

การออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

ปริญญานิพนธ์
ของ
ศิริพรรณ ศรัทธาผล

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มีนาคม 2551
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

บทคัดย่อ

ของ

ศิริพรรณ ศรีธามผล

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มีนาคม 2551

ศิริพรรณ ศรัทธาผล. (2551). การออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน
สองทิศทาง. ปรินูญานินพนธ์ กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรี
นครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข,
รองศาสตราจารย์ อรุณีย์ อินทศร.

ได้ออกแบบอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง ที่สามารถวัดปริมาณเชิงมุม
ขณะใดขณะหนึ่งของการเคลื่อนที่แบบหมุนตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกา ณ เวลาต่าง ๆ โดยบันทึก
ผลเป็นคู่อันดับการกระจัดเชิงมุมกับเวลาในรูปของไฟล์อักษร และสามารถแสดงผลในรูปกราฟ
ความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาได้ทันทีทางจอภาพของคอมพิวเตอร์ ซึ่งควบคุมการทำงานด้วย
โปรแกรมภาษา C++ ผ่านพอร์ตขนาน สำหรับความน่าเชื่อถือของเครื่องมือและโปรแกรมที่เขียน
ขึ้นได้ทำการตรวจสอบโดยเปรียบเทียบค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุทรงตันที่สร้างขึ้นจาก
การคำนวณเชิงทฤษฎี (I_T) และโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุจากการทดลอง (I_E) ในกรณีที่มีการ
เคลื่อนที่แบบหมุนทิศทางเดียวหรือการเคลื่อนที่แบบแกว่งกลับไปมาสองทิศทาง ผลที่ได้พบว่า
โมเมนต์ความเฉื่อยเชิงทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 19.2×10^{-3} กิโลกรัม.เมตร² และจากการทดลองในกรณี
การหมุนทิศทางเดียวมีค่าเท่ากับ $(20.4 \pm 0.8) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ $(21.2 \pm 1.3) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ $(22.7 \pm 1.3) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ และ $(24.7 \pm 1.1) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ เมื่อมวลถ่วงขนาด 30.0 g 40.0 g 50.0 g
และ 60.0 g ตามลำดับ ขณะที่โมเมนต์ความเฉื่อยที่หาได้จากการเคลื่อนที่แบบแกว่งกลับไปมา
สองทิศทางมีค่าเท่ากับ $(24.8 \pm 1.2) \times 10^{-3}$ กิโลกรัม.เมตร²

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DEVICE FOR TWO - DIRECTION ROTATIONAL
MOTION MEASUREMENT

AN ABSTRACT
BY
SIRIPHAN SATTHAPHON

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Education Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
March 2008

Siriphan Satthaphon. (2008). *Design and Construction of a Device for Two-Direction Rotational Motion Measurement*. Master thesis, M.Ed.(Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assist. Prof. Bancha Silskulsuk, Assoc. Prof. Arunee Intasorn.

This device is designed for measuring the instantaneous angular variables of both clockwise and anti-clockwise rotational motion. The system evolution in time is displayed promptly on a monitor and recorded kinematically as computer text files by interfacing with computer parallel port. The rotational motion sensor system contains two sets of Infrared LED and infrared receiver. The data acquisition method via computer C++ program provides the relation of angle and time data. The reliability of the measurement data with this device was investigated by comparing the theoretical moment of inertia (I_T) of the tee shape object with the experimental ones (I_E), when it was rotated in only one direction or oscillated as the torsion pendulum system. The results are that $I_T = 19.2 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ and I_E of one directional motion experiments produced by weigh of mass 30.0 g, 40.0 g, 50.0 g and 60.0 g are $(20.4 \pm 0.8) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$, $(21.2 \pm 1.3) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$, $(22.7 \pm 1.3) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ and $(24.7 \pm 1.1) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ respectively, while I_E of oscillating torsion pendulum system = $(24.8 \pm 1.2) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$.

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนสำหรับนิสิตในระดับบัณฑิตศึกษา
จาก
งบประมาณเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ประจำปีการศึกษา 2550

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
การออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง
ของ
ศิริพรรณ ศรีท้าวผล

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๒๕๖๓

.....คนบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญศิริ จีระเดชากุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลปสกุลสุข)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุณีย์ อินทศร)

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน
(อาจารย์ ดร. สิริ สิรินิลกุล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลปสกุลสุข)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ อรุณีย์ อินทศร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เขียงกา)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ อรุณีย์ อินทสร ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้ งานวิจัยนี้ โดยพร้อมให้ความรู้และคำแนะนำเสมอมา

กราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. สิริ สิรินิลกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุรศักดิ์ เชียงกา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และให้คำแนะนำแก้ไขเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้

กราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาคฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้อบรม ให้ความรู้ผู้วิจัย ในรายวิชาต่างๆ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ให้การช่วยเหลือ รวมทั้งเป็นกำลังใจให้กันและกันเสมอ

ท้ายที่สุดนี้ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และพี่ ๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา

ศิริพรรณ ศรีธำพล

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้.....	3
2 ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนตติง.....	4
อัตราเร็วเชิงมุม.....	5
อัตราเร่งเชิงมุม.....	6
การเคลื่อนที่แบบหมุนด้วยอัตราเร่งเชิงมุมคงที่.....	6
ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชิงมุมและปริมาณเชิงเส้น.....	7
พลังงานจลน์ของการหมุน.....	9
โมเมนต์ความเฉื่อย.....	10
ทอร์ก.....	12
ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับอัตราเร่งเชิงมุม.....	13
คาบเวลาในออสซิลเลตของเพนดูลัมชนิดบิด.....	14
ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์.....	17
สัญญาณดิจิทัลและสัญญาณอนาล็อก.....	17
ระบบตัวเลข.....	18
พอร์ตขนาน.....	19
วงจรตรรกะ.....	21
Transistor-Transistor Logic.....	25
วงจรมิตต์ทริกเกอร์.....	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2 (ต่อ)	ฟลิปฟล็อป.....	27
	การตรวจจับการเคลื่อนที่แบบหมุน.....	29
	ตัวรับ-ส่งอินฟราเรด.....	29
	การบอกทิศทางการหมุนของส่วนประกอบภายในเมาส์.....	33
	การวิเคราะห์แบบถดถอย.....	36
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
	การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการวิจัย.....	38
	การออกแบบสร้างเครื่องมือในการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง	39
	การทดสอบโปรแกรมกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยวัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อย	
	เปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี.....	47
	การคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยตามทฤษฎี.....	47
	การหาโมเมนต์ความเฉื่อยจากการทดลอง.....	48
4	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	53
	การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อย.....	53
	การออกแบบและสร้างวงจรวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง.....	53
	การออกแบบและสร้างวงจรวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง.....	54
	ผลการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางของ	
	เครื่องมือวัด.....	55
	ผลการทดสอบโปรแกรมกับเครื่องมือทดลองโดยทำการวัดค่าโมเมนต์ความ	
	เฉื่อยเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี.....	62

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ.....	66
สรุปและอภิปรายผลการทดลอง.....	66
ข้อเสนอแนะ.....	67
 บรรณานุกรม.....	 69
 ภาคผนวก.....	 72
 ประวัติย่อผู้วิจัย.....	 86

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงลักษณะสัญญาณของพอร์ตขนาน.....	20
2 ลักษณะการทำงานของแอนด์เกต.....	22
3 ลักษณะการทำงานของออร์เกต.....	22
4 ลักษณะการทำงานของนอร์เกต.....	23
5 ลักษณะการทำงานของแนนด์เกต.....	24
6 ลักษณะการทำงานของนอตเกต.....	24
7 ลักษณะการทำงานของเอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต.....	25
8 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปชนิดดี (7474).....	28
9 แสดงการทำงานของ D Latch (7475).....	29
10 แสดงข้อมูลที่ได้จากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์กรณีหมุนทางเดียว.....	56
11 แสดงข้อมูลที่ได้จากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์กรณีหมุนสองทิศทาง.....	58
12 แสดงข้อมูลของอุปกรณ์ทดลองและไมโครคอมพิวเตอร์.....	62
13 แสดงค่าน้ำหนักที่ใช้ถ่วงอุปกรณ์ทดลอง.....	63
14 แสดงอัตราเร่งเชิงมุม (α) จากการวิเคราะห์แบบถดถอย.....	64
15 แสดงค่าคาบเวลาที่ได้จากการทดลอง.....	65

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 การหมุนของแผ่นกลมรัศมี r รอบแกนตั้งที่ผ่านจุด O	4
2 แสดงตำแหน่งอนุภาค $P(\theta_1, t_1)$ และ $Q(\theta_2, t_2)$ บนแผ่นจานกลมที่กำลังหมุน.....	5
3 แสดงอนุภาค P หมุนรอบแกนตั้งที่ผ่านจุด O	7
4 แสดงการหาความเร่งรวมของ P อนุภาคที่หมุนรอบแกนตั้งผ่านจุด O	8
5 แสดงอนุภาคมีมวล m_i หมุนรอบแกน z ผ่านจุด O ด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω	9
6 แสดงทอร์กเนื่องจากแรง $\vec{F}$	12
7 แสดงแรง $\vec{F}_1$ ซึ่งพยายามหมุนวัตถุในทิศทวนเข็มนาฬิกา และ $\vec{F}_2$ พยายามหมุนวัตถุ ในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	12
8 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นวงกลม.....	13
9 แสดงเพนดูลัมชนิดบิโด.....	14
10 แสดงแท่งทรงกระบอกที่ถูกบิดเป็นมุม θ	15
11 แสดงรูปของสัญญาณอนาล็อกและดิจิตอล.....	17
12 แสดงลักษณะของพอร์ตขนาน.....	19
13 ทิศทางการรับส่งข้อมูลของพอร์ตขนาน.....	21
14 สัญลักษณ์ของแอนด์เกต.....	22
15 สัญลักษณ์ของออร์เกต.....	22
16 สัญลักษณ์ของนอร์เกต.....	23
17 สัญลักษณ์ของแนนด์เกต.....	23
18 สัญลักษณ์ของนอตเกต.....	24
19 สัญลักษณ์ของเอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต.....	24
20 แสดงวงจรมิตต์ทริกเกอร์แบบทราานซิสเตอร์และการทำงาน.....	26
21 แสดงสัญลักษณ์ของฟลิปฟล็อปชนิดดี (7474).....	28
22 แสดงสัญลักษณ์ของ D Latch (7475).....	29
23 วงจรที่ทำงานเมื่อแสงตกกระทบ.....	30

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
24 วงจรที่ทำงานเมื่อไม่มีแสงตกกระทบ.....	31
25 วงจรตัวส่งและตัวรับอินฟราเรดแบบพื้นฐาน.....	32
26 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสภายในเมาส์.....	34
27 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสที่หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา.....	34
28 สัญญาณจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถบอกทิศทางการหมุน ของจาน เข้ารหัสในเมาส์ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	35
29 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสที่หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา.....	35
30 สัญญาณจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถบอกทิศทางการหมุน ของจาน เข้ารหัสในเมาส์ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	36
31 แบบแผ่นใส่วัดมุมด้วยการตัดลำแสงจำนวน 180 เส้น.....	39
32 แสดงส่วนประกอบเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง.....	41
33 แผนภาพการทำงานของเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น.....	41
34 แสดงวงจรของระบบวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง.....	42
35 แสดงอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อหาโมเมนต์ความเฉื่อย.....	43
36 โครงสำหรับยึดอุปกรณ์การทดลอง.....	43
37 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อย.....	44
38 แสดงการพิจารณาโมเมนต์ความเฉื่อยของท่อ PVC ในแนวนอน.....	47
39 แสดงการพิจารณาโมเมนต์ความเฉื่อยของท่อ PVC ในแนวแกนตั้ง.....	48
40 แสดงแผนภาพการวิเคราะห์ผลรวมของทอร์กสุทธิ.....	49
41 อุปกรณ์การทดลองในกรณีหมุนสองทิศทาง.....	52
42 แสดงภาพตัดขวางจากด้านบนของท่อ PVC เมื่อถูกบิด.....	52
43 แสดงอุปกรณ์การทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อย.....	53
44 แสดงวงจรของระบบวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง.....	54
45 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง.....	55

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

- 46 ตัวอย่างผลการทดลองจากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ของการทดลองการเคลื่อนที่แบบหมุนกรณีปล่อยมวลซึ่งผูกติดกับเชือกแล้วคล้องผ่านรอกให้เคลื่อนที่ในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยตามหัวข้อ..... 56
- 47 ตัวอย่างผลการทดลองจากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ของการทดลองการเคลื่อนที่แบบหมุนกรณีปิดท่อ PVC ซึ่งทำให้อุปกรณ์เกิดการแกว่งแบบกลับไปกลับมาในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยตามหัวข้อ..... 57
- 48 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาจากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ของการทดลองกรณีปล่อยมวลให้เคลื่อนที่ในการทดลอง..... 60
- 49 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาจากการนำข้อมูลที่ได้จากคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์แบบถดถอยด้วยโปรแกรม 60
- 50 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาจากการบันทึกผลของคอมพิวเตอร์ของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนกรณีที่มีสปริง..... 61
- 51 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาจากการนำข้อมูลที่ได้จากคอมพิวเตอร์มาแสดงกรณีหมุนสองทิศทาง..... 61

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ปัจจุบันการดำเนินชีวิตของคนเรามีความเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์และเครื่องใช้ที่เป็นเทคโนโลยีระดับสูงมากมายหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นเครื่องใช้ในบ้านเรือน หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในวงการธุรกิจ อุปกรณ์การสื่อสารโทรคมนาคม ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา เป็นต้น อุปกรณ์ที่เป็นเทคโนโลยีระดับสูงอย่างหนึ่งที่นับว่ามีบทบาทสำคัญยิ่งในชีวิตประจำวันของคนเราได้แก่ คอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในทุกวงการ และเมื่อมีการประดิษฐ์เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ซึ่งมีขนาดเล็กและราคาไม่สูงมากนักก็ทำให้มีการใช้อย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น

คอมพิวเตอร์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้น เพื่อใช้ทำงานแทนมนุษย์ในด้านการคิดคำนวณ ที่สามารถจำข้อมูลทั้งตัวเลขและตัวอักษรเพื่อการเรียกใช้งานในครั้งต่อไป และยังสามารถจัดการกับสัญลักษณ์ได้ด้วยความเร็วสูง โดยปฏิบัติตามขั้นตอนของโปรแกรม นอกจากนี้คอมพิวเตอร์ยังมีความสามารถในด้านต่างๆ อีกมาก อาทิเช่น การเปรียบเทียบทางตรรกะ (Logic) การรับส่งข้อมูล การจัดเก็บข้อมูลไว้ในตัวเครื่อง และสามารถประมวลผลจากข้อมูลต่างๆ ได้

ในวงการศึกษานั้น ได้มีการนำไมโครคอมพิวเตอร์มาใช้ทั้งในด้านการบริหารจัดการเรียนการสอนและเป็นคอมพิวเตอร์ช่วยสอนโดยการสร้างโปรแกรมบทเรียนในรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นสื่อในการเรียนการสอนต่างๆ ทำให้ผู้เรียนสามารถใช้ในลักษณะของการศึกษารายบุคคลได้เป็นอย่างดี ด้านวิทยาศาสตร์ก็เช่นเดียวกัน มีการใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมืออำนวยความสะดวกในการออกแบบจำลองการทดลองต่างๆ ช่วยในการบันทึกข้อมูลจำนวนมากๆ ช่วยในการวิเคราะห์คำนวณและอื่นๆ อีกมากมาย และเราสามารถใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการทดลองในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์เบื้องต้น หรือในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับสูงได้ เราสามารถนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่อย่างแพร่หลายและราคาถูก มาออกแบบและสร้างเครื่องมือในการทดลองทางฟิสิกส์โดยเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์ได้หลายอย่าง เช่น การเคลื่อนที่แบบหมุน ทอร์ก ลูกตุ้มเพนดูลัมชนิดปิด และแรงสู่ศูนย์กลาง เป็นต้น

การวัดปริมาณต่างๆ ทางฟิสิกส์ของการเคลื่อนที่แบบหมุน เช่น การหมุนของรอก หรือการหมุนรอบแกนหมุน การวัดการเคลื่อนที่ขณะกำลังหมุนด้วยเครื่องมืออย่างง่าย ๆ เช่น ไม้บรรทัด หรือไม้บรรทัดวัดมุมไม่สามารถกระทำได้ จากประเด็นนี้ผู้วิจัยจึงสนใจและได้ออกแบบสร้างอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางของระบบที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งยากแก่การวัดด้วยเครื่องมืออย่างง่ายได้ โดยอุปกรณ์นี้จะใช้ทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ และควบคุมการทำงานด้วยโปรแกรมภาษาซี ซึ่งเป็นภาษาระดับกลางที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูง

และสามารถประยุกต์และปรับใช้กับงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น ระบบการจัดการฐานข้อมูล การคำนวณหาปริมาณต่าง ๆ การสร้างงานอุปกรณ์ภายนอกและสามารถสร้างกราฟิก (Graphic) ได้ ข้อดีของภาษานี้ คือ ทำงานได้รวดเร็วและแสดงผลได้ทันที เมื่อเทียบกับภาษาอื่นๆ สามารถทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ต่างประเภท

การออกแบบและสร้างอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง จะทำให้ได้อุปกรณ์วัดค่ามุมที่เวลาต่างๆ ซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณปริมาณต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่แบบหมุนได้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อให้ได้อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ควบคุมการเก็บข้อมูลการหมุน ได้แก่ การกระจัดเชิงมุม และเวลา ในการหมุนรอบแกนที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์
2. ได้ชุดทดลอง สำหรับศึกษา โมเมนต์ความเฉื่อย 1 ชุด

ความสำคัญของการวิจัย

1. ได้อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง เพื่อการวิเคราะห์การทดลองทางฟิสิกส์
2. เป็นแนวทางในการนำความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ โปรแกรมคอมพิวเตอร์ มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับการหมุนซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน

ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบ สร้างอุปกรณ์การทดลองสำหรับการวัดความเฉื่อย และการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบหมุน
2. ศึกษาและติดตั้งตัวรับรู้ทางแสงเพิ่มเติม บนอุปกรณ์การเคลื่อนที่แบบหมุนทิศทางเดียว ที่ออกแบบโดย นายศุภเดช สุจินทรัพย์ ออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อแปลงการกระจัดเชิงมุมเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับป้อนเข้ากับพอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์
3. เขียนโปรแกรมควบคุมการรับ และเก็บข้อมูลของตำแหน่งของการเคลื่อนที่เชิงมุมที่เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลา ผ่านพอร์ตขนาน
4. เขียนโปรแกรมประมวลผลและแสดงผลการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อแสดงความสัมพันธ์ในรูปกราฟ

5. ทดสอบโปรแกรมที่เขียนขึ้นของเครื่องมือวัด กับการทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อย
ทอร์ก ของอุปกรณ์ทดลองที่สร้างขึ้น เทียบกับค่าทางทฤษฎี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

1. สามารถนำอุปกรณ์สำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง และชุดทดลอง
โมเมนต์ความเฉื่อยไปใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่แบบหมุน
2. สามารถนำอุปกรณ์ที่เป็นเครื่องมือวัด และโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ไปประยุกต์ใช้
กับการทดลองในทางฟิสิกส์ที่มีลักษณะของการเคลื่อนที่แบบหมุนซึ่งไม่มีการเลื่อนตำแหน่ง

บทที่ 2

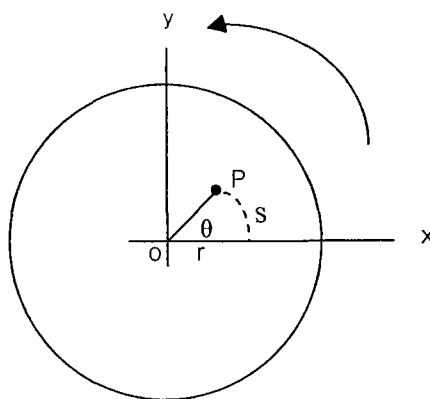
ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของวัตถุ
2. ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์
3. การตรวจจับการเคลื่อนที่แบบหมุน
4. การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis)

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง

ในการศึกษาการหมุนของวัตถุนั้น เราจะพิจารณาวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) โดยวัตถุแข็งเกร็งหมายถึง อนุภาคที่ประกอบกันเป็นวัตถุโดยอนุภาคทั้งหลายมีตำแหน่งที่สัมพันธ์กันคงที่และไม่เปลี่ยนแปลงในระหว่างที่มีการเคลื่อนที่ ภาพประกอบ 1 แสดงการหมุนของแผ่นกลมรอบแกนตั้งที่ผ่านจุด O ซึ่งตั้งฉากกับระนาบ xy และ P เป็นอนุภาคหนึ่งของแผ่นกลมที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมมีรัศมีเท่ากับ r จากจุดหมุน O



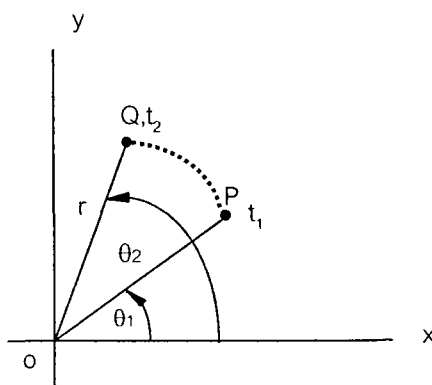
ภาพประกอบ 1 แสดงการหมุนของแผ่นกลมรัศมี r รอบแกนตั้งที่ผ่านจุด O

1. อัตราเร็วเชิงมุม (Angular Velocity)

พิจารณาการหมุนรอบแกนตั้งฉากผ่านจุดกำเนิด O ของแผ่นจานกลมตามภาพประกอบ 1 ให้จุด P อยู่ห่างจากจุดกำเนิด O เป็นระยะทางเท่ากับ r และหมุนรอบจุด O ในระบบพิกัดเชิงขั้ว สามารถบอกตำแหน่งของจุด P เป็น (r, θ) ซึ่ง r คงที่ตลอดเวลา แต่ θ เปลี่ยนแปลงไป เมื่อจุดบนแผ่นจานกลมเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี r จากแกน x ($\theta = 0$) ไปยังตำแหน่งที่ r ทำมุม θ กับแกน x อนุภาคจะเคลื่อนที่ได้เป็นความยาวส่วนโค้ง s ที่มีความสัมพันธ์กับตำแหน่งเชิงมุม θ และสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$s = r\theta$$

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (1)$$



ภาพประกอบ 2 แสดงตำแหน่งอนุภาค $P(\theta_1, t_1)$ และ $Q(\theta_2, t_2)$ บนแผ่นจานกลมที่กำลังหมุน

