



การศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมแนวระดับโดยใช้ชุดเซนเซอร์แบบไร้สาย

A STUDY OF HORIZONTAL CIRCULAR MOTION BY USING WIRELESS SENSOR KIT



ธีวินท์ มหาโชค

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2565

การศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมแนวระดับโดยใช้ชุดเซนเซอร์แบบไร้สาย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

A STUDY OF HORIZONTAL CIRCULAR MOTION BY USING WIRELESS SENSOR KIT



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF EDUCATION
(Physics)

Faculty of Science, Srinakharinwirot University

2022

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมแนวระดับโดยใช้ชุดเซนเซอร์แบบไร้สาย

ของ

ธีวินท์ มหโชค

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ พลายพิชิต)

..... ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย พุทธิรักษา)

ชื่อเรื่อง	การศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมแนวระดับโดยใช้ชุดเซนเซอร์แบบไร้สาย
ผู้วิจัย	ธีวินท์ มหโชค
ปริญญา	การศึกษามหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2565
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุวรรณ พลายพิชิต

หนึ่งในบทเรียนทางฟิสิกส์ที่ยากต่อการเข้าใจคือการเคลื่อนที่แบบวงกลม เนื่องจากปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ มากมายที่ต้องศึกษาในการเคลื่อนที่แบบวงกลม เช่น ปริมาณเชิงเส้น ปริมาณเชิงมุม และกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน นี่เป็นเหตุผลหลักส่วนใหญ่ที่ทำให้นักเรียนสับสน ในงานนี้เราได้สร้างอุปกรณ์การทดลองเคลื่อนที่แบบวงกลมที่สม่าเสมอโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 เซนเซอร์อินฟราเรด เซนเซอร์ไจโรสโคป และเซนเซอร์วัดความเร่ง สำหรับการทดลองประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เซ็นเซอร์ต่าง ๆ แบตเตอรี่ และบล็อกโลหะซึ่งเชื่อมต่อกับแผ่นจานวงกลม ชุดการทดลองนี้สามารถส่งข้อมูลไร้สายไปยังอุปกรณ์แสดงผลตามที่ต้องการได้ เราทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ความเร็วเชิงมุม และรัศมีการเคลื่อนที่โดยใช้ชุดทดลองนี้ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับความเร็วจเชิงมุมและรัศมีการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นไปตามสมการของความสัมพันธ์ของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง นอกจากนี้ต้นทุนทั้งหมดในการสร้างชุดการทดลองมีราคาไม่สูงมาก และนักเรียนยังสามารถได้รับข้อมูลจากการทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมได้แบบเรียลไทม์ สรุปได้ว่าอุปกรณ์นี้เหมาะสำหรับใช้ในห้องเรียนเพื่อประโยชน์ในการศึกษาของนักเรียนอย่างแท้จริง

คำสำคัญ : การเคลื่อนที่แบบวงกลม, ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง, ESP8266, ไจโรสโคป, เซนเซอร์วัดความเร่ง

Title	A STUDY OF HORIZONTAL CIRCULAR MOTION BY USING WIRELESS SENSOR KIT
Author	TEEWIN MAHACHOK
Degree	MASTER OF EDUCATION
Academic Year	2022
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Suwan Plaipichit

Circular motion is a challenging topic in physics education, primarily due to the multiple quantities involved, such as linear and angular quantities, as well as Newton's laws of motion. This often leads to confusion among students. In this study, an experimental device for uniform circular motion was developed using an ESP8266 microcontroller, IR sensor, accelerometer, and gyroscope sensor. The device consists of a microcontroller, sensors, battery, and metal block, which are connected to a circular plate. The device wirelessly transmits data to a display device of choice. We investigated the relationship between centripetal acceleration, angular velocity, and the radius of motion. The results revealed a direct variation between centripetal acceleration and both angular velocity and moving radius, in line with the centripetal acceleration equation. Additionally, this device is cost effective and provides students with real-time physical data on circular motion. Consequently, it is a valuable tool for classroom use, enhancing the educational experiences of students.

Keyword : Circular Motion, Centripetal Acceleration, ESP8266, Gyroscope, Accelerometer

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสะดวกตากรุณาช่วยเหลือ และความเอาใจใส่อย่างดี ยิ่งตลอดจนการให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการปรับแก้ไขข้อบกพร่อง จากคณะกรรมการผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณ พลายพิชิต ที่ได้ให้ความสะดวกตากรุณาเป็นที่ปรึกษาและให้ความช่วยเหลือชี้แนะแนวทางในสิ่งที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการทำปริญญาานิพนธ์นี้ด้วยความเอาใจใส่ตลอดมา รวมทั้ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ดร.โชคชัย พุทธรักษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประธาน บุรณศิริ ที่กรุณาให้ข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพิ่มเติมแก่ผู้วิจัย ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์และกรรมการบริหารหลักสูตรสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒทุกท่าน ที่ได้กรุณาประสิทธิ์ประสาทความรู้ต่าง ๆ ให้แก่ผู้วิจัย ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนโครงการส่งเสริมการผลิตครูที่มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ (สควค.) จากสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ที่ให้การสนับสนุนด้านการศึกษาและงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ เพื่อนร่วมงาน ที่บัณฑิตวิทยาลัยสำหรับข้อมูลตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ รวมถึงความช่วยเหลือและกำลังใจให้กับผู้วิจัยตลอดมา

ขอขอบคุณพี่ ๆ และเพื่อน ๆ สาขาวิชาฟิสิกส์ รวมถึงบุคคลอีกหลายท่านที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงคุณของบิดา มารดา และครูอาจารย์ ที่อบรมสั่งสอนให้ความรู้ เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ธีวินท์ มหโชค

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง	1
ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	2
ความสำคัญของงานวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 การเคลื่อนที่แบบวงกลม (Circular motion)	5
2.2 การเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotational motion)	8
2.3 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)	10
2.4 เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope sensor).....	11
2.5 เซนเซอร์อินฟราเรด (Infrared sensor).....	14
2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)	14
2.7 NodeMCU	16
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	21
3.1 อุปกรณ์การทดลอง.....	21
3.2 การสร้างเครื่องมือในการวิจัย	21
3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	23
3.4 การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	25
บทที่ 4 ผลและการวิเคราะห์ผลการศึกษา	27
4.1 การวิเคราะห์ค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว	30
4.2 การวิเคราะห์ค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับคาบที่วัดได้จากเซนเซอร์อินฟราเรด.....	43
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	47
สรุปผลการวิจัย.....	47
อภิปรายผลการวิจัย	48
ข้อเสนอแนะ	49
บรรณานุกรม	51
ภาคผนวก.....	53
โค้ดภาษา C ที่ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ทำงานร่วมกับเซนเซอร์วัดความเร็วและเซนเซอร์ไจโรสโคป (BMI160 module).....	54
โค้ดภาษา C ที่ใช้โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP-32 ทำงานร่วมกับเซนเซอร์อินฟราเรด (TCRT5000 module)	62
ประวัติผู้เขียน.....	65

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 การแปลค่า P-value จากการทำ t-test paired two sample for means	26
ตาราง 2 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ณ รัศมี 10.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ใจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง)	30
ตาราง 3 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ณ รัศมี 15.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ใจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง)	33
ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ณ รัศมี 20.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ใจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง)	35
ตาราง 5 ค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ใจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 10.0 เซนติเมตร (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ใจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง).....	38
ตาราง 6 ค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ใจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 15.0 เซนติเมตร (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ใจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง).....	40
ตาราง 7 ค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ใจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 20.0 เซนติเมตร (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ใจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง).....	41

ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็ว
 รอบหมุนของมอเตอร์ 21.42-22.23 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3
 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด) 44

ตาราง 9 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็ว
 รอบหมุนของมอเตอร์ 25.00-26.09 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3
 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด) 44

ตาราง 10 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็ว
 รอบหมุนของมอเตอร์ 30.00-31.58 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3
 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด) 45

ตาราง 11 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็ว
 รอบหมุนของมอเตอร์ 35.29-37.50 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3
 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด) 45

ตาราง 12 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็ว
 รอบหมุนของมอเตอร์ 42.85-46.16 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3
 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด) 46

สารบัญรูปภาพ

หน้า

ภาพประกอบ 1 แสดงมุมมองด้านบนของการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบวงกลมในระนาบ	6
ภาพประกอบ 2 แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุหลักเชิงกษาคัด วัตถุจะมีการเคลื่อนที่ตามความเร็วเชิงเส้น ณ ขณะนั้น.....	7
ภาพประกอบ 3 เมื่อแรงลัพธ์กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่แบบวงกลมมีส่วนประกอบของแรงในแนวเส้นสัมผัส $\sum \vec{F}_t$	8
ภาพประกอบ 4 แสดงวัตถุแข็งเกร็งที่มีแกนหมุนอยู่ ณ จุด O ณ จุด P จะมีความเร็วเชิงเส้น \vec{v} ที่มีทิศตั้งฉากกับรัศมี \vec{r}	9
ภาพประกอบ 5 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร่ง	10
ภาพประกอบ 6 แสดงตัววัดอัตราการเปลี่ยนแปลงมุม 3 แกน คือ Yaw Pitch และ Roll ในเซนเซอร์ไจโรสโคป	12
ภาพประกอบ 7 แสดงแกนขับเคลื่อนรูปตัว T คู่ ที่แกนแต่ละข้างมีการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกัน	13
ภาพประกอบ 8 แสดงการสะท้อนของคลื่นอินฟราเรดบนพื้นผิวสีขาวที่สะท้อนได้ดี (ภาพซ้าย) และพื้นผิวดำที่สะท้อนได้แย่ (ภาพขวา)	14
ภาพประกอบ 9 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์	15
ภาพประกอบ 10 แสดง ESP8266 (ESP-01)	16
ภาพประกอบ 11 แสดงชุดการทดลองของ Hochberg และคณะ ประกอบด้วยสมาร์ตโฟน 5 เครื่อง ซึ่งวางอยู่บนจานหมุน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ห่างจากจุดศูนย์กลาง	17
ภาพประกอบ 12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงรัศมีและรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ตโฟนของ K Hochberg และคณะ.....	18
ภาพประกอบ 13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงรัศมีและเวลาของการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ตโฟนของ K Hochberg และคณะ.....	19
ภาพประกอบ 14 แสดงการออกแบบชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมสมำเสมอ.....	22

ภาพประกอบ 15 ชุดอุปกรณ์ทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับหลังประกอบเสร็จ (ภาพ A มุมมองด้านบน, ภาพ B มุมมองด้านหน้า).....24

ภาพประกอบ 16 ตัวอย่างหน้าเว็บไซต์ Google Sheet ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์ไจโรสโคป และเซนเซอร์วัดความเร็ว.....27

ภาพประกอบ 17 แผนภาพฮิสโตแกรมของค่าความเร็วอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (g) ซึ่งอ่านได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว จำนวน 300 จุด 28

ภาพประกอบ 18 ตัวอย่างหน้าเว็บไซต์ Google Sheet ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์อินฟราเรด 29

ภาพประกอบ 19 ความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว จำนวน 100 จุด ข้อมูล ณ รัศมี 10.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ 31

ภาพประกอบ 20 ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป จำนวน 100 จุด ข้อมูล ณ รัศมี 10.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ 32

ภาพประกอบ 21 ความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว จำนวน 100 จุด ณ รัศมี 15.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ 34

ภาพประกอบ 22 ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป จำนวน 100 จุด ข้อมูล ณ รัศมี 15.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ 34

ภาพประกอบ 23 ความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว จำนวน 100 จุด ณ รัศมี 20.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ 36

ภาพประกอบ 24 ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป จำนวน 100 จุด ข้อมูล ณ รัศมี 20.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ 37

ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 10.0 เซนติเมตร 39

ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 15.0 เซนติเมตร 40

ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 20.0 เซนติเมตร 42



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

การศึกษาของผู้เรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ในรายวิชาฟิสิกส์ หลาย ๆ บทเรียนมักเป็นเนื้อหาที่ค่อนข้างยากที่จะเข้าใจจากการฟังคำบรรยายหรือการจดบันทึกเท่านั้น การลงมือปฏิบัติด้วยตนเองเพื่อนำไปสู่ข้อเท็จจริงจึงเป็นวิธีที่ค่อนข้างมีประสิทธิภาพที่จะทำให้ผู้เรียนเข้าใจเนื้อหาบทเรียนนั้น ๆ มากยิ่งขึ้น หนึ่งในวิธีการที่จะให้ผู้เรียนได้ลงมือปฏิบัติด้วยตนเอง คือ การทดลองทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งนอกจากจะเป็นสื่อตัวกลางที่ทำให้ผู้เรียนเข้าใจเนื้อหาบทเรียนเรื่องนั้น ๆ ได้ดีขึ้นแล้ว การทดลองทางวิทยาศาสตร์ยังเป็นการฝึกทักษะการทดลองทางวิทยาศาสตร์อย่างเป็นขั้นเป็นตอน มีหลักของเหตุและผลให้กับผู้เรียนที่ได้ลงมือปฏิบัติ บทเรียนที่ค่อนข้างยากเรื่องหนึ่งของรายวิชาฟิสิกส์ในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย คือ การเคลื่อนที่แบบวงกลม ถึงแม้ว่าจะมีสื่ออุปกรณ์การทดลองสำหรับบทเรียนนี้แล้วก็ตาม แต่ชุดการทดลองดั้งเดิมนั้นยังมีความคลาดเคลื่อนที่สามารถเกิดขึ้นจากการทดลองที่ค่อนข้างสูง เนื่องจากปัจจัยสำคัญในการทดลองเรื่องนี้ด้วยชุดการทดลองดั้งเดิมคือมนุษย์ผู้ทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลม ถึงกระนั้นก็มีคณะนักวิจัยหลายคนพยายามออกแบบวิธีการทดลองที่จะช่วยให้ผู้ทดลองสะดวกและลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้น้อยลง หนึ่งในงานวิจัยที่ค่อนข้างได้รับความนิยมแพร่หลายคือการใช้เซนเซอร์ภายในสมาร์ทโฟน (smart phone) เป็นเครื่องมือวัดปริมาณต่าง ๆ ในการทดลอง เช่น เซนเซอร์ไจโรสโคป เซนเซอร์วัดความเร่ง เซนเซอร์วัดความดัน เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ แม้ว่าการใช้เซนเซอร์ภายในอุปกรณ์สมาร์ทโฟนจะดูสะดวกสบาย ไม่ต้องสร้างอุปกรณ์การทดลองที่ดูยุ่งยาก แต่วิธีการนี้มีข้อเสียเช่นกัน ยกตัวอย่างกรณีของเซนเซอร์วัดความเร่งที่หลาย ๆ การทดลองทางฟิสิกส์จำเป็นต้องต้องทราบตำแหน่งที่แน่นอนของเซนเซอร์ภายในสมาร์ทโฟนก่อน อย่างไรก็ตามการที่ตัวเครื่องของสมาร์ทโฟนในตลาดปัจจุบันมีให้ผู้บริโภคได้เลือกซื้อเลือกใช้งานมีมากมาย ซึ่งสถาปัตยกรรมภายในของสมาร์ทโฟนแต่ละแบรนด์แต่ละรุ่นย่อมมีความแตกต่างกันตามบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นหากไม่ทำการแกะเปิดดูอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในของสมาร์ทโฟนแต่ละเครื่อง อาจจำเป็นต้องทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาตำแหน่งของเซนเซอร์ ซึ่งดูเหมือนจะเป็นขั้นตอนที่ต้องทำเพิ่มเติมและยุ่งยาก แม้ว่าสุดท้ายแล้วผู้ทดลองจะได้ตำแหน่งของเซนเซอร์จากการทดลองเพิ่มเติม แต่จะมั่นใจได้อย่างไรว่าเซนเซอร์ที่ต้องการนำมาใช้ทำการทดลองวางตัวอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมตรงตามที่ผู้ทดลองต้องการแล้วจริง

นอกเหนือจากการนำเซนเซอร์ภายในสมาร์ทโฟนมาออกแบบชุดการทดลองทางวิทยาศาสตร์แล้ว การนำไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก มาต่อพ่วงเข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เช่น เซนเซอร์ เพื่อสร้างชุดการทดลองทางวิทยาศาสตร์ก็ได้รับความนิยมไม่แพ้กัน เนื่องจากในปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์มีตัวเลือกให้ผู้บริโภคเลือกใช้งานมากมาย ด้วยประสิทธิภาพและราคาที่ไม่แพงจนเกินไปจึงทำให้หลาย ๆ งานวิจัยที่เกี่ยวกับการสร้างชุดการทดลองทางวิทยาศาสตร์ได้หยิบยกเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ไปใช้เป็นหัวใจหลักของการสร้างชุดการทดลองทางวิทยาศาสตร์ที่ต้องการความละเอียด และความแม่นยำมากกว่าชุดการทดลองสมัยก่อน

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมจากชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมจากชุดเซนเซอร์แบบไร้สาย
2. สร้างชุดอุปกรณ์การทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมจากไมโครคอนโทรลเลอร์และชุดเซนเซอร์

ความสำคัญของงานวิจัย

ในการศึกษาวิชาความรู้ทางวิทยาศาสตร์ สิ่งสำคัญที่ช่วยให้ผู้เรียนเข้าใจบทเรียนนั้น ๆ ได้ดียิ่งขึ้น คือ การทำการทดลองทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งหนึ่งในสาขาวิชาทางวิทยาศาสตร์ที่มีการทดลองทางกลไกกลศาสตร์ค่อนข้างมากคือวิชาฟิสิกส์ ในการทดลองหลาย ๆ ครั้ง เพื่อพิสูจน์ทฤษฎีที่ได้เรียนมาจากห้องเรียนเกี่ยวกับบทเรียนกลศาสตร์ในการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จะพบว่าชุดอุปกรณ์การทดลองเหล่านั้นยังมีความสามารถในการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ไม่ดีเท่าที่ควร ตัวอย่างเช่น การทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลม ซึ่งใช้มนุษย์เป็นผู้ทดลองในการออกแรงให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลม ซึ่งมั่นใจได้ยากกว่ามนุษย์แต่ละคนจะสามารถแกว่งวัตถุนั้นให้เกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลมตรงตามจุดประสงค์ของการทดลองนั้นจริง เช่น การแกว่งให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอ (uniform circular motion) โดยระนาบของการเคลื่อนที่ไม่มีการเอียงจากระนาบระดับ รวมถึงการจับเวลาเพื่อหาคาบของการเคลื่อนที่แบบวงกลมของวัตถุซึ่งใช้มนุษย์เป็นผู้จับเวลาเช่นกัน ซึ่งจะเห็นว่าปัจจัยเหล่านี้ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลองจากผู้ทดลองตามมามากมาย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงได้คิดแก้ปัญหาตรงนี้โดยการสร้างชุดอุปกรณ์การทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอ โดยใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งมีราคาไม่สูง เชื่อมต่อเข้ากับเซนเซอร์วัดความเร่งเพื่อใช้วัดความเร่งของวัตถุที่เกิดขึ้นขณะวัตถุเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลม โดยชุดการทดลองสามารถแสดงปริมาณต่างๆ ที่ผู้ทดลองต้องการได้แบบเรียลไทม์ผ่านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการ เช่น สมาร์ทโฟน คอมพิวเตอร์ โดยไม่ต้องใช้มนุษย์เป็นผู้ออกแรงกระทำกับวัตถุหรือจับเวลาหาคาบของการเคลื่อนที่อีกต่อไป ซึ่งชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้จะช่วยลดปัจจัยที่ก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากผู้ทดลองออกไป

ขอบเขตการวิจัย

ชุดอุปกรณ์การทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่สร้างขึ้น ใช้สำหรับศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่มีความเร่งเชิงมุมคงที่ (constant angular velocity) ซึ่งเน้นศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอ (uniform circular motion) โดยชุดการทดลองที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้จะต้องสามารถแสดงผลของปริมาณต่างๆ ของการเคลื่อนที่ดังนี้ คาบของเวลา ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางขณะเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลม เพื่อให้ผู้เรียนสามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่างๆ ของการเคลื่อนที่แบบวงกลมตามที่หลักสูตรการศึกษากำหนดได้ นอกจากนี้ชุดอุปกรณ์การทดลองจะต้องสามารถส่งข้อมูลที่วัดได้จากเซนเซอร์ผ่านกระบวนการจัดการของไมโครคอนโทรลเลอร์ให้สามารถส่งข้อมูลผลการทดลองไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการอ่านค่าได้ เช่น สมาร์ทโฟน คอมพิวเตอร์ ขนาดของชุดการทดลองมีรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลมไม่เกิน 25 เซนติเมตร

