน ดังรูปภาพที่ 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาด RMSE กับค่าอัตราการสุ่มตัวอย่าง

5. วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่า วิธีการใช้น้ำหนักเฉลี่ยภายในช่วงเวลา 1 วินาทีนั้น ระบบที่นำเสนอ

มีค่า RMSE ที่สูงกว่าค่า RMSE ที่คำนวณจากเอาต์พุตของสตรีมเกจเล็กน้อยอย่างไม่มีนัยสำคัญ

อย่างไรก็ตามเมื่อใช้วิธีการสุ่มค่าตัวอย่าง 1 ตัวอย่างทุกๆ 1 วินาที มาใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนักวิธีการที่นำเสนอจะมีค่า RMSE ต่ำกว่า RMSE ที่คำนวณจากเอาต์พุตของสตรีมเกจอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดลองเปลี่ยนแปลงอัตราการสุ่มตัวอย่างและค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งให้เห็นว่าจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสมที่ใช้ในการคำนวณค่าน้ำหนักไม่ควรน้อยกว่า 8 ตัวอย่าง ซึ่งอัตราการสุ่มตัวอย่างที่น้อยที่สุด จึงไม่ควรน้อยกว่า 8 ตัวอย่างต่อวินาที

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จากผลการทดสอบ ได้แสดงให้เห็นว่า ระบบที่นำเสนอเหมาะสมกับการชั่งน้ำหนักในลักษณะของงานที่ต้องการค่าน้ำหนักอย่างรวดเร็ว และมีความแม่นยำสูง อย่างเช่นระบบการชั่งน้ำหนักในอุตสาหกรรม ระบบการชั่งน้ำหนักรถบรรทุกในขณะที่มีการเคลื่อนที่ (Weight In Motion) โดยระบบมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อน รวดเร็ว และใช้ทรัพยากรในการคำนวณน้อย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Zhang, W. Lv and Y. Guo, "A Vehicle Weight-In-Motion System Based on Hopfield Neural Network Adaptive filter," *Conference on Communication: and Mobile Computing*, pp.123-127, 2015.
- [2] Dhaneesh and L. Mathew, "Design of an Adaptive LMS Second Order Volterra Series Filter for Removing Noise from Vibration Signal of Faulty Bearing," *Communication and Information*, pp.1-5, 2017.
- [3] Q.M. Yang and J.M. Sun, "Study on vibration control based on adaptive filtering algorithm," *Mechatronics and Automation*, pp.4018-4022, 2009.
- [4] A. Rafique and S.S. Ahmed, "Performance Analysis of a Series of Adaptive Filters in Non-Stationary Environment for Noise Cancelling Setup," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, No.74, p.332, 2013.
- [5] M. Sambur, "Adaptive noise canceling for speech signals," *Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, Vol.26, pp.419-423, 1978.
- [6] B. Widrow, S.D. Stearns and J.C. Burgess, "Adaptive signal processing edited by bernard widrow and samuel d.stearns," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1986.
- [7] W. Hernández, "Improving the response of a wheel speed sensor using an adaptive line enhancer," *Measurement*, Vol.33, pp.229-240, 2003.
- [8] J.D. Wu and S.L. Lin, "Audio Quality Improvement of Vehicular Hands-Free Communication Using Variable Step-Size Affine-Projection Algorithm," *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, Vol.8, pp.875-894, 2010.
- [9] C. Chandrakar and M.K. Kowar, "Denoising ECG signals using adaptive filter algorithm," *International Journal of Soft Computing and Engineering*, Vol.2, pp.120-123, 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนหนึ่งโปรแกรมด้วยคอมพิวเตอร์อาร์ดูโนโอคือ

```

for (int i =0; i< 15; i++){

// เซตค่ารับสัญญาณอินพุต เพื่อนำไปคำนวณหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น
mySensor = analogRead(sensor);
mySensor = mySensor-2430;
mySensor = mySensor/600;
myStrainGauge = analogRead(straingauge);
myStrainGauge = myStrainGauge*3.3/4095;
x1[i] = mySensor;
d[i] = myStrainGauge;
Rx1x1 = x1[i]*x1[i];
Rx1x2 = x1[i]*x2n;
Rx2x1 = x2n*x1[i];
Rx2x2 = x2n*x2n;
rdx1 = d[i]*x1[i];
rdx2 = d[i]*x2n;
}
// คำนวณหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น
h1n = ((Rx2x2*rdx1)+((-Rx1x2)*rdx2))/((Rx1x1*Rx2x2)-(Rx1x2*Rx2x1));
h2n = (((-Rx2x1)*rdx1)+(Rx1x1*rdx2))/((Rx1x1*Rx2x2)-(Rx1x2*Rx2x1));

// เซตค่ารับสัญญาณอินพุต
x1n = analogRead(sensor);
x1n = (x1n-2430)/600;
dn = analogRead(straingauge);
dn = dn*3.3/4095;

// ระบบแบบปรับค่าได้
y1n = h1n*x1n;
y2n = h2n*x2n;
en = dn-y1n-y2n;
h1n = h1n +(2*u*en*x1n);
h2n = h2n +(2*u*en*x2n);

//คำนวณน้ำหนัก h2n กับ สเตรนเกจ
h_r = ((7.7558*h2n)+0.014291)/3;
s_r = (2.5864*dn)+0.0092344;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนหนึ่งของโปรแกรมแมทแลป ส่วนของการหาค่าเงื่อนไขเริ่มต้น และนำค่าไปใช้กับระบบแบบปรับตัวได้ รวมถึงการหาค่าน้ำหนัก