พิจารณาภาพประกอบ 2 เมื่ออนุภาคเดินทางจากจุด P ไปยังจุด Q โดยใช้เวลา $\Delta t = t_2 - t_1$ และรัศมี r กวาดไปเป็นมุม $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$ นั้นหมายถึงการกระจัดเชิงมุมในช่วงเวลา Δt นั้นเอง และสามารถหาอัตราเร็วเชิงมุมเฉลี่ยได้จาก

$$\bar{\omega} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (2)$$

ดังนั้นอัตราเร็วเชิงมุมขณะใดขณะหนึ่งจึงหาได้จาก

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

ปริมาณ ω จะเป็นบวกถ้ามุม θ มีค่าเพิ่มขึ้นหรือมีการเคลื่อนที่ในทิศทวนเข็มนาฬิกา และจะเป็นลบเมื่อมุม θ มีค่าลดลงหรือมีการเคลื่อนที่ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

2. อัตราเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration)

พิจารณาในกรณีที่แผ่นจานกลมมีการหมุนนั้น ถ้าอัตราเร็วเชิงมุมของอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงจาก ω_1 เป็น ω_2 ในช่วงเวลา Δt ทำให้เกิดอัตราเร่งเชิงมุม α ของอนุภาคของจานหมุนที่มีการหมุนและสามารถหาอัตราเร่งเชิงมุมเฉลี่ยได้จาก

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \quad (4)$$

ดังนั้นในทำนองเดียวกันก็สามารถหาอัตราเร่งเชิงมุมขณะใดขณะหนึ่งได้ดังนี้

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \quad (5)$$

ปริมาณ α จะเป็นบวก เมื่อ ω มีค่าเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน ถ้า α เป็นลบนั่นแสดงว่า ω มีค่าลดลงในช่วงเวลาเดียวกันและ α มีทิศไปทางเดียวกับทิศทางของความเร่งเชิงมุม

3. การเคลื่อนที่แบบหมุนด้วยอัตราเร่งเชิงมุมคงที่

จากสมการ (5) สามารถเขียนในรูปของ $d\omega = \alpha dt$ เมื่อกำหนดให้เวลาเริ่มต้น $t_0 = 0$ มี $\omega = \omega_0$ แล้วทำการอินทิเกรตจะได้

$$\omega = \omega_0 + \alpha t \quad (6)$$

นำสมการ (6) แทนลงในสมการ (3) แล้วทำการอินทิเกรตอีกครั้ง โดย ($\theta = \theta_0$ ที่เวลา $t_0 = 0$ และ $\theta = \theta$ ที่เวลา $t = t$) จะได้ว่า

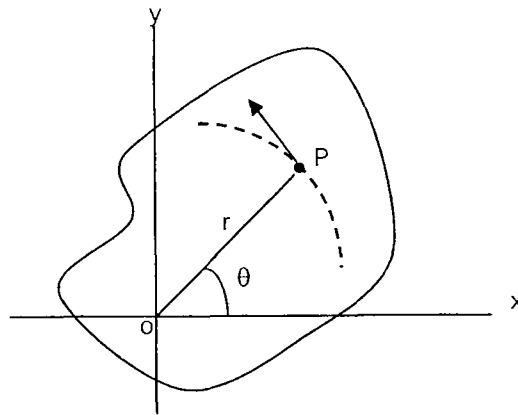
$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (7)$$

นำค่า αt จากสมการ (6) แทนลงในสมการ (7) จะได้

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{2} (\omega_0 + \omega) t \quad (8)$$

4. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชิงมุมและปริมาณเชิงเส้น

ในขณะที่วัตถุแข็งเกร็งมีการหมุนรอบแกนตรึงนั้น ทุก ๆ อนุภาคของวัตถุจะเคลื่อนที่ในวงกลมรอบแกนของการหมุน



ภาพประกอบ 3 แสดงอนุภาค P หมุนรอบแกนตรึงที่ผ่านจุด O

พิจารณาอนุภาคที่มีการหมุนเป็นวงกลมรัศมี r รอบแกน z (แกนตรึง) ที่มีแนวตั้งฉากกับกระดาษ ดังภาพประกอบ 3 ขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลม ซึ่งเกิดความเร็วเชิงเส้น $\vec{v}$ ที่มีทิศสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม และขนาดของความเร็วในแนวเส้นสัมผัสคือ $\frac{ds}{dt}$ เมื่อ s คือระยะทางที่จุด P เคลื่อนที่ตามแนวเส้นรอบวงกลม จากสมการ (1) จะได้ว่า $s = r\theta$ โดยที่ r คือรัศมีซึ่งคงที่ ดังนั้นอนุภาคจะเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยความเร็ว

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (9)$$

และสามารถหาอัตราเร่งเชิงมุมของอนุภาคจากอัตราเร่งของเส้นสัมผัสวงกลม a_t นั่นก็คือส่วนประกอบของอัตราเร่งแนวเส้นสัมผัสวงกลมของการเคลื่อนที่

$$a_t = \frac{dv}{dt} = r \frac{d\omega}{dt}$$

$$a_t = r\alpha \quad (10)$$

และเมื่อวัตถุเคลื่อนที่เป็นวงกลม อัตราเร่งของวัตถุจะพุ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางของวงกลม และมีขนาด ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของอัตราเร็วเชิงมุม ω คือ

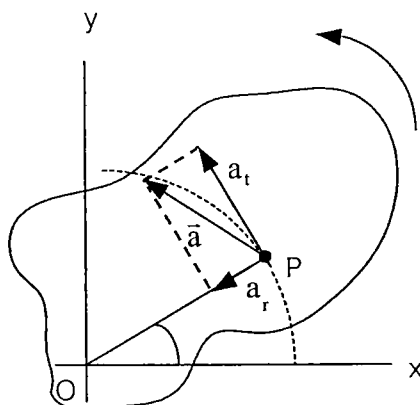
$$a_r = \frac{v^2}{r} = r\omega^2 \quad (11)$$

ดังนั้นความเร่งรวมของอนุภาคคือ

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_r$$

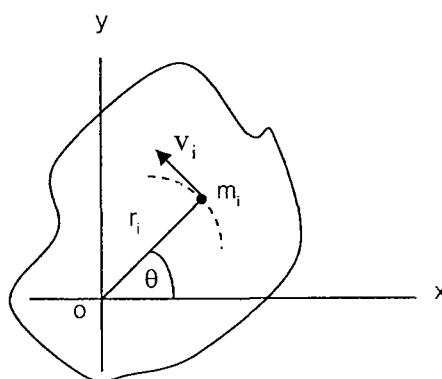
ขนาดของความเร่งรวมของอนุภาคคือ

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_r^2} = \sqrt{r^2\alpha^2 + r^2\omega^4} = r\sqrt{\alpha^2 + \omega^4} \quad (12)$$



ภาพประกอบ 4 แสดงการหาความเร่งรวมของ P อนุภาคที่หมุนรอบแกนตั้งผ่านจุด O

5. พลังงานจลน์ของการหมุน



ภาพประกอบ 5 อนุภาคมีมวล m_i หมุนรอบแกน z ผ่านจุด O ด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω

จากภาพประกอบ 5 พิจารณาวัตถุแข็งเกร็งที่มีอนุภาคสะสมอยู่และสมมติว่าวัตถุมีการหมุนรอบแกน z ด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω ซึ่งอนุภาคแต่ละอนุภาคของวัตถุมีพลังงานจลน์ เมื่อให้มวลของอนุภาคตัวที่ i คือ m_i มีอัตราเร็ว v_i ดังนั้น พลังงานจลน์ของอนุภาค m_i เท่ากับ

$$K_i = \frac{1}{2} m_i v_i^2$$

เมื่อทุก ๆ อนุภาคในวัตถุแข็งเกร็งมีอัตราเร็วเชิงมุม ω เท่ากัน แต่อัตราเร็วเชิงเส้นอาจไม่เท่ากันและขึ้นอยู่กับระยะทางจากจุดหมุน r_i จึงสามารถอธิบายได้ว่า $v_i = r_i \omega$ ดังนั้นพลังงานจลน์รวมของวัตถุแข็งเกร็งที่มีการหมุนคือ

$$K = \sum K_i = \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} \sum m_i r_i^2 \omega^2 = \frac{1}{2} (\sum m_i r_i^2) \omega^2$$

โดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย $I = \sum m_i r_i^2$ ดังนั้น สามารถเขียนพลังงานจลน์ของวัตถุแข็งเกร็งที่มีการหมุนได้ว่า

$$K = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (13)$$

6. โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

เรานิยามโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุแข็งเกร็งก้อนหนึ่งรอบแกนหมุนอันหนึ่งว่าเป็นผลรวมของผลคูณของมวลอนุภาคตัวหนึ่ง (m_i) กับกำลังสองของระยะที่อนุภาคตัวนั้นอยู่ห่างจากแกนหมุน (r_i^2) กล่าวคือ

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (14)$$

เนื่องจากวัตถุแข็งเกร็งก้อนหนึ่งประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมาก ถ้าวัตถุแข็งเกร็งก้อนดังกล่าวมีความหนาแน่น ρ เมื่อพิจารณาในส่วนปริมาตรเล็กๆ (infinitesimal volume " dV ") มีมวลเล็กๆ (infinitesimal mass " dm ") จะได้

$$dm = \rho dV \quad (15)$$

ถ้ามวลเล็กๆ dm อยู่ห่างจากแกนหมุนเท่ากับ r จาก สมการ (14) เราสามารถเขียนสมการโมเมนต์ความเฉื่อยขึ้นใหม่ได้เป็น

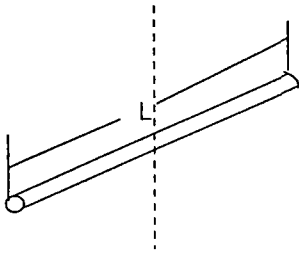
$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = \int r^2 dm = \int \rho r^2 dV$$

และถ้าวัตถุแข็งเกร็งก้อนนี้มีมวลกระจายอย่างต่อเนื่องเป็นเอกพันธ์ (Homogeneous) กล่าวคือ ρ มีค่าคงตัวจะได้

$$I = \rho \int r^2 dV \quad (16)$$

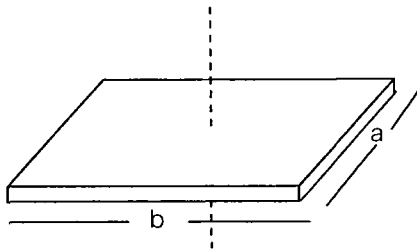
การคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุรูปทรงต่าง ๆ รอบแกนหมุนที่ผ่านจุดศูนย์กลางมวล สามารถหาได้ดังนี้

แท่งวัตถุ



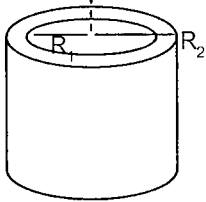
$$I = \frac{1}{12} mL^2$$

แผ่นสี่เหลี่ยม



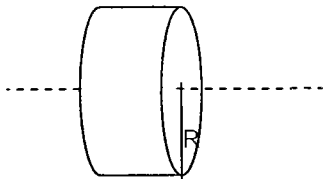
$$I = \frac{1}{12} m(a^2 + b^2)$$

ทรงกระบอกกลวง



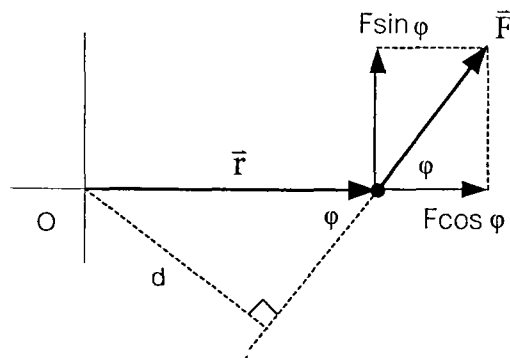
$$I = \frac{1}{2} m(R_1^2 + R_2^2)$$

ทรงกระบอกตัน



$$I = \frac{1}{2} mR^2$$

7. ทอร์ก (Torque)



ภาพประกอบ 6 แสดงทอร์กเนื่องจากแรง $\vec{F}$

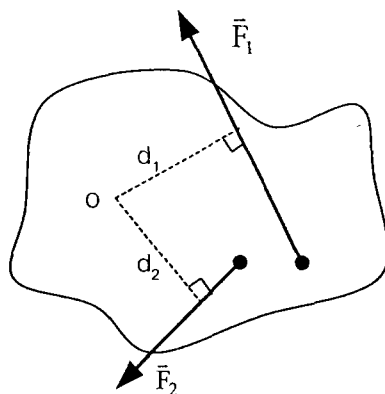
เมื่อวัตถุอยู่ห่างจากจุดกำเนิด O เป็นระยะทาง $\vec{r}$ ถ้ามีแรง $\vec{F}$ มากระทำต่อวัตถุในทิศทางทำมุม ϕ กับ $\vec{r}$ จะทำให้วัตถุหมุนรอบแกนตั้งที่ตั้งฉากกับจุด O ทำให้เกิดทอร์ก ($\vec{\tau}$) ดังนั้นผลจากแรงกระทำ จะทำให้วัตถุเปลี่ยนตำแหน่งรอบแกนหมุน ดังภาพประกอบ 6 ทอร์กคือ

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

มีขนาดเป็น

$$\tau = rF\sin\phi = Fd \quad (17)$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างจุดหมุนกับจุดที่มีแรงมากระทำ และ d คือระยะทางตั้งฉากจากจุดหมุนไปยังแนวแรง

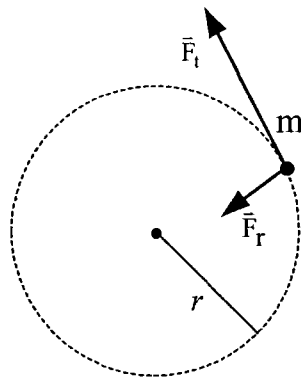


ภาพประกอบ 7 แสดงแรง $\vec{F}_1$ ซึ่งพยายามหมุนวัตถุในทิศทวนเข็มนาฬิกา และ $\vec{F}_2$ พยายามหมุนวัตถุในทิศตามเข็มนาฬิกา

ถ้ามีแรง 2 แรงหรือมากกว่ากระทำต่อวัตถุดังแสดงในภาพประกอบ 7 ซึ่งแรงแต่ละแรงพยายามหมุนวัตถุรอบจุด O จากภาพประกอบ 7 แรง $\vec{F}_2$ ซึ่งพยายามหมุนวัตถุในทิศตามเข็มนาฬิกาและแรง $\vec{F}_1$ พยายามหมุนวัตถุในทิศทวนเข็มนาฬิกา ให้แรงที่พยายามหมุนวัตถุในทิศทวนเข็มนาฬิกามีเครื่องหมายเป็นบวกและเป็นลบในกรณีที่หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา ดังนั้นขนาดของทอร์กสุทธิที่เกิดจากแรงทั้งสองคือ

$$\tau_{\text{net}} = \tau_1 + \tau_2 = F_1 d_1 - F_2 d_2$$

8. ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับอัตราเร่งเชิงมุม



ภาพประกอบ 8 แสดงการเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นวงกลม

พิจารณาอนุภาคมวล m ซึ่งเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี r โดยมีแรงในแนวเส้นสัมผัส $\vec{F}_t$ และแรงสู่ศูนย์กลาง $\vec{F}_r$ กระทำต่ออนุภากดังแสดงในภาพประกอบ 8 จากกฎข้อสองของนิวตัน จะได้ว่า $\vec{F}_t = m\vec{a}_t$ และ $\vec{F}_r = m\vec{a}_r$

เมื่อ $\vec{a}_t$ คือความเร่งในแนวเส้นสัมผัสและ $\vec{a}_r$ คือความเร่งสู่ศูนย์กลาง ดังนั้นทอร์กเนื่องจากแรงสู่ศูนย์กลางรอบจุดกำเนิดมีค่าเป็น 0 เพราะ $\vec{F}_r$ ขนานกับ $\vec{r}$ ดังนั้น $\vec{r} \times \vec{F}_r = 0$ และทอร์กเนื่องจากแรงในแนวเส้นสัมผัสคือ $\vec{r} \times \vec{F}_t$ แต่เมื่อ $\vec{r}$ ตั้งฉากกับแรง $\vec{F}_t$ จะได้ขนาดของทอร์กเป็น $F_t r$ ดังนั้นขนาดของทอร์กสุทธิคือ

$$\tau = F_t r = (ma_t)r \quad (18)$$

เมื่ออัตราเร่งในแนวเส้นสัมผัสมีความสัมพันธ์กับอัตราเร่งเชิงมุม จะได้ว่า $a_t = r\alpha$ ดังนั้นทอร์กคือ

$$\tau = (mr\alpha)r = (mr^2)\alpha$$

เนื่องจาก ปริมาณ mr^2 คือโมเมนต์ความเฉื่อยของอนุภาคที่หมุนรอบแกนตั้ง และเมื่อคิดทุก ๆ อนุภาคของวัตถุ จะได้ว่า

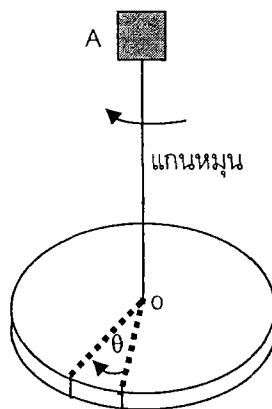
$$\Sigma\tau = \left(\sum_i m_i r_i^2 \right) \alpha$$

จากสมการ (14) จะได้ว่า

$$\Sigma\tau = I\alpha \quad (19)$$

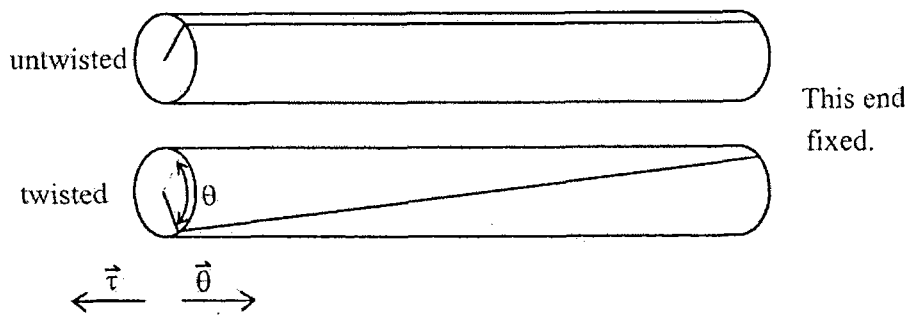
จึงสรุปได้ว่าทอร์กสุทธิที่กระทำกับวัตถุเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร่งเชิงมุม

9. คาบเวลาในออสซิลเลตของเพนดูลัมชนิดบิด (Torsion Pendulum)



ภาพประกอบ 9 แสดงเพนดูลัมชนิดบิด

เพนดูลัมชนิดบิดประกอบด้วยจานกลมซึ่งถูกแขวนด้วยแท่งเหล็กดังภาพประกอบ 9 เมื่อจานกลมถูกบิดรอบแกนของแท่งเหล็ก แท่งเหล็กจะให้ทอร์ก ซึ่งทำให้จานกลมหมุนกลับมายังตำแหน่งสมดุล ถ้าจานกลมถูกบิดและปล่อย จานกลมจะแกว่งแบบกลับไปกลับมา



ภาพประกอบ 10 แสดงแท่งทรงกระบอกที่ถูกบิดเป็นมุม θ

ที่มา: Steew. (2004). *Lab M4 The Torsional pendulum and Moment of Inertia*.
(Online).

พิจารณาแท่งทรงกระบอกยาว ขนาดสม่ำเสมอ ปลายหนึ่งถูกยึดติดอยู่กับที่ อีกปลายหนึ่งถูกบิดไปเป็นมุม θ รอบแกนของทรงกระบอกยาวดังภาพประกอบ 10 จะทำให้เกิดทอร์กซึ่งพยายามทำให้ทรงกระบอกกลับมาสู่ตำแหน่งเดิมโดยทอร์ก τ จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับมุม θ

$$\tau = -k\theta \quad (20)$$

เมื่อ k คือค่าคงตัวในการบิด (Torsion constant) เครื่องหมายลบแสดงถึงทิศทางของทอร์ก τ ซึ่งตรงข้ามกับ θ ซึ่งเหมือนกับกฎของฮุคสำหรับสปริง

ถ้ามวลซึ่งถูกผูกติดกับปลายด้านหนึ่งของทรงกระบอกยาวถูกบิดแล้วปล่อย ดังนั้นจะทำให้เกิดทอร์กที่ทำให้มวลแกว่งด้วยอัตราเร่งเชิงมุม α จะได้ว่า

$$\tau = I\alpha = I \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (21)$$

นำสมการ (20) และ (21) รวมกันซึ่งเป็นสมการการเคลื่อนที่สำหรับเพนดูลัมชนิดบิดโดยสามารถเขียนได้ว่า

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = -k\theta$$

หรือ

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\frac{k}{I}\theta \quad (22)$$

ซึ่งคำตอบของสมการนี้คือ

$$\theta(t) = \theta_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (23)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\kappa}{I}} \quad (24)$$

ซึ่ง φ คือมุมเฟส ที่ขึ้นอยู่กัตำแหน่งเริ่มต้น และ θ_m คือมุมที่มีค่าสูงสุดซึ่งมุมนี้จะแกว่งได้ อยู่ระหว่าง $\pm\theta_m$

เมื่อ ω มีความสัมพันธ์กับความถี่ f และ คาบ T ของการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกส์ตามสมการ

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (25)$$

ดังนั้น จากสมการที่ (24) และ (25) สามารถหาคาบเวลาได้โดย

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{\kappa}} \quad (26)$$

เราสามารถหาค่าคงตัวในการบิด κ ได้จากการวัดคาบ T ถ้าเรารู้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย I ตามสมการ

$$\kappa = 4\pi^2 \frac{I}{T^2} \quad (27)$$

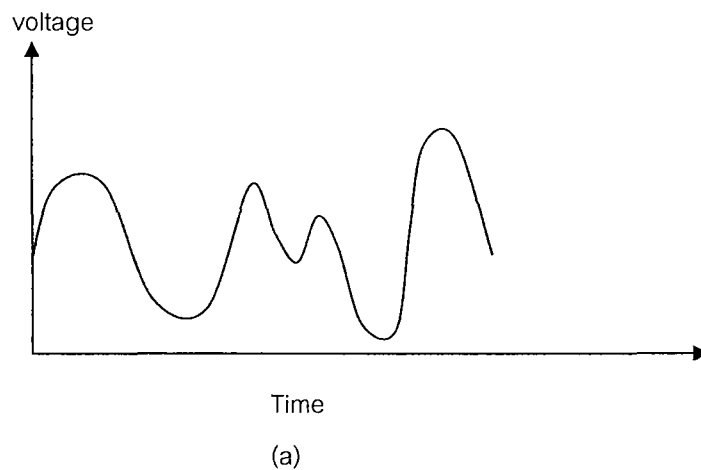
ในทำนองเดียวกันถ้าเรารู้ค่าคงตัวในการบิด κ ก็สามารถหาโมเมนต์ความเฉื่อย

$$I = \kappa \frac{T^2}{4\pi^2} \quad (28)$$

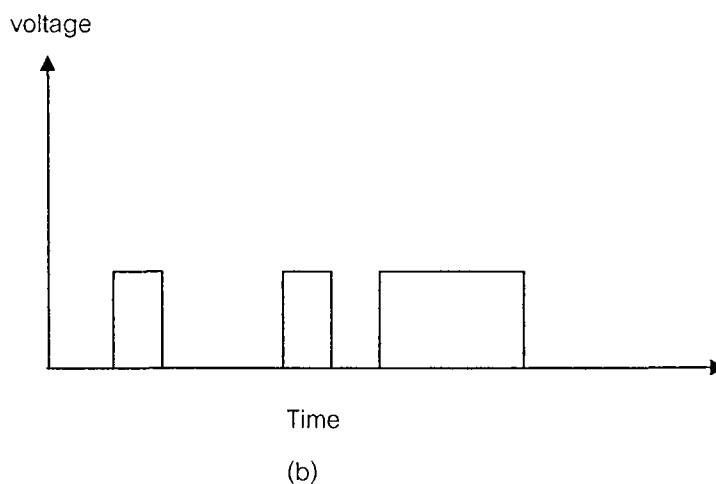
ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์