นิยามศัพท์เฉพาะ

เซนเซอร์ไจโรสโคป หมายถึง MEMs Gyroscope ซึ่งเป็นเซนเซอร์ไจโรสโคปที่มีขนาดเล็กเหมาะกับชิ้นงานที่ไม่ต้องการขนาดใหญ่มาก ซึ่งเป็นที่นิยมในการใช้เป็นเซนเซอร์ภายในสมาร์ทโฟน

ไมโครคอนโทรลเลอร์ หมายถึง อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า ESP8266 หรือ ESP-32 (ทั้งสองมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน) เป็นบอร์ดชนิด NodeMCU ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนหรือใกล้เคียงไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่า เช่น Arduino Uno แต่มีขนาดเล็กกว่า และมีมอดูลไวไฟ (Wi-Fi module) ติดตั้งมาด้วย

สมาร์ทโฟน หมายถึง โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีความสามารถเพิ่มเติมเหนือจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ทั่วไป สมาร์ทโฟนเปรียบเสมือนคอมพิวเตอร์พกพาขนาดเล็กซึ่งมีความสามารถในการโทรติดต่อสื่อสารเหมือนโทรศัพท์มือถือทั่วไป และความสามารถในการทำงานร่วมกับ

โปรแกรมประยุกต์เช่นคอมพิวเตอร์ ผู้ใช้สมาร์ทโฟนสามารถติดตั้งโปรแกรมเสริมเพิ่มเติมเพื่อ
ใช้จุดประสงค์ต่าง ๆ ได้ โดยรูปแบบการติดตั้งโปรแกรมนั้นขึ้นอยู่กับระบบปฏิบัติการของสมาร์ต
โฟนยี่ห้อนั้น ๆ



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

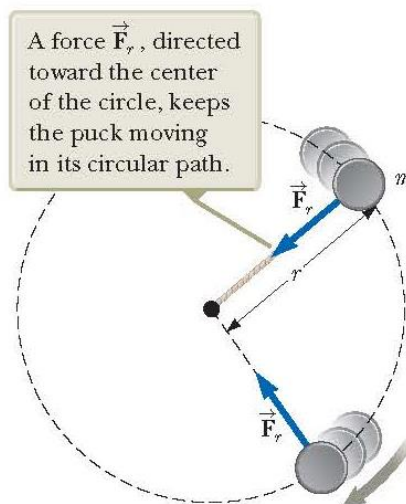
1. การเคลื่อนที่แบบวงกลม (circular motion)
2. การเคลื่อนที่แบบหมุน (rotational motion)
3. เซนเซอร์วัดความเร่ง (accelerometer)
4. เซนเซอร์ไจโรสโคป (gyroscope sensor)
5. ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller)
6. NodeMCU
7. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (literature review)

2.1 การเคลื่อนที่แบบวงกลม (Circular motion)

พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีการเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอ (uniform circular motion) (Serway, 2014, pp. pp. 150-151) ซึ่งกรณีนี้หากอนุภาคจะมีอัตราเร็วเชิงเส้นคงตัว v (constant speed) และมีรัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลม r จะได้ว่า ขนาดของความเร่งของวัตถุจะสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$a_r = \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

ความเร่งที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (centripetal acceleration) เนื่องจาก \vec{a}_r จะมีทิศเข้าสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลม และจะมีทิศตั้งฉากกับทิศทางของความเร็วเชิงเส้น \vec{v} (หากมีความเร่งอื่นที่มีทิศทางเดียวกับความเร็วเชิงเส้นเกิดขึ้น อัตราเร็ว v ก็จะเปลี่ยนไปด้วย)



ภาพประกอบ 1 แสดงมุมมองด้านบนของการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบวงกลมในระนาบ

ที่ มา : Raymond A. Serway. (2014). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics Ninth Edition.

พิจารณาวัตถุที่มีมวล m ซึ่งผูกติดกับเชือกยาว r แกว่งให้เกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลม โดยมีอัตราเร็วคงตัวในระนาบระดับ เส้นทางการเคลื่อนที่แบบวงกลมของวัตถุที่เกิดขึ้นสามารถแสดงให้เห็นได้ดังภาพประกอบ 1 น้ำหนักของวัตถุนี้จะถูกรองรับด้วยโต๊ะซึ่งไม่มีแรงเสียดทาน ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งของเชือกถูกตรึงไว้ที่จุดศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลม เหตุผลที่วัตถุนี้ยังเคลื่อนที่เป็นวงกลมได้ เนื่องจากมีแรง \vec{F}_r กระทำต่อวัตถุโดยมีทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นเชือก จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ทำให้ได้สมการในการคำนวณแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง คือ

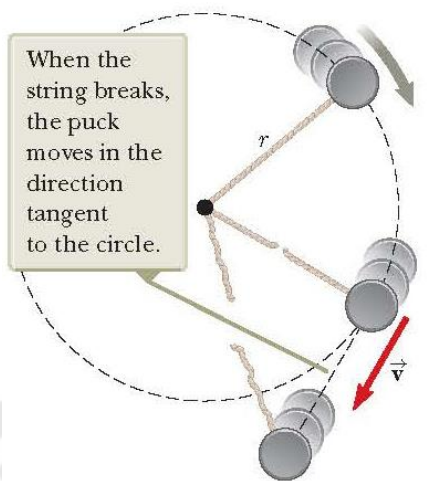
$$\sum \vec{F}_r = m\vec{a}_r \quad (2)$$

หากพิจารณาเฉพาะขนาด จะได้ว่า

$$\sum F_r = ma_r = \frac{mv^2}{r} \quad (3)$$

แรงนี้จะทำให้เกิดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางในทิศทางเข้าสู่ศูนย์กลางและเป็นตัวแปรที่ทำให้ความเร็วของวัตถุมีทิศทางที่เปลี่ยนแปลงไป ถ้าหากแรงนี้หายไป สิ่งที่จะเกิดขึ้นตามมาก็คือวัตถุนี้ จะไม่สามารถเคลื่อนที่เป็นวงกลมต่อไปได้ วัตถุจะเกิดการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามทิศทางของความเร็วเชิงเส้น ณ ขณะนั้น ซึ่งสามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 2 สำหรับวัตถุที่มีการเคลื่อนที่

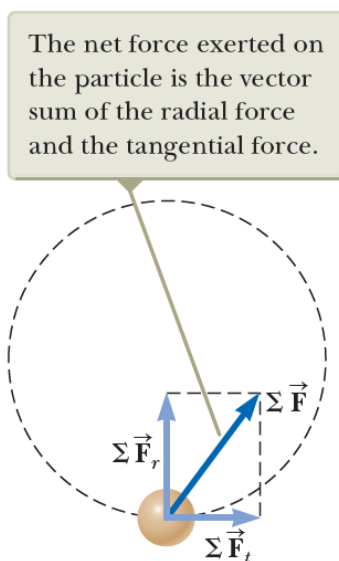
แบบวงกลม หากเชือกขาดวัตถุจะเกิดการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามทิศทางของความเร็วเชิงเส้น ณ ขณะนั้นของวัตถุ



ภาพประกอบ 2 แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุหลักเชือกขาด วัตถุจะมีการเคลื่อนที่ตามความเร็วเชิงเส้น ณ ขณะนั้น

ที่มา : Raymond A. Serway. (2014). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics Ninth Edition.

ถ้าหากวัตถุเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลมโดยมีอัตราเร็วที่เปลี่ยนแปลงไป วัตถุนี้จะเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลมไม่สม่ำเสมอ (nonuniform circular motion) ซึ่งการเคลื่อนที่กรณีนี้จะมีแรง 2 แนวเกิดขึ้น คือ ความเร่งตามแนวรัศมี (radial acceleration) และความเร่งตามแนวเส้นสัมผัส (tangential acceleration) โดยแรงที่กระทำต่อวัตถุจะเกิดขึ้นทั้งสองแนวเช่นกัน คือ แนวรัศมี และแนวเส้นสัมผัส เนื่องจากความเร่งลัพธ์ $\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_t$ หมายความว่า แรงลัพธ์ที่กระทำต่อวัตถุ คือ $\sum \vec{F} = \sum \vec{F}_r + \sum \vec{F}_t$ สามารถแสดงได้ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 3 เมื่อแรงลัพธ์กระทำต่อวัตถุที่เคลื่อนที่แบบวงกลมมีส่วนประกอบของแรงในแนวเส้นสัมผัส $\Sigma \vec{F}_t$

ที่มา : Raymond A. Serway. (2014). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics Ninth Edition.

2.2 การเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotational motion)

ในความเป็นจริงนั้น เป็นไปได้ยากที่เราจะทำให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอในระนาบระดับได้ เนื่องจากปัจจัยอื่น ๆ ซึ่งควบคุมได้ยาก เช่น แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในระบบ ดังนั้นจึงต้องอาศัยหลักการความรู้เรื่องการเคลื่อนที่แบบหมุน (Serway, 2014, p. p. 296) มาอธิบายผลของแรงเสียดทานที่ส่งผลต่ออัตราเร็วเชิงมุมของระบบ โดยเริ่มจากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็ง ตัวอย่างเช่น แผ่นซีดี ซึ่งมีการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบจุดที่ถูกตรึงเอาไว้ และมีความเร่งเชิงมุมคงที่ เราสามารถคำนวณอัตราเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ลักษณะนี้ได้จากสมการความสัมพันธ์ $d\omega = \alpha dt$ เมื่อทำการหาปริพันธ์สมการข้างต้น จาก $t_i = 0$ ถึง $t_f = t$ จะได้สมการ

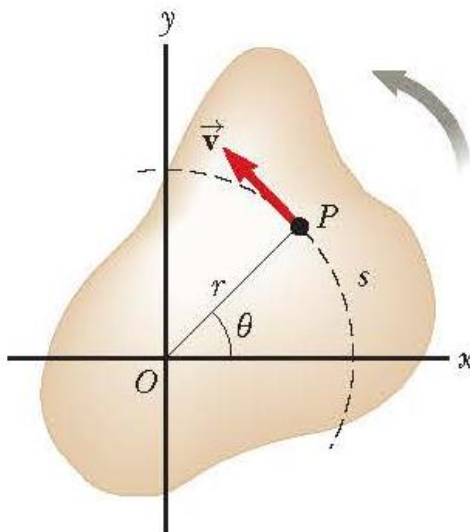
$$\omega_f = \omega_i + \alpha t \quad (4)$$

เมื่อ ω_f คือ อัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุที่เวลา t ใด ๆ (rad/s)

ω_i คือ อัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุแข็งเกร็งที่เวลา $t = 0$ (rad/s)

α คือ ความเร่งเชิงมุม (คงที่) ของวัตถุแข็งเกร็ง (rad/s²)

t คือ เวลาที่วัตถุใช้เคลื่อนที่ (s)



ภาพประกอบ 4 แสดงวัตถุแข็งเกร็งที่มีแกนหมุนอยู่ ณ จุด O ณ จุด P จะมีความเร็วเชิงเส้น \vec{v} ที่มีทิศตั้งฉากกับรัศมี \vec{r}

ที่มา : Raymond A. Serway. (2014). Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics Ninth Edition.

หากพิจารณาอนุภาคหนึ่ง ณ จุด P บนวัตถุชิ้นหนึ่ง ซึ่งห่างจากแกนหมุน ณ จุด O เป็นระยะ r หากเราทำให้วัตถุนี้เกิดการหมุนรอบแกน O ดังภาพประกอบ 3 จะพบว่าอนุภาค ณ จุด P จะเกิดการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ซึ่งมีความเร็วเชิงเส้น \vec{v} เราสามารถคำนวณหาอัตราเร็วเชิงมุม ω จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงรัศมีของวัตถุ (radial acceleration) และรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลม (radius) ดังนี้

$$a_r = \omega^2 r \quad (5)$$

เมื่อนำสมการ (4) มาแทนในสมการ (5) จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงรัศมีของวัตถุ (radial acceleration) และความเร่งเชิงมุม ดังนี้

$$a_r(t) = \omega_f^2 r$$

$$a_r(t) = (\omega_i + \alpha t)^2 r$$

$$a_r(t) = (\omega_i^2 + 2\omega_i \alpha t + \alpha^2 t^2) r$$

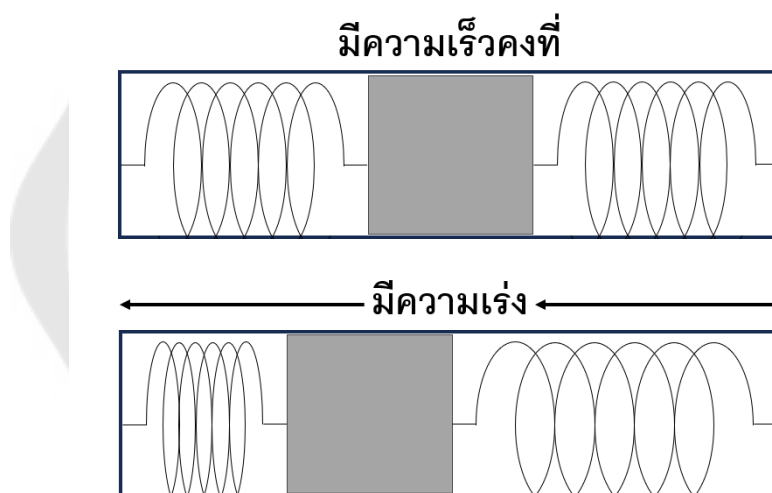
$$a_r(t) = a_i + 2r\omega_i \alpha t + r\alpha^2 t^2 \quad (6)$$

เมื่อ α คือ ความเร่งเชิงมุมของวัตถุแข็งเกร็ง (rad/s^2)

a_i คือ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่เวลา $t = 0$ (m/s^2)

2.3 เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer)

Accelerometer (xcodethai, 2013) เกิดจากการรวมคำว่า Acceleration และ Meter เข้าด้วยกัน ตามคำนิยามคือ เซนเซอร์ที่วัดความเร่งของระบบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไร (หน่วย m/s^2) เช่น ความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วง ซึ่งมีค่าประมาณ $9.81 m/s^2$ หลักการทำงานให้ลองจินตนาการถึงห้องสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ ที่ทุกด้านของผนังกำแพงมีสปริงติดอยู่ เวลาที่ห้องนี้เกิดการเอียงไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง สปริงก็จะกดตัวไปในทิศทางนั้น ๆ ดังภาพประกอบ 5 โดยมองว่าแรงผลักลับของสปริงมีค่าน้อยกว่าแรงโน้มถ่วงของโลก และใช้วงจรไฟฟ้าในการดึงข้อมูลแอนะล็อกเอาต์พุต (output analog) ออกมาใช้งาน หรืออาจจะเป็นดิจิทัลเอาต์พุต (output digital) ซึ่งขึ้นกับชนิดของเซนเซอร์ที่เลือกนำมาใช้งาน



ภาพประกอบ 5 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร่ง

หน้าที่ของเซนเซอร์วัดความเร่ง คือ เป็นตัวบ่งชี้ว่าระบบอยู่ในสถานะนิ่งเฉย (static) หรือไดนามิก (dynamic) นั้นทำให้เซนเซอร์วัดความเร่งเป็นเซนเซอร์สำหรับบอกสถานะการเอียงของระบบได้เป็นอย่างดี (tilt sensor)

ตัวอย่างการนำเซนเซอร์วัดความเร่งมาใช้ประโยชน์ในยุคปัจจุบันที่สุดซึ่งใกล้ตัวเรามากที่สุด คือ การนำเซนเซอร์วัดความเร่งติดตั้งเข้ากับสมาร์ทโฟนที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน

ประโยชน์ที่ได้จากเครื่องวัดความเร่งที่นอกเหนือจากความสะดวกในการใช้งาน คือการที่แอปพลิเคชันหลาย ๆ ประเภทบนสมาร์ทโฟนได้มีการนำเซนเซอร์วัดความเร่งมาใช้สร้างสื่อบันเทิง เช่น เกมบนสมาร์ทโฟน เพื่อให้ประสบการณ์ที่สมจริงยิ่งขึ้นแก่ผู้ใช้งานสมาร์ทโฟน ยกตัวอย่าง เช่น

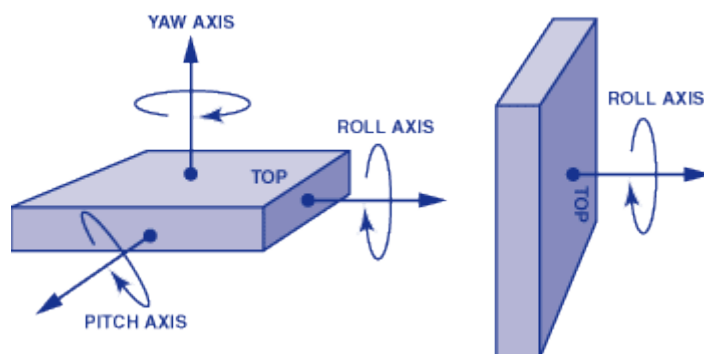
เกมขั้บรตที่สามารถเอียงซ้ายหรือขวา เสมือนเป็นพวงมาลัยในการควบคุม เอียงออกจากตัว-เข้าหาตัว เสมือนการเร่งหรือเบรก หรือเกมที่ต้องอาศัยการหมุนทิศทางต่าง ๆ ก็จะเล่นได้สมจริงกว่าการควบคุมจากหน้าจอเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากความที่เซนเซอร์วัดความเร่งทำงานไม่ค่อยดีในเรื่องของการบอกการเอียงของสมาร์ทโฟน เซนเซอร์ไจโรสโคปจึงเข้ามาทำหน้าที่แทนในส่วนตรงนั้น

2.4 เซนเซอร์ไจโรสโคป (Gyroscope sensor)

เซนเซอร์ไจโรสโคป (EIProCus Technologies Pvt Ltd, 2019) คือ อุปกรณ์ที่สามารถวัดและระบุการวางตัวของวัตถุและความเร็วเชิงมุมของวัตถุ ซึ่งมีความสามารถมากกว่าเซนเซอร์วัดความเร่ง (accelerometers) เซนเซอร์ไจโรสโคปสามารถวัดการเอียงตัวของวัตถุและอัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุ ในขณะที่เซนเซอร์วัดความเร่งสามารถวัดได้เพียงความเร่งในการเคลื่อนที่เชิงเส้นเท่านั้น เซนเซอร์ไจโรสโคปบางครั้งก็ถูกเรียกว่า Angular Rate Sensor หรือ Angular Velocity Sensors เซนเซอร์เหล่านี้จะถูกติดตั้งลงบนชุดอุปกรณ์ที่การระบุการวางตัวของวัตถุ ซึ่งยากที่จะรับรู้โดยใช้ความรู้สึกของมนุษย์

นอกจากที่จะสามารถตรวจจับความเร็วเชิงมุม (angular velocity) ได้แล้ว เซนเซอร์ไจโรสโคปยังสามารถวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุ ในด้านอุตสาหกรรมหากต้องการวัดการเคลื่อนที่ของวัตถุให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น มักจะใช้เซนเซอร์ไจโรสโคปร่วมกับเซนเซอร์วัดความเร่ง (accelerometer sensor) เซนเซอร์ไจโรสโคปประกอบด้วยตัววัดอัตราการเปลี่ยนแปลงมุม 3 ชนิด คือ

- Yaw – การหมุนในแนวขวาง (horizontal rotation) บนพื้นราบเมื่อมองวัตถุจากด้านบน
- Pitch - การหมุนในแนวตั้ง (vertical rotation) เมื่อมองจากด้านหน้าของวัตถุ และ
- Roll – การหมุนในแนวขวางเมื่อมองวัตถุจากด้านหน้า ดังภาพประกอบ 6