```

dc_15 = 1;
Rx1x1_15 = 0;
Rx1x2_15 = 0;
Rx2x1_15 = 0;
Rx2x2_15 = 0;
rdx1_15 = 0;
rdx2_15 = 0;
for i = 1:15
    Rx1x1_15 = Rx1x1_15 +input_sensor(i)*input_sensor(i);
    Rx1x2_15 = Rx1x2_15 +input_sensor(i)*dc_15;
    Rx2x1_15 = Rx2x1_15+ dc_15*input_sensor(i);
    Rx2x2_15 = Rx2x2_15+dc_15*dc_15;
    rdx1_15 = rdx1_15+ input_staingauge(i)*input_sensor(i);
    rdx2_15 = rdx2_15+input_staingauge(i)*dc_15;
end
h1_15 = ((Rx2x2_15*rdx1_15)+((-Rx1x2_15)*rdx2_15))/((Rx1x1_15*Rx2x2_15)-(Rx1x2_15*Rx2x1_15));
h2_15 = (((-Rx2x1_15)*rdx1_15)+(Rx1x1_15*rdx2_15))/((Rx1x1_15*Rx2x2_15)-(Rx1x2_15*Rx2x1_15));
xhat_sensor_15 = 0;
xhat_dc_15 = 0;
u_15 = 0.0045;
e_15 = 0;
for i = 201:3267
    xhat_sensor_15 = h1_15*input_sensor(i);
    xhat_dc_15 = h2_15*dc_15;
    e_15 = input_staingauge(i)-xhat_sensor_15-xhat_dc_15;
    h1_15 = h1_15 +(2*u_15*e_15*input_sensor(i));
    h2_15 = h2_15 +(2*u_15*e_15*dc_15);
    error_adaptive_15(i) = e_15*e_15;
    h1n_15(i) = h1_15;
    h2n_15(i) = h2_15;
    s_r_15(i) = (2.5864*input_staingauge(i))+0.0092344;
    h_r_15(i) = ((7.7558*h2n_15(i))+0.014291)/3;
end

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายนทีกานต์ มุลทองน้อย
วัน เดือน ปีเกิด	7 มีนาคม 2535
ที่อยู่	1141/9 ถ.เคหะร่มเกล้า แขวงคลองสองต้นนุ่น เขตลาดกระบัง กทม. 10520
ประวัติการศึกษา	2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้