1. สัญญาณดิจิทัลและสัญญาณอนาล็อก (Digital versus Analog)

สัญญาณดิจิทัลในทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete) มีได้สองสถานะ คือ 0 หรือ 1 ส่วนในระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอนาล็อกนั้นสัญญาณจะมีค่าที่ต่อเนื่อง (continuously) ซึ่งอาจแปรเปลี่ยนไปตามขนาดทางกายภาพ เช่น ปริมาณของอุณหภูมิ ความดัน อัตราเร็ว และตำแหน่ง ดังภาพประกอบ 11 แสดงตัวอย่างสัญญาณดิจิทัลและอนาล็อก



ภาพประกอบ 11 (a) แสดงรูปของสัญญาณอนาล็อก



ภาพประกอบ 11 (b) แสดงรูปของสัญญาณดิจิทัล

2. ระบบตัวเลข

ระบบตัวเลข (Numeral system) คือ ระบบของการแสดงจำนวน ซึ่งมีหลายระบบ เช่น ระบบเลขฐานสิบ ระบบเลขฐานสอง เป็นต้น

2.1 ระบบเลขฐานสิบ (Decimal Numbering System)

ในระบบเลขฐานสิบนั้นตัวเลขแต่ละหลักจะมีค่าที่เป็นไปได้คือ 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9 ซึ่งตัวเลขเหล่านี้ใช้เป็นตัวคูณของแต่ละหลัก เพื่อให้ได้ค่าเป็นจำนวนเท่าของค่าประจำหลัก เช่น

	หลักพัน	หลักร้อย	หลักสิบ	หลักหน่วย
ค่าประจำหลัก	10^3	10^2	10^1	10^0
ตัวคูณ	4	6	2	3
ค่า	(4×1000)	(6×100)	(2×10)	(3×1)

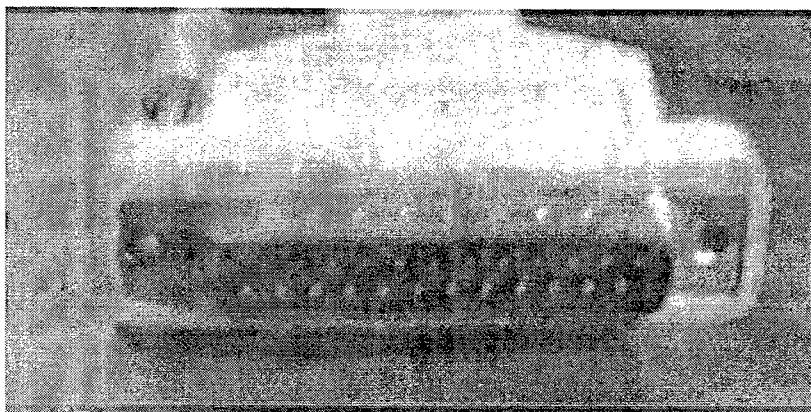
การนับเลขในระบบฐานสิบนั้น แต่ละหลักมีตัวเลขที่ใช้ได้คือ 10 ตัว
ค่ารวมของจำนวนเลข 4623 ผลรวมที่ได้ตามตัวอย่างนี้คือ $(4 \times 1000) + (6 \times 100) + (2 \times 10) + (3 \times 1)$ นั่นเอง

2.2 ระบบเลขฐานสอง (Binary Numbering System)

ในทางดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์นั้นเราจะใช้ระบบเลขฐานสอง เนื่องจากระบบเลขฐานสองใช้เพียงตัวเลข 0 และ 1 เท่านั้น ทำให้สามารถแทนตัวเลขทั้งสองนี้ด้วยระดับความต่างศักย์สองระดับคือ +5 โวลต์ และ 0 โวลต์ โดย 5 โวลต์ แทน 1 และ 0 โวลต์ แทน 0

ในระบบเลขฐานสอง เราต้องใช้จำนวนหลักหลายหลักเพื่อที่จะแทนค่า ๆ หนึ่ง ที่อาจใช้เพียง 1-2 หลัก ในระบบเลขฐานสิบ แม้ว่าข้อนี้จะเป็นข้อเสียเปรียบของระบบเลขฐานสอง แต่ระบบนี้ก็มีข้อดีคือ การที่เลขแต่ละหลักมีได้เพียงสองสถานะ คือ 0 กับ 1 เท่านั้น ทำให้เราสามารถใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้า หรืออิเล็กทรอนิกส์ที่ง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนมาแทนได้ เช่น สวิตช์ ซึ่งมีสองสถานะคือ วงจรเปิด กับ วงจรปิด เป็นต้น ระบบเลขฐานสองจึงกลายเป็นพื้นฐานของระบบดิจิทัลปัจจุบัน และเป็นระบบเลขที่ใช้ในการทำงานภายในเครื่องคอมพิวเตอร์

3. พอร์ตขนาน (Parallel Port)



ภาพประกอบ 12 แสดงลักษณะของพอร์ตขนาน

พอร์ตขนาน (Parallel Port) เดิมเรียกว่า พริ้นเตอร์พอร์ต (Printer Port) เพราะส่วนใหญ่ มักใช้งานกับเครื่องพิมพ์เป็นหลัก ซึ่งพอร์ตขนานนั้นสามารถส่งข้อมูลได้ 8 บิต พร้อมกัน ลักษณะ หัวต่อของพอร์ตขนานจะเป็นแบบ ดี-ชนิด 25 ขา (D-type 25 pin) อยู่หลังเครื่องคอมพิวเตอร์ ทัวปดังภาพประกอบ 12 อย่างไรก็ตามนอกจากพอร์ตขนานจะใช้ติดต่อกับเครื่องพิมพ์แล้ว ยังสามารถใช้งานเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ได้อีก เนื่องจากพอร์ตขนานนั้นสามารถรับและส่ง ข้อมูลในลักษณะขนานได้ จึงทำให้นำไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้ ลักษณะความต่าง ศักย์ที่ให้ออกมาจากพอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์จะเป็นแบบทีทีแอล (TTL-Transistor-Transistor Logic) โดยที่สัญญาณตรรกะ 1 จะเท่ากับ 5 โวลต์และตรรกะ 0 จะเท่ากับ 0 โวลต์ ทำให้สามารถ หาวัสดุมาออกแบบวงจรและการประยุกต์ใช้งานได้อย่างสะดวกมากขึ้น

พอร์ตขนานสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะของสัญญาณซึ่ง ประกอบด้วย

พอร์ตข้อมูล (Data Port)	จำนวน 8 เส้นสัญญาณ
พอร์ตสถานะ (Status Port)	จำนวน 5 เส้นสัญญาณ
พอร์ตควบคุม (Control Port)	จำนวน 4 เส้นสัญญาณ

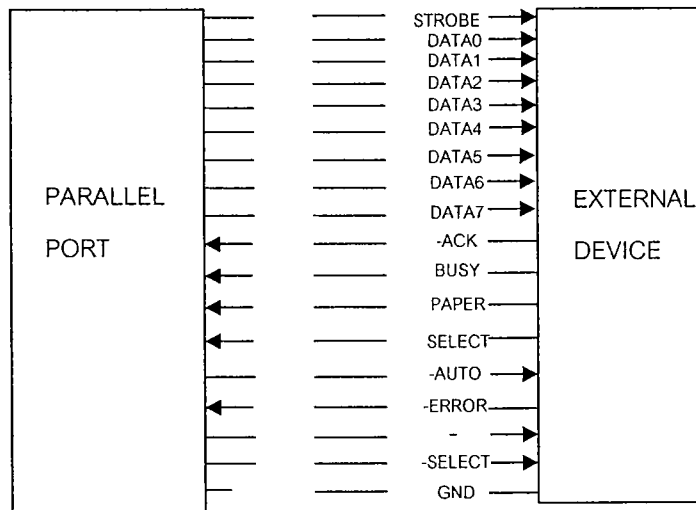
สรุปลักษณะการทำงานของพอร์ตนาน

ตาราง 1 ลักษณะสัญญาณของพอร์ตนาน

PinNo(D-Type25)	Signal Name	Direction In/Out	Register
1	nStrobe	In/Out	Control
2	Data 0	Out	Data
3	Data 1	Out	Data
4	Data 2	Out	Data
5	Data 3	Out	Data
6	Data 4	Out	Data
7	Data 5	Out	Data
8	Data 6	Out	Data
9	Data 7	Out	Data
10	nAck	In	Status
11	Busy	In	Status
12	Paper Out/Paper End	In	Status
13	Select	In	Status
14	nAuto-Linefeed	In/Out	Control
15	nError / nFault	In	Status
16	nInitialize	In/Out	Control
17	nSelect-Printer / nSelect-In	In/Out	Control
18-25	Ground	Gnd	

3.1 ทิศทางของการรับส่งข้อมูล (Pin Outs)

สำหรับการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกเข้ากับพอร์ตนานที่ขาต่าง ๆ นั้น จะมีทิศทางของการรับส่งข้อมูลของพอร์ตนานดังภาพประกอบ 13 ซึ่งแสดงทิศทางการรับส่งข้อมูลของสายสัญญาณในพอร์ตนาน



ภาพประกอบ 13 ทิศทางการรับส่งข้อมูลของพอร์ตขนาน

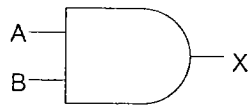
3.2 แอดเดรสของพอร์ต (Port Address)

พอร์ตขนานโดยทั่วไปจะมีพอร์ตแอดเดรสอยู่ที่ตำแหน่ง 378H สำหรับ LPT1 และ 278H สำหรับ LPT2 โดยจะถูกกำหนดให้มีพอร์ตสื่อสารตามมาตรฐานของไบออส (BIOS) โดยระบุตำแหน่งของพอร์ตขนานที่คอมพิวเตอร์ในแต่ละเครื่องสนับสนุนการใช้งาน ซึ่งจะประกอบไปด้วยข้อมูลชนิด 16 บิตที่ใช้ระบุหมายเลขพอร์ต LPT1 และ LPT2 เป็น 0378 ฐานสิบหก (378h) และ 0278 ฐานสิบหก (278H) ตามลำดับ

4. วงจรตรรกะ (Logic Circuits)

วงจรตรรกะอิเล็กทรอนิกส์ ประกอบด้วยหน่วยเล็กที่สุดที่เรียกว่า เกต หรือลอจิกเกต (Logic Gate) ซึ่งได้แก่ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เฉพาะอย่างตามฟังก์ชันตรรกะทั้ง 6 แบบ คือ AND, OR, NAND, NOT, NOR, และ XOR ซึ่งมีการทำงานดังนี้

4.1 AND Gate

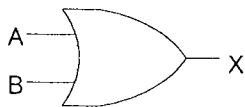


ภาพประกอบ 14 สัญลักษณ์ของ AND Gate

ตาราง 2 ลักษณะการทำงานของ AND Gate

Inputs		Output
A	B	X
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

4.2 OR Gate

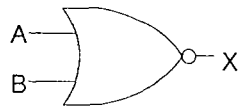


ภาพประกอบ 15 สัญลักษณ์ของ OR Gate

ตาราง 3 ลักษณะการทำงานของ OR Gate

Inputs		Output
A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

4.3 NOR Gate



ภาพประกอบ 16 สัญลักษณ์ของ NOR Gate

ตาราง 4 ลักษณะการทำงานของ NOR Gate

Inputs		Output
A	B	X
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

4.4 NAND Gate

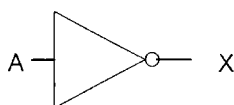


ภาพประกอบ 17 สัญลักษณ์ของ NAND Gate

ตาราง 5 ลักษณะการทำงานของ NAND Gate

Inputs		Output
A	B	X
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

4.5 NOT Gate

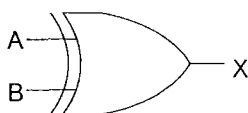


ภาพประกอบ 18 สัญลักษณ์ของ NOT Gate

ตาราง 6 ลักษณะการทำงานของ NOT Gate

Input	Output
A	X
0	1
1	0

4.6 Exclusive OR Gate



ภาพประกอบ 19 สัญลักษณ์ของ Exclusive OR Gate

ตาราง 7 ลักษณะการทำงานของ Exclusive OR Gate

Inputs		Output
A	B	X
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

โดยทั่วไปแล้วเกตพื้นฐานที่นิยมใช้กันทั่วไปคือชนิด Transistor-Transistor Logic หรือ ทีทีแอล (TTL) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ลอจิกเกตชนิดทีทีแอลในการสร้างวงจร

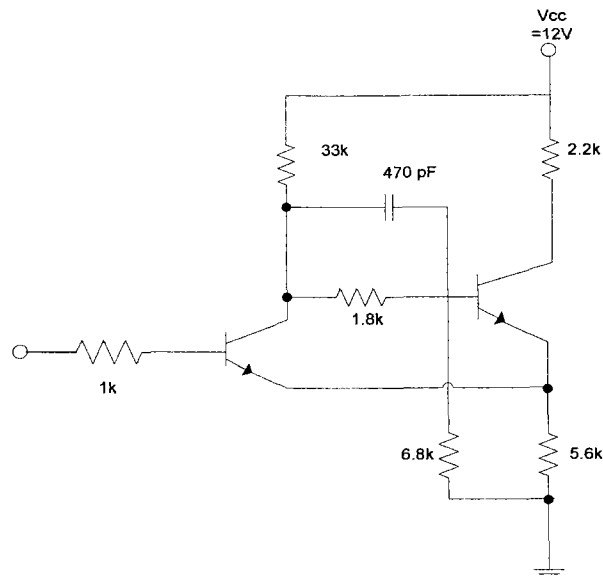
5. Transistor-Transistor Logic หรือ ทีทีแอล (TTL)

Transistor-Transistor Logic (TTL) เป็นไอซีที่มีความนิยมในการนำมาใช้ทางด้านการสร้างวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ซึ่งไอซีทีทีแอลนี้เป็นวงจรตรรกะตระกูลแรกที่น่ามาออกแบบเพื่อผลิตเป็นไอซีโดยตรง จึงมีโครงสร้างที่เหมาะสมกับการผลิตเป็นไอซีเป็นอย่างมาก และยังมีราคาถูกอีกด้วย ลักษณะทางด้านไฟฟ้าทั่วไปของไอซีทีทีแอลคือ ศักย์ไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตเมื่อแสดงลอจิก "0" อยู่ที่ 0.2-0.4 โวลต์ และศักย์ไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตเมื่อแสดงลอจิก "1" อยู่ที่ 3.0-4.0 โวลต์ นอกจากนี้ไอซีทีทีแอลยังมีคุณสมบัติที่เหนือกว่าวงจรตรรกะตระกูลต่าง ๆ อีกหลายอย่าง เช่น การหน่วงของสัญญาณ (Propagation Delay) น้อย กำลังงานสูญเสียในวัสดุ (Power Dissipation) ต่ำ

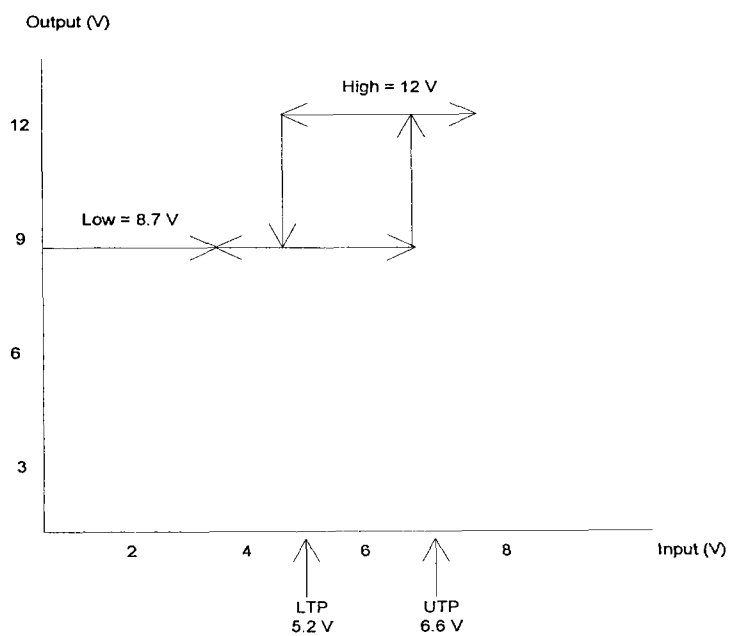
6. วงจรชmitt์ทริกเกอร์ (Schmitt Trigger)

วงจรชmitt์ทริกเกอร์ เป็นวงจรที่สามารถใช้สำหรับปรับสัญญาณดิจิตอลให้เกิดเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมดังภาพประกอบ 20 (ก) แสดงวงจรชmitt์ทริกเกอร์ที่ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ภายในวงจรจะมีเอาต์พุตแบบสองสถานะ ซึ่งการเปลี่ยนสถานะของเอาต์พุตจะเกิดขึ้นเมื่ออินพุตมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ จากกราฟในภาพประกอบ 20 (ข) แสดงให้เห็นว่า เอาต์พุตมีการเปลี่ยนสถานะจาก Low เป็น High เมื่อศักย์ไฟฟ้าอินพุตเพิ่มถึงค่า 6.6 โวลต์ และเอาต์พุตจะเปลี่ยนสถานะจาก High เป็น Low เมื่อศักย์ไฟฟ้าอินพุตมีค่าลดลงจนถึง 5.2 โวลต์ ดังนั้นวงจรชmitt์ทริกเกอร์ จึงสามารถเปลี่ยนแปลงรูปคลื่นให้เป็นพัลส์สี่เหลี่ยมได้ เราใช้สัญญาณที่แปลงจาก ชmitt์ทริกเกอร์ สำหรับวงจรดิจิตอลต่างๆ ที่ต้องการการเปลี่ยนแปลงในช่วงเวลาที่สั้น เช่น วงจรนับจำนวน เป็นต้น

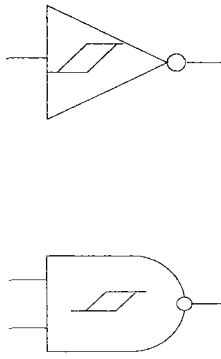
ภาพประกอบ 20 (ค) แสดงสัญลักษณ์ของวงจรดิจิทัลชนิดทริกเกอร์แบบ NAND และแบบ INVERTER



ภาพประกอบ 20 (ก) แสดงวงจรชนิดทริกเกอร์แบบทรานซิสเตอร์



ภาพประกอบ 20 (ข) แสดงการทำงานของชนิดทริกเกอร์



ภาพประกอบ 20 (ค) แสดงสัญลักษณ์ของดิจิทัลลอจิกทรานซิสเตอร์แบบ INVERTER และ NAND

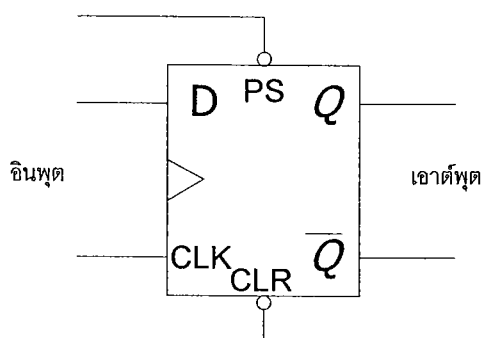
7. ฟลิปฟล็อป (Flip Flop)

ฟลิปฟล็อป เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่งซึ่งนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในเรื่องของวงจรดิจิทัล ซึ่งฟลิปฟล็อปนี้ทำหน้าที่คล้ายเป็นชิ้นส่วนของหน่วยความจำ และเป็นส่วนประกอบของวงจรบันทึกข้อมูลหรือจำนวนตัวเลข (Register) สำหรับวงจรดิจิทัล ข้อมูลหรือจำนวนจะถูกเก็บในรูปของตัวเลขฐานสอง ฟลิปฟล็อป เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้จาก เกต และทรานซิสเตอร์ ฟลิปฟล็อปเป็นมัลติไวเบรเตอร์ชนิดไบสเทเบิล (Bistable) ซึ่งจะมีเอาต์พุตอยู่ 2 สถานะด้วยกัน โดยที่เอาต์พุตหนึ่งจะเป็นคอมพลีเมนต์ (Complement) ของอีกเอาต์พุตหนึ่ง และเอาต์พุตทั้งสองจะคงอยู่ในสถานะใดสถานะหนึ่งจนกว่าจะมีอินพุตพัลส์ (input-pulse) เข้ามากระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนสถานะไป และการที่เอาต์พุตมีสถานะคงที่อยู่ที่ 2 สถานะและคงอยู่ในสถานะใดสถานะหนึ่งนั้น หมายความว่ามันสามารถจดจำสถานะที่เกิดขึ้นเมื่อมีพัลส์สุดท้ายที่ป้อนเข้ามากระตุ้นที่อินพุตได้ ฟลิปฟล็อปมีด้วยกันหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็มีสถานะคงตัว 2 สถานะเหมือนกันหมด จะแตกต่างกันตรงที่ความต้องการของอินพุตที่เข้ามาเพื่อให้เอาต์พุตเปลี่ยนสถานะคงตัวจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่งเท่านั้น

7.1 D Flip-flop (7474)

วงจรรวมเบอร์ 7474 นี้ เป็นฟลิปฟล็อปซึ่งภายในประกอบด้วย D Flip-flop 2 ตัว โดยมีการกระตุ้นทางด้านขอบขาบวก หรือเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าจาก 0 ไป 1 ตามสัญญาณนาฬิกา วงจรรวมเบอร์ 7474 เป็นฟลิปฟล็อปที่มีอินพุต 2 ชุดที่ชัดเจนคือ อินพุตซิงโครนัส (Synchronous Input) ประกอบด้วยขาข้อมูล (D) และขาคล็อก (CLK) ซึ่งทำงานร่วมกัน เมื่อป้อนข้อมูลสัญญาณเข้าที่ขา D ข้อมูลสัญญาณตรรกะจะส่งผ่านไป ที่ เอาต์พุต Q ได้เมื่อมีสัญญาณพัลส์ป้อนเข้าขา CLK มาควบคุมการทำงานเท่านั้น ส่วนอินพุตอะซิงโครนัส (Asynchronous Input) จะประกอบด้วยขาพรีเซต (PS) และขาเคลียร์ (CLR) ซึ่งทำงานด้วยตรรกะ 0 กล่าวคือ เมื่อป้อน 0 ให้