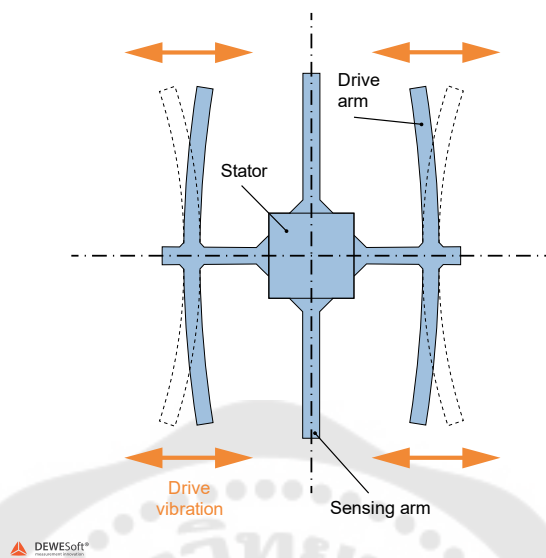
ภาพประกอบ 6 แสดงตัววัดอัตราการเปลี่ยนแปลงมุม 3 แกน คือ Yaw Pitch และ Roll ในเซนเซอร์ไจโรสโคป

ที่มา: <https://i.stack.imgur.com/4PXFg.gif> สืบค้นวันที่ 18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2562

แนวคิดของแรงโคริโอลิส (Coriolis force) ถูกนำมาใช้ในการสร้างเซนเซอร์ไจโรสโคป เซนเซอร์นี้วัดอัตราการเปลี่ยนแปลงมุม อัตราการหมุนของเซนเซอร์ที่อ่านได้จะถูกแปลงค่าเป็นสัญญาณไฟฟ้า หลักการทำงานของเซนเซอร์ไจโรสโคปสามารถเข้าใจได้โดยการสังเกตการทำงานของ การสั่นของเซนเซอร์ไจโรสโคป

เซนเซอร์ไจโรสโคปนี้ประกอบจากวัสดุที่สามารถสั่นได้ ซึ่งผลิตมาจากผลึก (crystal material) ขึ้นรูปร่างเป็นโครงสร้างแบบตัว T คู่ (double - T - structure) โครงสร้างแบบนี้ประกอบด้วยส่วนที่อยู่นิ่ง (stationary part) ตรงกลางติดกับแขนการรับรู้ (sensing arm) และแขนขับเคลื่อน (drive arm) ทั้งสองข้าง

โครงสร้างแบบตัว T คู่ เป็นรูปที่สมมาตร เมื่อการสั่นของสนามไฟฟ้าถูกใช้เพื่อขับเคลื่อน แขนทั้งสอง ต่อเนื่องไปยังการสั่นที่ปลายที่ถูกสร้างขึ้น แขนขับเคลื่อนมีลักษณะสมมาตร เมื่อแขนใดแขนหนึ่งเกิดการเคลื่อนที่ไปทางซ้าย แขนที่เหลือจะเคลื่อนที่ไปทางขวา ดังภาพประกอบ 7 เพื่อหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือนที่เร็วเกินไป ส่วนนี้จะช่วยรักษาให้ส่วนที่อยู่นิ่งตรงกลางและแขนการรับรู้ยังคงที่เหมือนเดิม



ภาพประกอบ 7 แสดงแขนขับเคลื่อนรูปตัว T คู่ ที่แขนแต่ละข้างมีการเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกัน

ที่มา : https://training.dewesoft.com/images/uploads/pro_training_gyro1.svg

สืบค้นวันที่ 18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2562

เมื่อแรงหมุนจากภายนอกกระทำต่อเซนเซอร์การสั่นในแนวตั้งอันเนื่องมาจากแขนขับเคลื่อน ซึ่งนำไปสู่การสั่นของแขนขับเคลื่อนในทิศขึ้นและลงจนกระทั่งแรงหมุนกระทำต่อส่วนที่อยู่เนืองตรงกลาง

การหมุนของส่วนที่อยู่เนืองนำไปสู่การสั่นในแนวตั้งของแขนการรับรู้ การสั่นนี้ก่อให้เกิดการวัดการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าในแขนการรับรู้ การเปลี่ยนแปลงจะถูกใช้วัดแรงหมุนจากภายนอกซึ่งกระทำต่อเซนเซอร์ในการหมุนเชิงมุม

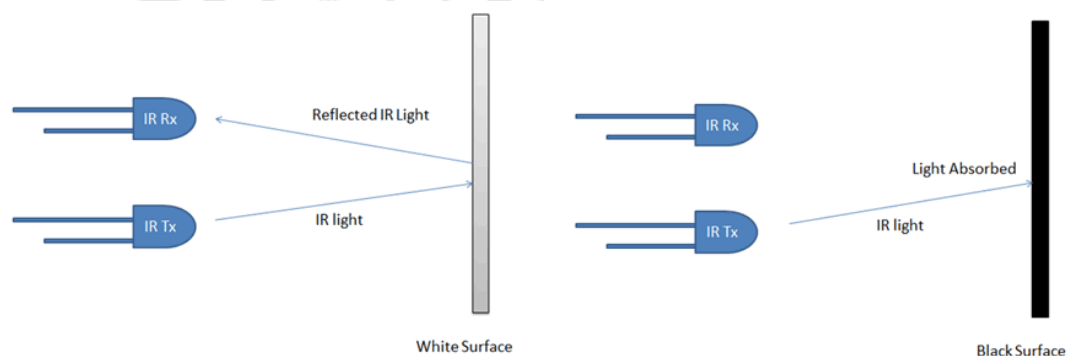
การจัดประเภทของเซนเซอร์ไจโรสโคปหากแบ่งตามขนาดของเซนเซอร์ จะมีตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงใหญ่ เมื่อไล่ลำดับจากขนาดใหญ่ไปขนาดเล็กสามารถจำแนกได้ดังนี้ คือ ไจโรสโคปวงแหวนเลเซอร์ (ring laser gyroscope) ไจโรสโคปเส้นใยแก้วนำแสง (fiber-optic gyroscope) ไจโรสโคปของไหล (fluid gyroscope) และไจโรสโคปแบบสั่น (vibration gyroscope)

เซนเซอร์ไจโรสโคปประเภทที่ได้รับความนิยมมากที่สุด คือ ไจโรสโคปแบบสั่น เนื่องจากมีขนาดเล็กและง่ายต่อการใช้งาน วัสดุที่ใช้สร้างส่วนที่อยู่เนืองภายในตัวของเซนเซอร์และความแตกต่างของโครงสร้างของเซนเซอร์จะส่งผลต่อคุณสมบัติของเซนเซอร์ไจโรสโคปแบบสั่นที่จะให้

ความแม่นยำที่แตกต่างกัน ดังนั้นโรงงานหลาย ๆ แห่งจึงใช้วัสดุและโครงสร้างที่แตกต่างกันในการผลิตเซนเซอร์ที่มีความแม่นยำเป็นของตนเอง

2.5 เซนเซอร์อินฟราเรด (Infrared sensor)

เซนเซอร์แสงสำหรับตรวจจับวัตถุกีดขวาง (infrared obstacle avoidance sensor) (Ken RobotSiam, 2016) เป็นเซนเซอร์อินฟราเรดชนิดที่มีตัวส่ง (emitter) และตัวรับ (receiver) คลื่นอินฟราเรดในตัวเดียวกัน โดยตัวส่งจะทำหน้าที่ส่งคลื่นอินฟราเรดไปด้านหน้าของเซนเซอร์ เมื่อเจอกับวัตถุด้านหน้า คลื่นอินฟราเรดจะถูกสะท้อนกลับมายังตัวรับ โดยตัวรับจะทำการแปลงค่าของคลื่นอินฟราเรดที่รับมาได้ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อใช้สำหรับอ่านค่าว่าคลื่นที่สะท้อนกลับมามีมากหรือน้อย ซึ่งการสะท้อนจะดีหรือไม่ดีขึ้นอยู่กับวัตถุหรือพื้นผิวที่คลื่นอินฟราเรดไปตกกระทบว่ามีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นอินฟราเรดได้ดีเท่าไร ตัวอย่างเช่น พื้นผิวสีขาวหรือมันวาวจะมีคุณสมบัติในการสะท้อนคลื่นอินฟราเรดได้ดีกว่าพื้นผิวดำ ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 แสดงการสะท้อนของคลื่นอินฟราเรดบนพื้นผิวสีขาวที่สะท้อนได้ดี (ภาพซ้าย) และพื้นผิวดำที่สะท้อนได้แย่ (ภาพขวา)

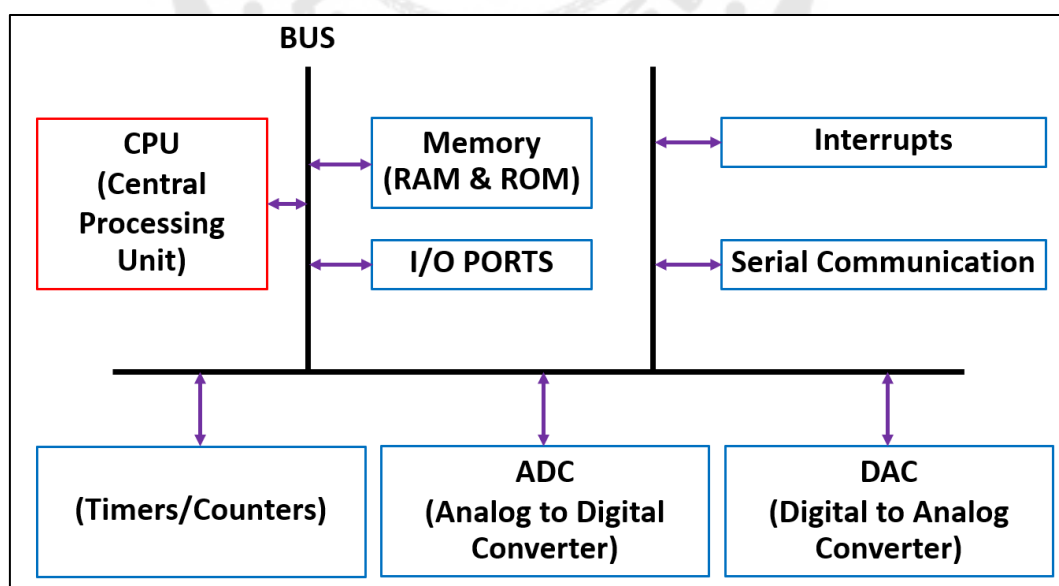
ที่มา : <https://robotsiam.blogspot.com/2016/10/ir-infrared-obstacle-avoidance-sensor.html> สืบค้นวันที่ 30 พฤษภาคม พ.ศ. 2566

2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller; MCU) (ทันพงษ์ ภูรักษา, 2013) คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งมีความสามารถที่คล้ายคลึงกับคอมพิวเตอร์ โดยตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาหน่วยประมวลผล (CPU) หน่วยความจำ (memory) และ

พอร์ต (port) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ในตัวเดียวกัน ดังภาพประกอบ 9

หากกล่าวถึงความหมายโดยตรงตัวของไมโครคอนโทรลเลอร์ ถูกกล่าวไว้ว่าเป็นระบบควบคุมสั่งการขนาดเล็กเปรียบเสมือนระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ผ่านการออกแบบวงจรและติดตั้งเข้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอกอื่น ๆ ให้เหมาะสมกับงานที่ต้องการใช้งานในด้านต่าง ๆ สำหรับการควบคุมชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอกเหล่านั้นจะใช้การเขียนโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมขาอินพุตและเอาต์พุตของไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งงานให้ไปควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ภายนอกให้เป็นไปตามลำดับขั้นตอน นับว่าเป็นระบบที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ทั้งทางด้านดิจิทัลและแอนะล็อก ยกตัวอย่างการนำไปใช้งานเช่น ระบบควบคุมการบินของโดรน ระบบควบคุมแขนกล ระบบควบคุมเก้าอี้รถเข็นสำหรับคนป่วยหรือคนพิการ นอกจากนี้ในปัจจุบันไมโครคอนโทรลเลอร์ยังสามารถทำการเชื่อมต่อกับระบบเครือข่าย (network) ของคอมพิวเตอร์ทั่วไปผ่านการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โมดูล Wi-Fi เพิ่มเติมเข้าไปในระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ได้อีกด้วย ดังนั้นการสั่งการทำงานจึงไม่ถูกจำกัดอยู่เพียงด้านหน้าแผงวงจรเท่านั้น แต่ผู้ใช้งานยังสามารถสั่งการทำงานของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ระยะทางไกลผ่านเครือข่ายไร้สายอินเทอร์เน็ตได้อีกด้วย



ภาพประกอบ 9 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

2.7 NodeMCU

NodeMCU (KKdeveloper, 2017) คือ แพลตฟอร์มหนึ่งที่ใช้ช่วยในการสร้างโปรเจกต์ Internet of Things (IoT) ที่ประกอบไปด้วยบอร์ดสำหรับพัฒนา (development Kit) และเฟิร์มแวร์ (firmware) ที่เป็นโอเพนซอร์ส (open source) สามารถเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Lua ได้ ทำให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น มาพร้อมกับโมดูล Wi-Fi ซึ่งเป็นอุปกรณ์สำคัญในการใช้เชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต โมดูล ESP8266 มีการพัฒนาขึ้นมาจำหน่ายหลายรุ่น ตั้งแต่รุ่นแรกเริ่ม คือ ESP-01 (ภาพประกอบ 10) ถูกพัฒนาต่อเรื่อยมา จนกระทั่งในปัจจุบันรุ่นล่าสุด คือ ESP-12 และ ESP-12E ทั้งสองมีความสามารถและการใช้งานไม่ต่างกันมาก ส่วนลักษณะของ NodeMCU นั้น คล้ายกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ทั่วไป (เช่น Arduino) ตรงที่มีพอร์ตอินพุตและเอาต์พุตบิวท์อิน (built-in) มาในตัวเดียวกัน สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตได้โดยไม่ต้องผ่านอุปกรณ์อื่น ๆ นอกจากนี้ปัจจุบันนักพัฒนาสามารถทำให้โปรแกรม Arduino IDE ใช้งานร่วมกับ NodeMCU ได้ (ดั้งเดิมเขียนโปรแกรมได้เฉพาะภาษา Lua) จึงทำให้ผู้พัฒนาสามารถใช้ภาษา C หรือ C++ ในการเขียนโปรแกรมได้ ดังนั้นผู้ใช้งานจึงสามารถใช้ประโยชน์จากบอร์ดประเภทนี้ได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น ด้านคุณสมบัติและความสามารถของ NodeMCU สามารถนำมาสร้างผลงานได้หลายอย่างมาก โดยเฉพาะหัวข้อที่มีความเกี่ยวข้องกับ IoT ยกตัวอย่าง เช่น การทำ Web Server ขนาดเล็ก การควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์ไฟผ่าน Wi-Fi Network ฯลฯ



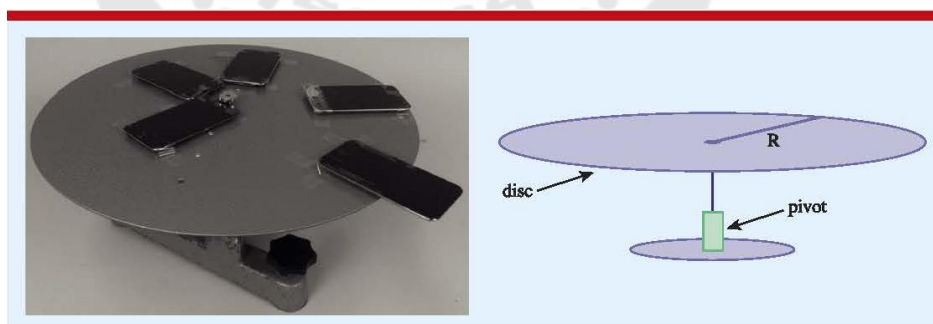
ภาพประกอบ 10 แสดง ESP8266 (ESP-01)

ที่มา: <http://sat2you.com/web/2017/01/31/nodemcu-กับ-iot-ตอนที่-1-nodemcu-คืออะไร/> สืบค้นวันที่ 18 พฤศจิกายน พ.ศ. 2562

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทศวรรษหลังมานี้ งานวิจัยด้านการศึกษารากฏการณ์ทางฟิสิกส์โดยใช้เซนเซอร์ภายในสมาร์ทโฟนเป็นเครื่องมือใช้วัดปริมาณต่าง ๆ ที่ต้องการเริ่มมีความนิยมมากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การหาความเร็วเชิงมุมและโมเมนตัมเชิงมุมของวัตถุแข็งเกร็งด้วยสมาร์ทโฟน (Patrinopoulos & Kefalis, 2015) การศึกษาการกลิ้งของวัตถุรูปทรงกระบอกด้วยสมาร์ทโฟน (Puttharugsa, Khemmani, Utayarat, & Luangtip, 2016) การหาสัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตจากการเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยสมาร์ทโฟน (Puttharugsa, Khemmani, Wicharn, & Plaipichit, 2019) การวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบวงกลมและความเร่งด้วยเซนเซอร์ภายใน Nintendo WiiMote (Erickson, Ochoa, & Ochoa, 2013) หรือจะเป็นการศึกษาความเร่งเชิงรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลมจากเซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ทโฟน (Hochberg, Gröber, Kuhn, & Müller, 2014)

ในการวิจัยของ K Hochberg และคณะ ได้สร้างชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมในระนาบระดับ โดยใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (accelerometer) ภายในสมาร์ทโฟนเป็นตัววัดความเร่งเชิงรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่ตำแหน่งห่างจากจุดศูนย์กลางของวงกลมเป็นรัศมีค่าต่าง ๆ และสามารถวัดความถี่ของการหมุน (rotation frequency) จากผลของแรงเสียดทานที่ทำให้การหมุนของระบบช้าลงได้ โดยชุดการทดลองของ K Hochberg และคณะ เป็นชุดการทดลองที่เรียบง่ายไม่ซับซ้อน ประกอบด้วยสมาร์ทโฟนจำนวน 5 เครื่อง และจานหมุนที่ทำหน้าที่ให้วัตถุเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลมในระนาบระดับ ดังภาพประกอบ 11

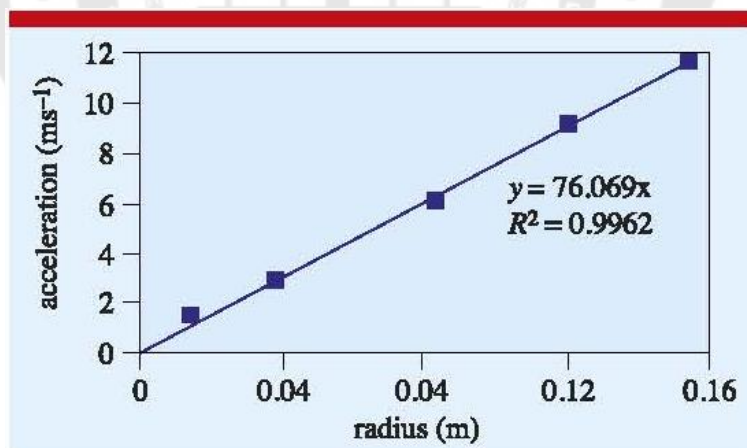


ภาพประกอบ 11 แสดงชุดการทดลองของ Hochberg และคณะ ประกอบด้วยสมาร์ทโฟน 5 เครื่อง ซึ่งวางอยู่บนจานหมุน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ห่างจากจุดศูนย์กลาง

ที่มา: K Hochberg et al. (2014). The spinning disc: studying radial acceleration and its damping process with smartphone acceleration sensors.

ขั้นแรกของการทดลอง K Hochberg และคณะจะต้องหาตำแหน่งที่อยู่ของเซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ทโฟนก่อน เนื่องจากการจะวัดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลมเพื่อนำมาคำนวณหาอัตราเร็วเชิงมุม (ω) เราจำเป็นจะต้องทราบรัศมีที่แน่นอนของเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัด วิธีการที่ง่ายที่สุดคือการนำสมาร์ทโฟนมาวางไว้ตรงกลางของจานหมุนแล้วทำการหมุนจานหมุน ชยับตำแหน่งของสมาร์ทโฟนไปเรื่อย ๆ จนพบตำแหน่งที่เซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ทโฟนอ่านค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางได้ศูนย์ หมายความว่าตำแหน่งที่ตรงกับจุดศูนย์กลางของจานหมุนขณะนั้นคือตำแหน่งที่อยู่ของเซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ทโฟน

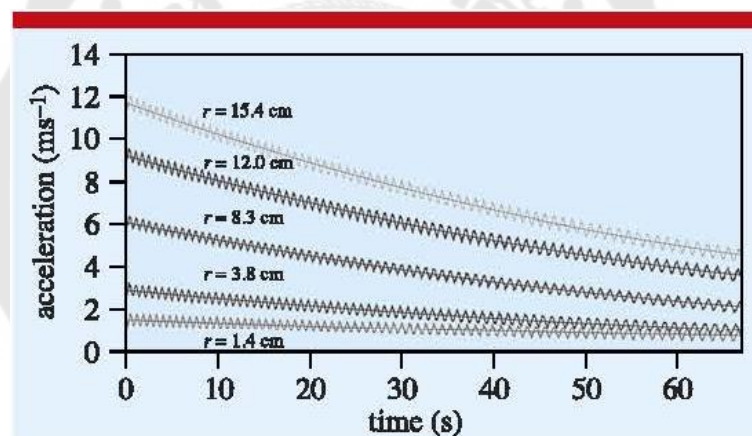
เมื่อได้ตำแหน่งที่อยู่ของเซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ทโฟนแล้ว K Hochberg และคณะได้นำสมาร์ทโฟนเหล่านั้นมาทำการทดลองวัดความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลม โดยการนำผลิตภัณฑ์ของยี่ห้อแอปเปิล ประกอบด้วย iPod touch และ iPhone จำนวนรวม 5 เครื่องวางที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนจานหมุนโดยมีรัศมีของการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน เพื่อใช้สำหรับศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางและรัศมีของการเคลื่อนที่ของวัตถุ ผลแสดงดังภาพประกอบ 12 จากกราฟจะเห็นว่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางและรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลมของวัตถุ มีความสัมพันธ์กันเป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งเป็นไปตามสมการ (5)



ภาพประกอบ 12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงรัศมีและรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ทโฟนของ K Hochberg และคณะ

ที่มา: K Hochberg et al. (2014). The spinning disc: studying radial acceleration and its damping process with smartphone acceleration sensors.

นอกจากนี้ในงานวิจัยของ K Hochberg และคณะ พบว่าชุดอุปกรณ์งานหมุนของพวกเขา ไม่สามารถทำให้เซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ทโฟนเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลมในระนาบระดับแบบสมบูรณ์ได้ สิ่งที่ตามมาในการวัดความเร่งของพวกเขาคือผลของความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงโลก (g) เข้ามาเกี่ยวข้องกับการวัดความเร่งของการเคลื่อนที่ที่ทำให้สังเกตเห็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงรัศมีและเวลาจากข้อมูลของสมาร์ทโฟนแต่ละเครื่อง มีการสั่นขึ้นลงตลอดการเคลื่อนที่ รวมถึงผลของแรงเสียดทานของจุดหมุนที่ทำให้สมาร์ทโฟนเหล่านี้ไม่สามารถเกิดการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่มีอัตราเร็วคงที่ได้ แต่จะมีอัตราเร็วเชิงมุมที่ลดลงตามเวลา หากนำข้อมูลของความเร่งเชิงรัศมีและเวลามาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ พบว่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของวัตถุมีค่าลดลงตามเวลา ดังภาพประกอบ 13 จะพบว่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางมีค่าลดลงตามเวลา



ภาพประกอบ 13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งเชิงรัศมีและเวลาของการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งภายในสมาร์ทโฟนของ K Hochberg และคณะ

ที่มา: K Hochberg et al. (2014). The spinning disc: studying radial acceleration and its damping process with smartphone acceleration sensors.

ผลของความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงโลกที่ส่งผลกระทบต่อความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลมของ K Hochberg และคณะ สามารถแก้ปัญหาก็ได้โดยการ fitting ข้อมูลเหล่านี้ด้วยฟังก์ชันกำลังสอง (quadratic function) ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีในสมการที่ (5) จะทำให้ได้กราฟของความเร่งเชิงรัศมีกับเวลาโดยที่ไม่มีผลจากความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่วนผลของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจนทำให้กราฟของความเร่งเชิงรัศมีมีค่าลดลงตามเวลา K

Hochberg และคณะได้พลิกโอกาสตรงนี้ในการอธิบายผลของความเร่งเชิงมุม (α) ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานนี้ โดยอาศัยสมการที่ (5) ในการวิเคราะห์เช่นเดิม

จากงานวิจัยของ K Hochberg และคณะ แสดงให้เห็นว่าเราสามารถนำอุปกรณ์ในชีวิตประจำวันอย่างสมาร์ทโฟนมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการทดลองทางฟิสิกส์ เพื่อให้ผู้เรียนเกิดความสนใจในการเรียนรู้ และปฏิเสธยากกว่าปัจจุบันประชากรส่วนใหญ่มีสมาร์ทโฟนเป็นของตนเองแล้ว เนื่องจากสเปก (specification) และราคาที่เป็นมิตรกับผู้ซื้อมากกว่าแต่ก่อน ถึงกระนั้นการนำเซนเซอร์ภายในสมาร์ทโฟน เช่น เซนเซอร์จีโรสโคป เซนเซอร์วัดความเร่ง มาใช้สำหรับการทดลองทางวิทยาศาสตร์บ้างก็สร้างเรื่องจุกจิกกวนใจ เช่น สมาร์ทโฟนแต่ละยี่ห้อ แต่ละรุ่นจะมีการออกแบบการวางตำแหน่งของเซนเซอร์แต่ละตัวแตกต่างกันออกไป ทำให้การเปลี่ยนสมาร์ทโฟน 1 เครื่องสำหรับชุดการทดลองหนึ่ง ๆ อาจจะทำให้ผู้ทำการทดลองต้องเสียเวลาสำหรับการหาตำแหน่งของเซนเซอร์ใหม่ หรือผู้ทดลองจะมั่นใจได้อย่างไรว่าเซนเซอร์เหล่านั้นที่เราต้องการใช้งานวางตัวในแนวที่ต้องการแล้ว ทางเลือกที่ง่ายต่อการสร้างเครื่องมือ กำหนดการวางตำแหน่งของอุปกรณ์แต่ละตัว และพัฒนาชุดเครื่องมือในภายหลังคือการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้น ๆ สร้างชุดการทดลองขึ้นมา ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะสร้างชุดอุปกรณ์การทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์วัดความเร่งเป็นหัวใจหลักของชุดการทดลอง ซึ่งเซนเซอร์วัดความเร่งนี้จะถูกติดตั้งกับไมโครคอนโทรลเลอร์และไมโครส่งข้อมูลอื่น ๆ เพื่อใช้สำหรับรับข้อมูล ส่งข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. อุปกรณ์การทดลอง
2. การสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย
3. การเก็บรวบรวมข้อมูล
4. การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล

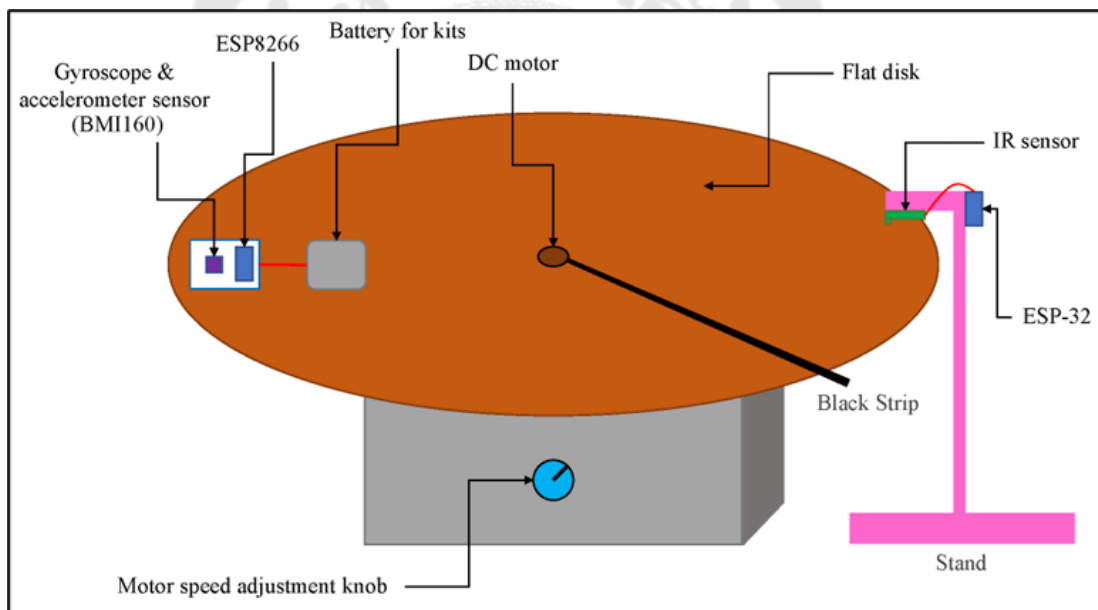
3.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. NodeMCU: ESP8266
2. NodeMCU: ESP-32
3. Accelerometer & Gyroscope Sensor: BMI160 Module
4. Infrared Sensor: TCRT5000 Module
5. Power Bank
6. Battery 12 V
7. จานหมุนประกอบกับมอเตอร์ไฟฟ้า 12 V
8. ขาตั้งสำหรับติดตั้ง Infrared Sensor
9. แถบกระดาษสีดำ
10. ตลับเมตร

3.2 การสร้างเครื่องมือในการวิจัย

1. ออกแบบชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลม ดังภาพประกอบ 14 โดยชุดอุปกรณ์การทดลองจะต้องมีคุณสมบัติดังนี้
 - 1) ฐานรองรับจานหมุนและมอเตอร์ไฟฟ้ามีความมั่นคง ไม่สั่นคลอนขณะมอเตอร์ไฟฟ้าทำงาน
 - 2) รัศมีของจานหมุนยาว 25 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถทดลองชุดเซนเซอร์ได้หลายตำแหน่งบนจานหมุน
 - 3) ติดตั้งแถบกระดาษสีดำบนจานหมุนซึ่งทำหน้าที่สำหรับทำให้เซนเซอร์อินฟราเรดทราบว่ามีวัตถุ (ชุดเซนเซอร์ไร้สาย) เคลื่อนที่ครบ 1 รอบวงกลมแล้ว

- 4) ชุดเซนเซอร์ไร้สาย ซึ่งประกอบด้วย ESP8266 แบตเตอรี่สำรองแบบพกพา (Power Bank) เซนเซอร์ไจโรสโคป และเซนเซอร์วัดความเร่ง สามารถติดตั้งได้ทุกตำแหน่งบนจานหมุน เพื่อให้สามารถทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับที่รัศมีต่าง ๆ ได้
- 5) ปุ่มปรับความเร็วมอเตอร์ สำหรับปรับความถี่การหมุนของจานหมุนเพื่อให้สามารถทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับที่ความถี่ต่าง ๆ ได้
- 6) เซนเซอร์อินฟราเรด ซึ่งทำงานร่วมกับ ESP-32 ถูกติดตั้งบนขาตั้ง ใช้สำหรับวัดคาบของเวลาหรือความถี่การหมุนของชุดเซนเซอร์บนจานหมุน
- 7) ส่งผ่านข้อมูลที่อ่าน/วัดได้จากเซนเซอร์ต่าง ๆ ไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการผ่านระบบไร้สาย Wi-Fi



ภาพประกอบ 14 แสดงการออกแบบชุดการทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมสม่ำเสมอ

2. เขียนโปรแกรมสำหรับอ่านค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วจึงส่งข้อมูลดังกล่าวต่อไปผ่านช่องทางไร้สายไวไฟ (Wi-Fi) ไปยังแพลตฟอร์ม Google Sheet เพื่อใช้แสดงผลของการวัดบนอุปกรณ์ที่ต้องการ เช่น สมาร์ทโฟน คอมพิวเตอร์

3. ศึกษาการสื่อสารข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่านช่องทางไร้สาย Wi-Fi กับ Google Sheet platform ให้สามารถส่งข้อมูลการวัดปริมาณต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว โดยมีปริมาณที่ควรอ่านได้ ดังนี้
 - 1) สามารถแสดงค่าของคาบ อัตราเร็วเชิงมุม และความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ณ ขณะนั้นได้
 - 2) สามารถเก็บข้อมูลปริมาณต่าง ๆ ในการเคลื่อนที่แบบวงกลมเมื่อเวลาผ่านไปได้ (data logs)
4. ทดลองชุดอุปกรณ์การทดลองที่สร้างขึ้น เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของค่าที่วัดได้จากชุดการทดลอง
5. ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องของชุดอุปกรณ์การทดลองจนสามารถนำไปใช้งานได้จริง

3.3 การเก็บรวบรวมข้อมูล

3.3.1 การทดสอบการส่งข้อมูลของชุดอุปกรณ์

เมื่อประกอบไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ากับเซนเซอร์ที่ต้องการ และทำการเขียนโปรแกรมให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สามารถทำงานรวมกันได้ จะมีการทดสอบการจัดส่งข้อมูลไปยังแพลตฟอร์ม Google Sheet ก่อนการนำไปทดลองในเหตุการณ์จำลอง ดังนี้

- 1) ความเร่งที่อ่านได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง สามารถวัดและส่งค่าได้ถูกต้องหรือไม่ หากความเร่งที่อ่านได้ในแนวเดียวกับทิศที่เข้าสู่ศูนย์กลางของโลกมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียง 9.81 m/s^2 สันนิษฐานว่าเซนเซอร์วัดความเร่งสามารถอ่านและส่งค่าได้ถูกต้อง
- 2) เซนเซอร์อินฟราเรดวัดและส่งค่าได้ถูกต้องหรือไม่ หากมีแถบกระดาษสีดำเคลื่อนที่ผ่านแล้ว เซนเซอร์อินฟราเรดสามารถตรวจจับได้หรือไม่ เพื่อใช้สำหรับวัดคาบการเคลื่อนที่ของชุดเซนเซอร์บนจานหมุนต่อไป

หากชุดเซนเซอร์ทั้งสอง คือ ชุดเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม-ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง และชุดเซนเซอร์วัดคาบของเวลา สามารถทำงานได้ถูกต้องตาม 2 ข้อที่กล่าวมา จะดำเนินการทดสอบต่อในหัวข้อถัดไป

3.3.2 การทดสอบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของชุดอุปกรณ์

หลังการทดสอบการจัดส่งข้อมูลของเซนเซอร์ก่อนหน้านี้สำเร็จ นำชุดเซนเซอร์สำหรับใช้วัดปริมาณต่าง ๆ ของการเคลื่อนที่แบบวงกลม คือ คาบของเวลา ความเร็วเชิงมุม และความเร่ง

เข้าสู่ศูนย์กลาง ติดตั้งบนจานหมุนไฟฟ้า ดังภาพประกอบ 15 เพื่อใช้ทดสอบวัดปริมาณทางฟิสิกส์ของชุดเซนเซอร์ในเหตุการณ์จำลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับ ดังนี้



ภาพประกอบ 15 ชุดอุปกรณ์ทดลองเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับหลังประกอบเสร็จ (ภาพ A มุมมองด้านบน, ภาพ B มุมมองด้านหน้า)

- 1) การทดลองความสัมพันธ์ตามสมการ (5) ระหว่างความเร็วเชิงมุม (ω) จากเซนเซอร์ไจโรสโคปและความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลาง (a_r) จากเซนเซอร์วัดความเร่ง โดยปรับรัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลม 3 ระยะ คือ 10.0, 15.0 และ 20.0 เซนติเมตร และความความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 5 ระดับ คือ 21.42, 25.00, 30.00, 35.29 และ 42.85 rpm (โดยประมาณ) ตามสมการ (5) ว่าเซนเซอร์ทั้งสองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือหรือไม่
- 2) การทดลองความสัมพันธ์ตามสมการ $\omega = 2\pi/T$ ระหว่างความเร็วเชิงมุม (ω) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และคาบของเวลา (T) ที่วัดได้จากเซนเซอร์อินฟราเรด โดยปรับรัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลม 3 ระยะ คือ 10.0, 15.0 และ 20.0 เซนติเมตร และความความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 5 ระดับ คือ 21.42, 25.00, 30.00, 35.29 และ 42.85 rpm (โดยประมาณ) ตามสมการ (5) ว่าเซนเซอร์ทั้งสองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือหรือไม่

3.4 การจัดการและการวิเคราะห์ข้อมูล

การบ่งบอกความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของชุดเซนเซอร์ จะใช้วิธีการทางสถิติกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองในเหตุการณ์จำลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับที่กำหนดขึ้น ซึ่งมีวิธีการดังนี้

3.4.1 การหาค่าเฉลี่ยผลต่างของสองชุดข้อมูล (Mean Difference)

การคำนวณค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างสองชุดข้อมูล ทำให้ผู้วิจัยสามารถวัดค่าเบี่ยงเบนระหว่างชุดข้อมูลโดยรวมได้ ช่วยให้เข้าใจระดับความขัดแย้งโดยเฉลี่ยระหว่างการวัดทั้งสอง

3.4.2 การหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง (S.D. of the difference)

การคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง ช่วยให้ผู้วิจัยวัดการกระจายหรือความแปรผันในการวัด ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่มากขึ้นแสดงถึงระดับความไม่เหมือนกันหรือความไม่สัมพันธ์กันที่มากขึ้นระหว่างชุดข้อมูลทั้งสอง

3.4.3 การทำ t-test paired two sample for means

การทดสอบสถิติที่ใช้เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มตัวอย่างที่เป็นคู่กัน การทดสอบนี้เหมาะสำหรับกรณีที่ผู้วิจัยมีข้อมูลสองชุดที่มีการจับคู่หรือเชื่อมโยงกันในรูปแบบใด ๆ วัตถุประสงค์ของการทดสอบคือตรวจสอบว่ามีความแตกต่างทางสถิติที่สำคัญระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มสองกลุ่มหรือไม่

- 1) t-test: t-test เป็นการทดสอบทางสถิติที่ช่วยประเมินว่าความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มมีความสำคัญทางสถิติหรือไม่ คำนวณค่า t-value ซึ่งเป็นตัววัดของความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยคำนึงถึงความแปรผันภายในกลุ่ม
- 2) Paired two sample: การทดสอบแบบ paired two sample หมายถึง ชุดข้อมูลสองชุดที่เปรียบเทียบเป็นคู่หรือมีความสัมพันธ์กันในรูปแบบใด ๆ แต่ละข้อมูลในกลุ่มหนึ่งจะสัมพันธ์กับข้อมูลที่เฉพาะเจาะจงในกลุ่มอีกกลุ่มหนึ่ง โดยทั่วไปอาจเกี่ยวข้องกับตัวอย่างก่อนและหลังการแก้ไขปัญหา หรือข้อมูลจากบุคคลที่สัมพันธ์กัน หรือการวัดสองครั้งที่เกิดขึ้นบนตัวอย่างเดียวกัน.
- 3) Means: t-test สำหรับค่าเฉลี่ยมีความสำคัญเป็นพิเศษในการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของสองกลุ่ม ซึ่งใช้ตรวจสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยว่าเป็นผลจากโอกาสสุ่มหรือเกิดจากความแตกต่างจริงในประชากรที่เลือกใช้เป็นตัวอย่าง

การทดสอบ t-test paired two sample for means นิยมใช้เมื่อผู้วิจัยมีข้อมูลที่เก็บก่อนและหลังจากการแก้ไขปัญหา ข้อมูลจากบุคคลสองคนที่สัมพันธ์กัน หรือข้อมูลจากการวัดสอง

ครั้งกับตัวอย่างเดียวกัน โดยการทำการทดสอบนี้ ผู้วิจัยสามารถระบุได้ว่าความแตกต่างที่สังเกตเห็นระหว่างค่าเฉลี่ยที่มีการจับคู่กันมีความสำคัญทางสถิติหรือไม่ ซึ่งทำให้ได้ข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพของการแก้ไขปัญหาหรือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เปรียบเทียบกัน

เมื่อค่า p-value มีค่าน้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด (เช่น $\alpha = 0.05$) หมายความว่ามีความเป็นไปได้สูงที่จะพบความแตกต่างที่แท้จริงของค่าเฉลี่ยของกลุ่มที่จับคู่กัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือค่าเฉลี่ยของสองกลุ่มไม่เท่ากัน ในทางกลับกัน หากค่า p-value มากกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด แสดงว่าไม่มีหลักฐานทางสถิติในการระบุความแตกต่างนี้