ขา PS จะทำให้ $Q=1$ เมื่อป้อน 0 ให้ขา CLR จะทำให้ $Q=0$ สัญลักษณ์ของฟลิปฟล็อปชนิดนี้แสดงในภาพประกอบ 21



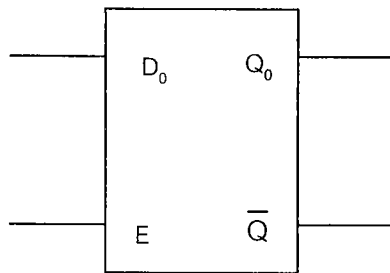
ภาพประกอบ 21 แสดงสัญลักษณ์ของฟลิปฟล็อปชนิดดี (7474)

ตาราง 8 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปชนิดดี (7474)

รูปแบบการทำงาน	อินพุต				เอาต์พุต	
	อะซิงโครนัส		ซิงโครนัส			
	PS	CLR	CLK	D	Q	$\bar{Q}$
Asynchronous	0	1	X	X	1	0
Asynchronous reset	1	0	X	X	0	1
Prohibited	0	0	X	X	1	1
Set	1	1	↑	1	1	0
Reset	1	1	↑	0	0	1

7.2 D Latch (7475)

แลตช์เป็นอุปกรณ์พื้นฐาน สำหรับทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูลชั่วคราว โดยแลตช์ 1 ตัว จะเก็บข้อมูลได้เพียง 1 บิต ซึ่ง Delay Latch (7475) หรือบางครั้งเรียกว่า ไบอะสเตเบิล เป็นแลตช์ที่ทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูล Q หรือหน่วยความจำโดยมีส่วนควบคุมการทำงานของการทำงานของการเก็บข้อมูลคือ ขา enable ถ้ามีสัญญาณพัลส์เกิดขึ้นที่ขา enable ก็จะทำให้ข้อมูลที่เกิดขึ้นที่ขา D ถูกนำไปเก็บไว้ที่ Q และจะคงค่าไว้อย่างนั้น ซึ่งมีสัญลักษณ์ดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 แสดงสัญลักษณ์ของ D Latch (7475)

ตาราง 9 แสดงตารางการทำงานของ D Latch (7475)

Input		Output	
D	CLK	Q	$\bar{Q}$
0	1	0	1
1	1	1	0
x	0	Q_0	$\bar{Q}_0$

จากตารางการทำงานของวงจรเราจะเห็นว่าเอาต์พุต Q จะเป็นไปตามอินพุต D เมื่อมีสัญญาณนาฬิกาเกิดขึ้นจะทำให้ข้อมูลที่ D ถูกส่งไปที่ Q และคงค่าไว้เช่นนั้น

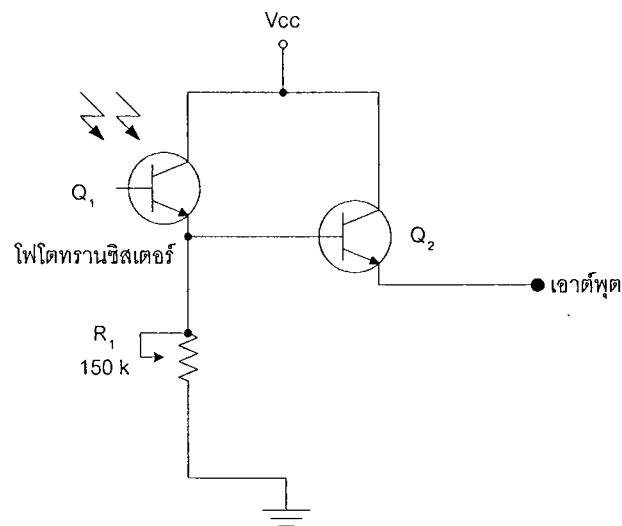
การตรวจจับการเคลื่อนที่แบบหมุน

1. ตัวรับ-ส่งอินฟราเรด

1.1 โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor)

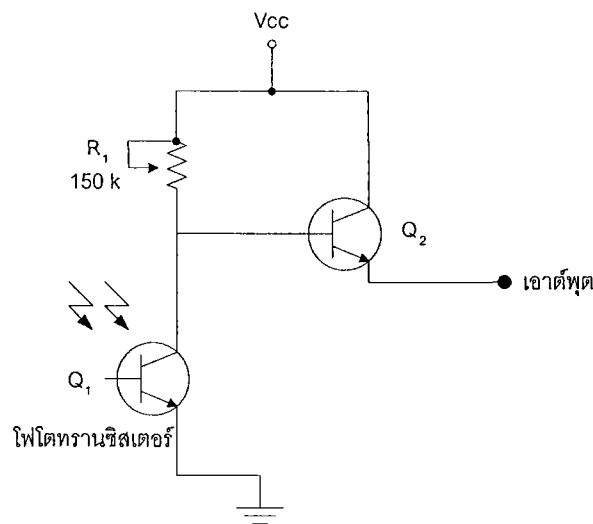
โฟโตทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์รับรู้ทางแสง ซึ่งถูกออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยพื้นที่ของขาเบส (B) จะมีขนาดใหญ่มากกว่าทรานซิสเตอร์ปกติทั่วไป และตัวที่ห่อหุ้มจะถูกทำให้มีช่องไว้สำหรับแสงส่องลงมา โดยปกติแล้วโฟโตทรานซิสเตอร์จะมีขั้วไฟฟ้าคอลเล็กเตอร์ (C) และอิมิตเตอร์ (E) สำหรับเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ ช่องที่เปิดไว้ให้แสงเข้าถูกปิดด้วยแก้วหรือควอตซ์ (Quartz)

โฟโตทรานซิสเตอร์โดยปกติแล้วจะเป็นชนิดเอ็นพีเอ็น (NPN) ซึ่งทำมาจากสารซีลีเนียม (Selenium) ซิลิคอน (Silicon) หรือเจอร์เมเนียม (Germanium) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) แต่ละชนิดจะมีการตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงได้ไม่เหมือนกัน โฟโตทรานซิสเตอร์ที่ทำมาจากซีลีเนียมจะตอบสนองได้เฉพาะบางความยาวคลื่นแสง และตอบสนองต่อแสงได้เช่นเดียวกับดวงตาของมนุษย์ โฟโตทรานซิสเตอร์ที่ทำมาจากซิลิคอนทำงานได้ดีในช่วงความยาวคลื่นแสงที่มองเห็นได้ แต่ก็มีความสามารถที่จะตอบสนองต่อความยาวคลื่นในช่วงที่ใกล้อินฟราเรด (Infrared) ได้ด้วย ส่วนโฟโตทรานซิสเตอร์ที่ทำมาจากสารเจอร์เมเนียม จะสามารถตอบสนองต่อแสงได้เกือบทุกความยาวคลื่นและมีความไวสูงสุดที่ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด¹



ภาพประกอบ 23 วงจรที่ทำงานเมื่อแสงตกกระทบ

¹ศุภเดช สุจินพรัหม. (2548, ตุลาคม). การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน. หน้า 44-47.



ภาพประกอบ 24 วงจรที่ทำงานเมื่อไม่มีแสงตกกระทบบ

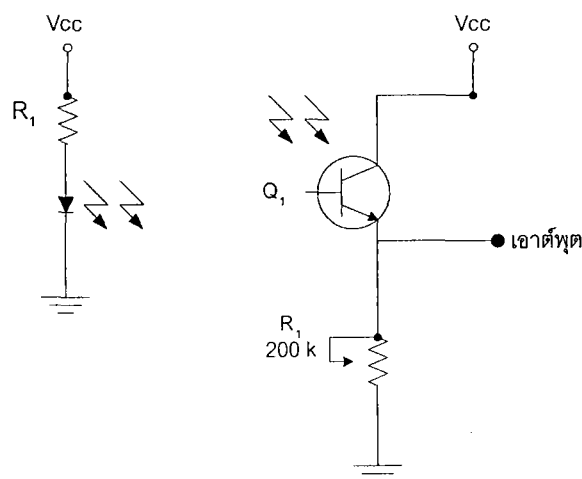
วงจรในภาพประกอบ 23 ให้โฟโตทรานซิสเตอร์ต่อเป็นวงจรตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแสง โฟโตทรานซิสเตอร์ (Q_1) จะอยู่ในลักษณะเปิดวงจร คือไม่นำกระแสในสถานะที่ไม่มีแสง เมื่อ Q_1 ไม่ทำงาน ทรานซิสเตอร์ (Q_2) ก็จะไม่นำกระแส

เมื่อมีแสงส่อง โฟโตทรานซิสเตอร์จะเริ่มนำกระแส ความต่างศักย์จะตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 ซึ่งมีหน้าที่ปรับความไวในการรับแสง ความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R_1 นี้มากพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส การปรับแต่งค่าความต้านทาน R_1 จะเป็นการหาจุดที่ทรานซิสเตอร์ Q_2 ทำงาน ถ้าปรับค่านี้ให้มากขึ้น จะทำให้วงจรต้องการแสงเพียงเล็กน้อย Q_2 ก็สามารถทำงานได้แล้ว แต่ถ้าปรับค่า R_1 ให้น้อยลง วงจรจำเป็นต้องการแสงมากๆ Q_2 จึงทำงาน

ในกรณีที่ต้องการกลับการทำงานของวงจร จำเป็นต้องย้ายตำแหน่งของ Q_1 และ R_1 ดังภาพประกอบ 24 ในวงจรนี้ Q_1 จะไม่นำกระแสเมื่ออยู่ในที่มืดหรือไม่มีแสงทำให้มีความต่างศักย์ตกคร่อม Q_1 หรือศักย์ไฟฟ้าที่เบสของ Q_2 เพิ่มขึ้นทำให้ ทรานซิสเตอร์ Q_2 ทำงาน แต่เมื่อมีแสงส่องมาที่ตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ จะทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์นำกระแส ยิ่งเมื่อมีแสงส่องมากเท่าใดก็จะทำให้ความต่างศักย์ตกคร่อม Q_1 น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อความต่างศักย์ลดลงถึงระดับหนึ่งจะไม่พอเพียงทำให้ Q_2 นำกระแสต่อไปได้ การปรับแต่งค่า R_1 คือการปรับความไวแสงของวงจรเช่นเดียวกัน

1.2 แอลอีดีอินฟราเรด (Infrared LED)

แอลอีดีอินฟราเรดถูกออกแบบมาให้เปล่งเฉพาะอินฟราเรดเท่านั้น ที่สำคัญอินฟราเรดนี้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เมื่อแอลอีดีอินฟราเรดนี้ได้รับการไบแอส (Bias) ตรง อิเล็กตรอน (Electron) จะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อสารกึ่งตัวนำภายในตัวไดโอด เป็นเหตุให้มันปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน (Photon) ปริมาณของพลังงานที่ปล่อยออกมาจากตัวแอลอีดีอินฟราเรดนั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ความยาวคลื่นของรังสีที่ปล่อยออกมานั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างแอลอีดี ถ้าเป็นชนิดแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) จะให้ความยาวคลื่น 940 นาโนเมตร แต่ถ้าทำมาจากแกเลียมอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์ (GaAlAs) จะให้ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร¹



ภาพประกอบ 25 วงจรตัวส่งและตัวรับอินฟราเรดแบบพื้นฐาน

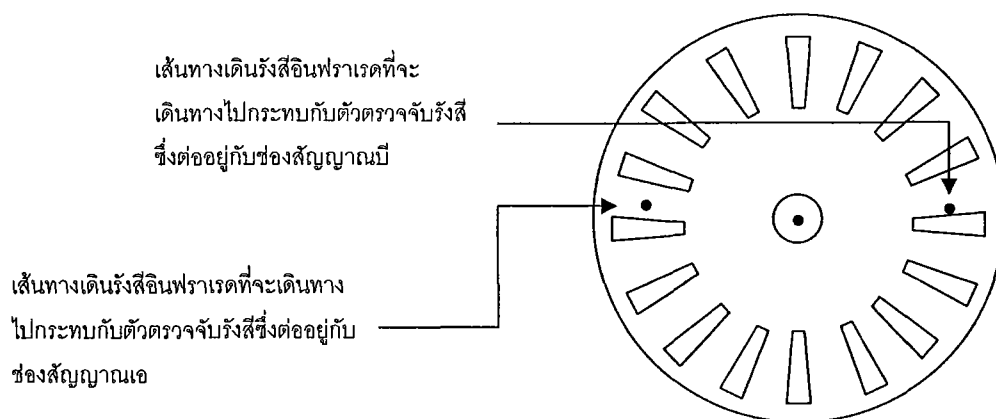
¹ศุภเดช สุจินพรัหม. (2548, ตุลาคม). การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน. หน้า 44-47.

ในภาพประกอบ 25 เป็นวงจรรับส่งอินฟราเรดพื้นฐาน แอลอีดีอินฟราเรดเป็นตัวส่งและโฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดอินฟราเรดเป็นตัวรับ ในส่วนของระบบการส่งนั้น อินฟราเรดจะพุ่งตรงไปข้างหน้า โดยแอลอีดีอินฟราเรดจะได้รับไบแอสตรง จึงส่งอินฟราเรดออกไปอย่างต่อเนื่อง กระแสที่ไหลผ่านแอลอีดีจะถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทาน R_1 ส่วนในการรับนั้นต่อวงจรในลักษณะได้รับรังสีจึงจะทำงาน ซึ่งจะคล้ายกับวงจรในภาพประกอบ 23 แตกต่างกันเพียงรังสีที่จะทำให้วงจรนี้ทำงานได้ต้องเป็นอินฟราเรดเท่านั้น หมายความว่ารังสีอื่นๆ จะไม่มีผลต่อการทำงานของวงจรนี้แต่อย่างไรก็ตาม แสงทั่วไปก็ยังคงมีอินฟราเรดปะปนอยู่ด้วย ดังนั้นเพื่อการทำงานที่ดีขึ้น ควรนำแผ่นพลาสติกสีเข้ม เช่น สีแดง มาปิดไว้ที่ด้านหน้าของตัวรับ เมื่อมีอินฟราเรดจากตัวส่ง จะทำให้ Q_1 ในวงจรรับนำกระแส ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม R_1 ส่งผลให้ Q_2 นำกระแส โดยสามารถปรับความไวของวงจรได้ที่ค่าความต้านทาน R_1

2. การบอกทิศทางการหมุนของส่วนประกอบภายในเมาส์

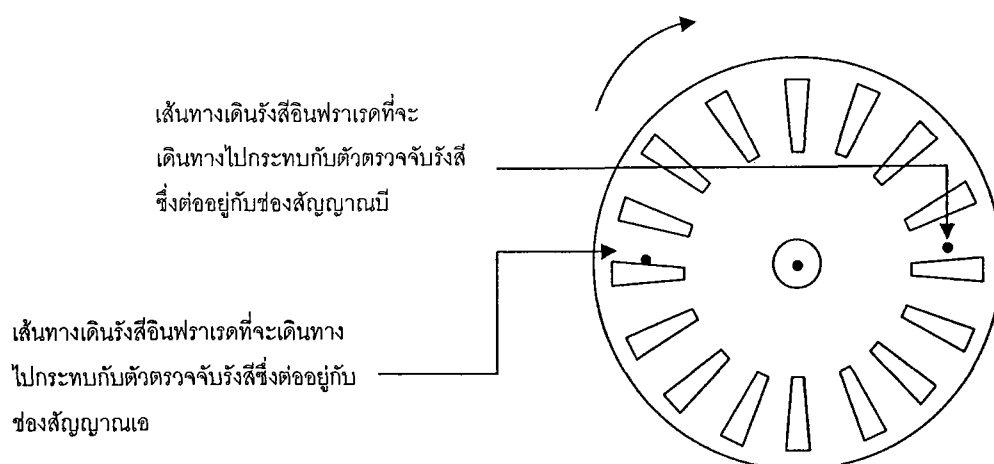
การหมุนของจานเข้ารหัสภายในเมาส์ จะตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่อยู่ระหว่างตัวส่งรังสีอินฟราเรดกับตัวตรวจจับรังสี 2 ชุด ทำให้สามารถบอกทิศทางการหมุนของจานเข้ารหัสภายในเมาส์ได้ ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นนั่นเอง เราสามารถแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของระดับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นได้โดยนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปต่อเข้ากับช่องสัญญาณของออสซิลโลสโคปเพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันของสัญญาณจากตัวตรวจจับทั้งสอง เราสามารถพิจารณาทิศทางการหมุนของจานเข้ารหัสได้ ดังภาพประกอบ 26¹

¹วิสูตร ดุลยสุข. (2546, มกราคม). การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือวัดพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัมบิด. หน้า 25-28.



ภาพประกอบ 26 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสภายในเมาส์

ทิศทางการหมุนของจานเข้ารหัสมี 2 ทิศทาง คือ ทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทิศทาง
ทวนเข็มนาฬิกา พิจารณาภาพประกอบ 26 เมื่อจานเข้ารหัสหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เห็น
ได้ว่าขอบของจานเข้ารหัสนั้น ตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่เดินทางไปกระทบกับตัว
ตรวจจับรังสีที่ต่ออยู่กับช่องสัญญาณเอของฮอสซิลโลสโคป ก่อนที่จะตัดเส้นทางเดินรังสี
อินฟราเรดที่เดินทางไปกระทบกับตัวตรวจจับรังสีที่ต่ออยู่กับช่องสัญญาณบีของฮอสซิลโลสโคป
ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ในช่องสัญญาณเอก่อนช่องสัญญาณบี ดังที่แสดง
ไว้ในภาพประกอบ 27 และ 28 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 27 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสที่หมุนในทิศตามเข็มนาฬิกา

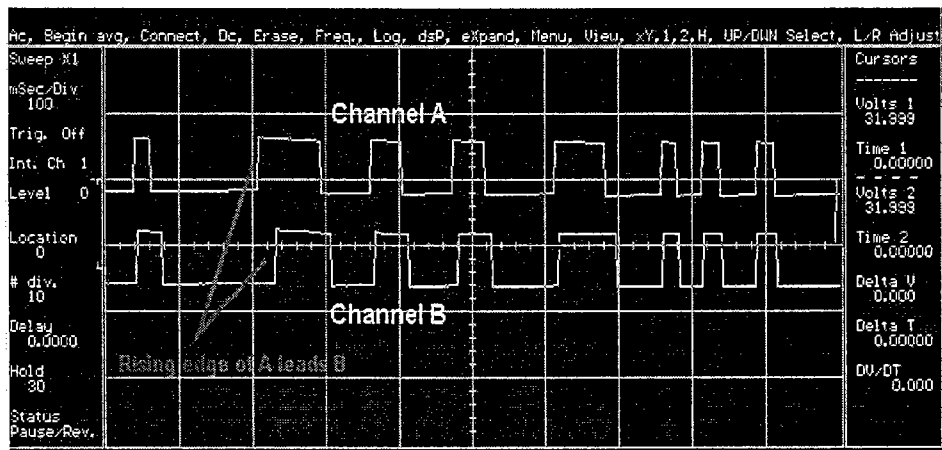


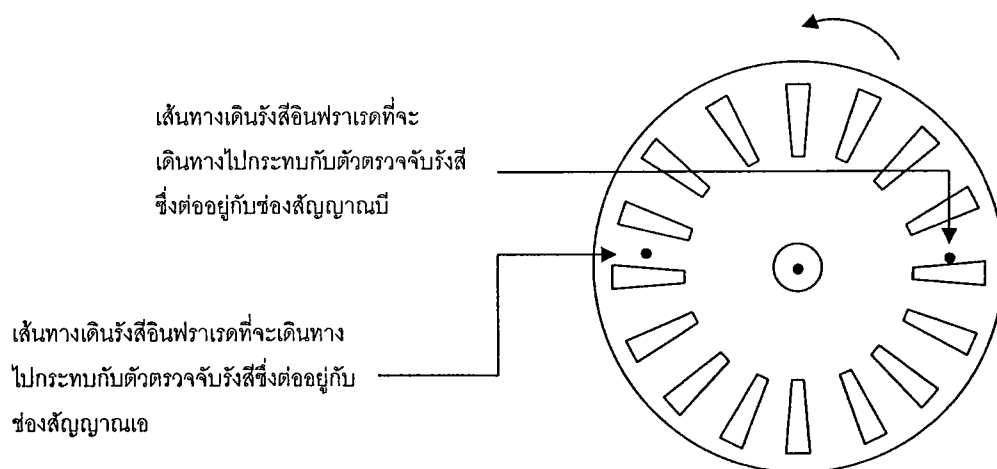
Figure 8: Clockwise shaft rotation

ภาพประกอบ 28 สัญญาณจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถบอกทิศทางการหมุน ของจาน
เข้ารหัสในเมาส์ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ที่มา: Hacking a Mouse for Encoders. (Online). (2000,June). Available Talnet:

boondog.com

ในทางกลับกัน เมื่อจานเข้ารหัสหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เห็นได้ว่าขอบของจาน
เข้ารหัสนั้น ตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่เดินทางไปกระทบกับตัวตรวจจับรังสีที่ต่ออยู่กับ
ช่องสัญญาณบี ก่อนที่จะตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่เดินทางไปกระทบกับตัวตรวจจับรังสี
ที่ต่ออยู่กับช่องสัญญาณเอ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ในช่องสัญญาณบีก่อน
ช่องสัญญาณเอ ดังที่แสดงในภาพประกอบ 29 และ 30 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 29 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสที่หมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกา

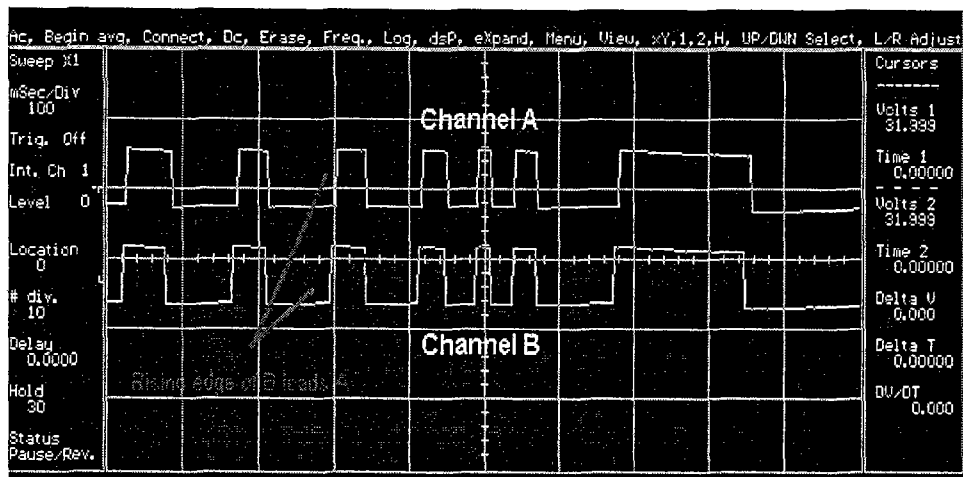


Figure 9: Counter-Clockwise Shaft Rotation

ภาพประกอบ 30 สัญญาณจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถบอกทิศทางการหมุน ของจาน

เข้ารหัสในเมาส์ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ที่มา: Hacking a Mouse for Encoders. (Online). (2000,June). Available Talnet:

boondog.com

การวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์ถดถอยนั้นคือ วิธีการทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัวหรือหลายตัว กับตัวแปรตามหนึ่งตัว ใช้วิธีเขียนกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร แล้วหาเส้นความสัมพันธ์ที่เหมาะสมที่สุดกับข้อมูล ซึ่งเส้นความสัมพันธ์นี้ จะใช้ในการหาค่าตัวแปรอิสระที่ทำนายค่าของตัวแปรตามได้ดีที่สุด การวิเคราะห์ถดถอยที่มีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวเรียกว่า การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression) และการวิเคราะห์ถดถอยที่มีตัวแปรอิสระสองตัวขึ้นไปเรียกว่า การถดถอยพหุ (Multiple Regression)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี พ.ศ.2546 วิสูตร ตุลยสุข ได้เขียนโปรแกรมเพื่อสื่อสารข้อมูลระหว่างเมาส์กับคอมพิวเตอร์ ซึ่งเป็นโปรแกรมที่วัดความสัมพันธ์ของการกระจัดเชิงมุมกับเวลาที่แสดงผลในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุมทางจอภาพคอมพิวเตอร์ ในการวิจัยพบว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถวัดค่าการกระจัดเชิงมุมได้ใกล้เคียงกับค่ามุมจากแผ่นสเกลวัดมุม ที่มีความแตกต่างสูงสุดอยู่ในช่วง ± 0.6 องศา และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.3 ถึง 0.5 องศา และได้นำเครื่องมือไปวัดพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัมบิด ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นถึงการแกว่งแบบเป็นคาบได้

ปี พ.ศ. 2548 ศุภเดช สุจินพรัหม ได้ใช้แผ่นโพลิเมอร์ลายเส้นแบ่งมุมเป็นส่วนประกอบของเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนที่เวลาต่าง ๆ โดยเขียนโปรแกรมควบคุมและสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์วัดมุมกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ตขนาน และแสดงผลออกทางจอภาพในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม อัตราเร็วเชิงมุม ระยะทาง และอัตราเร็วกับเวลา จากการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือโดยนำไปทดลองกับเครื่องจักรแอทวูด เพื่อหาค่าสนามโน้มถ่วงของโลก พบว่ามีค่า g เท่ากับ 9.77 m/s^2 ซึ่งแตกต่างจากค่าของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ 0.1%

ปี พ.ศ. 2537 Peter E. Banks ได้ทำการหาโมเมนต์ความเฉื่อยจากท่อ PVC ซึ่งใช้ท่อมาต่อกันเป็นรูปตัวที แล้วติดกับรอก จากนั้นใช้มวลถ่วงเพื่อหาอัตราเร็ว แล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาแล้วหาอัตราเร่งได้จากความชันของกราฟ จากนั้นนำไปหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี

ปี พ.ศ. 2537 Joe Bunn และ Jay Smith ได้นำท่อ PVC มาต่อเป็นรูปกากบาท และนำรอกมาติดที่ฐานของอุปกรณ์ ซึ่งมียางยืดคล้องกับท่อ PVC ที่เจาะรู จากนั้นดึงเชือกที่ปลายด้านบนทำให้ ท่อ PVC หมุนด้วยอัตราเร็วที่พอเหมาะเพื่อหาคาบในการหมุน จากนั้นทำการวัดขนาดของแรงสู่ศูนย์กลางจากการใช้ยางคล้องที่ท่อ PVC แล้วผูกติดกับเชือก แล้วนำมวลแขวนที่รอก ซึ่งการทดลองตอนนี้อยู่ระบบไม่มีการหมุน จากการทดลองสามารถนำมาคำนวณหาแรงสู่ศูนย์กลางซึ่งมีความผิดพลาดเพียง 5 % เท่านั้น

ปี พ.ศ. 2539 Charles J. Reidl, Jr. ได้ทำการทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อยเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี โดยใช้แท่งไม้วางในแนวตั้งฉากกับพื้น แล้วทดลองเพื่อหาคาบของการแกว่งของระบบเพนดูลัม ซึ่งใช้น้ำพิกากับเวลาในการแกว่ง แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยซึ่งใช้ทฤษฎีแกนขนาน ทำให้ได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ใกล้เคียงกัน

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

1. การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการวิจัย
2. ออกแบบสร้างเครื่องมือในการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง
3. ทดสอบโปรแกรมกับเครื่องมือทดลองโดยทำการวัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเทียบกับ

ค่าคำนวณทางทฤษฎี

3.1 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการวิจัย

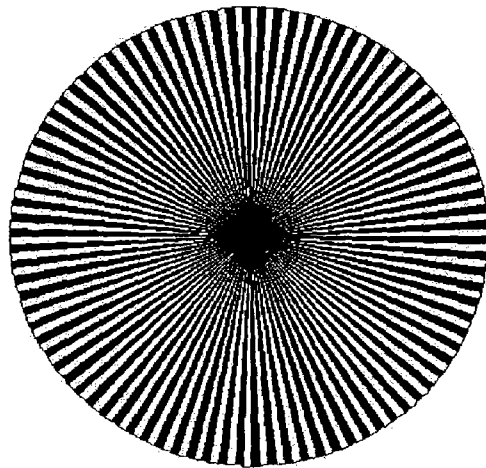
3.1.1 อุปกรณ์ในการทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อยประกอบด้วย

- ท่อ PVC ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว จำนวน 4 ชิ้น ยาว 100 เซนติเมตร
- ข้อต่อ PVC แบบ 4 ทาง
- ไม้อัดขนาด กว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น
- เชือก
- สปริง
- ตะปูคอนกรีต, สกรูเกลียวปล่อย
- เครื่องชั่งดิจิตอลความละเอียด 0.001 หน่วยกรัม
- เวอร์เนียคาลิเปอร์ความละเอียด 0.01 หน่วยเซนติเมตร
- ไม้บรรทัด

3.1.2 อุปกรณ์ในการสร้างวงจรตรวจจับการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

- วงจรรวมเบอร์ 7414 , 7474 , 7475, 7404, 7401
- ตัวต้านทานขนาด 100 โอห์ม , 1 กิโลโอห์ม , 2.2 กิโลโอห์ม
- สายแพร
- แผ่นใสวัดมุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร โดยเส้นแต่ละเส้นที่ลากจากจุดศูนย์กลางไปยังเส้นรอบวงทำมุมระหว่างกัน 2 องศา จำนวน 180 เส้น ซึ่งทำให้เป็นแถบมืดและสว่างสลับกันดังภาพประกอบ 30

- อุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่แบบหมุน¹



ภาพประกอบ 30 แบบแผ่นใสวัดมุมด้วยการตัดลำแสงจำนวน 180 เส้น

3.2 การออกแบบสร้างเครื่องมือในการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

1. ขั้นตอนการออกแบบวงจรเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง
2. ขั้นตอนการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดลองการเคลื่อนที่แบบหมุน
3. ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

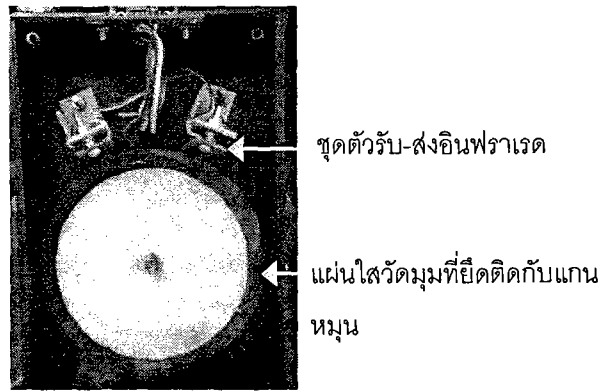
3.2.1. ขั้นตอนการออกแบบวงจรเพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่แบบหมุน

สองทิศทาง

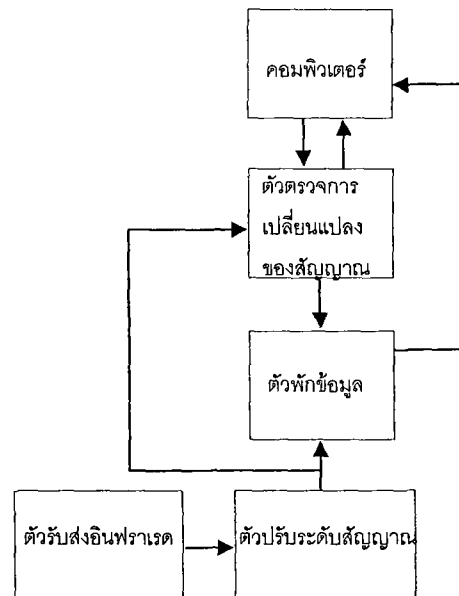
ศึกษาและทำการติดตั้งตัวรับรู้รังสีอินฟราเรดและแผ่นใสวัดมุมเพิ่มเติม โดยเปลี่ยนแผ่นใสวัดมุมจากของเดิมซึ่งเส้นที่ลากจากจุดศูนย์กลางมีขนาดเส้นละ 1 องศา ให้มีขนาดเส้นละ 2 องศา โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นใสเท่าเดิมในอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่แบบหมุน ทดสอบการปรับตำแหน่งตัวรับรู้ทั้งสองโดยต่อกับออสซิลโลสโคปและสังเกตจนได้สัญญาณเหมือนกันชัดเจนที่สุดบนจอออสซิลโลสโคปในทั้งสองทิศทาง

¹ศุภเดช สุจินพรัหม. (2548, ตุลาคม). การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน. หน้า 49-53.

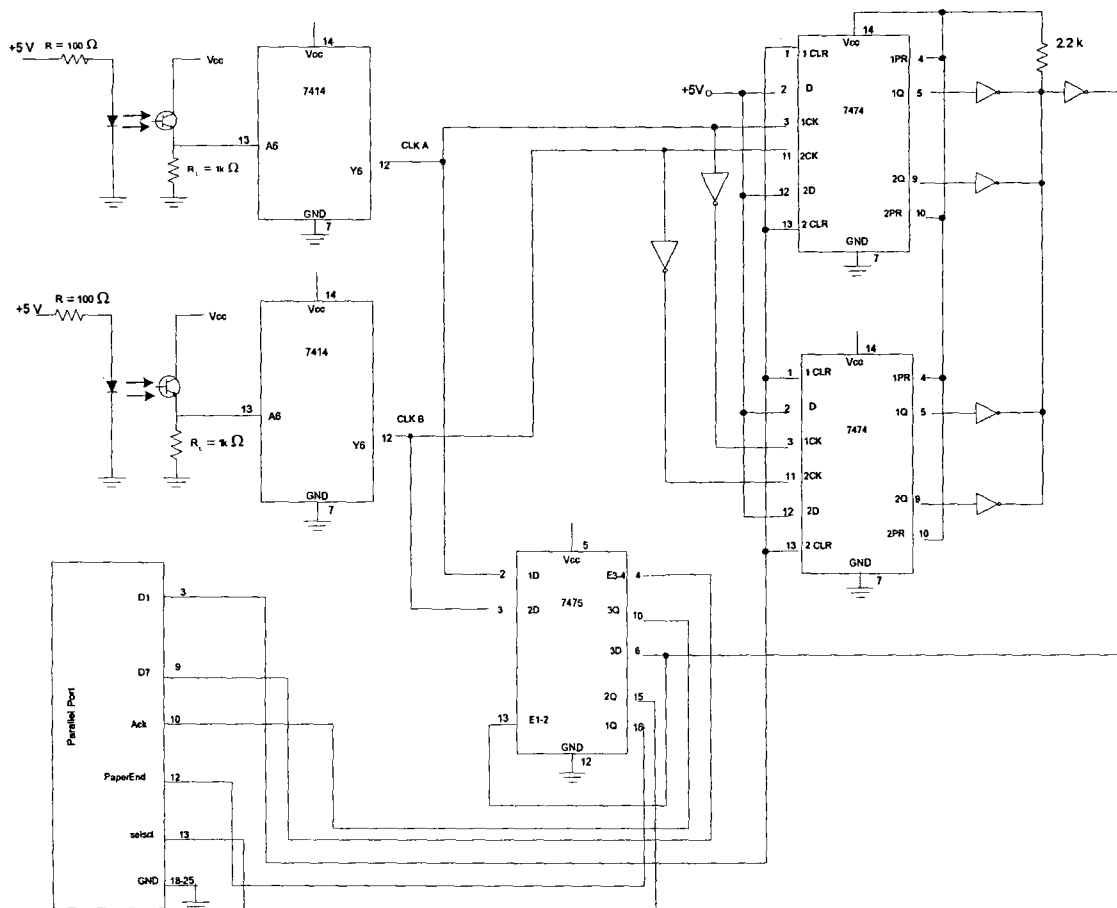
การตรวจสอบและแสดงผลการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง ได้ออกแบบให้มีแผนภาพแสดงการทำงานดังภาพประกอบ 32 การทำงานเริ่มจากเมื่อมีการหมุนแกนหมุนของรอกที่ติดอุปกรณ์รับรู้ทางแสงไว้ ซึ่งทำให้แผ่นใสวัดมุมที่ยึดติดกับแกนหมุนมีการเคลื่อนที่ตามแกนหมุนไปด้วย เมื่อเส้นทึบบนแผ่นใสหมุนตัดผ่านลำรังสีอินฟราเรด โดยการจัดวางตำแหน่งของตัวรับส่งอินฟราเรดสองชุดให้อยู่ในลักษณะเหลื่อมกันเล็กน้อยตามภาพประกอบ 31 ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าของสัญญาณทางออกไม่พร้อมกัน ความแตกต่างของสัญญาณสามารถนำไปวิเคราะห์ว่าแกนหมุนมีการหมุนไปทิศทางซ้ายหรือขวา เมื่อตัวรับอินฟราเรดได้รับอินฟราเรดจากตัวส่ง ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกของตัวรับจะมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ แต่เมื่อตัวรับส่งอินฟราเรดถูกบัง จะทำให้ความต่างศักย์นี้มีค่าประมาณ 3-4 โวลต์ ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าจะถูกส่งไปยังวงจรของระบบวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนดังภาพประกอบ 33 เพื่อปรับให้มีขนาดและรูปสัญญาณที่เหมาะสมกับวงจรประมวลผลทางดิจิทัลด้วยวงจรมิตต์ทริกเกอร์สองวงจร และเพื่อแยกสัญญาณให้ทราบว่ามีการเปลี่ยนแปลงการหมุนทิศทางใด ซึ่งวงจรมิตต์ทริกเกอร์ประกอบด้วยวงจรรวมหมายเลข 7414 จากนั้นจึงไปผ่านวงจรตรวจการเปลี่ยนแปลง ที่ประกอบด้วยวงจรรวมหมายเลข 7474 ซึ่งเป็นฟลิปฟล็อปชนิด D-flipflop 4 ตัว อินเวอร์เตอร์ และ OR เกต สัญญาณทางออกของวงจรตรวจการเปลี่ยนแปลงนี้จะเป็นสัญญาณที่ใช้ในการกระตุ้นให้วงจรรวมหมายเลข 7475 ซึ่งเป็น D-Latch ทำการพักข้อมูลไว้เมื่อมีสัญญาณการเปลี่ยนแปลงของการตัดลำแสงอินฟราเรด คอมพิวเตอร์จะทำการตรวจสอบสัญญาณทางออกของวงจรตรวจการเปลี่ยนแปลงผ่านทางช่องสัญญาณ Ack ทำให้ทราบว่ามีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหรือไม่ และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณเกิดขึ้น ค่าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงล่าสุดจะถูกเก็บด้วยคอมพิวเตอร์ โดยสัญญาณจะถูกรับเข้าทางพอร์ต Select และ Paper End เพื่อทำการประมวลผลการเคลื่อนที่ หลังจากนั้นคอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณผ่านทางพอร์ตข้อมูล D1 ทำการรีเซตตัวตรวจการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้พร้อมรับการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณและทำการพักข้อมูลใหม่ที่จะผ่านเข้ามา ข้อมูลที่คอมพิวเตอร์รับเข้ามาจะได้รับการประมวลผลจัดเก็บแล้วแสดงผลทางจอภาพต่อไป



ภาพประกอบ 31 แสดงส่วนประกอบเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง



ภาพประกอบ 32 แผนภาพการทำงานของเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น

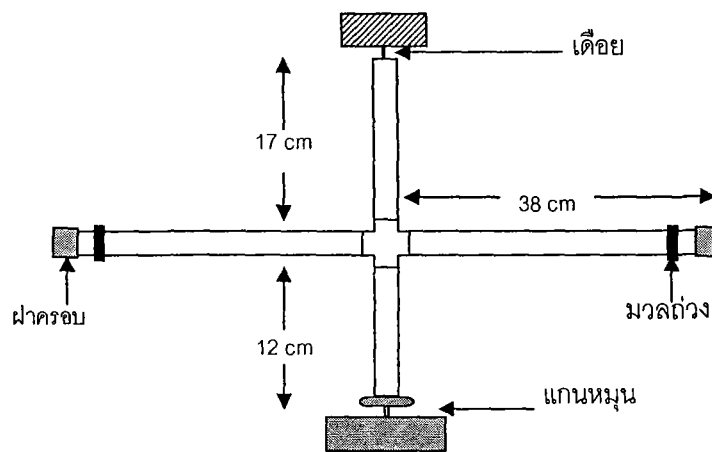


ภาพประกอบ 33 แสดงวงจรของระบบวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

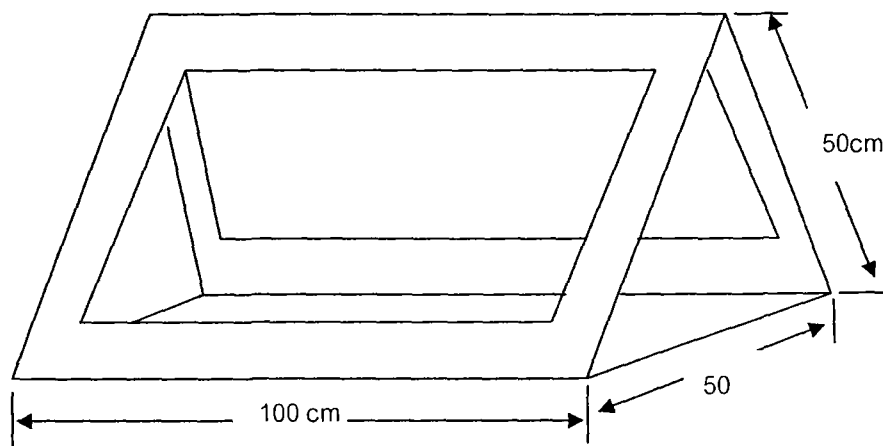
3.2.2 ขั้นตอนการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดลองการเคลื่อนที่แบบหมุน

ก) สร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดลองหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุที่มีการหมุน โดยใช้ท่อ PVC ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว นำมาประกอบกันตามภาพประกอบ 34

ข) สร้างโครงเพื่อใช้สำหรับรองรับอุปกรณ์ โดยใช้ไม้อัด ขนาด กว้าง 50 cm ยาว 100 cm ทั้งหมด 3 แผ่น โดยตัดให้เป็นกรอบตามภาพประกอบ 35 ทั้งสองแผ่น แล้วนำมาประกอบกันเป็นรูปตัววี โดยใช้แผ่นที่ไม่ได้ทำการตัดวางเป็นฐานรอง

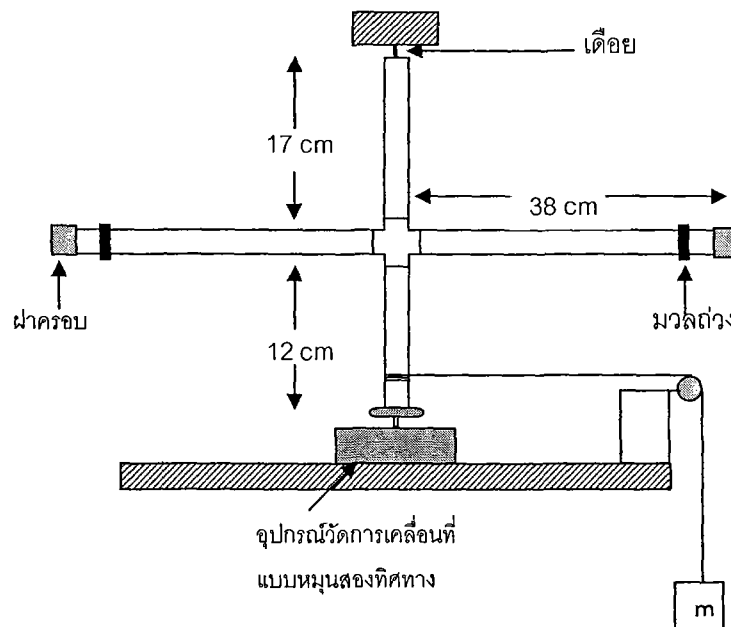


ภาพประกอบ 34 แสดงอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อหาโมเมนต์ความเฉื่อย



ภาพประกอบ 35 โครงสำหรับยึดอุปกรณ์การทดลอง

ค) ติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อยของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น โดยนำอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน¹ ติดตั้งบนฐานรองโดยมี ท่อ PVC ที่ประกอบกันแล้วติดตั้งบนรอกที่มีแกนหมุนติดกับกล่องอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบหมุนตามภาพประกอบ 36 โดยนำเชือกซึ่งปลายด้านหนึ่งพันรอบท่อ PVC ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งผูกติดกับมวลแล้วคล้องผ่านรอกเบาที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายฐานรองอีกครั้งหนึ่ง



ภาพประกอบ 36 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อย

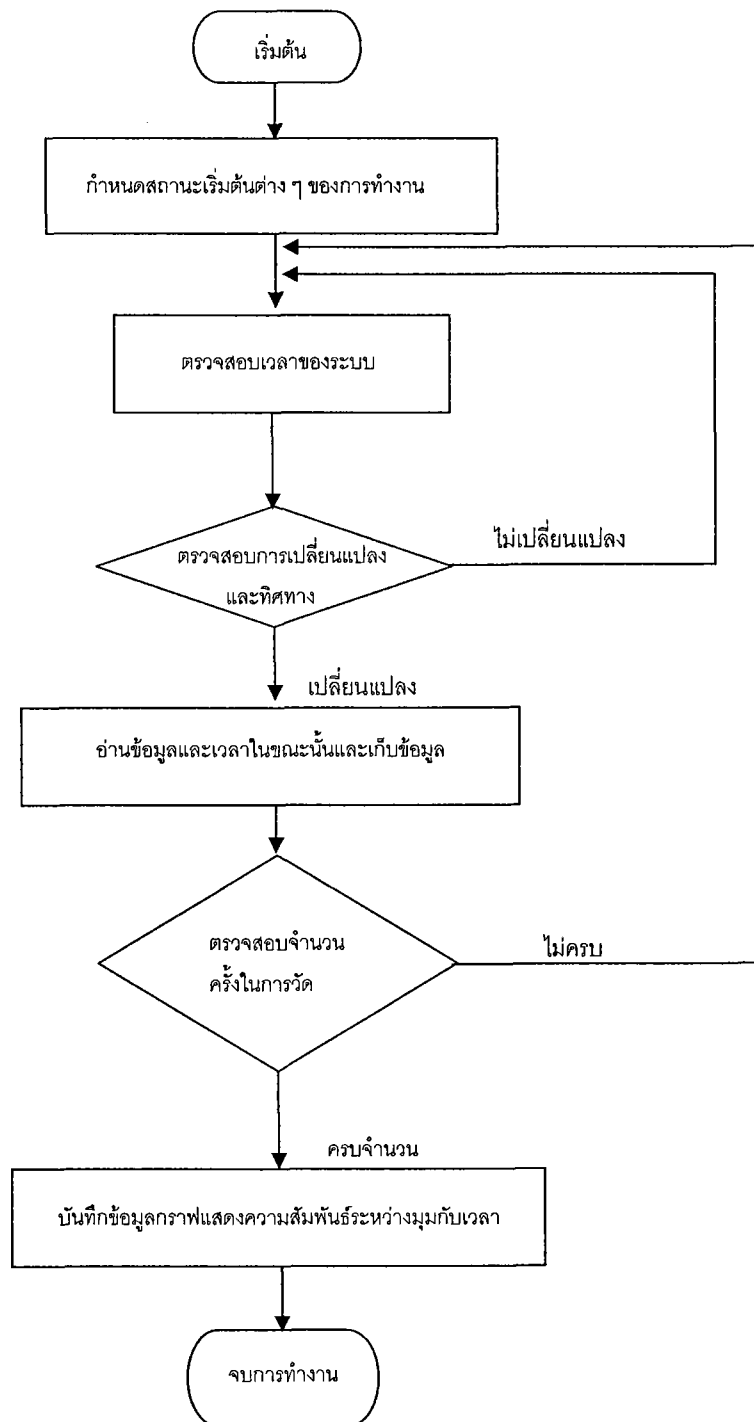
¹ศุภเดช สุจินพรัหม. (2548, ตุลาคม). การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน. หน้า 49-53.