ค่า p-value เป็นข้อมูลที่สำคัญในการตัดสินใจในการยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐาน ถ้าค่า p-value มากกว่าระดับความเชื่อมั่น แสดงว่าเราไม่สามารถปฏิเสธ Null hypothesis ได้ กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่หาก p-value น้อยกว่าระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด แสดงว่าเราจะปฏิเสธ Null hypothesis (H_0) และยอมรับ Alternative hypothesis กล่าวคือ ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ สามารถสรุปได้ดังตาราง

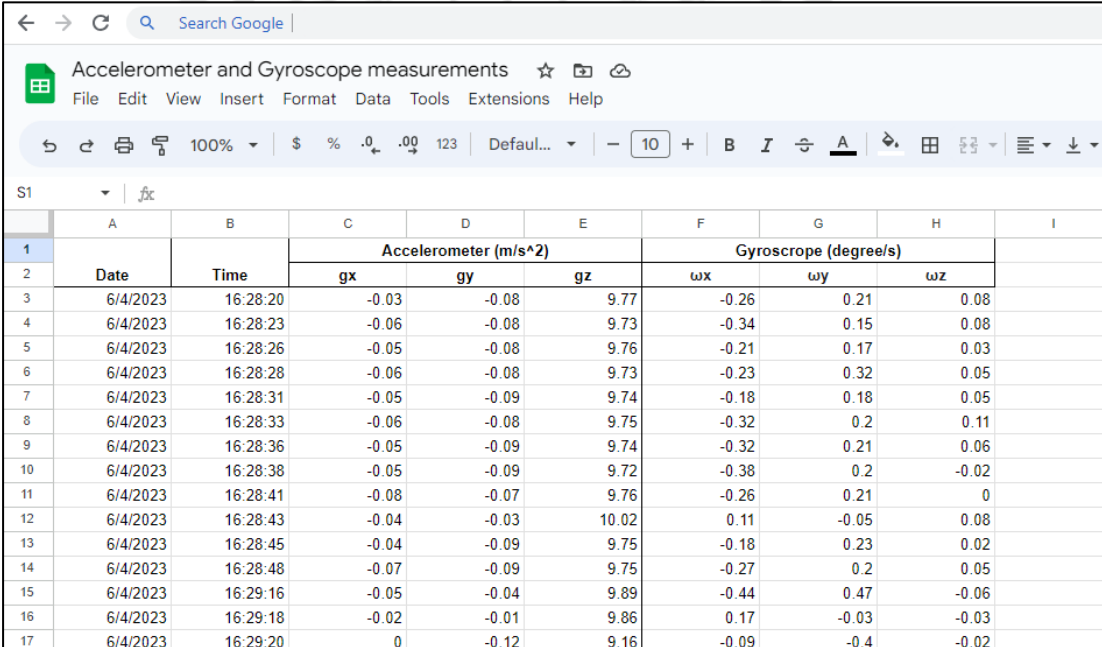
ตาราง 1 การแปลค่า P-value จากการทำ t-test paired two sample for means

เกณฑ์ของ P-value	ผลลัพธ์	แปลผล
$P - value > \alpha$	ยอมรับ Null hypothesis	ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ
$P - value \leq \alpha$	ปฏิเสธ Null hypothesis และยอมรับ Alternative hypothesis	ค่าเฉลี่ยของผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 4

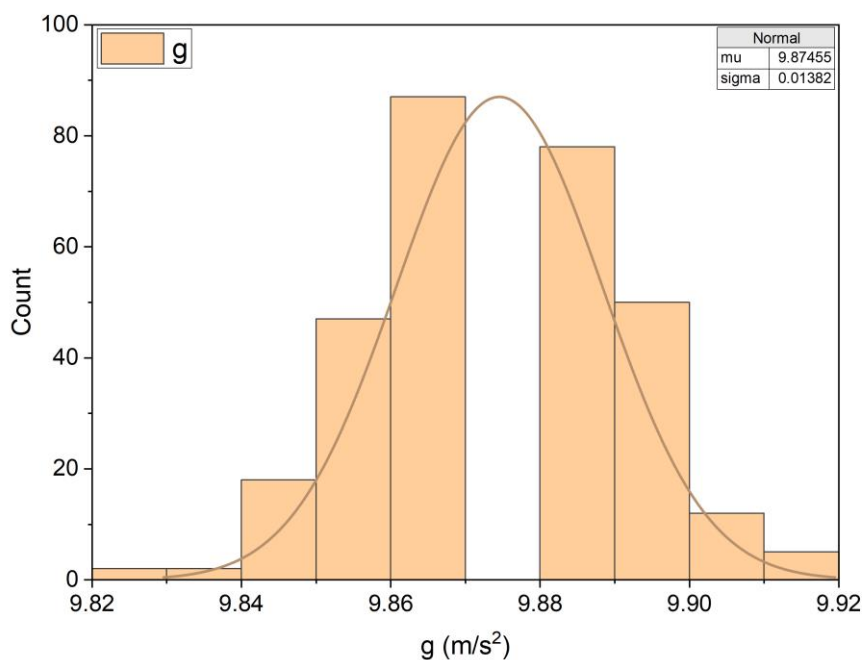
ผลและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

ขั้นแรก หลังจากผู้วิจัยเขียนโปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ทำงานร่วมกับ เซนเซอร์ไจโรสโคปและวัดความเร่ง (BMI160) และ ESP-32 ทำงานร่วมกับเซนเซอร์อินฟราเรด (TCRT5000) เพื่ออ่านค่าของคาบ ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลม ผู้วิจัยทำการตรวจสอบตัวเลขข้อมูลที่ปรากฏบนเว็บไซต์ Google Sheet ซึ่งถูกเลือกใช้ให้เป็นแพลตฟอร์มสำหรับการอ่านข้อมูลได้แบบเรียลไทม์หรือการเก็บ log ของข้อมูลเพื่อใช้วิเคราะห์ในภายหลัง สำหรับตัวเลขข้อมูลที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่ง พบว่าสามารถส่งมายัง Google Sheet Platform ได้อย่างครบถ้วน ตัวอย่างการแสดงผลดังภาพประกอบ 16



	A	B	Accelerometer (m/s ²)			Gyroscope (degree/s)		
	Date	Time	gx	gy	gz	wx	wy	wz
3	6/4/2023	16:28:20	-0.03	-0.08	9.77	-0.26	0.21	0.08
4	6/4/2023	16:28:23	-0.06	-0.08	9.73	-0.34	0.15	0.08
5	6/4/2023	16:28:26	-0.05	-0.08	9.76	-0.21	0.17	0.03
6	6/4/2023	16:28:28	-0.06	-0.08	9.73	-0.23	0.32	0.05
7	6/4/2023	16:28:31	-0.05	-0.09	9.74	-0.18	0.18	0.05
8	6/4/2023	16:28:33	-0.06	-0.08	9.75	-0.32	0.2	0.11
9	6/4/2023	16:28:36	-0.05	-0.09	9.74	-0.32	0.21	0.06
10	6/4/2023	16:28:38	-0.05	-0.09	9.72	-0.38	0.2	-0.02
11	6/4/2023	16:28:41	-0.08	-0.07	9.76	-0.26	0.21	0
12	6/4/2023	16:28:43	-0.04	-0.03	10.02	0.11	-0.05	0.08
13	6/4/2023	16:28:45	-0.04	-0.09	9.75	-0.18	0.23	0.02
14	6/4/2023	16:28:48	-0.07	-0.09	9.75	-0.27	0.2	0.05
15	6/4/2023	16:29:16	-0.05	-0.04	9.89	-0.44	0.47	-0.06
16	6/4/2023	16:29:18	-0.02	-0.01	9.86	0.17	-0.03	-0.03
17	6/4/2023	16:29:20	0	-0.12	9.16	-0.09	-0.4	-0.02

ภาพประกอบ 16 ตัวอย่างหน้าเว็บไซต์ Google Sheet ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่ง



ภาพประกอบ 17 แผนภาพฮิสโตแกรมของค่าความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (\bar{g}) ซึ่งอ่านได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จำนวน 300 จุด

หลังจากนั้นได้ทำการตรวจสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร่งว่าค่าความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (\bar{g}) มีค่าตัวเลขที่ถูกต้องหรือใกล้เคียงความเป็นจริง คือ 9.81 m/s^2 มากน้อยเท่าไร รวมถึงดูการกระจายตัวของตัวเลขที่อ่านได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง ซึ่งผลของการวัดค่าความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (\bar{g}) จำนวน 300 จุด โดยใช้แผนภาพฮิสโตแกรมแสดงผล ดังภาพประกอบ 17 พบว่าค่าความเร่งอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก (\bar{g}) อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริง โดยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 9.87 m/s^2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำมาใช้งานได้

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Date	Time	Count	Period (ms)					
2	2023-06-02	22:15:27	1	4131					
3	2023-06-02	22:15:31	2	4133					
4	2023-06-02	22:15:34	3	3716					
5	2023-06-02	22:15:38	4	3606					
6	2023-06-02	22:15:41	5	3371					
7	2023-06-02	22:15:45	6	3331					
8	2023-06-02	22:15:48	7	3240					
9	2023-06-02	22:15:51	8	3223					
10	2023-06-02	22:15:55	9	3180					
11	2023-06-02	22:15:58	10	3190					
12	2023-06-02	22:16:01	11	3123					
13	2023-06-02	22:16:04	12	2965					
14	2023-06-02	22:16:07	13	2940					
15	2023-06-02	22:16:09	14	2813					
16	2023-06-02	22:16:12	15	2765					
17	2023-06-02	22:16:15	16	2728					

ภาพประกอบ 18 ตัวอย่างหน้าเว็บไซต์ Google Sheet ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลจากเซนเซอร์ อินฟราเรด

ในส่วนการทำงานเบื้องต้นของเซนเซอร์อินฟราเรด ซึ่งทำหน้าที่อ่านค่าคาบของการเคลื่อนที่แบบวงกลมแนวระดับ จากการทดลองเปิดการทำงานของจานหมุนไฟฟ้า พบว่าข้อมูลที่อ่านได้จากเซนเซอร์อินฟราเรดสามารถส่งข้อมูลคาบของการเคลื่อนที่มายัง Google Sheet Platform ที่ต้องการได้ ตัวอย่างการแสดงผล ดังภาพประกอบ 18 รวมถึงผู้วิจัยได้ทดลองจับเวลาคาบการเคลื่อนที่ด้วยนาฬิกาจับเวลา พบว่าคาบที่ผู้วิจัยวัดได้กับคาบที่วัดได้จากเซนเซอร์อินฟราเรดมีความใกล้เคียงกัน จึงสามารถสันนิษฐานได้เบื้องต้นว่าชุดเซนเซอร์อินฟราเรดนี้สามารถนำมาใช้ในการวัดคาบของการเคลื่อนที่แบบวงกลมแนวระดับได้

ดังนั้นในขั้นตอนถัดมา ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลตัวเลขดังกล่าวที่อ่านได้จากชุดเซนเซอร์ทั้งสอง เพื่อวัดความถูกต้อง ความแม่นยำ และระดับความน่าเชื่อถือของเครื่องมือในการวัดปริมาณทางฟิสิกส์เพื่อใช้สำหรับห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ โดยได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การวิเคราะห์ค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับคาบที่วัดได้จากเซนเซอร์อินฟราเรด และการวิเคราะห์ค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว

4.1 การวิเคราะห์ค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง

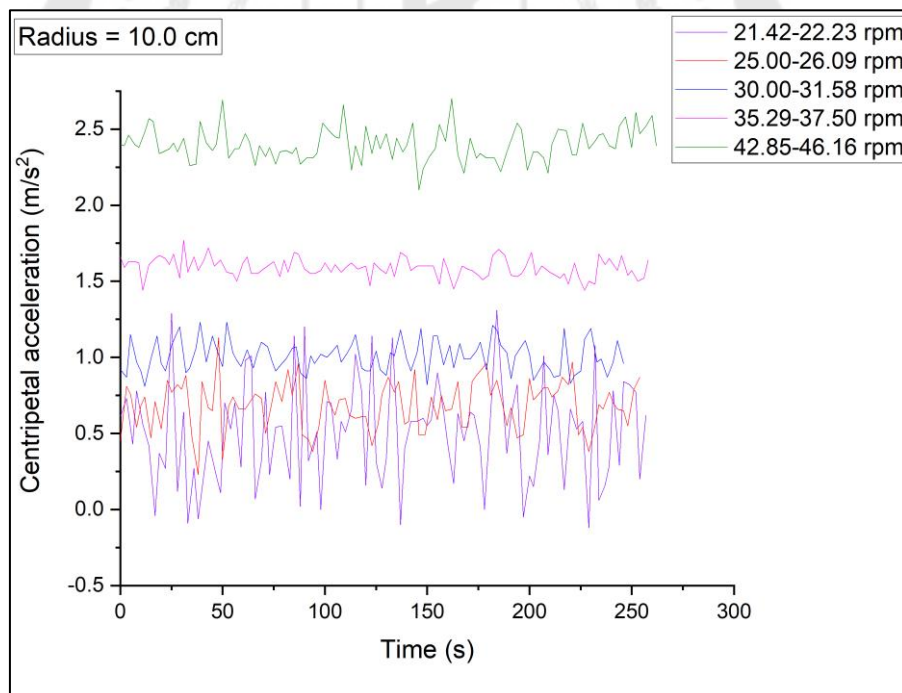
การวิเคราะห์ข้อมูลตัวเลขในส่วนแรกนี้ ผู้วิจัยทำการทดลองหรือทดสอบเซนเซอร์ทั้งสอง โดยการนำค่าความเร็วเชิงมุม (ω) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปมาคำนวณหาความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (a_r) ตามสมการ (5) จะได้เป็นความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป (a_{r1}) แล้วนำมาเทียบกับค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง (a_{r2}) โดยทดลองเปลี่ยนความเร็วรอบหมุน (T) ของมอเตอร์เป็น 5 ระดับ คือ 21.42, 25.00, 30.00, 35.29 และ 42.85 rpm โดยประมาณ และรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลม (r) เป็น 3 ระยะ คือ 10.0, 15.0 และ 20.0 เซนติเมตร ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วน ตามรัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลม ดังตาราง 2, 3 และ 4 ในแต่ละตารางการวิเคราะห์จะเลือกชุดข้อมูลที่วัดได้จากเซนเซอร์ทั้งสอง จำนวน 100 คู่ มาทำการเปรียบเทียบและคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อระบุความแม่นยำและความน่าเชื่อถือระหว่างเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่ง

ตาราง 2 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ณ รัศมี 10.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง)

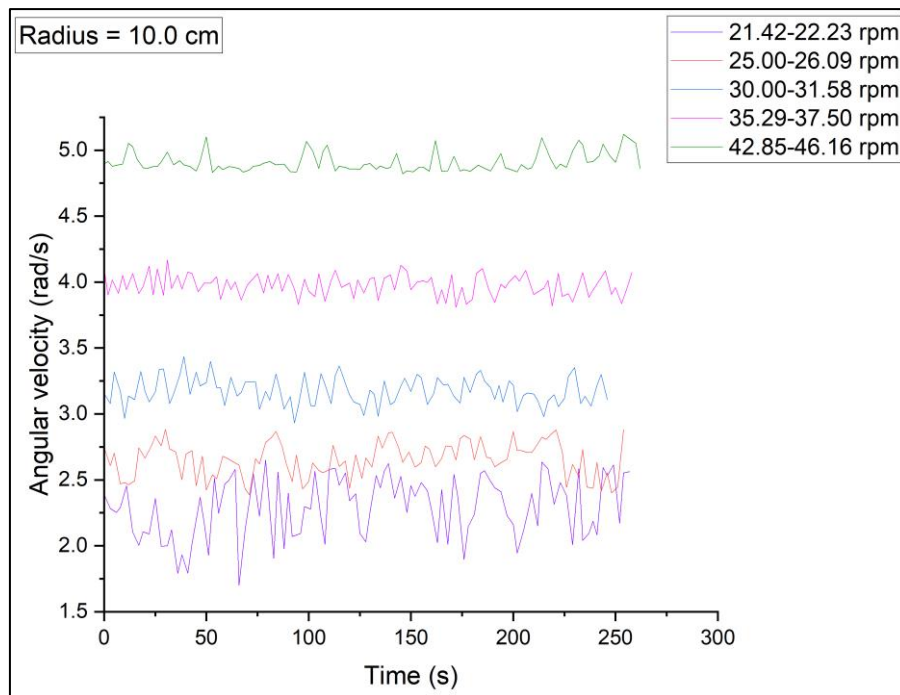
Motor speed (rpm)	Gyroscope ₁			Accelerometer ₂			Mean Diff. a_r (m/s ²)	S.D. of the Differences a_r (m/s ²)	P- value at $\alpha =$ 0.05
	ω_1 (rad/s)	a_{r1} (m/s ²)	S.D. ₁	a_{r2} (m/s ²)	S.D. ₂	a_r (m/s ²)			
21.42~22.23	2.29	0.530	0.104	0.505	0.334	0.236	0.184	0.405	
25.00~26.09	2.66	0.707	0.071	0.687	0.159	0.114	0.092	0.176	
30.00~31.58	3.18	1.010	0.067	1.008	0.102	0.059	0.044	0.773	
35.29~37.50	3.98	1.582	0.066	1.589	0.065	0.046	0.035	0.281	
42.85~46.16	4.91	2.411	0.073	2.398	0.109	0.065	0.050	0.125	

จากตาราง 2 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของผลต่าง (Mean Diff.) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (S.D. of the Differences) จากเซนเซอร์ทั้งสอง ทดลองที่รัศมี 10.0 เซนติเมตร ด้วยความเร็วรอบหมุนทั้ง 5 ระดับ มีค่าไม่สูงมาก อยู่ในช่วงเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ยกเว้น ช่วงความเร็วรอบหมุนประมาณ 21.42-22.23 rpm เมื่อนำผลการทดลองที่วัดได้ในช่วงความถี่นี้มาเปรียบเทียบกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่ได้จากความถี่อื่น ๆ พบว่ามีค่าสูงกว่าช่วงอื่น ๆ ที่มีความถี่สูงกว่า ซึ่งผู้วิจัยค้นพบสาเหตุที่ทำให้ผลการทดลองเป็นเช่นนี้ คือ เกิดจากมอเตอร์ที่เลือกใช้ทำการหมุนเพื่อจำลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับเกิดการสั่นค่อนข้างสูงเมื่อทำการเปิดใช้งานในช่วงความถี่ต่ำ ๆ จึงทำให้ค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่อ่านได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งและความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปมีการกระจายตัวที่ค่อนข้างสูง สามารถสังเกตจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.334 ถือว่าสูงกว่าช่วงความถี่อื่น ๆ และผู้วิจัยได้สร้างกราฟความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางจากเซนเซอร์วัดความเร่ง ($a_{r,2}$) เมื่อเวลาผ่านไป จำนวน 100 จุด ดังภาพประกอบ 19 และกราฟความเร็วเชิงมุมจากเซนเซอร์ไจโรสโคป (ω_1) เมื่อเวลาผ่านไป จำนวน 100 จุด ดังภาพประกอบ 20 ซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟของข้อมูลชุดที่มีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ช่วง 21.42-22.23 rpm จากกราฟทั้งสอง มีการกระจายตัวของข้อมูลที่สูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ



ภาพประกอบ 19 ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จำนวน 100 จุดข้อมูล ณ รัศมี 10.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ



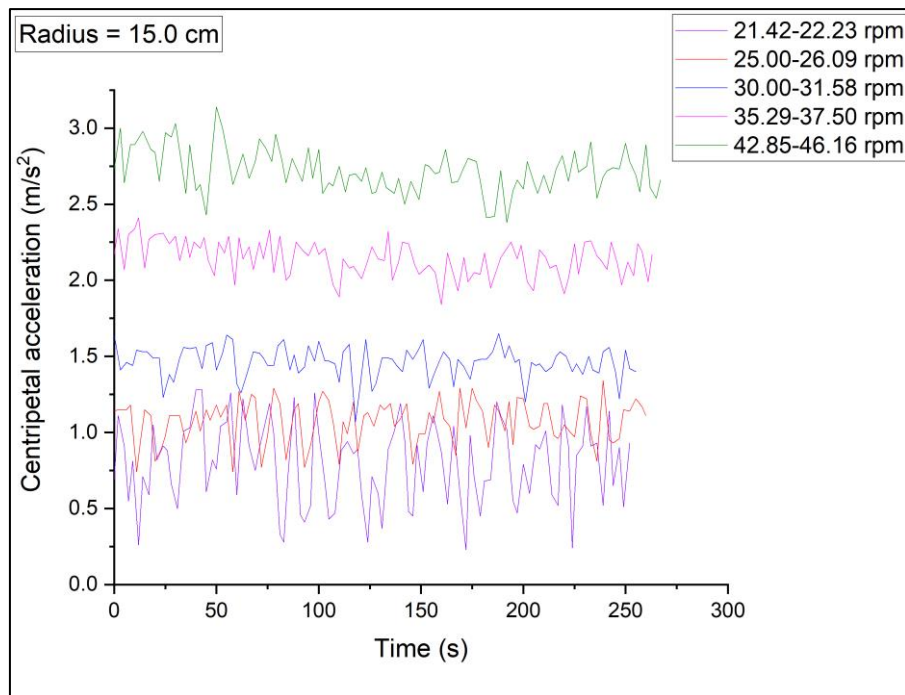
ภาพประกอบ 20 ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป จำนวน 100 จุดข้อมูล ณ รัศมี 10.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ

ในส่วนการทำ t-test paired two sample for means ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าค่า P-value ที่ได้จากการทดลองที่รัศมี 10.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกันทั้ง 5 ระดับ มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่า ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) กล่าวคือ ไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณที่ได้จากเซนเซอร์ทั้งสอง นั้นหมายความว่า การทดลองโดยใช้ชุดเซนเซอร์ไร้สายนี้ที่รัศมี 10.0 เซนติเมตร ปริมาณที่วัดได้ระหว่างเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่ง คือ ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกันและกันได้

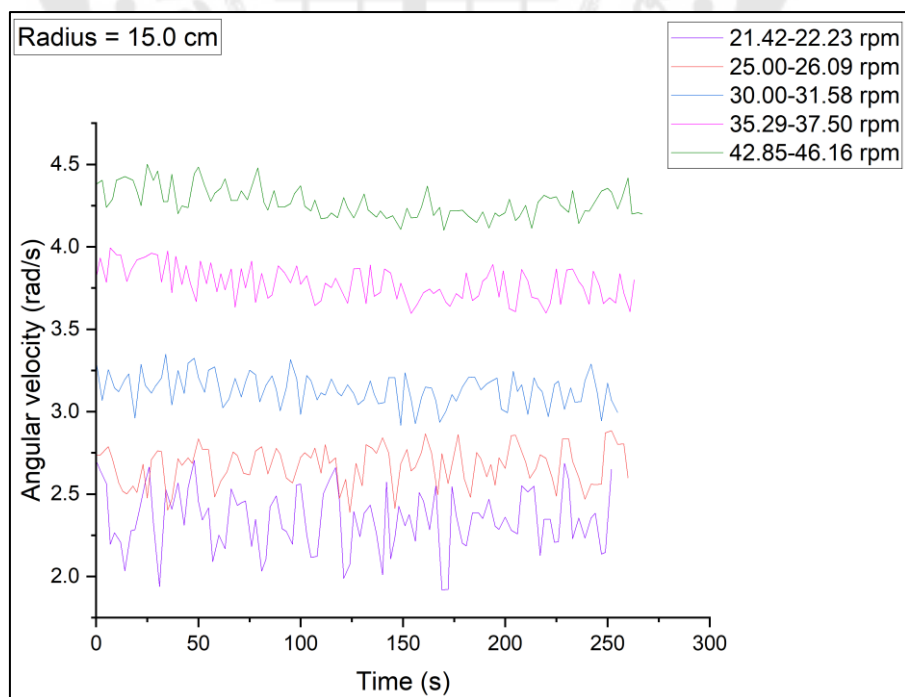
ตาราง 3 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ณ รัศมี 15.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์จีโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง)

Motor speed (rpm)	Gyroscope ₁			Accelerometer ₂		Mean Diff.	S.D. of the Differences	P- value
	ω_1 (rad/s)	$a_{r,1}$ (m/s ²)	S.D. ₁	$a_{r,2}$ (m/s ²)	S.D. ₂	a_r (m/s ²)	a_r (m/s ²)	at $\alpha =$ 0.05
21.42~22.23	2.35	0.830	0.131	0.798	0.271	0.197	0.141	0.187
25.00~26.09	2.67	1.075	0.095	1.075	0.141	0.097	0.077	0.959
30.00~31.58	3.13	1.475	0.090	1.460	0.104	0.081	0.068	0.161
35.29~37.50	3.78	2.142	0.116	2.143	0.117	0.046	0.043	0.872
42.85~46.16	4.33	2.812	0.148	2.807	0.169	0.074	0.057	0.601

จากตาราง 3 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของผลต่าง (Mean Diff.) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (S.D. of the Differences) จากเซนเซอร์ทั้งสอง ทดลองที่รัศมี 15.0 เซนติเมตร ด้วยความเร็วรอบหมุนทั้ง 5 ระดับ มีค่าไม่สูงมาก อยู่ในช่วงเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และมีแนวโน้มของผลต่างฯ ลดลงเมื่อเทียบกับข้อมูล ณ รัศมี 10.0 เซนติเมตร ในการทดลองก่อนหน้านั้น โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างฯ สูงสุด เท่ากับ 0.141 เมื่อความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ประมาณ 21.42-22.23 rpm ผู้วิจัยได้สร้างกราฟค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง ($a_{r,2}$) เมื่อเวลาผ่านไป จำนวน 100 จุด ดังภาพประกอบ 21 และกราฟความเร็วเชิงมุมจากเซนเซอร์จีโรสโคป (ω_1) เมื่อเวลาผ่านไป จำนวน 100 จุด ดังภาพประกอบ 22 เช่นเดียวกับที่ได้กระทำการทดลองก่อนหน้านั้น เพื่อตรวจสอบการสั่นของมอเตอร์เช่นเดิม ซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟของชุดข้อมูลที่มีความเร็วรอบหมุนประมาณ 21.42-22.23 rpm ยังคงมีการกระจายตัวของข้อมูลที่สูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ เช่นเดิม



ภาพประกอบ 21 ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จำนวน 100 จุด ณ รัศมี 15.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ



ภาพประกอบ 22 ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป จำนวน 100 จุดข้อมูล ณ รัศมี 15.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ

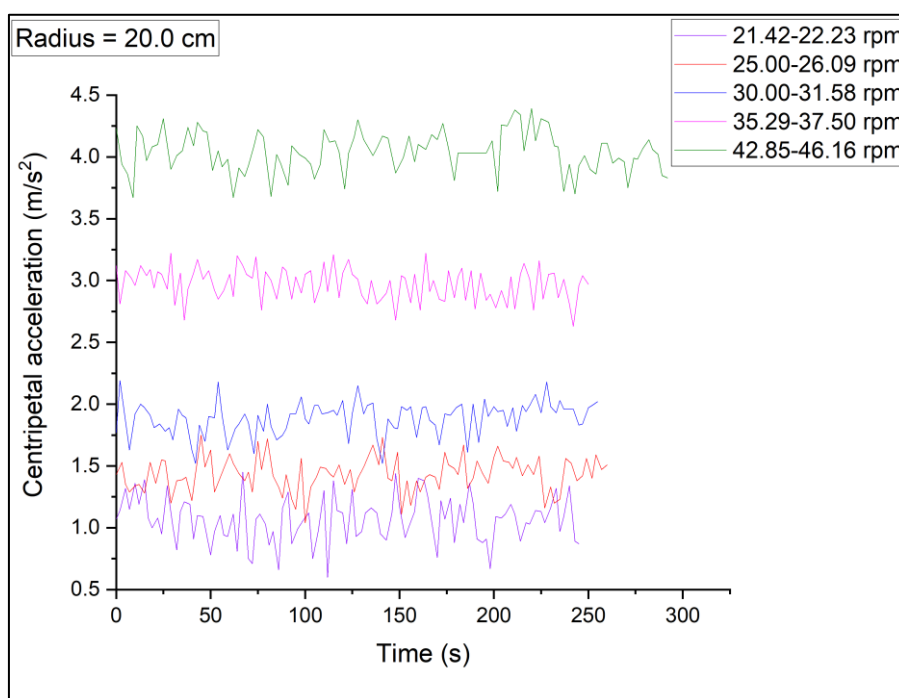
ในส่วนการทำ t-test paired two sample for means ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าค่า P-value ที่ได้จากการทดลองที่รัศมี 15.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกันทั้ง 5 ระดับ มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่า ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) กล่าวคือ ไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของปริมาณที่ได้จากเซนเซอร์ทั้งสอง นั้นหมายความว่า การทดลองโดยใช้ชุดเซนเซอร์ไร้สายนี้ที่รัศมี 15.0 เซนติเมตร ปริมาณที่วัดได้ระหว่างเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร็ว คือ ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกันและกันได้

ตาราง 4 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ณ รัศมี 20.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร็ว)

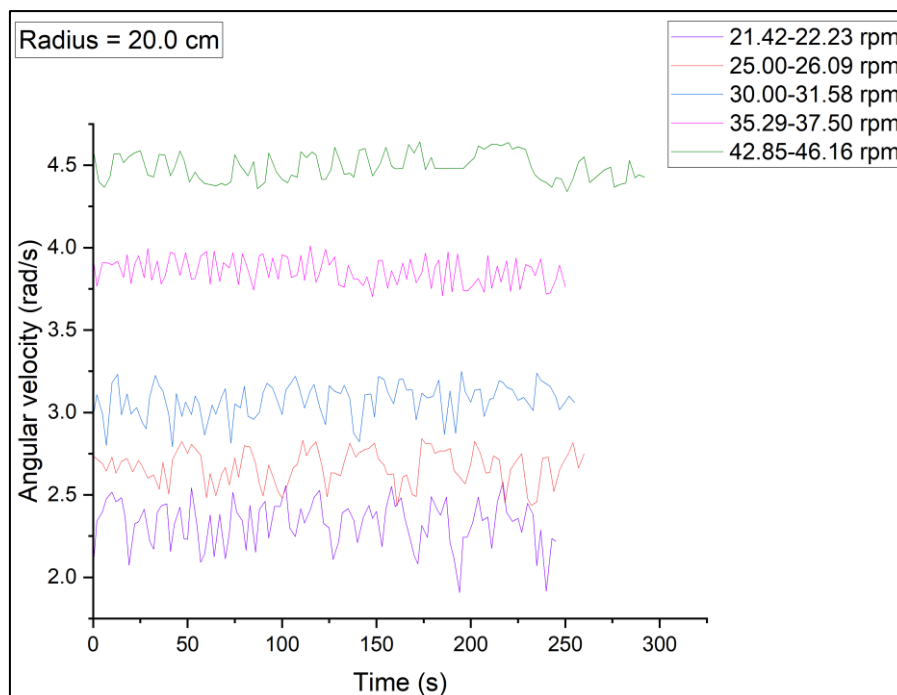
Motor speed (rpm)	Gyroscope ₁			Accelerometer ₂			Mean Diff.	S.D. of the Differences	P- value
	ω_1 (rad/s)	a_{r1} (m/s ²)	S.D. ₁	a_{r2} (m/s ²)	S.D. ₂	a_r (m/s ²)	a_r (m/s ²)	at $\alpha =$ 0.05	
21.42~22.23	2.30	1.083	0.128	1.065	0.184	0.129	0.115	0.284	
25.00~26.09	2.67	1.428	0.112	1.434	0.140	0.106	0.083	0.640	
30.00~31.58	3.07	1.891	0.127	1.887	0.134	0.079	0.057	0.672	
35.29~37.50	3.86	2.978	0.130	2.970	0.134	0.059	0.049	0.311	
42.85~46.16	4.49	4.031	0.149	4.038	0.167	0.095	0.074	0.564	

จากตาราง 4 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของผลต่าง (Mean Diff.) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของเซนเซอร์ (S.D. of the Differences) ทดลองที่รัศมี 15.0 เซนติเมตร ด้วยความเร็วรอบหมุนทั้ง 5 ระดับ มีค่าไม่สูงมาก อยู่ในช่วงเกณฑ์ที่ยอมรับได้ โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างฯ สูงสุด เท่ากับ 0.115 เมื่อความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ประมาณ 21.42-22.23 rpm ผู้วิจัยได้สร้างกราฟค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว (a_{r2}) เมื่อเวลาผ่านไป จำนวน 100 จุด ดังภาพประกอบ 23 และกราฟความเร็วเชิงมุมจากเซนเซอร์ไจโรสโคป (ω_1) เมื่อเวลาผ่านไป จำนวน 100 จุด ดังภาพประกอบ 24 เช่นเดียวกับที่ได้กระทำในการทดลองก่อนหน้า เพื่อตรวจสอบการสั่นของมอเตอร์เช่นเดียวกับการทดลองก่อน

หน้านี้ ซึ่งจะเห็นว่าเส้นกราฟของชุดข้อมูลที่มีความเร็วรอบหมุนประมาณ 21.42-22.23 rpm ยังคงมีการกระจายตัวของข้อมูลที่สูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ เช่นเดิม แต่ไม่มากเท่ากับการทดลองเมื่อวางชุดเซนเซอร์ไว้ส่าย ณ ตำแหน่งรัศมี 10.0 และ 15.0 เซนติเมตร ก่อนหน้านี้



ภาพประกอบ 23 ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จำนวน 100 จุด ณ รัศมี 20.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ



ภาพประกอบ 24 ความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป จำนวน 100 จุดข้อมูล ณ รัศมี 20.0 เซนติเมตร ที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกัน 5 ระดับ

ในการทำ t-test paired two sample for means ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 พบว่าค่า P-value ที่ได้จากการทดลองที่รัศมี 20.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่างกันทั้ง 5 ระดับ มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่า ยอมรับสมมติฐานหลัก (H_0) กล่าวคือ ไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยจากเซนเซอร์ทั้งสอง นั่นหมายความว่าที่รัศมี 20.0 เซนติเมตร ปริมาณที่วัดได้ระหว่างเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร็ว คือ ความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกันและกันได้โดยใช้เซนเซอร์ทั้งสองในการวัด

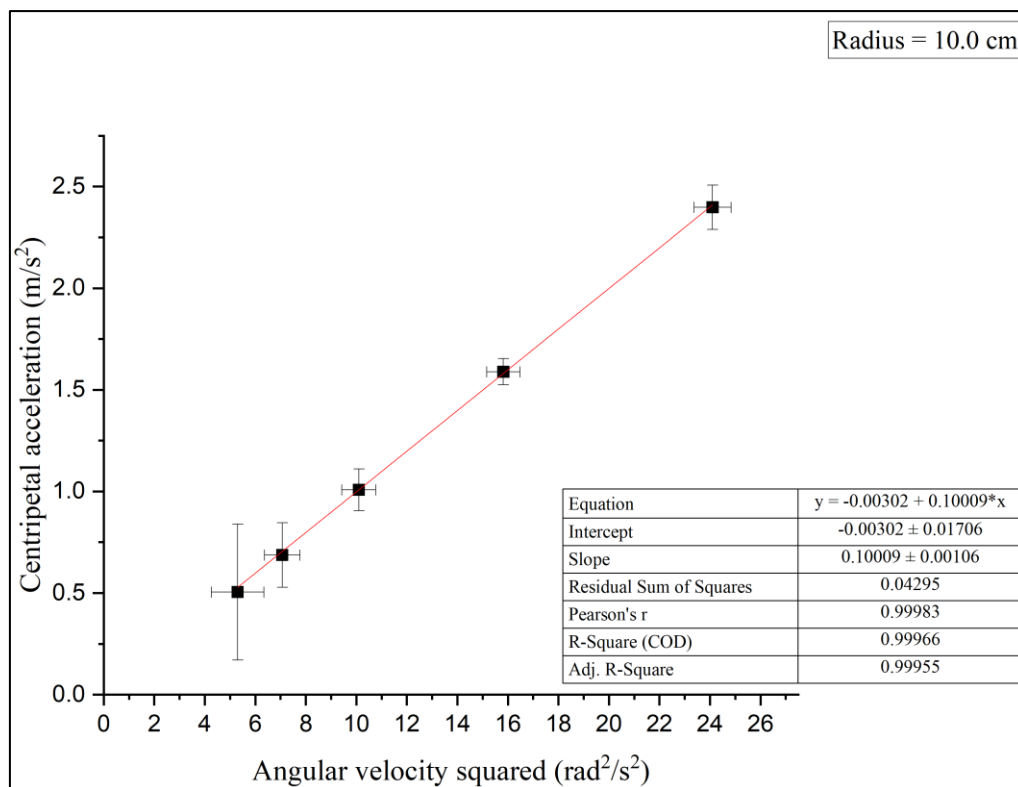
จากผลการทดลองเทียบค่าความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์ทั้งสอง ผลการทดลองส่วนใหญ่ชี้ให้เห็นว่าสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม (ω_1) กับความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (a_{r2}) ตามสมการ (5) ได้ โดยหากเลือกใช้ตัวเลขจากข้อมูลแบบเรียลไทม์เพื่อใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสองปริมาณจะแสดงผลได้ค่อนข้างดีเกือบทุกความเร็วรอบหมุนมอเตอร์ โดยอ้างอิงจากค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (S.D. of the Difference) ที่มีค่าต่ำ อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ยกเว้นในการทดลองที่มีความเร็วรอบหมุนมอเตอร์ในช่วงความถี่ต่ำ (เช่น 21.42-22.23 rpm) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (S.D. of the Difference) จะมีค่าสูงมากขึ้น ทำให้การแสดงผล

ความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสองด้วยตัวเลขจากข้อมูลแบบเรียลไทม์อาจจะไม่เหมาะสมและทำได้ไม่ดี หากใช้ชุดมอเตอร์นี้ในการจำลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับ ควรหลีกเลี่ยงการทดลองในช่วงความถี่รอบหมุนต่ำ ๆ

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ต่อไปโดยการนำค่าเฉลี่ยของปริมาณทั้งสอง คือ ความเร็วเชิงมุมจากการวัดด้วยเซนเซอร์ไจโรสโคป (ω_1) และความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางจากการวัดด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง ($a_{r,2}$) โดยมีข้อมูลจำนวน 100 คู่ มาทดสอบดูความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองตามสมการ (5) ว่าค่าเฉลี่ยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกันและกันได้ดีหรือไม่ หากมีจำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองโดยมีช่วงความถี่รอบหมุนของมอเตอร์ต่ำ

ตาราง 5 ค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 10.0 เซนติเมตร (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง)

Motor speed (rpm)	Gyroscope ₁		Accelerometer ₂	
	ω_1^2 (rad/s ²)	S.D. of ω_1^2	$a_{r,2}$ (m/s ²)	S.D. of $a_{r,2}$
21.42~22.23	5.300	1.041	0.505	0.334
25.00~26.09	7.069	0.705	0.687	0.159
30.00~31.58	10.098	0.665	1.008	0.102
35.29~37.50	15.822	0.662	1.588	0.065
42.85~46.16	24.107	0.734	2.398	0.109

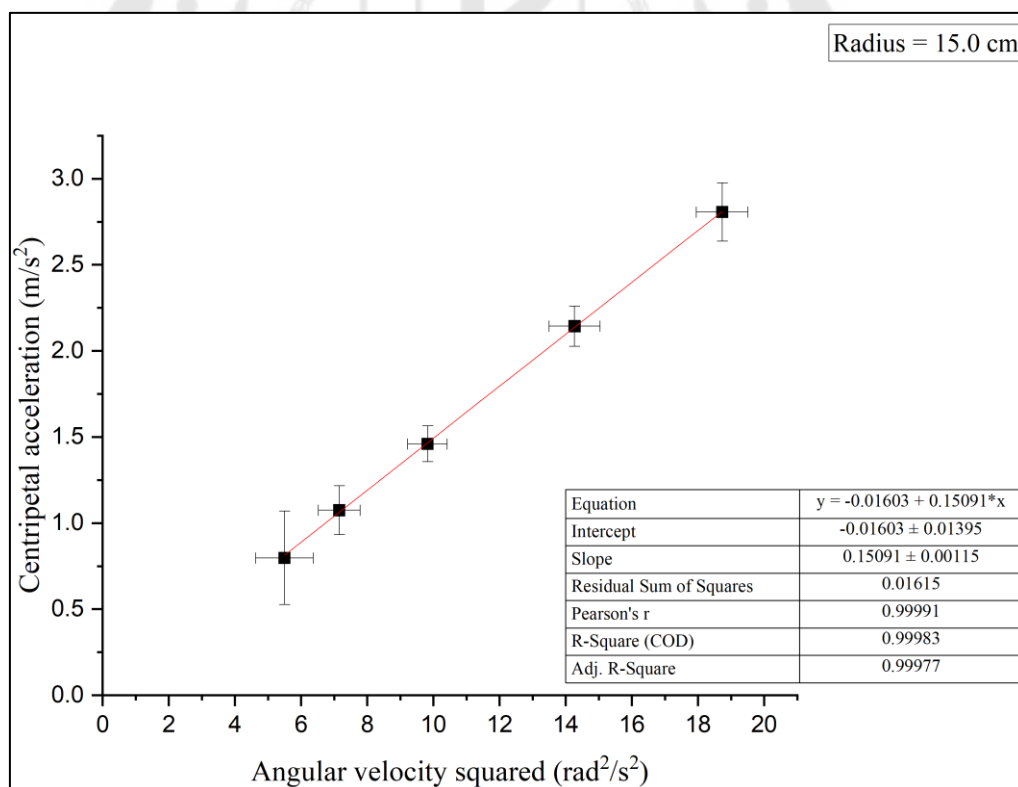


ภาพประกอบ 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์โรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 10.0 เซนติเมตร

จากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์โรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 10.0 เซนติเมตร ได้ผลดังตาราง 5 เมื่อนำมาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองดังภาพประกอบ 25 พบว่ากราฟที่ได้เป็นเส้นตรงโดยมีค่า adjusted R-Square ที่มากกว่า 0.99 ประกอบกับความชันของเส้นตรงนี้ ซึ่งก็คือรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลม มีค่าเท่ากับ 0.100 เมตร ตรงกับรัศมีที่ทำการวัดในขั้นตอนการติดตั้งชุดเซนเซอร์ลงบนจานหมุนก่อนการทดลอง (10.0 เซนติเมตร) แสดงให้เห็นว่าสามารถนำค่าเฉลี่ยของปริมาณทั้งสองมาแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ (5) ได้ แม้ว่าจะมีผลทดลองที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่ำมาเกี่ยวข้องก็ตาม จุดข้อมูลก็ยังอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน

ตาราง 6 ค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 15.0 เซนติเมตร (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร็ว)

Motor speed (rpm)	Gyroscope ₁		Accelerometer ₂	
	ω_1^2 (rad/s ²)	S.D. of ω_1^2	$a_{r,2}$ (m/s ²)	S.D. of $a_{r,2}$
21.42~22.23	5.500	0.871	0.798	0.271
25.00~26.09	7.154	0.630	1.074	0.141
30.00~31.58	9.825	0.598	1.460	0.104
35.29~37.50	14.270	0.772	2.143	0.117
42.85~46.16	18.731	0.783	2.807	0.169

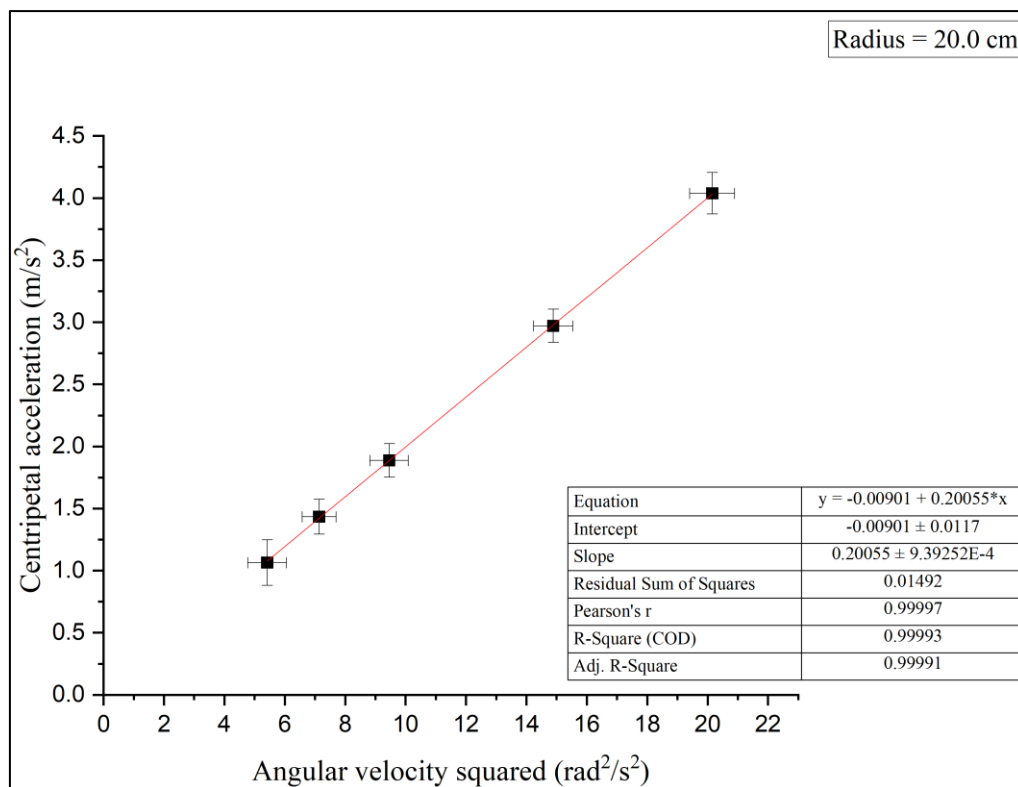


ภาพประกอบ 26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร็วเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร็ว จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 15.0 เซนติเมตร

จากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 15.0 เซนติเมตร ได้ผลดังตาราง 6 เมื่อนำมาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองดังภาพประกอบ 26 พบว่ากราฟที่ได้เป็นเส้นตรงโดยมีค่า adjusted R-Square ที่มากกว่า 0.99 ประกอบกับความชันของเส้นตรงนี้ ซึ่งก็คือรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลม มีค่าเท่ากับ 0.151 เมตร ใกล้เคียงกับรัศมีที่ทำการวัดในขั้นตอนการติดตั้งชุดเซนเซอร์ลงบนจานหมุนก่อนการทดลอง (15.0 เซนติเมตร) แสดงให้เห็นว่าสามารถนำค่าเฉลี่ยของปริมาณทั้งสองมาแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ (5) ได้ แม้ว่าจะมีผลการทดลองที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่ำมาเกี่ยวข้อง จุดข้อมูลก็ยังอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกันกับรัศมี 10.0 เซนติเมตร ก่อนหน้านี้

ตาราง 7 ค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 20.0 เซนติเมตร (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 2 แทนข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง)

Motor speed (rpm)	Gyroscope ₁		Accelerometer ₂	
	ω_1^2 (rad/s ²)	S.D. of ω_1^2	$a_{r,2}$ (m/s ²)	S.D. of $a_{r,2}$
21.42~22.23	5.40	0.642	1.065	0.184
25.00~26.09	7.13	0.559	1.434	0.140
30.00~31.58	9.45	0.637	1.887	0.134
35.29~37.50	14.88	0.651	2.970	0.134
42.85~46.16	20.15	0.747	4.038	0.167



ภาพประกอบ 27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 20.0 เซนติเมตร

จากการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมกำลังสอง (ω_1^2) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคป และค่าเฉลี่ยของความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) ที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความเร่ง จากข้อมูลจำนวน 100 คู่ ทดลองที่รัศมี 20.0 เซนติเมตร ได้ผลดังตาราง 7 เมื่อนำมาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองดังภาพประกอบ 27 พบว่ากราฟที่ได้เป็นเส้นตรงโดยมีค่า adjusted R-Square ที่มากกว่า 0.99 ประกอบกับความชันของเส้นตรงนี้ ซึ่งก็คือรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลม มีค่าเท่ากับ 0.201 เมตร ใกล้เคียงกับรัศมีที่ทำการวัดในขั้นตอนการติดตั้งชุดเซนเซอร์ลงบนจานหมุนก่อนการทดลอง (20.0 เซนติเมตร) แสดงให้เห็นว่าสามารถนำค่าเฉลี่ยของปริมาณทั้งสองมาแสดงความสัมพันธ์ดังสมการ (5) ได้ แม้ว่าจะมีผลทดลองที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่ำมาเกี่ยวข้อง จุดข้อมูลก็ยังอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับรัศมี 10.0 และ 15.0 เซนติเมตร ก่อนหน้านี้

จากการทดลองวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่ง สามารถสรุปได้ว่าปริมาณที่ได้จากเซนเซอร์ทั้งสอง ประกอบด้วยความเร็วเชิงมุม (ω_1) และความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง ($a_{r,2}$) สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (5) โดยหากพิจารณาจากการนำข้อมูลแบบเรียลไทม์มาใช้ทันทีทันใด การแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ดังกล่าวทำได้ดีเมื่อทดลองที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์สูง โดยอ้างอิงจากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (S.D. of the Differences) และค่า P-value จากการทำ t-test มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 ควรหลีกเลี่ยงการทดลองที่มีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่ำ ๆ เนื่องจากการแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองอาจจะไม่เหมาะสมและทำได้ไม่ค่อยดี อันเป็นผลมาจากการสั่นของมอเตอร์ที่ทำงานในช่วงความถี่ต่ำ ทำให้ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่อ่านจากเซนเซอร์วัดความเร่งมีการกระจายตัวที่มากกว่าความถี่อื่น ๆ ทางเลือกในการแสดงและทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับ ตามความสัมพันธ์ตามสมการ (5) ที่ดีที่สุดคือ การเลือกใช้ค่าเฉลี่ยจากการวัดหลาย ๆ ครั้ง แทนการใช้ข้อมูลแบบเรียลไทม์ทันทีทันใด แม้ว่าจะทำการทดลองที่ความเร็วรอบหมุนมอเตอร์ต่ำก็ตาม ผลที่ได้จากค่าเฉลี่ยก็ยังคงแสดงให้เห็นผู้ทดลองหรือผู้เขียนเห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางได้ดีมากกว่าการใช้ข้อมูลแบบเรียลไทม์ ดังที่แสดงให้เห็นจากกราฟความสัมพันธ์ในภาพประกอบ 25, 26 และ 27

4.2 การวิเคราะห์ค่าความเร็วเชิงมุมที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับคาบที่วัดได้จากเซนเซอร์อินฟราเรด

การวิเคราะห์ข้อมูลตัวเลขในส่วนที่สองนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองวัดความเร็วเชิงมุม (ω) และคาบของเวลา (T) ที่อ่านได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์อินฟราเรดตามลำดับ โดยทดลองที่ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 5 ระดับ คือ 21.42, 25.00, 30.00, 35.29 และ 42.85 rpm โดยประมาณ และรัศมีของการเคลื่อนที่แบบวงกลมเป็น 3 ระยะ คือ 10.0, 15.0 และ 20.0 เซนติเมตร ซึ่งสามารถแสดงผลการวิเคราะห์ออกเป็น 5 ส่วน ตามความถี่การหมุนของมอเตอร์ ดังตาราง 8, 9, 10, 11 และ 12 ในแต่ละส่วนจะเลือกใช้ชุดข้อมูลความเร็วเชิงมุมและคาบในระยะช่วงเวลาที่ทำการเก็บข้อมูล 100 คู่ ของเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่งที่วิเคราะห์มาก่อนหน้านี้ในหัวข้อ 4.1 ทำการเปรียบเทียบและคำนวณหาค่าเฉลี่ย เพื่อระบุความแม่นยำและความน่าเชื่อถือระหว่างเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์อินฟราเรด

ตาราง 8 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 21.42-22.23 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด)

r (cm)	IR sensor ₃			Gyroscope ₁		Diff. of ω averaged (rad/s)
	T_3 (ms)	ω_3 (rad/s)	S.D. ₃	ω_1 (rad/s)	S.D. ₁	
10.0	2,681	2.34	0.04	2.29	0.23	0.05
15.0	2,658	2.36	0.02	2.35	0.19	0.02
20.0	2,698	2.33	0.02	2.32	0.14	0.01

จากตาราง 8 การทดลองที่รัศมี 10.0, 15.0 และ 20.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 21.42-22.23 rpm พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับค่าที่คำนวณจากคาบของเซนเซอร์อินฟราเรดมีค่าต่างกันน้อยมาก โดยมีผลต่างสูงสุด เท่ากับ 0.05 เรเดียน/วินาที เมื่อรัศมีเท่ากับ 10.0 เซนติเมตร

ตาราง 9 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 25.00-26.09 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด)

r (cm)	IR sensor ₃			Gyroscope ₁		Diff. of ω averaged (rad/s)
	T_3 (ms)	ω_3 (rad/s)	S.D. ₃	ω_1 (rad/s)	S.D. ₁	
10.0	2,351	2.67	0.02	2.66	0.13	0.02
15.0	2,345	2.68	0.02	2.67	0.12	0
20.0	2,353	2.67	0.01	2.67	0.11	0

จากตาราง 9 การทดลองที่รัศมี 10.0, 15.0 และ 20.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 25.00-26.09 rpm พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับค่าที่คำนวณจากคาบของเซนเซอร์อินฟราเรดมีค่าต่างกันน้อยมาก โดยมีผลต่างสูงสุด เท่ากับ 0.02 เรเดียน/วินาที เมื่อรัศมีเท่ากับ 10.0 เซนติเมตร

ตาราง 10 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 30.00-31.58 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด)

r (cm)	IR sensor ₃			Gyroscope ₁		Diff. of ω averaged (rad/s)
	T_3 (ms)	ω_3 (rad/s)	S.D. ₃	ω_1 (rad/s)	S.D. ₁	
10.0	1,964	3.20	0.04	3.18	0.10	0.02
15.0	1,997	3.15	0.03	3.13	0.10	0.01
20.0	2,046	3.07	0.01	3.07	0.10	0

จากตาราง 10 การทดลองที่รัศมี 10.0, 15.0 และ 20.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 30.00-31.58 rpm พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับค่าที่คำนวณจากคาบของเซนเซอร์อินฟราเรดมีค่าต่างกันน้อยมาก โดยมีผลต่างสูงสุด เท่ากับ 0.02 เรเดียน/วินาที เมื่อรัศมีเท่ากับ 10.0 เซนติเมตร

ตาราง 11 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 35.29-37.50 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด)

r (cm)	IR sensor ₃			Gyroscope ₁		Diff. of ω averaged (rad/s)
	T_3 (ms)	ω_3 (rad/s)	S.D. ₃	ω_1 (rad/s)	S.D. ₁	
10.0	1,576	3.99	0.02	3.98	0.08	0.01
15.0	1,661	3.78	0.05	3.78	0.10	0.01
20.0	1,623	3.87	0.03	3.86	0.08	0.01

จากตาราง 11 การทดลองที่รัศมี 10.0, 15.0 และ 20.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 35.29-37.50 rpm พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับค่าที่คำนวณจากคาบของเซนเซอร์อินฟราเรดมีค่าต่างกันน้อยมาก โดยมีผลต่าง เท่ากับ 0.01 เรเดียน/วินาที ทุกรัศมีการทดลอง

ตาราง 12 ค่าเฉลี่ยจากการวัดความเร็วเชิงมุมและคาบจากการเคลื่อนที่แบบวงกลม ณ ความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 42.85-46.16 rpm (ตัวเลขกำกับ 1 แทนข้อมูลของเซนเซอร์ไจโรสโคป และ 3 แทนข้อมูลของเซนเซอร์อินฟราเรด)

r (cm)	IR sensor ₃			Gyroscope ₁		Diff. of ω averaged (rad/s)
	T_3 (ms)	ω_3 (rad/s)	S.D. ₃	ω_1 (rad/s)	S.D. ₁	
10.0	1,270	4.95	0.01	4.91	0.07	0.04
15.0	1,467	4.28	0.06	4.27	0.09	0.01
20.0	1,387	4.53	0.04	4.49	0.08	0.04

จากตาราง 12 การทดลองที่รัศมี 10.0, 15.0 และ 20.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ 42.85-46.16 rpm พบว่าค่าเฉลี่ยของความเร็วเชิงมุมระหว่างค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปเทียบกับค่าที่คำนวณจากคาบของเซนเซอร์อินฟราเรดมีค่าต่างกันน้อยมาก โดยมีผลต่างสูงสุด เท่ากับ 0.04 เรเดียน/วินาที เมื่อรัศมีเท่ากับ 10.0 เซนติเมตร

จากผลการวิเคราะห์ที่ได้ในตาราง 8, 9, 10, 11 และ 12 ค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุม (ω) ที่ได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์อินฟราเรดมีค่าต่างกันน้อยมาก ประกอบกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความเร็วเชิงมุมจากเซนเซอร์ทั้งสองมีค่าน้อยมากในทุกรัศมีการทดลอง (ค่าสูงสุด เท่ากับ 0.23) แสดงให้เห็นว่าสามารถนำค่าเฉลี่ยของคาบ (T) ที่วัดได้จากเซนเซอร์อินฟราเรดและความเร็วเชิงมุม (ω) ที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปมาแสดงความสัมพันธ์ตามสมการความสัมพันธ์ $\omega = 2\pi/T$ ได้ นั่นหมายถึงรวมถึงการนำค่าเฉลี่ยของคาบที่วัดได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปไปแสดงความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยความถี่เข้าสู่ศูนย์กลางที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดความถี่ซึ่งวิเคราะห์ไปแล้วในหัวข้อ 4.1 ตามสมการ (5) ได้อีกด้วย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยเรื่องการศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมแนวระดับโดยใช้ชุดเซนเซอร์แบบไร้สาย โดยมีชุดเซนเซอร์แบบไร้สายเป็นหัวใจหลักของงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบขึ้นจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 เซนเซอร์ไจโรสโคป เซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์อินฟราเรด ทำการเขียนโปรแกรมให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้สามารถทำงานร่วมกันและส่งข้อมูลตามที่ต้องการ ผู้วิจัยได้นำชุดเซนเซอร์นี้ไปทดลองในเหตุการณ์จำลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับบนจานหมุนไฟฟ้าที่สร้างขึ้น เพื่อวัดปริมาณทางฟิสิกส์ ซึ่งประกอบด้วยคาบของเวลา ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง แล้วนำปริมาณทางฟิสิกส์เหล่านี้มาวิเคราะห์ความถูกต้อง ความแม่นยำ และความเชื่อมั่นของเซนเซอร์ด้วยวิธีการทางสถิติ สามารถสรุปงานวิจัยนี้โดยแบ่งหัวข้อในการสรุปการดำเนินการทั้งหมดดังต่อไปนี้

- 1 สรุปผลการวิจัย
- 2 อภิปรายผลการวิจัย
- 3 ข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

ผู้วิจัยมีจุดมุ่งหมายที่จะสร้างอุปกรณ์การทดลองเรื่องการศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับที่จะช่วยลดความคลาดเคลื่อนจากการทดลองของชุดการทดลองในห้องเรียนปัจจุบันลง ซึ่งได้สังเกตเห็นไมโครคอนโทรลเลอร์อันเปรียบเสมือนเครื่องคิดเลขขนาดเล็กที่สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เช่น เซนเซอร์ ผู้วิจัยจึงได้เลือกหนึ่งในไมโครคอนโทรลเลอร์ยอดนิยม คือ ESP8266 และ ESP-32 เป็นอุปกรณ์หลักในงานวิจัยนี้ เนื่องจากราคาที่ไม่สูง ประกอบกับมีโมดูลไวไฟ (Wi-Fi Module) ภายในตัวเองโดยไม่ต้องซื้อมาติดตั้งเพิ่มเติม เมื่อนำมาประกอบเข้ากับเซนเซอร์ไจโรสโคป เซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์อินฟราเรด เพื่อใช้วัดปริมาณทางฟิสิกส์ในเรื่องการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับ หลังจากเขียนโปรแกรมให้อุปกรณ์เหล่านี้สามารถทำงานร่วมกันได้แล้ว พบว่าชุดเซนเซอร์ไร้สายดังกล่าวที่สร้างขึ้น สามารถวัดคาบของเวลา ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลม และสามารถส่งข้อมูลแบบไร้สายผ่านช่องทาง Wi-Fi ไปยังแพลตฟอร์ม Google Sheet เพื่อการอ่านและบันทึกผลการทดลองได้โดยปราศจากมนุษย์จับบันทึก ทำให้ลดโอกาสในการเกิดความคลาดเคลื่อนอันเกิดจากมนุษย์ได้ตามจุดประสงค์ของงานวิจัย

ในส่วนของผลการทดลองความถูกต้อง ความแม่นยำ และความน่าเชื่อถือของชุดเซนเซอร์ไร้สายกับเหตุการณ์จำลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับบนจานหมุนไฟฟ้า เพื่อทำการยืนยันว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่แบบวงกลมแนวระดับได้อย่างถูกต้อง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลมตามสมการ (5) สามารถแสดงให้เห็นได้ด้วยการวัดปริมาณทั้งสองด้วยเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่ง โดยมีค่าเฉลี่ยของผลต่าง ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่าง และ p-value จาก t-test เป็นตัวบ่งบอกถึงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของข้อมูล จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าทางสถิติเหล่านี้อยู่ในช่วงเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ทำให้ผู้ทดลองหรือผู้เรียนสามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางจากเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่งได้ ในส่วนของความสัมพันธ์ระหว่างคาบและความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่แบบวงกลม พบว่า ปริมาณทั้งสองที่วัดได้จากเซนเซอร์อินฟราเรดและเซนเซอร์ไจโรสโคปสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ตามสมการ $\omega = 2\pi/T$ ตัวบ่งบอกความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของเซนเซอร์ทั้งสอง คือ ผลต่างของค่าเฉลี่ย ที่มีค่าต่างกั นน้อยมาก ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าชุดเซนเซอร์แบบไร้สายซึ่งประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และเซนเซอร์ต่าง ๆ นี้ สามารถนำไปใช้ทดลองเพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ของปริมาณทางฟิสิกส์ในหัวข้อการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับภายในห้องเรียนหรือห้องปฏิบัติการทางฟิสิกส์ในระดับมัธยมตอนปลายได้

อภิปรายผลการวิจัย

สำหรับชุดเซนเซอร์แบบไร้สายที่ประกอบขึ้นจาก ESP8266 เซนเซอร์ไจโรสโคป และเซนเซอร์วัดความเร่ง สามารถนำไปวัดและแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางได้ โดยจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่า หากนำข้อมูลแบบเรียลไทม์ ณ ขณะนั้น ๆ มาคำนวณตามสมการ (5) เพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองสามารถทำได้ มีความถูกต้องและความน่าเชื่อถือในระดับที่ยอมรับได้ในหลาย ๆ ช่วงความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ หลาย ๆ ช่วงของรัศมีวงกลม แต่มีข้อควรหลีกเลี่ยงในการนำข้อมูลเหล่านี้มาใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสอง คือ ในช่วงการทดลองที่มีความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่ำ ๆ การกระจายตัวของข้อมูลความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางจากเซนเซอร์วัดความเร่งค่อนข้างสูง เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าที่เลือกใช้งานวิจัยนี้มีการสั่นที่ค่อนข้างสูงเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความเร็วต่ำ ๆ ดังที่เห็นจากผลการทดลองที่รัศมี 10.0 เซนติเมตร โดยมีความเร็วรอบหมุน 21.42-22.23 rpm ผลการทดลองได้ค่าเฉลี่ยผลต่างฯ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลต่างฯ คือ 0.236

และ 0.183 เมตร/วินาที² ตามลำดับ ซึ่งถือว่าสูงเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางที่อ่านได้จากเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่ง คือ 0.530 และ 0.505 เมตร/วินาที² ตามลำดับ

การแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของการเคลื่อนที่แบบวงกลมจากเซนเซอร์ไจโรสโคปและเซนเซอร์วัดความเร่งทำได้ดีเมื่อใช้ค่าเฉลี่ยจากหลาย ๆ จุดข้อมูลแทนการใช้ข้อมูลแบบเรียลไทม์ ณ ขณะใดขณะหนึ่ง ดังที่เห็นในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความเร็วเชิงมุมกำลังสองและค่าเฉลี่ยความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางในภาพประกอบ 25, 26 และ 27 ไม่ว่าจะเปลี่ยนเงื่อนไขการทดลองไปอย่างไร ความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าจะสูงหรือต่ำ กราฟแสดงความสัมพันธ์ก็ยังคงมีความเป็นเส้นตรงสูงเช่นเดิม ดังที่เห็นจากค่า adjusted R-square ที่ใกล้เคียง 1 มาก ในทุกการทดลอง ประกอบกับค่าความชันของเส้นตรงในแต่ละกราฟมีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับรัศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลมที่ได้วัดไว้ในขั้นตอนติดตั้งชุดเซนเซอร์ลงบนจานหมุน ตามสมการ (5)

การวัดคาบและความเร็วเชิงมุมของการเคลื่อนที่แบบวงกลมจากเซนเซอร์อินฟราเรดและเซนเซอร์ไจโรสโคป เพื่อใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสองตามสมการ $\omega = 2\pi/T$ ทำได้ดีทุกช่วงความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ และทุกระศมีการเคลื่อนที่แบบวงกลม ดังที่แสดงให้เห็นจากผลต่างของค่าเฉลี่ยปริมาณทั้งสอง โดยมีค่าสูงสุด เท่ากับ 0.05 เรเดียน/วินาที เท่านั้น ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

ข้อเสนอแนะ

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อการอภิปรายเรื่องการนำข้อมูลแบบเรียลไทม์มาใช้คำนวณเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมและความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางตามสมการ (5) ให้ผลการทดลองที่ไม่ดี เมื่อทำการทดลองด้วยความเร็วรอบหมุนของมอเตอร์ต่ำ ๆ เนื่องจากเกิดการสั่นสะเทือนจากมอเตอร์ไฟฟ้าค่อนข้างสูงเมื่อมอเตอร์ทำงานที่ความถี่ต่ำ ๆ ดังนั้นหากต้องการข้อมูลแบบเรียลไทม์ในช่วงความถี่ต่ำที่ให้อุณหภูมิของข้อมูลดีขึ้น ควรเปลี่ยนมอเตอร์ไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพดีกว่านี้ เนื่องด้วยในงานวิจัยนี้พยายามสร้างชุดทดลองการเคลื่อนที่แบบวงกลมในแนวระดับที่ใช้งบประมาณในการผลิตน้อยที่สุด สามารถผลิตได้ง่ายในชุมชนทั่วไป โดยมุ่งเน้นเพียงให้ชุดการทดลองนี้มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการทดลองแบบเดิม ๆ จึงไม่ได้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีคุณภาพสูงและราคาแพงตั้งแต่ต้น เนื่องจากงบประมาณสำหรับสร้างอุปกรณ์ทดลองก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ทำให้ยากต่อการผลิตจริงในจำนวนมากได้ รวมถึงการพิจารณาติดตั้งหน้าจอ LCD,

LED หรือ OLED ขนาดเล็กให้กับระบบเพิ่มเติมจะทำให้การอ่านข้อมูลการทดลองขณะที่ไม่มีอินเทอร์เน็ตเกิดขึ้นได้ ซึ่งเป็นข้อเสนอแนะที่จะทำเพิ่มเติมในอนาคต



บรรณานุกรม

- EIProCus Technologies Pvt Ltd. (2019). Gyroscope Sensor Working and Its Applications. Retrieved from <https://www.elprocus.com/gyroscope-sensor/>
- Erickson, M., Ochoa, R., & Ochoa, C. (2013). The Wiimote on the Playground. *The Physics Teacher*, 51(5), 272-275. doi:10.1119/1.4801352
- Hochberg, K., Gröber, S., Kuhn, J., & Müller, A. (2014). The spinning disc: studying radial acceleration and its damping process with smartphone acceleration sensors. *Physics Education*, 49(2), 137-140. doi:10.1088/0031-9120/49/2/137
- Ken RobotSiam. (2016). การใช้งาน IR Infrared Obstacle Avoidance Sensor Module. Retrieved from <https://robotsiam.blogspot.com/2016/10/ir-infrared-obstacle-avoidance-sensor.html>
- KKdeveloper. (2017). NodeMCU คืออะไร. Retrieved from <http://sat2you.com/web/2017/01/31/nodemcu-กับ-iot-ตอนที่-1-nodemcu-คืออะไร/>
- Patrinopoulos, M., & Kefalis, C. (2015). Angular velocity direct measurement and moment of inertia calculation of a rigid body using a smartphone. *The Physics Teacher*, 53(9), 564-565. doi:10.1119/1.4935774
- Puttharugsa, C., Khemmani, S., Utayarat, P., & Luangtip, W. (2016). Investigation of the rolling motion of a hollow cylinder using a smartphone. *European Journal of Physics*, 37(5), 055004. doi:10.1088/0143-0807/37/5/055004
- Puttharugsa, C., Khemmani, S., Wicharn, S., & Plaipichit, S. (2019). Determination of the coefficient of static friction from circular motion using a smartphone's sensors. *Physics Education*, 54(5), 053007. doi:10.1088/1361-6552/ab35c2
- Serway, R. A. (2014). *Physics for scientists and engineers with modern physics* (9th ed., ed.): Singapore : Brooks/Cole Cengage Learning.
- xcodethai. (2013). สอนโปรเจค project แอปเซนเซอร์(sensor) accelerometer gyroscope compass appiphone appandroid. Retrieved from <https://sites.google.com/site/thaimulticopter/acc>
- ทันพงษ์ ภูรักษา. (2013). ความรู้เกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์เบื้องต้น. สระบุรี: แผนกวิชาเมคคาทรอนิกส์

นิกส์และหุ่นยนต์ วิทยาลัยเทคนิคสระบุรี.





โค้ดภาษา C ที่ใช้โปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP8266 ทำงานร่วมกับเซ็นเซอร์วัด
ความเร่งและเซ็นเซอร์ไจโรสโคป (BMI160 module)

```
#include <BMI160Gen.h>
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiClientSecure.h>

#define ON_Board_LED 2 //--> Defining an On Board LED, used for indicators when the
process of connecting to a wifi router

const int i2c_addr = 0x69;
int accel_range = 2; //option: ±2, 4, 8, 16 (g)
int gyro_range = 500; //option: ±125, 250, 500, 1000, 2000 (degree/sec)

//-----SSID and Password of your WiFi router.
const char* ssid = "YOUR_SSID";
const char* password = "YOUR_PASSWORD";
//-----

//-----Host & httpsPort
const char* host = "script.google.com";
const int httpsPort = 443;
//-----

WiFiClientSecure client; //--> Create a WiFiClientSecure object.

String GAS_ID = "YOUR_GAS_ID"; //--> spreadsheet script ID

//=====
===== void setup
```

```
void setup() {  
  Serial.begin(115200); // initialize Serial communication  
  while (!Serial); // wait for the serial port to open  
  
  // initialize device  
  BMI160.begin(BMI160GenClass::I2C_MODE, i2c_addr);  
  
  // Auto calibrate accel & gyro  
  BMI160.autoCalibrateGyroOffset();  
  BMI160.autoCalibrateAccelerometerOffset(X_AXIS, 0);  
  BMI160.autoCalibrateAccelerometerOffset(Y_AXIS, 0);  
  BMI160.autoCalibrateAccelerometerOffset(Z_AXIS, 1);  
  
  // set accelerometer range  
  BMI160.setAccelerometerRange(accel_range);  
  
  // set gyroscope range  
  BMI160.setGyroRange(gyro_range);  
  
  WiFi.begin(ssid, password);  
  Serial.println("");  
  
  pinMode(ON_Board_LED, OUTPUT); //--> On Board LED port Direction output  
  digitalWrite(ON_Board_LED, HIGH); //--> Turn off Led On Board  
  
  //-----Wait for connection  
  Serial.print("Connecting");  
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {  
    Serial.print(".");  
  }  
}
```

```

//-----Make the On Board Flashing LED on the process of
connecting to the wifi router.
digitalWrite(ON_Board_LED, LOW);
delay(250);
digitalWrite(ON_Board_LED, HIGH);
delay(250);
//-----
}
//-----
digitalWrite(ON_Board_LED, HIGH); //--> Turn off the On Board LED when it is
connected to the wifi router.
//-----If successfully connected to the wifi router, the IP
Address that will be visited is displayed in the serial monitor
Serial.println("");
Serial.print("Successfully connected to : ");
Serial.println(ssid);
Serial.print("IP address: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
Serial.println();
//-----

client.setInsecure();
}
//=====
=====

//=====
===== void loop
void loop() {

```

```
int gx_raw, gy_raw, gz_raw;    // raw acceleration values
float gx, gy, gz;
int Gx_raw, Gy_raw, Gz_raw;    // raw gyro values
float Gx, Gy, Gz;
float g, G;

// convert raw accelerometer values
float accel_con_val;
if (accel_range == 16) {
    accel_con_val = 2048;
}
else if (accel_range == 8) {
    accel_con_val = 4096;
}
else if (accel_range == 4) {
    accel_con_val = 8192;
}
else if (accel_range == 2) {
    accel_con_val = 16384;
}

// convert raw gyroscope values
float gyro_con_val;
if (gyro_range == 2000) {
    gyro_con_val = 16.4;
}
else if (gyro_range == 1000) {
    gyro_con_val = 32.8;
}
```

```
else if (gyro_range == 500) {
    gyro_con_val = 65.6;
}
else if (gyro_range == 250) {
    gyro_con_val = 131.2;
}
else if (gyro_range == 125) {
    gyro_con_val = 262.4;
}

// read raw accelerometer measurements from device
BMI160.readAccelerometer(gx_raw, gy_raw, gz_raw);
gx = (gx_raw*9.81/accel_con_val);
gy = (gy_raw*9.81/accel_con_val);
gz = (gz_raw*9.81/accel_con_val);

// read raw gyro measurements from device
BMI160.readGyro(Gx_raw, Gy_raw, Gz_raw);
Gx = Gx_raw/gyro_con_val;
Gy = Gy_raw/gyro_con_val;
Gz = Gz_raw/gyro_con_val;

// display tab-separated acceleration x/y/z values
Serial.print("Accelerator:\t");
Serial.print(gx);
Serial.print("\t");
Serial.print(gy);
Serial.print("\t");
Serial.print(gz);
```



```

Serial.print("\n");
Serial.print("Gyroscope:\t");
Serial.print(Gx);
Serial.print("\t");
Serial.print(Gy);
Serial.print("\t");
Serial.print(Gz);
Serial.print("\n");
Serial.println();

sendData(gx, gy, gz, Gx, Gy, Gz); //--> Calls the sendData Subroutine
}

//=====
=====
//=====

===== void sendData
// Subroutine for sending data to Google Sheets
void sendData(float gx, float gy, float gz, float Gx, float Gy, float Gz) {
  Serial.println("=====");
  Serial.print("connecting to ");
  Serial.println(host);

  //-----Connect to Google host
  if (!client.connect(host, httpsPort)) {
    Serial.println("connection failed");
    return;
  }
  //-----

```

```

//-----Processing data and sending data
String string_accel_x = String(gx);
String string_accel_y = String(gy);
String string_accel_z = String(gz);
String string_gyro_x = String(Gx);
String string_gyro_y = String(Gy);
String string_gyro_z = String(Gz);

String url = "/macros/s/" + GAS_ID + "/exec?gx=" + string_accel_x + "&gy=" +
string_accel_y + "&gz=" + string_accel_z + "&Gx=" + string_gyro_x + "&Gy=" +
string_gyro_y + "&Gz=" + string_gyro_z;

Serial.print("requesting URL: ");
Serial.println(url);

client.print(String("GET ") + url + " HTTP/1.1\r\n" +
  "Host: " + host + "\r\n" +
  "User-Agent: BuildFailureDetectorESP8266\r\n" +
  "Connection: close\r\n\r\n");

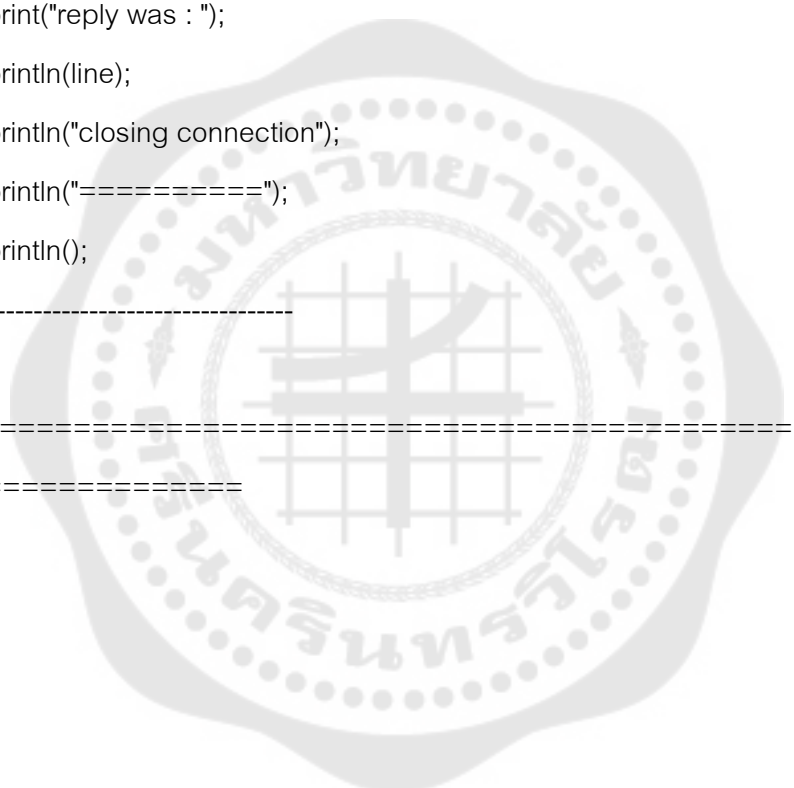
Serial.println("request sent");

//-----

//-----Checking whether the data was sent successfully or not
while (client.connected()) {
  String line = client.readStringUntil('\n');
  if (line == "\r") {
    Serial.println("headers received");
    break;
  }
}

```

```
}  
String line = client.readStringUntil('\n');  
if (line.startsWith("{\"state\":\"success\"}")) {  
  Serial.println("esp8266/Arduino CI successfull!");  
} else {  
  Serial.println("esp8266/Arduino CI has failed");  
}  
Serial.print("reply was : ");  
Serial.println(line);  
Serial.println("closing connection");  
Serial.println("=====");  
Serial.println();  
//-----  
}  
//=====
```



โค้ดภาษา C ที่ใช้โปรแกรมให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP-32 ทำงานร่วมกับเซนเซอร์อินฟราเรด (TCRT5000 module)

```
#include <HTTPClient.h>

const int sensorPin = 15; // sensor pin
int sensorState = 0; // current sensor state
int previousState = 0; // previous sensor state
unsigned long previousTime = 0; // previous time
unsigned long currentTime = 0;
int count = 0; // count of turns
unsigned long period = 0;

// Replace with your network credentials
const char* ssid = "YOUR_SSID";
const char* password = "YOUR_PASSWORD";

// IFTTT Webhook parameters
const char* event_name = "YOUR_EVENT_NAME";
const char* ifttt_key = "YOUR_IFTTT_KEY";

void setup() {
  Serial.begin(115200);

  pinMode(sensorPin, INPUT); // set sensor pin as input

  // connect to WiFi
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(1000);
```

```
Serial.println("Connecting to WiFi...");
}
Serial.println("Connected to WiFi");
}

void loop() {
    sensorState = digitalRead(sensorPin); // read sensor state

    if (sensorState != previousState) { // check for change in sensor state
        if (sensorState == HIGH) { // check if sensor is on black bar
            unsigned long currentTime = millis(); // get current time
            if (previousTime != 0) { // check if previous time is set
                unsigned long period = currentTime - previousTime; // calculate period
                Serial.print("Turn ");
                Serial.print(count);
                Serial.print(": ");
                Serial.print(period);
                Serial.println(" ms");
            }
            count++; // increment count
            previousTime = currentTime; // update previous time
        }
        previousState = sensorState; // update previous state
    }

    // Replace these values with your data
    int value_1 = count;
    unsigned long value_2 = period;
```

```
// send the values to IFTTT Maker Webhooks
HTTPClient http;
String url = "https://maker.ifttt.com/trigger/" + String(event_name) + "/with/key/" +
String(ifttt_key);
String payload = "{ \"value1\": " + String(value_1) + ", \"value2\": " + String(value_2) + " }";
Serial.println("Sending payload: " + payload);
http.begin(url);
http.addHeader("Content-Type", "application/json");
int httpCode = http.POST(payload);
String response = http.getString();
Serial.println("HTTP Code: " + String(httpCode));
Serial.println("Response: " + response);
http.end();

//delay(10000); // wait 1 seconds before sending the next payload
}
```

ประวัติผู้เขียน