3.2.3 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ภาษาซี ซึ่งเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกอย่างพอร์ตนานได้ นำมาเขียนโปรแกรมคำสั่งในการตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยโปรแกรมจะตรวจการเปลี่ยนแปลงทิศทางของการหมุนเป็นการกระจัดเชิงมุมที่เวลาต่าง ๆ และสามารถนำค่าการกระจัดเชิงมุม ไปคำนวณหาปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหมุนได้ โดยรายละเอียดของโปรแกรมจะรวมส่วนที่เป็นการควบคุมการทำงานการรับส่งข้อมูลทางพอร์ตนาน การเก็บข้อมูล และการแสดงผลของการวัดในรูปของกราฟซึ่งแสดงค่ามุมที่เวลาต่างๆ ทางจอภาพคอมพิวเตอร์เอาไว้ในโปรแกรมเดียวกัน

ลักษณะการแสดงผลของการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน สามารถทำได้โดยใช้คอมพิวเตอร์อ่านข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของการหมุนเกิดขึ้นและเก็บข้อมูล หลังจากนั้นนำข้อมูลไปแสดงผลในรูปของกราฟ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา โดยผลของข้อมูลที่บันทึกได้จะนำไปวิเคราะห์ การเคลื่อนที่แบบหมุน เปรียบเทียบกับทฤษฎี ทำให้ทราบโมเมนต์ความเฉื่อยของเครื่องมือทดลอง สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำสั่ง แสดงไว้ในแผนผังการทำงาน (Flow Chart) ดังต่อไปนี้

โปรแกรมแสดงผลการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา



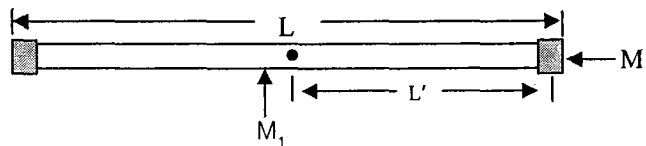
3.3 การทดสอบโปรแกรมกับอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นโดยวัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อย เปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี

3.3.1 การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยตามทฤษฎี

อุปกรณ์ทดลองที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ท่อ PVC ขนาด $\frac{1}{2}$ นิ้ว และมีรูปทรงที่สามารถคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยได้ พิจารณาจากภาพประกอบ 37 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของท่อ PVC ซึ่งวางในแนวนอนมี 2 ท่อนคือ

หรือ
$$I_1 = \frac{1}{12} M_1 L^2 + 2M' L'^2 \quad (29)$$

เมื่อ M_1 คือมวลรวมของท่อ PVC ในแนวแกนนอน
 M' คือมวลของฝาครอบท่อ PVC
 L คือความยาวของท่อในแนวแกนนอน
 L' คือระยะทางจากจุดหมุนถึงกึ่งกลางของฝาครอบ

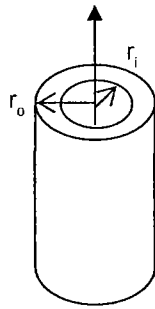


ภาพประกอบ 37 แสดงการพิจารณาโมเมนต์ความเฉื่อยของท่อ PVC ในแนวนอน

โมเมนต์ความเฉื่อยของท่อ PVC ซึ่งอยู่ในแนวตั้งฉากและอยู่ในแนวเดียวกันกับแกนหมุน
 พิจารณาจากภาพประกอบ 38

$$I_2 = \frac{1}{2} M_2 (r_o^2 + r_i^2) \quad (30)$$

เมื่อ M_2 คือมวลรวมของท่อ PVC ในแนวตั้ง
 r_o คือรัศมีภายนอกของท่อ PVC
 r_i คือรัศมีภายในของท่อ PVC



ภาพประกอบ 39 แสดงการพิจารณาโมเมนต์ความเฉื่อยของท่อ PVC ในแนวแกนตั้ง

โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลถ่วงทั้งสองด้านที่อยู่ห่างจากศูนย์กลางเท่ากันเป็น

$$I = M_3 R^2$$

นั่นคือโมเมนต์ความเฉื่อยสำหรับมวลสองก้อนคือ

$$I_3 = 2M_3 R^2 \quad (31)$$

เมื่อ M_3 คือมวล 1 ก้อนที่ใช้ถ่วงแต่ละด้าน
 R คือระยะทางจากจุดหมุนจนถึงมวลถ่วง

ดังนั้นโมเมนต์ความเฉื่อยรวมทั้งหมดคือ

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 \quad (32)$$

3.3.2 การหาโมเมนต์ความเฉื่อยจากการทดลอง

3.3.2.1 นำเครื่องมือวัดติดตั้งบนอุปกรณ์ตรวจจับการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยมีมวลที่ผูกติดกับเชือกคล้องผ่านรอกเบาซึ่งตั้งอยู่กับฐานของอุปกรณ์ ดังภาพประกอบ 36 ทำการทดลองหามวลยังผลของความเสียดทานโดยค่อย ๆ ใส่มวลเพิ่มขึ้นจนกระทั่งอุปกรณ์ทดลองเริ่มขยับ

บันทึกมวลที่ทำให้อุปกรณ์เริ่มเคลื่อนที่แล้วหาค่ามวลเฉลี่ยเพื่อหาขนาดของทอร์กเนื่องจากแรงเสียดทานจากสมการ

$$\tau_f = m_f g r_o$$

เมื่อ m_f คือ มวลยังผลของความเสียดทาน

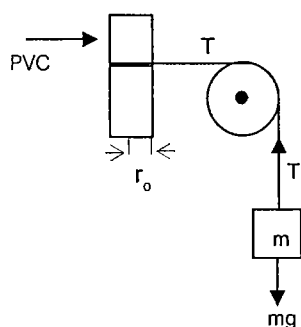
g คือ ค่าสนามโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.8 m/s^2

r_o คือ รัศมีภายนอกของท่อ PVC เท่ากับ $1.06 \times 10^{-2} \text{ m}$

3.3.2.2 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.3.2.1 โดยเปลี่ยนมวลที่ใช้แขวนเพิ่มขึ้นทีละ 10.0 g โดยเริ่มจาก 30.0 g ถึง 60.0 g ปลดปล่อยมวลที่ถูกติดกับเชือกให้เคลื่อนที่ ทำให้อุปกรณ์ทดลองเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุน จากนั้นทำการเก็บข้อมูลการกระจัดเชิงมุมกับเวลาด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ นำข้อมูลที่ได้จากคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์ค่าอัตราเร่งเชิงมุมด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression Analysis) ด้วยโปรแกรมการจัดการด้านแผ่นงาน (Worksheet) วิเคราะห์ข้อมูลตัวเลขที่เก็บเป็นคู่อันดับมุมกับเวลาจากนั้นนำผลที่ได้จากโปรแกรมมาเปรียบเทียบกับสมการ (7) ในบทที่ 2 คือ

$$\theta = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2} \alpha t^2$$

ซึ่งทำให้ทราบค่าอัตราเร่งเชิงมุมจากผลลัพธ์ที่ได้ในเทอมที่ 3 คือ $\frac{1}{2} \alpha$ จากนั้นคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจากอัตราเร่งเชิงมุมที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย ซึ่งสามารถหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในกรณีนี้ได้จากสมการ $\Sigma \tau = I \alpha$ โดยผลรวมของทอร์กสามารถพิจารณาได้จากภาพประกอบ 40 คือ



ภาพประกอบ 40 แสดงแผนภาพการวิเคราะห์ผลรวมของทอร์กสุทธิ

$$Tr_O - \tau_f = I\alpha \quad (33)$$

เมื่อ T คือแรงดึงเชือกซึ่งปลายด้านหนึ่งพันรอบท่อ PVC ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งผูกติดกับมวลโดยคล้องผ่านรอกซึ่งหาได้จาก

$$mg - T = ma$$

และ $a = r_O \alpha$ ดังนั้น $T = mg - mr_O \alpha$

แทนค่า T ในสมการ (33) จะได้โมเมนต์ความเฉื่อยเท่ากับ

$$I = \frac{mgr_O}{\alpha} - mr_O^2 - \frac{\tau_f}{\alpha} \quad (34)$$

เมื่อ m คือมวลที่ใช้แขวนซึ่งผูกติดกับเชือก

r_O คือรัศมีภายนอกของท่อ PVC

τ_f คือขนาดของทอร์กเนื่องจากแรงเสียดทาน

จากนั้นนำค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่คำนวณได้จากสมการ (34) ในขณะที่ใช้มวลที่แขวนต่าง ๆ กันมาเปรียบเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎีในหัวข้อ 3.3.1

3.3.2.2 ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่แบบหมุนแบบสองทิศทาง โดยใช้เชือกพันรอบท่อ PVC โดยมีปลายทั้งสองของเส้นเชือกผูกติดกับสปริงที่ตรึงอยู่กับผนังตามภาพประกอบ 41 จากนั้นแกว่งอุปกรณ์ทดลอง โดย เมื่อทำการบิดท่อ PVC จนสปริงยืดออกจะเกิดทอร์กบิดกลับซึ่งเป็นสัดส่วนกับมุมบิดคือ $\tau = -k\theta$ และเมื่อปล่อยจะทำให้ท่อ PVC เกิดการออสซิลเลตแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายซึ่งมีการเคลื่อนที่เป็นไปตามสมการ (23) ในบทที่ 2

$$\theta(t) = \theta_m \cos(\omega t + \phi)$$

และ $\omega = \sqrt{\frac{\kappa}{I}} = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

เมื่อ κ คือค่าคงตัวในการบิด (Torsion constant) ในที่นี้ขึ้นอยู่กับค่านิจของสปริงด้วย และสามารถหาค่าคงตัวในการบิด κ ได้โดยพิจารณาจากภาพประกอบ 42 ในกรณีนี้สปริงยืดออกจากการบิดท่อ PVC จะทำให้มีแรงดึงกลับเป็นไปตามสมการ

$$\vec{F} = -\kappa \vec{x}$$

จาก
$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F}$$

เมื่อ
$$\vec{r} = \frac{d}{2} \hat{a}_y$$

ดังนั้น
$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} = \frac{d}{2} \hat{a}_y \times (-\kappa x \hat{a}_x)$$

ระยะยืดของสปริง x จะเพิ่มขึ้นเมื่อ มุม θ ลดลง

ดังนั้น $x = s = -\frac{d}{2}\theta$ จะได้ว่า
$$\sum \vec{\tau} = -\kappa \left(\frac{d^2}{4} \right) \theta \hat{a}_z$$

ให้ $\frac{d^2}{4} = R'^2$ และเมื่อคิดทั้งสองด้านของท่อ PVC จะได้ขนาดของทอร์กลัพธ์คือ

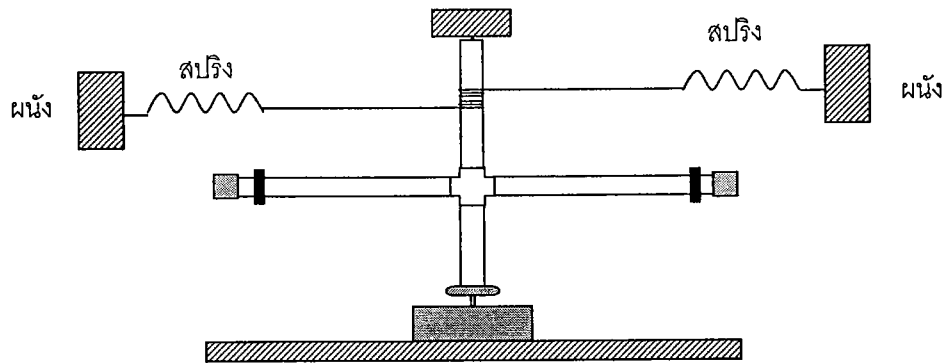
$$\sum \tau = -2\kappa R'^2 \theta$$

ดังนั้นค่าคงตัวในการบิด κ คือ $2\kappa R'^2$

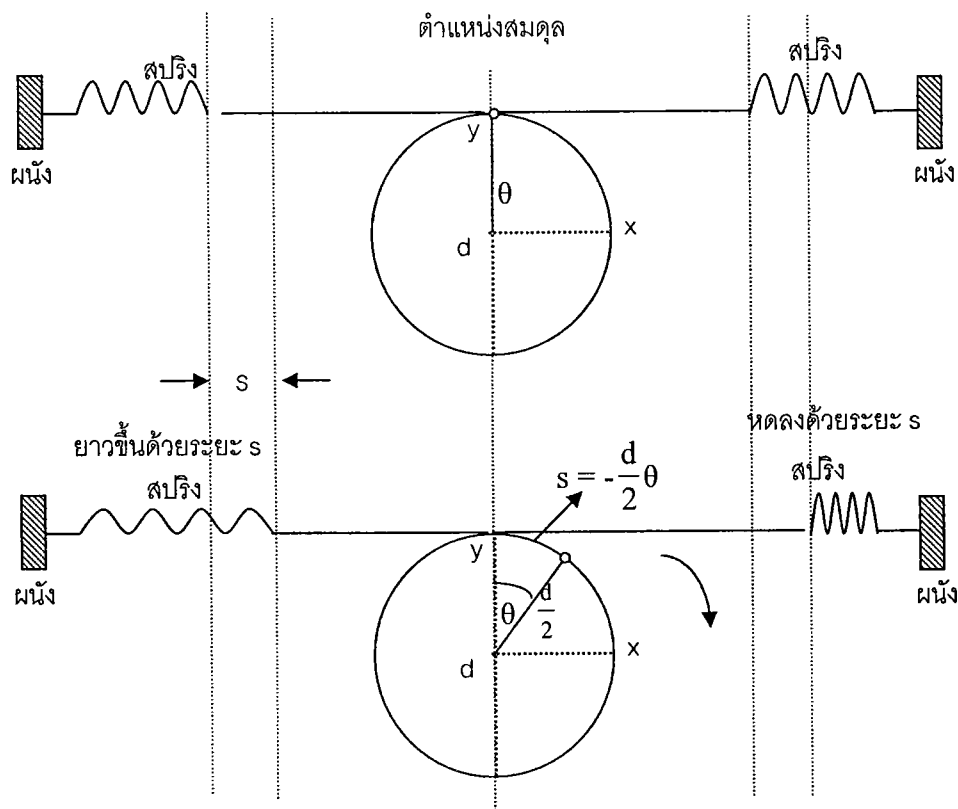
ทำการเก็บข้อมูลการกระจัดเชิงมุมกับเวลาจากคอมพิวเตอร์โดยบันทึกเป็นไฟล์อักษร (.txt) ซึ่งจะช่วยให้รู้ค่าคาบเวลาในการครบรอบของการแกว่งของอุปกรณ์ เมื่อรู้ค่า T และค่าคงตัวในการบิด (κ) ซึ่งหาได้จาก $2\kappa R'^2$ โดยค่าคงตัวของสปริง (k) หาได้จากการถ่วงมวลแล้ววัดระยะยืดกับมวลที่เพิ่มขึ้น จากนั้นนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดกับมวลที่ใช้ จะได้ค่าความชันของกราฟซึ่งคือค่าคงตัวของสปริง ดังนั้นจึงสามารถหาโมเมนต์ความเฉื่อยในกรณีนี้ได้ตามสมการ (28)

$$I = \kappa \frac{T^2}{4\pi^2}$$

นำค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ได้ในกรณีนี้ไปเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีตามหัวข้อ 3.3.1



ภาพประกอบ 41 อุปกรณ์การทดลองในกรณีหมุนสองทิศทาง



ภาพประกอบ 42 แสดงภาพตัดขวางจากด้านบนของท่อ PVC เมื่อถูกบิด โดย S คือระยะในการยืดของสปริง เมื่อ θ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเป็นบวก และใน θ ทิศทางตามเข็มนาฬิกาเป็นลบ

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

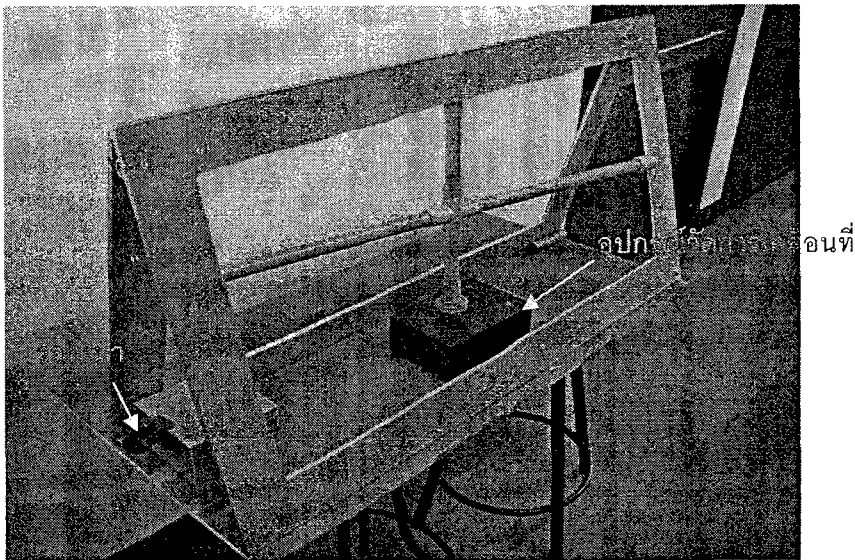
ผลการทดลองสร้างเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางและอุปกรณ์การทดลองโมเมนต์ความเฉื่อยตามขั้นตอนดังกล่าวในบทที่ 3 ประกอบด้วย

1. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อย
2. การออกแบบและสร้างวงจรวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง
3. การทดสอบโปรแกรมกับเครื่องมือทดลองโดยทำการวัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

เทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี

4.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อย

อุปกรณ์ทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อยที่ออกแบบและสร้างขึ้น ตามแบบภาพประกอบ 34 และ 35 ได้ผลดังภาพประกอบ 43



ภาพประกอบ 43 แสดงอุปกรณ์การทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อย

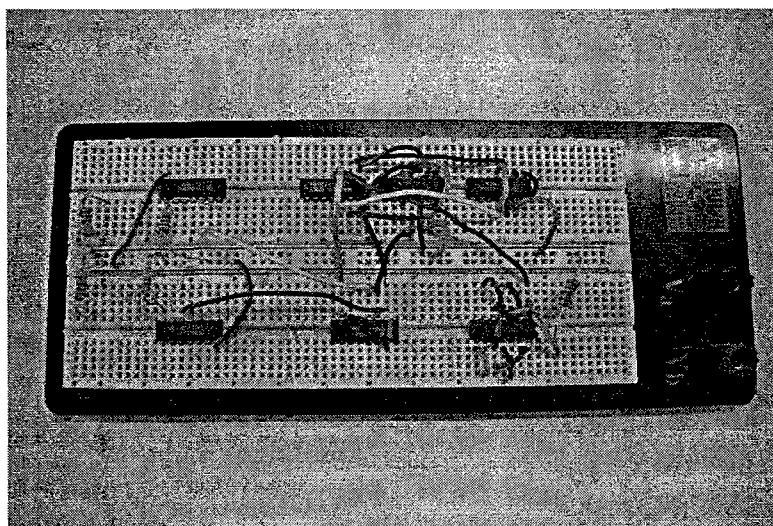
4.2 การออกแบบและสร้างวงจรวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

แบ่งออกเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. การออกแบบและสร้างวงจรวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง
2. การเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางของเครื่องมือวัด

4.2.1 การออกแบบและสร้างวงจรวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

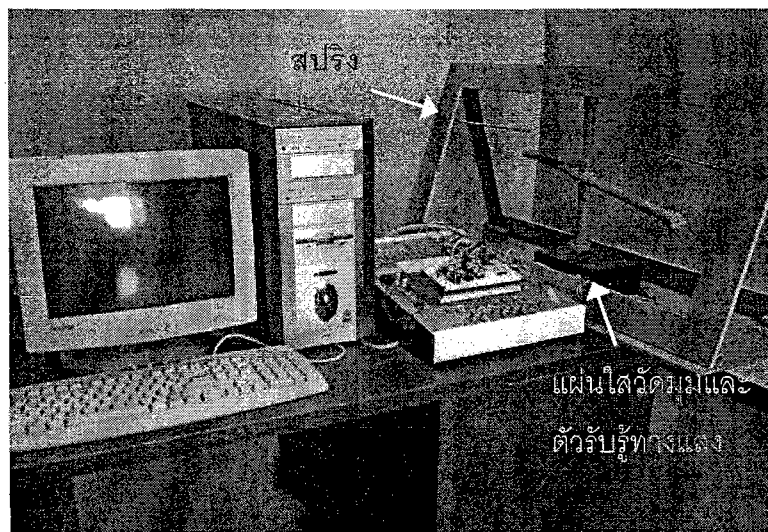
ในการออกแบบสร้างวงจรวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง ตามวงจรในภาพประกอบ 33 ได้เครื่องมือดังภาพประกอบ 44



ภาพประกอบ 44 แสดงวงจรของระบบวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

ตัวเครื่องมือที่สร้างขึ้น ใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากวงจรแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลต์มาเป็นกระแสตรง 5 โวลต์ มีช่องรับสัญญาณจากตัวตรวจจับการเคลื่อนที่แบบหมุน และมีช่องสัญญาณติดต่อกับคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตขนาน

เมื่อนำอุปกรณ์ทุกชิ้นมาประกอบรวมกัน เพื่อทำการทดลองทำให้ได้ชุดการทดลอง
โมเมนต์ความเฉื่อยดังภาพประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ทดลองวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

4.2.2 ผลการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางของ เครื่องมือวัด

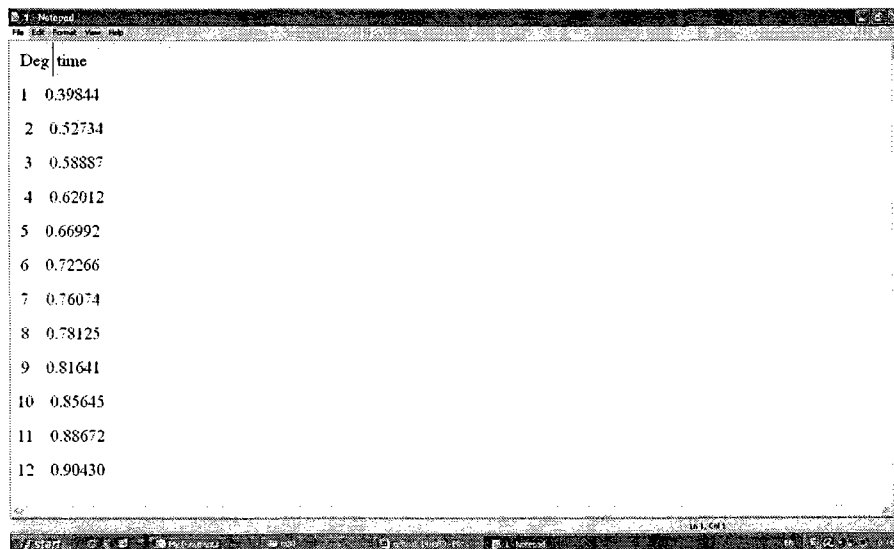
ในการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางของเครื่องมือวัด ได้ทำการเขียนโปรแกรมซึ่งเขียนขึ้นด้วยภาษาซี โดยใช้พอร์ตข้อมูลและพอร์ตสถานะสำหรับรับส่งสัญญาณควบคุมการทำงาน ซึ่งโปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถเก็บบันทึกข้อมูลเป็นไฟล์อักษร (.txt) โดยเก็บเป็นคู่อันดับของการกระจัดเชิงมุมกับเวลาดังภาพประกอบ 46 และ 47 และได้เขียนโปรแกรมให้สามารถนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงผลเป็นกราฟทางจอภาพ ได้ผลดังภาพประกอบ 48 เมื่อนำข้อมูลดังตาราง 10 ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาด้วยโปรแกรม ทำการวิเคราะห์แบบถดถอย (regression) ตามสมการ (7) ในบทที่ 2 ได้ผลดังภาพประกอบ 49 โดยเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งในช่วงแรกและจะเป็นเส้นตรงในที่สุด โดยความชันของเส้นกราฟขณะใดขณะหนึ่งแสดงถึงอัตราเร็วขณะนั้นๆ ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าอัตราเร็วตอนเริ่มต้นมีค่าน้อยและเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีอัตราเร็วคงที่

	Deg time
1	0.90430
3	1.31250
5	1.51367
7	1.72852
9	1.87305
11	2.04199
13	2.15430
15	2.29883
17	2.39648
19	2.52441
21	2.61035
23	2.72559

ภาพประกอบ 46 ตัวอย่างผลการทดลองจากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ของการทดลองการเคลื่อนที่แบบหมุนกรณีปล่อยมวลซึ่งผูกติดกับเชือกแล้วคล้องผ่านรอกให้เคลื่อนที่ในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยตามหัวข้อ 3.3.2.2

ตาราง 10 แสดงข้อมูลที่ได้จากคอมพิวเตอร์ในกรณีการเคลื่อนที่แบบหมุนทิศทางเดียว

มุม (องศา)	เวลา (วินาที)	มุม (องศา)	เวลา (วินาที)	มุม (องศา)	เวลา (วินาที)
1	0.90430	19	2.52441	37	3.31348
3	1.31250	21	2.61035	39	3.40332
5	1.51367	23	2.72559	41	3.46582
7	1.72852	25	2.80664	43	3.54980
9	1.87305	27	2.91309	45	3.60938
11	2.04199	29	2.98633	47	3.69043
13	2.15430	31	3.08594	49	3.74805
15	2.29883	33	3.15625	51	3.82422
17	2.39648	35	3.24805	...	...



	Deg	time
1	0.39844	
2	0.52734	
3	0.58887	
4	0.62012	
5	0.66992	
6	0.72266	
7	0.76074	
8	0.78125	
9	0.81641	
10	0.85645	
11	0.88672	
12	0.90430	

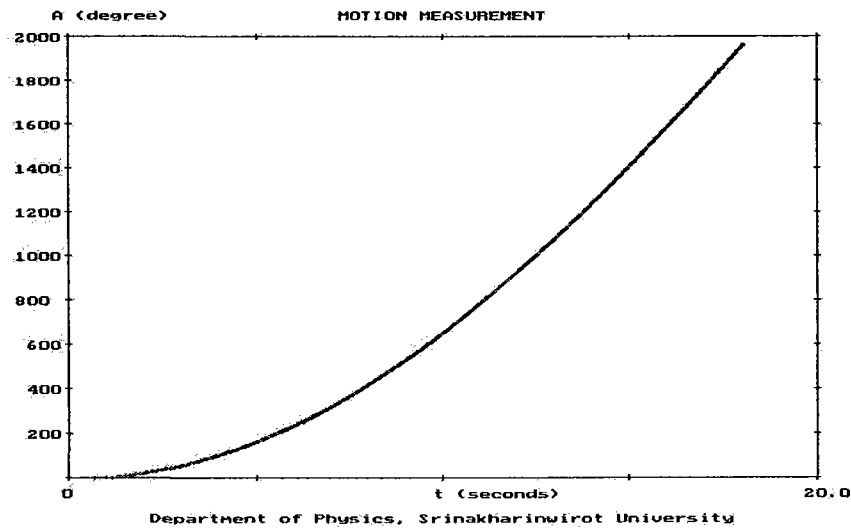
ภาพประกอบ 47 ตัวอย่างผลการทดลองจากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ของการทดลองการเคลื่อนที่แบบหมุนกรณีบิดท่อน PVC ซึ่งทำให้อุปกรณ์เกิดการแกว่งแบบกลับไปกลับมาในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยตามหัวข้อ 3.3.2.3

ตาราง 11 แสดงข้อมูลที่ได้จากคอมพิวเตอร์ในกรณีการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)
1	0.37012	33	1.65820	65	2.39746	97	3.12598	123	5.02246	91	6.15332
2	0.50684	34	1.68359	66	2.42578	98	3.16309	122	5.07031	90	6.17578
3	0.62207	35	1.71484	67	2.44727	99	3.18359	121	5.13086	89	6.19629
4	0.68750	36	1.73926	68	2.46191	100	3.20703	120	5.16895	88	6.21777
5	0.72949	37	1.75488	69	2.48438	101	3.22852	119	5.25000	87	6.25391
6	0.78613	38	1.77930	70	2.51270	102	3.26855	118	5.28418	86	6.27637
7	0.85352	39	1.80957	71	2.53320	103	3.29004	117	5.33008	85	6.29688
8	0.89844	40	1.83301	72	2.54883	104	3.31543	116	5.36035	84	6.31836
9	0.92676	41	1.84766	73	2.57129	105	3.33789	115	5.42188	83	6.35254
10	0.96973	42	1.87305	74	2.60059	106	3.38086	114	5.45215	82	6.37598
11	1.02246	43	1.90137	75	2.62109	107	3.40332	113	5.48926	81	6.39453
12	1.05859	44	1.92480	76	2.63770	108	3.43066	112	5.51562	80	6.41602
13	1.08398	45	1.93945	77	2.65918	109	3.45410	111	5.57129	79	6.45020
14	1.12012	46	1.96289	78	2.68945	110	3.50195	110	5.59766	78	6.47363
15	1.16504	47	1.99121	79	2.70996	111	3.52539	109	5.63086	77	6.49121
16	1.19824	48	2.01367	80	2.72656	112	3.58203	108	5.65430	76	6.51270
17	1.21777	49	2.02832	81	2.74805	113	3.63574	107	5.70410	75	6.54590
18	1.25098	50	2.05176	82	2.77930	114	3.66211	106	5.72852	74	6.56836
19	1.29102	51	2.07910	83	2.79980	115	3.69727	105	5.75781	73	6.58594
20	1.32129	52	2.10156	84	2.81738	116	3.72656	104	5.78027	72	6.60938
21	1.33887	53	2.11621	85	2.83887	117	3.78613	103	5.82520	71	6.64062
22	1.37012	54	2.13867	86	2.87109	118	3.81641	102	5.84863	70	6.66406
23	1.40625	55	2.16699	87	2.89160	119	3.86035	101	5.87500	69	6.68262
24	1.43457	56	2.18848	88	2.91016	120	3.89453	100	5.89844	68	6.70410
25	1.45117	57	2.22559	89	2.93164	121	3.97363	99	5.93945	67	6.73535
26	1.48047	58	2.25391	90	2.96582	122	4.01074	98	5.96289	66	6.75977
27	1.51367	59	2.27441	91	2.98633	123	4.07031	97	5.98730	65	6.77637
28	1.54102	60	2.28906	92	3.00488	124	4.11816	96	6.00879	64	6.79883
29	1.55762	61	2.31152	93	3.02637	125	4.24707	95	6.04785	63	6.83105
30	1.58496	62	2.33984	94	3.06250	126	4.31836	94	6.07031	62	6.85449
31	1.61621	63	2.36035	95	3.08301	125	4.82324	93	6.09375	61	6.87207
32	1.64258	64	2.37598	96	3.10449	124	4.89258	92	6.11523	60	6.89453

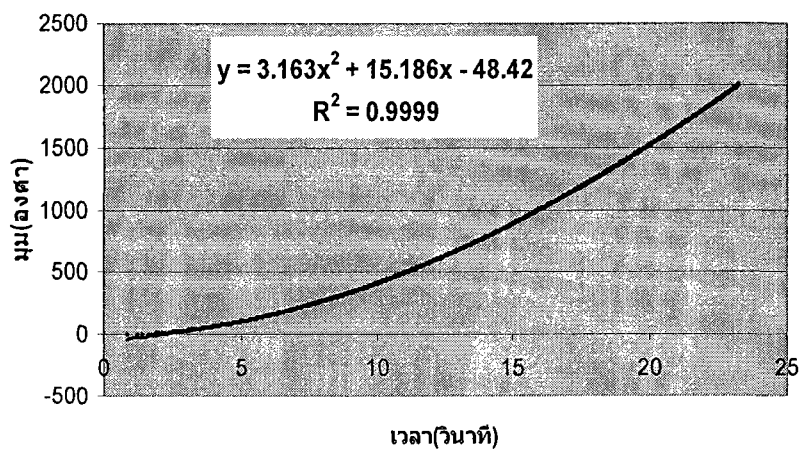
ตาราง 11 (ต่อ)

มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)	มุม องศา	เวลา (วินาที)
59	6.92578	28	7.74316	27	9.88672	58	10.7942	89	11.6354	114	13.4637
58	6.95020	27	7.78418	28	9.92383	59	10.8282	90	11.6639	113	13.5750
57	6.96680	25	7.81934	29	9.94727	60	10.8549	91	11.7065	112	13.6410
56	6.99121	24	7.84277	30	9.98438	61	10.8727	92	11.7315	111	13.7597
55	7.02148	23	7.87891	31	10.0274	62	10.8991	93	11.7564	110	13.8097
54	7.04785	22	7.92383	32	10.0612	63	10.9339	94	11.7848	109	13.8702
53	7.06445	21	7.96484	33	10.0823	64	10.9588	95	11.8308	108	13.9121
52	7.08789	20	7.98926	34	10.1161	65	10.9774	96	11.8572	107	13.9944
51	7.12012	19	8.02930	35	10.1573	66	11.0031	97	11.8854	106	14.0315
50	7.14551	18	8.08398	36	10.1895	67	11.0396	98	11.9146	105	14.0775
49	7.16211	17	8.13086	37	10.2088	68	11.0638	99	11.9637	104	14.1113
48	7.18750	15	8.15918	38	10.2411	69	11.0823	100	11.9911	103	14.1773
47	7.21875	14	8.20801	39	10.2790	70	11.1098	101	12.0226	102	14.2111
46	7.24609	13	8.27832	40	10.3097	71	11.1435	102	12.0531	101	14.2500
45	7.26270	12	8.45312	41	10.3282	72	11.1685	103	12.1080	100	14.2815
44	7.28906	11	8.57422	42	10.3598	73	11.1888	104	12.1395	99	14.3394
43	7.32227	12	8.72754	43	10.3951	74	11.2152	105	12.1758	98	14.3719
42	7.34961	13	9.02539	44	10.4240	75	11.2508	106	12.2088	97	14.4040
41	7.36621	14	9.17383	45	10.4428	76	11.2774	107	12.2726	96	14.4339
40	7.39453	15	9.29492	46	10.4718	77	11.2968	108	12.3064	95	14.4855
39	7.42773	16	9.36816	47	10.5071	78	11.3234	109	12.3491	94	14.5145
38	7.45801	17	9.40918	48	10.5356	79	11.3605	110	12.3862	93	14.5450
37	7.47559	18	9.47363	49	10.5523	80	11.3854	111	12.4652	92	14.5742
36	7.50391	19	9.54492	50	10.5831	81	11.4057	112	12.5064	91	14.6227
35	7.54004	20	9.59570	51	10.6161	82	11.4322	113	12.5645	90	14.6517
34	7.57031	21	9.62500	52	10.6435	83	11.4718	114	12.6146	89	14.6773
33	7.58984	22	9.67383	53	10.6613	84	11.4977	115	12.7307	88	14.7058
32	7.62012	23	9.72949	54	10.6895	85	11.5185	116	12.7975	87	14.7508
31	7.65918	24	9.77148	55	10.7233	86	11.5450	117	12.9080	86	14.7790
30	7.69141	25	9.79688	56	10.7492	87	11.5854	116	13.0531	85	14.8056
29	7.71094	26	9.83887	57	10.7660	88	11.6113	115	13.3282	...	...



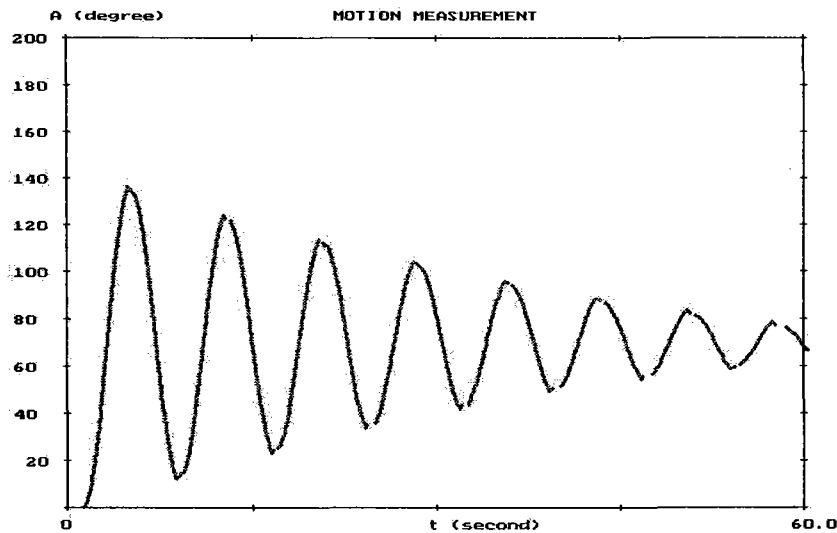
ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาจากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์ของการทดลองกรณีปล่อยมวลให้เคลื่อนที่ในการทดลองตามหัวข้อ 3.3.2.2

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา

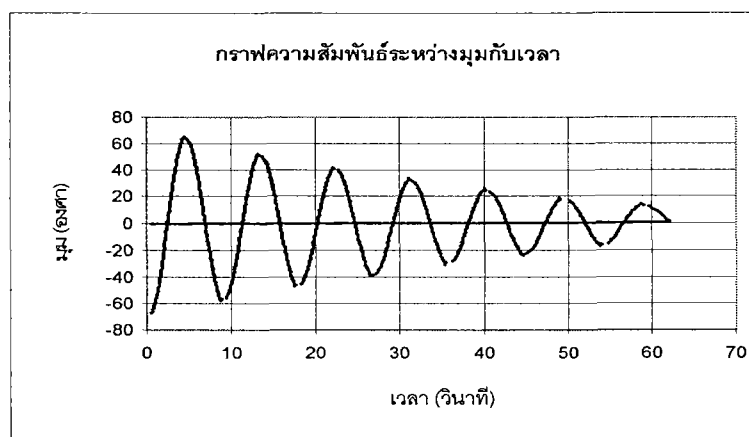


ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาจากการนำข้อมูลที่ได้จากคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression Analysis) ของการทดลองกรณีปล่อยมวลให้เคลื่อนที่แบบหมุนทิศทางเดียวในการทดลองตามหัวข้อ 3.3.2.2

จากภาพประกอบ 50 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา ของผลการทดลองที่ได้จากการนำข้อมูลดังตาราง 11 มาแสดงผลทางจอภาพคอมพิวเตอร์ ที่วัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางของอุปกรณ์ทดลองโมเมนต์ความเฉื่อยในกรณีบิดท่อน PVC ซึ่งทำให้อุปกรณ์เกิดการแกว่งแบบกลับไปกลับมา โดยเส้นกราฟมีลักษณะของการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิกส์ ขณะที่เวลาเพิ่มขึ้นแอมพลิจูดจะมีค่าลดลง



ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาจากการบันทึกผลของคอมพิวเตอร์ ของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนกรณีที่มีสปริงซึ่งทำให้อุปกรณ์เกิดการแกว่งแบบกลับไปกลับมา



ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาจากการนำข้อมูลคอมพิวเตอร์มา แสดงเพื่ออ่านคาบเวลาของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนกรณีหมุนสองทิศทาง

4.3 ผลการทดสอบโปรแกรมกับเครื่องมือทดลองโดยทำการวัดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎี

4.3.1 การคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของอุปกรณ์ทดลองตามทฤษฎี โดยแบ่งการหมุนของอุปกรณ์เป็นสามส่วนโดยมีข้อมูลจากการวัดแต่ละส่วนแสดงดังตาราง 12 และสามารถหาโมเมนต์ความเฉื่อยได้ดังนี้

ตาราง 12 แสดงข้อมูลของอุปกรณ์ทดลองและโมเมนต์ความเฉื่อยทั้งสามส่วนโดยใช้มวลถ่วงที่ระยะห่างจากจุดหมุน $R = 0.30 \text{ m}$

	$M' \times 10^{-3} \text{ (kg)}$	$M \times 10^{-3} \text{ (kg)}$	$L \text{ (m)}$	$L' \text{ (m)}$	$r_o \times 10^{-2} \text{ (m)}$	$r_i \times 10^{-2} \text{ (m)}$	$I \text{ (kg.m}^2\text{)}$
แนวนอน	-	130.080	0.760	-	-	-	6.26×10^{-3}
ฝาครอบ 1 อัน	13.587	-	-	0.380	-	-	3.92×10^{-3}
แนวตั้ง	-	66.257	0.290	-	1.06	0.87	6.23×10^{-6}
มวลถ่วง 1 ก้อน	-	50.301	-	-	-	-	9.05×10^{-3}
(รวม)							19.2×10^{-3}

ส่วนที่ 1 ท่อ PVC แนวนอนรวมฝาครอบ สามารถคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยได้ตามสมการ (29)

$$I_1 = \frac{1}{12} M_1 L^2 + 2 M' L'^2$$

ได้โมเมนต์ความเฉื่อย $I_1 = 10.18 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$

ส่วนที่ 2 ท่อ PVC แนวแกนตั้ง สามารถคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยได้จากสมการ (30)

คือ

$$I_2 = \frac{1}{2} M_2 (r_o^2 + r_i^2)$$

ได้โมเมนต์ความเฉื่อย $I_2 = 6.27 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$

ส่วนที่ 3 มวลถ่วงที่แขวนของท่อ PVC ทั้งสองด้าน สามารถคำนวณโมเมนต์ความเฉื่อยได้จากสมการ (31) คือ

$$I_3 = 2M_3R^2$$

ได้โมเมนต์ความเฉื่อย $I_3 = 9.05 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$

ดังนั้นผลรวมโมเมนต์ความเฉื่อยทางทฤษฎีทั้งสามส่วนคือ $I_T = 19.2 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$

4.3.2 ผลการทดลองหามวลยังผลของความเสียดทานจากการทดลองตามหัวข้อ

3.3.2.1 เพื่อคำนวณทอร์กเนื่องจากแรงเสียดทาน (τ_f) ซึ่งได้ผลแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 13 แสดงค่าน้ำหนักที่ใช้ถ่วงจนวัตถุเริ่มเคลื่อนที่มีดังนี้

ครั้งที่	$m_f \times 10^{-3} (\text{kg})$
1	8.744
2	7.269
3	7.270
4	8.010
5	8.036
6	7.564
7	7.562
8	6.989
9	7.271
10	7.894
เฉลี่ย	7.661
S.D	0.518

นำค่าเฉลี่ยมวลที่ได้ในตาราง 13 มาวิเคราะห์ค่า (τ_f) ได้จาก $\tau_f = m_f g r_o$

$$\text{เมื่อ } m_f = (7.661 \pm 0.518) \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$r_o = (1.06 \pm 0.01) \times 10^{-2} \text{ m}$$

ดังนั้นทอร์กเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าเท่ากับ $(7.96 \pm 0.63) \times 10^{-4} \text{ N.m}$

4.3.3 ผลการทดลองปล่อยมวลให้เคลื่อนที่ซึ่งจะทำให้ท่อ PVC เกิดการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยวิเคราะห์ค่าอัตราเร่งเชิงมุมที่ได้จากการเก็บข้อมูลการกระจัดเชิงมุมและเวลาของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งในการทดลองทำการเปลี่ยนมวล (m) ที่แขวนเป็น 30.0 g 40.0 g 50.0 g และ 60.0 g ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

ตาราง 14 แสดงอัตราเร่งเชิงมุม (α) ที่ได้จากการนำข้อมูลตัวเลขคู่อันดับระหว่างมุมกับเวลาที่เก็บได้จากคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์แบบถดถอย (Regression Analysis)

ครั้งที่	อัตราเร่งเชิงมุม(rad/s^2)			
	0.03 kg	0.04 kg	0.05 kg	0.06 kg
1	0.114	0.156	0.188	0.216
2	0.113	0.158	0.187	0.220
3	0.113	0.156	0.194	0.220
4	0.114	0.159	0.194	0.222
5	0.114	0.159	0.197	0.222
6	0.110	0.159	0.194	0.219
7	0.110	0.161	0.192	0.220
8	0.113	0.159	0.199	0.220
9	0.113	0.157	0.197	0.214
10	0.114	0.160	0.195	0.226
เฉลี่ย	0.113	0.158	0.194	0.220
S.D.	0.002	0.002	0.004	0.003

จากค่าอัตราเร่งเชิงมุมที่ได้จากการวิเคราะห์แบบถดถอย นำมาคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (I) จาก $\sum \tau = I\alpha$ ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.3.2.2 โดยได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (I) เท่ากับ $(20.4 \pm 0.8) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ $(21.2 \pm 1.3) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ $(22.7 \pm 1.3) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ และ $(24.7 \pm 1.1) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ เมื่อแขวนมวล 30.0 g 40.0 g 50.0 g และ 60.0 g ตามลำดับ

4.3.4 ผลการทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อยตามภาพประกอบ 41 ในกรณีที่อุปกรณ์เกิดการแกว่งกลับไปกลับมา โดยวิเคราะห์ค่าคาบเวลา ซึ่งได้จากการนำข้อมูลที่เก็บโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา เพื่ออ่านคาบเวลาซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในตาราง 15 ต่อไปนี้

ตาราง 15 แสดงค่าคาบเวลาซึ่งได้จากการอ่านข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา

คาบ (วินาที)											
ครั้งที่											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	เฉลี่ย	S.D.
9.094	8.616	8.623	8.404	8.645	8.698	8.627	8.550	8.877	8.342	8.648	0.216

นำค่าคาบเวลามาคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยตามสมการ (28) ในบทที่ 2 ซึ่งในการทดลองกรณีนี้ใช้มวลถ่วงทั้งสองด้านเท่ากับในกรณีแรกโดยมีค่านิจสปริง (k) เท่ากับ $58.45 \pm 0.13 \text{ N/m}$ และค่าคงตัวในการบิด (κ) ซึ่งหาได้จาก $2kR'^2$ โดย R' คือ $\frac{d}{2}$ มีค่าเท่ากับ $(1.06 \pm 0.01) \times 10^{-2} \text{ m}$ ดังนั้นค่าคงตัวในการบิด $\kappa = (13.13 \pm 0.03) \times 10^{-3} \text{ N.m}$ และสามารถหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในการทดลองกรณีนี้มีค่าเท่ากับ $(24.8 \pm 1.2) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$

ความแตกต่างของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (I) ที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มีการหมุนทิศทางเดียวเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎีคิดเป็นร้อยละ 6.25% 10.4% 18.2% และ 28.6% เมื่อแขวนมวล 30.0g 40.0g 50.0g และ 60.0g ตามลำดับ และความแตกต่างของค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (I) ที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มีการหมุนสองทิศทางเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎีคิดเป็นร้อยละ 29.2%

บทที่ 5

สรุปผล อภิปราย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง โดยใช้วัสดุและอุปกรณ์ดังกล่าวในบทที่ 3 ซึ่งประกอบด้วยวงจรในการวัดการเคลื่อนที่ที่สามารถเก็บและพักข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงได้และสามารถส่งสัญญาณพัลส์ผ่านไปยังคอมพิวเตอร์ทางพอร์ตขนานได้ โดยพัลส์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการหมุนรอกที่ติดอยู่กับแกนหมุน ทำให้แผ่นใสวัดมุมหมุนติดกับลำแสงอินฟราเรดของอุปกรณ์รับส่งอินฟราเรดทำให้เกิดพัลส์ขึ้น

โปรแกรมที่ผู้วิจัยเขียนขึ้นโดยใช้ภาษา C++ สามารถเก็บข้อมูลและประมวลผลว่าเป็นการเคลื่อนที่ทิศทางใดแล้วจึงเก็บข้อมูลเป็นคู่อันดับมุมกับเวลาซึ่งทำให้สามารถวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางได้ สำหรับการทดลองใช้เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางนี้ได้นำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์ทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อย โดยสามารถแสดงผลการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทางของอุปกรณ์ทดลองซึ่งเก็บเป็นข้อมูลไฟล์อักษร (.txt) และแสดงผลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา โปรแกรมคำสั่งที่ใช้ประมวลผลการวัดจะทำหน้าที่ตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงก่อนหลังและสัญญาณใดที่มีเฟสหน้าหน้าเพื่อตัดสินว่าเป็นการหมุนในทิศทางใด ณ เวลาต่าง ๆ

การทดสอบเครื่องมือวัดและโปรแกรมที่เขียนขึ้น เมื่อนำอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นทั้งหมดมาประกอบรวมกันสามารถนำมาทดลองการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง โดยทำการทดลองหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย 3 แบบด้วยกันคือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ $19.2 \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ โมเมนต์ความเฉื่อยจากการทดลองในกรณีที่มีการหมุนทิศทางเดียวมีค่าเท่ากับ $(20.4 \pm 0.8) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ $(21.2 \pm 1.3) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ $(22.7 \pm 1.3) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ และ $(24.7 \pm 1.1) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ เมื่อแขวนมวล 30.0g 40.0g 50.0g และ 60.0g ตามลำดับ และโมเมนต์ความเฉื่อยที่ได้จากการทดลองในกรณีที่มีการหมุนสองทิศทางโดยใช้สปริงมีค่าเท่ากับ $(24.8 \pm 1.2) \times 10^{-3} \text{ kg.m}^2$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (I) ของชุดทดลองที่สร้างขึ้นนี้ด้วย 3 วิธีที่แตกต่างกันได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยในการหมุนทิศทางเดียวที่แขวนมวล 30.0g 40.0g 50.0g และ 60.0g มีความแตกต่างจากค่าคำนวณทางทฤษฎีเท่ากับ 6.25% 10.4% 18.2% และ 28.6% ตามลำดับ ส่วนความแตกต่างของการทดลองในกรณีหมุนสองทิศทางโดยใช้สปริงเมื่อเทียบกับค่าคำนวณทางทฤษฎีมีค่าเท่ากับ 29.2% ซึ่งน่าจะสรุปได้ว่าเครื่องมือที่สร้างขึ้นและวิธีการคำนวณให้ผลที่ถูกต้องยอมรับได้ โดยเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถวัดการเคลื่อนที่แบบ

หมุนสองทิศทางได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้กับการทดลองทางฟิสิกส์ที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนในลักษณะที่ไม่มีการเลื่อนตำแหน่งได้ โดยโปรแกรมที่เขียนขึ้นสามารถประมวลผลได้ทันทีพร้อมบันทึกผลเพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์ต่อไป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการทดลองหามวลยังผลของความเสียดทาน (m_f) ของอุปกรณ์ทดลองโมเมนต์ความเฉื่อย เพื่อหาขนาดของทอร์กเนื่องจากแรงเสียดทาน (τ_f) ซึ่งเกิดจากความฝืดของอุปกรณ์ทดลองมาคำนวณในกรณีที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนทิศทางเดียวด้วย สำหรับการทดลองในกรณีหมุนสองทิศทางนั้น จะเห็นได้ว่าไม่มีการหาความฝืดของอุปกรณ์ทดลองมาคำนวณด้วย แต่จะสนใจค่าคาบเวลาและค่าคงที่ของสปริงเท่านั้น จึงทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ได้มีความต่างจากค่าทางทฤษฎีค่อนข้างมาก

สำหรับการเขียนโปรแกรมในการเก็บข้อมูลการกระจัดเชิงมุมกับเวลานั้น สามารถนำข้อมูลที่ได้จากคอมพิวเตอร์มาสร้างกราฟเพื่อวิเคราะห์ค่าคาบเวลาเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยในกรณีที่มีการเคลื่อนที่แบบกลับปัดกลับมา และยังสามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์ปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการหมุนได้ โดยในการทดลองกรณีที่มีการเคลื่อนที่สองทิศทางนั้นเป็นการเคลื่อนที่แบบบิตซึ่งจะต้องนำค่าคงตัวในการบิต (k) ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของสปริง (k) มาคำนวณด้วย ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องทำการหาค่าคงที่สปริงด้วย

ในการทดลองการเคลื่อนที่แบบหมุนทิศทางเดียวนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อใช้มวลที่ถ่วงกับเชือกคล้องผ่านรอกนั้น สามารถวัดการเคลื่อนที่ได้ดีในกรณีที่มวลมีน้ำหนักไม่มากเกินไป หากใช้มวลขนาดมากไปการประมวลผลจะมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้มวลขนาด 30.0 g ถึง 60.0 g เท่านั้น ซึ่งจะเห็นได้จากผลการทดลองที่ได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่แตกต่างจากทฤษฎีมากขึ้นเมื่อแขวนมวลที่มีน้ำหนักมากขึ้น เครื่องมือที่สร้างขึ้นนั้นนอกจากจะใช้ในการทดลองหาโมเมนต์ความเฉื่อยได้ ยังสามารถนำไปใช้ในการทดลองที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนในกรณีที่ไม่มีการเลื่อนตำแหน่งได้ เช่น การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกส์ หรือการตกของวัตถุ เป็นต้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การจัดวางตำแหน่งของตัวรับรู้ทางแสงควรจัดให้เหลื่อมกันอย่างชัดเจนและต้องเท่ากัน เพื่อให้สามารถเห็นความเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งได้อย่างดี ไม่เช่นนั้นจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่ามุมของแผ่นใส
2. ในการใช้แผ่นใสและตัวรับส่งอินฟราเรด เป็นอุปกรณ์บอกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ สัญญาณจากตัวรับอินฟราเรดจะถูกส่งผ่านวงจรของระบบวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสองทิศทาง

ซึ่งเชื่อมต่อไปยังพอร์ตนาน เพื่อใช้วัดการเคลื่อนที่แบบหมุนนั้น ผลการวิจัยที่ได้พบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเนื่องจากจังหวะของการตัดลำแสงซึ่งนำไปสู่การเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงมุมของแผ่นใส่นั้น จะขึ้นอยู่กับความถี่และความสม่ำเสมอของเส้นบนแผ่นใสและความเข้มของอินฟราเรด

3. อุปกรณ์ทดลองโมเมนต์ความเฉื่อยที่สร้างในส่วนของฐานที่ตั้งและส่วนบนที่ยึดกับโครงนั้นควรใช้วัสดุที่เล็กแหลมตรงกับฐานเพื่อลดความผิดพลาดในการหมุนของอุปกรณ์

4. สปริงที่ใช้ในการทดลองกรณีหมุนสองทิศทางนั้น ควรเลือกที่มีขนาดพอเหมาะและดึงให้ตึงเพื่อให้อุปกรณ์หมุนกลับไปกลับมาได้คล่อง

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- จิระวัฒน์ ใจอ่อนนุ่ม; และ นภัทร วัจนเทพินทร์. (2541). *วงจรดิจิทัล*. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สยามสปอร์ต ซินดิเคท.
- พิชญ์ ดาราพงษ์. (2549). *ดิจิทัลอิเล็กทรอนิกส์ ทฤษฎีและการทำงาน*. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์ ไอเดียสโตร์.
- พิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ. (2541). *กลศาสตร์เชิงวิเคราะห์*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์เลียงเชียง.
- ร่ำพิง มังคละสวัสดิ์. (2530, กันยายน). *ระบบดิจิทัล 1*. พิมพ์ครั้งที่ 1. หจก. ศรีเทพ เทคนิค การพิมพ์.
- วิสูตร ตุลยสุข. (2546). *การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัมบิด*. ปรินซ์นิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต. (ฟิลิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- สุวัฒน์ รอดผล. (2544). *ดิจิทัลและการออกแบบวงจรลอจิก*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทยญี่ปุ่น) ส.ส.ท..
- ศุภเดช สุจินพรหม. (2548). *การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน*. ปรินซ์นิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต. (ฟิลิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- อภิชาติ ภู่วัฒน. (2546). *เริ่มต้นเขียนโปรแกรมติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์ด้วยวิชวลเบสิก*. กรุงเทพฯ: ด้านสุขภาพการพิมพ์.
- อนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ ทบวงมหาวิทยาลัย. (2543). *ฟิลิกส์ เล่ม 1*. ฉบับปรับปรุง. สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- Bogart, Theodore F., Jr. (1992). *Introduction to Digital Circuits*. Lake Forest: Glencoe.
- Chow, Tai L. (1995). *Classical Mechanics*. New York: Wiley.
- Eisberg, Robert M. & Lerner, Lawrence S. (1982). *Physics Foundations and Applications*. New York: McGRAW-HILL International Book Company
- Gettys Edward W., Keller, Frederick J. & Skove, Malcolm J. (1989). *Classical Physics and Modern*. McGRAW-HILL International Book Company.

- Grob, Bernard. (1987). *Basic Electronics*. New york : McGRAW-HILL International Book Company
- Harris, Norman C. , Hemmerling, Edwin M.& A.James Mallmann. (1990). *Physics Principle & Application*. 5th ed. New york : McGRAW-HILL International Book Company.
- Harris, Norman C. (1980). *Experiment in applied physics*. 3rd ed. McGRAW-HILL International Book Company.
- Young, Hugh D. & Freedman, Roger A. (2004). *University Physics with modern physics*. 10th ed. San Francisco : Pearson Education,Inc.
- Kleitz, William. (2002). *Digital Electronics : a Practical Approach*. 6th ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Serway, Raymond A; & Jewett, John W.. (2004). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. 6th ed. Philadelphia: Saunders College Pub.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
โปรแกรมคำสั่งในการวัดมุมกับเวลา

```

#include <iostream.h>
#include <scrnpv.h>
#include<conio.h>
#include <stdio.h>
#include <dos.h>
#include <bios.h>
#include <timeint.h>
#include <scrnptav.h>

#define PORTADDRESS 0x378 /*Enter Your Port Address Here*/
#define DATA PORTADDRESS+0
#define STATUS PORTADDRESS+1
#define CONTROL PORTADDRESS+2

int Pread,readin,i;  int read_latch();  int read_data() ;
void clear () ;
void write_data();
int left_right(int Pread,int readin);

ScreenPhaseTime SCPT;

unsigned long TimeInterval(unsigned long,unsigned long); /* define time range for keep
data*/

unsigned long TimeInterval(unsigned long time,unsigned long n)
{ unsigned long ticks,t;
  t=time;
  ticks=time+n;
  while (t<ticks)
  { t=ticks_70h;}
  return t; }

class Check
{ public  int left_right(int Pread,int readin);
        int read_latch();

```

```

int read_data(); void write_data();

void clear();    int Get_j();

int Get_b();

private:  int j,b; } ;

```

Check work;

```

int Check::left_right( int Pread,int readin)
{
    int count=0;    if(Pread==0)
{
    switch(readin)
{
    case 16:

        count=count+1;    break;

        case 32:

            count=count-1;    break;

            default: printf("ERROR\n");

        }

    } if(Pread==32)

    {

        switch(readin)

    {
        case 0:

            count=count+1;

            break;

            case 48:

                count=count-1;

                break;

                default: printf("ERROR\n");

            }

        } if(Pread==48)

        {

            switch(readin)

        {
            case 32:

                count=count+1;    break;

```

```

        case 16:
            count=count-1;          break;
            default: printf("ERROR\n");
    }
} if(Pread==16)
{
    Switch (readin)
{
    case 48:
        count=count+1;          break;
        case 0:
            count=count-1;          break;
            default: printf("ERROR\n");
    }
} if(Pread==readin)
{ count=0; }
return (count);
}

int Check::read_latch()
{ int j;
  j=(inportb(STATUS)&0x30); /*read data at bit 4 and 5 of status port*/
  return(j); }

void Check::clear(void )    /// function clear //
{
    outportb (DATA,0x00); /*write 0 at bit 1 */
    outportb(DATA,0x02); } /*write 1 at bit 1 */

int Check:: read_data()    ////////// function read_data /////
{
    int b;
    b=(inportb(STATUS)&0x40 ); } /*read bit 6 of status port*/
    return(b);

```

```

void Check:: write_data(void)   /// function  clock at enable 2  ///
{
    outportb(DATA,0x22); /*write 1 at bit 5 */
    outportb(DATA,0x02); } /*write 0 at bit 5 */
int Check::Get_j()
{ return j; }
int Check::Get_b()
{ return b; }
////////////////////////////////////
//////// main program  //////////
////////////////////////////////////
main()
{ clrscr();
  unsigned long time=0,n=5,Time_t[2000];
  unsigned initialtime,checktime,deltatime,addposition;
  int counter=0,count,i,k,degree[2000],total=0,maximum;
  int D_Pread[2000],Deg[2000],D_readin[2000],cycle=1,read_ACK,readin,Pread,x;
  float cal[2000];
  //////////////////////////////////
  Time70h.init70h();
  time=ticks_70h;
  ticks_70h=0;
  //////////////////////////////////
  /// check time fo system  ///
  //////////////////////////////////
  TimeInterval(time,n);
  time=TimeInterval(time,n);
  initialtime=time;
  initialtime=checktime;

```

```

    readin=(inportb(STATUS)&0x30); /*read data at bit 4 and 5 of status port*/
    outportb (DATA,0x00); /*write 0 at bit 1 */
    outportb(DATA,0x02); /*write 1 at bit 1 */

for(i=0;i<2000;i++)
{
    do
    { outportb(DATA,0x22); /*write 1 at bit 5 */
      outportb(DATA,0x02); /*write 0 at bit 5 */
      read_ACK=(inportb(STATUS)&0x40 ); /*read bit 6 of status port*/
    }
while (read_ACK==0);

    outportb (DATA,0x00); /*write 0 at bit 1 */
    outportb(DATA,0x02); /*write 1 at bit 1 */
    readin=(inportb(STATUS)&0x30); /*read data at bit 4 and 5 of status port*/
    D_readin[i]=readin;
    time=TimeInterval(time,n);
    Time_t[i]=time; }
for (i=0;i<2000;i++)
{ x=work.left_right(D_readin[i],D_readin[i+1] );
    degree[i]=x;
    total+=degree[i];
    Deg[i]=total;
}
//    save data           //
{    FILE *fp;
    fp=fopen("c:/complete.txt","w+t");
    if (fp==NULL)
    { printf("Can not open file\n");
      void exit (void);    }
}

```

```

else
{ fprintf(fp,"Data Deg time s/deg\n"); }
    { for(i=0;i<2000;i++)
        if(i%2==0)
            { fprintf(fp,"%d %d %.5f \n",D_readin[i],Deg[i],(Time_t[i])*(0.0009765625));
                }
        } fclose(fp);
    }
Time70h.quit70h();
return (0); }
///// End main program////////

```

ภาคผนวก ข

โปรแกรมส่วนหัวสำหรับทำงานร่วมกับโปรแกรม

```

#ifndef _TIMEINT_H
#define _TIMEINT_H
#ifdef __cplusplus
# define __CPPARGS ...
#else
# define __CPPARGS void
#endif
#include <dos.h>
#define IRQ8 0x70
#define SET_EVENT 0x8300
#define CANCEL_EVENT 0x8301
#define LARGEST 0xffff
#define NEW70H 1
class INT70h
{
public:
    void    init70h(void);
    void    quit70h(void); };
INT70h Time70h;
void interrupt new70h(__CPPARGS);
extern volatile unsigned long int ticks_70h;
static float  tick_per_ms = 1.024;
static float  ms_per_tick = 0.9765625;
static char far *event;
static unsigned char flag70h = 0;
static void    interrupt(*old70h) (__CPPARGS);
volatile unsigned long int ticks_70h;
void interrupt new70h(__CPPARGS)
{
    disable();
    ticks_70h++;

```

```

    enable();
    old70h();
}

void INT70h::init70h(void)
{
    union REGS    regs;
    struct SREGS   sregs;
    unsigned int   event_seg,
                  event_off;
    if (flag70h != NEW70H) {
        old70h = getvect(IRQ8);
        setvect(IRQ8, new70h);
        event_seg = FP_SEG(event);
        event_off = FP_OFF(event);
        regs.x.ax = SET_EVENT;
        sregs.es = event_seg;
        regs.x.bx = event_off;
        regs.x.cx = LARGEST;
        regs.x.dx = LARGEST;
        int86x(0x15, &regs, &regs, &sregs);
        flag70h = NEW70H;
    }
}

void INT70h::quit70h(void)
{
    union REGS    regs;
    if (flag70h == NEW70H) {
        regs.x.ax = CANCEL_EVENT;
        int86(0x15, &regs, &regs);
        setvect(IRQ8, old70h);
        flag70h = 0;    }
} #endif

```

ภาคผนวก ค
โปรแกรมส่วนหัวสำหรับทำงานร่วมกับโปรแกรมวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน
สองทิศทาง

```

#include <stdio.h>
#include <bios.h>
#include <conio.h>
#include <graphics.h>
#include <iostream.h>
#include <dos.h>
#include <stdlib.h>
#include <scrnpv.h>
#include <timeint.h>
#include <scrnpaa.h>

////////////////////////////////////

// This program is plot graph.

////////////////////////////////////

int x[1000],g[1000],j=0,angle,x1,y1,x2,y2,count,n;
float y;
ScreenPhaseTime SCPT;
typedef struct _DATA
{ int NR,angle; int ND; float NT; };
void CalPeak(_DATA*sdat,int sdatasize)
{ struct _DPEAK
{ int NR,ND,angle; float NT;}PEAK;
for (int i=0;i<=sdatasize;i++)
{ for(i=0;i<1000;i++)
{ x[i]= sdat[i].ND;
g[i]= sdat[i].NT; x2=(g[i]*560)/10;
// y2=x[i]*2; SCPT.DrawCircle(x2,x[i]);}
} }; //close function//
main()
{ int count,h,NumberPage=1,newh; int y; ScreenPhaseTime SCPT; n=3; h=56;
FILE*fp; int R,D,i ; float T; int countline=0; char tm[255];
fp=fopen("c:/10b.txt","r");

```

```

if (fp==NULL) { printf("Cannot open file\n"); void exit(void); }

    ///fine number of data record/////

while(!feof(fp))
{ fgets (tm,255,fp);
    countline++ ; }

    ///////////////////////////////////

    //built pointer for keep new data//

    ///////////////////////////////////

    _DATA*ndata=new _DATA[countline];
    int newi=0; rewind(fp); while(!feof(fp))
    { fscanf(fp,"%d %d %f",&R,&D,&T);
        ndata[newi].NR=R;
        ndata[newi].ND=D;
        ndata[newi].NT=T;
        //    printf("%d %d %f\n",R,D,T); newi++;
        fflush();
    } fclose(fp); clrscr();

        SCPT.Screen(NumberPage); CalPeak(ndata,countline-1);

/*  for(i=0;i<1000;i++)
    { //if(i%2==0) x2=(g[i]*2)+15; } y2=x[i]*2;
        SCPT.DrawCircle(x2,y2);
    // closegraph();

        /* you must delete array pointer every time*/
        delete[]ndata;
        ndata=NULL;
}

```

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวศิริพรรณ ศรีททาผล
วันเดือนปีเกิด	17 พฤษภาคม พุทธศักราช 2524
สถานที่เกิด	อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	38 หมู่ 8 ตำบล จอมบึง อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี 70150
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2543	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนราชโบริกานุเคราะห์ จังหวัดราชบุรี
พ.ศ. 2547	ค.บ. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
พ.ศ. 2551	กศ.ม. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