

การออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน

บทคัดย่อ
ของ
ศุภเดช สุจินพรัหม

- 1 ก.พ. 2549

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ตุลาคม 2548

๒๕๔๘/๐๗ ๑.๓

ศุภเดช สุจินทรัพย์. (2548). การออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน.
ปริญญาโท กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข,
รองศาสตราจารย์ ดร. ณสรร์ค ผลโกศ.

อุปกรณ์วัดมุมอิเล็กทรอนิกส์ ที่มีแผ่นโอสิมป์หลายเส้นแบ่งมุมเป็นส่วนประกอบ
สามารถใช้เป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนที่เวลาต่างๆ ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นสำหรับ
ควบคุมการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์วัดมุมกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตขนาน ผลการวัด
จะแสดงออกทางจอภาพในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม อัตราเร็วเชิงมุม ระยะทาง
และอัตราเร็วกับเวลาได้ทันทีและบันทึกข้อมูลเป็นแฟ้มข้อความ จากการตรวจสอบความถูกต้อง
ของเครื่องมือโดยนำไปทดลองกับเครื่องจักรแอทวูด เพื่อหาค่าสนามความโน้มถ่วงของโลก พบ
ว่ามีค่า g เท่ากับ 9.77 เมตร/วินาที² แตกต่างจากค่าของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ 0.1 %

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A DEVICE FOR MEASURING
ROTATIONAL MOTION

AN ABSTRACT

BY

SUPPHADATE SUJINNAPRAM

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Education Degree in Physics
at Srinakharinwirot University
October 2005

Supphadate Sujinnapram. (2005). *Design and Construction of a Device for Measuring Rotational Motion*. Master thesis, M.Ed.(Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Assist. Prof. Bancha Sitskulsuk, Assoc. Prof. Dr. Nason Phonphok.

An electronic angular measuring instrument which angular displacement can be measured via a circular scaled on transparency film was made. The device interfaced with computer parallel port can be used to measure instantaneous angular motions by a home-made program. Relationships of angle, angular speed, distance and speed with respect to time, can be displayed promptly on a monitor and recorded as computer text files. Accuracy tests were done in terms of the Earth's gravitational acceleration obtained by an atwood's machine. The value of g , 9.77 m/s^2 , which is 0.1% slightly different in comparison with the standard value provided by the National Institute of Metrology (Thailand), was obtained.

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย
จาก
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน

ปริญญาโท
ของ
ศุภเดช สุจินทรัพย์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ตุลาคม 2548
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปริญญานิพนธ์

เรื่อง

การออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน

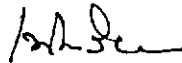
ของ

นายศุภเดช สุจินพรัหม

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

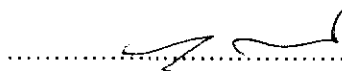


.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญสิริ จีระเดชากุล)

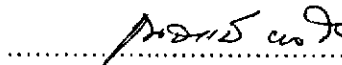
วันที่ 14 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2548

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์



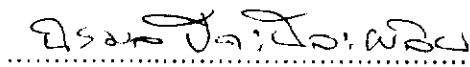
.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลปสกุลสุข)



.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ณสรร์ค ผลโภค)



..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นIRMล ปิตะนีละผลิน)



..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(อาจารย์ ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำการวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ณสรร์ค ผลโภค ที่ให้ความกรุณาตรวจแก้งานวิจัยนี้ โดยพร้อมให้คำปรึกษาเสมอมา

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรมล ปิตะเนิลผลิน และ อาจารย์ ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเป็นคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาโท และให้คำแนะนำ แก้ไขเพิ่มเติมในงานวิจัยนี้

กราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาคฟิสิกส์ทุกท่านที่ได้อบรม ให้ความรู้ผู้วิจัย ในรายวิชาต่างๆ ซึ่งเป็นพื้นฐานในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณนิสิตปริญญาโท สาขาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ร่วมกันสร้างบรรยากาศทางวิชาการในการศึกษาและการทำงานวิจัย รวมทั้งเป็นกำลังใจให้กันและกันเสมอ

ท้ายที่สุดนี้ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และญาติๆทุกคนที่ให้กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยเสมอมา

ศุภเดช สุจินพรัหม

สารบัญ

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| 1 บทนำ..... | 1 |
| ภูมิหลัง..... | 1 |
| ความมุ่งหมายของงานวิจัย..... | 2 |
| ความสำคัญของงานวิจัย..... | 2 |
| ขอบเขตของงานวิจัย..... | 2 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้..... | 3 |
| 2 ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนตรึง..... | 4 |
| อัตราเร็วเชิงมุมและอัตราเร่งเชิงมุม..... | 4 |
| การหมุนด้วยอัตราเร่งเชิงมุมคงที่..... | 6 |
| ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชิงมุมกับปริมาณเชิงเส้น..... | 6 |
| พลังงานจลน์ของการหมุน..... | 8 |
| โมเมนต์ความเฉื่อย..... | 9 |
| ทอร์ก..... | 10 |
| ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับอัตราเร่งเชิงมุม..... | 11 |
| เครื่องจักรแอกทูต..... | 13 |
| ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์..... | 18 |
| พอร์ตขนาน..... | 18 |
| ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัล..... | 24 |
| เกต..... | 26 |
| วงจรมิตต์ทริกเกอร์..... | 31 |
| ฟลิปฟล็อป..... | 32 |
| วงจรมัลติเพลกเซอร์..... | 36 |
| วงจรมัลติเพลกเซอร์..... | 42 |
| โฟโตทรานซิสเตอร์..... | 44 |
| แอลอีดีอินฟราเรด..... | 46 |
| งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 48 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|--|----------------------------|
| 3 | วิธีดำเนินการวิจัย..... 49 |
| การออกแบบสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม..... 49 | |
| ขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม..... 49 | |
| ขั้นตอนการออกแบบวงจรการวัดการกระจัดเชิงมุม..... 54 | |
| ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ของเครื่องมือวัด..... 56 | |
| การทดสอบและปรับเทียบเครื่องมือวัด..... 58 | |
| การทดสอบเครื่องมือวัด..... 58 | |
| การปรับเทียบเครื่องมือวัด..... 58 | |
| การหาสมบัติด้านความผิด ความเอนของเครื่องมือวัด และตรวจสอบความถูกต้อง..... 58 | |
| การหาความผิดและความเอนของเครื่องมือ..... 58 | |
| การตรวจสอบความถูกต้อง..... 59 | |
| 4 | ผลการวิจัย..... 60 |
| ผลการออกแบบสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม..... 60 | |
| ผลการออกแบบและสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม..... 60 | |
| ผลการออกแบบวงจรการวัดการกระจัดเชิงมุม..... 61 | |
| ผลการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ของเครื่องมือวัด..... 62 | |
| ผลทดสอบและปรับเทียบเครื่องมือวัด..... 66 | |
| ผลการทดสอบเครื่องมือวัด..... 66 | |
| ผลการปรับเทียบเครื่องมือวัด..... 68 | |
| ผลการหาสมบัติด้านความผิด ความเอนของเครื่องมือวัด และตรวจสอบความถูกต้อง..... 68 | |
| ผลการหาความผิดและความเอนของเครื่องมือวัด..... 71 | |
| ผลการตรวจสอบความถูกต้อง..... 75 | |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|--------------------------------------|------|
| 5 สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ..... | 76 |
| สรุปผลการวิจัย..... | 76 |
| อภิปรายผลการวิจัย..... | 77 |
| ข้อเสนอแนะ..... | 78 |
| | |
| บรรณานุกรม..... | 79 |
| | |
| ภาคผนวก..... | 82 |
| | |
| ประวัติย่อผู้วิจัย..... | 134 |

บัญชีตาราง

| ตาราง | หน้า |
|--|------|
| 1 แสดงลักษณะสัญญาณของพอร์ตข้อมูล..... | 19 |
| 2 ลักษณะสัญญาณของพอร์ตสถานะ..... | 19 |
| 3 แสดงลักษณะสัญญาณของพอร์ตควบคุม..... | 20 |
| 4 ลักษณะของสัญญาณของพอร์ตขนาน..... | 21 |
| 5 รูปแบบการติดต่อผ่านพอร์ตขนาน..... | 23 |
| 6 ลักษณะการทำงานของแอนด์เกต..... | 27 |
| 7 ลักษณะการทำงานของออร์เกต..... | 28 |
| 8 ลักษณะการทำงานของนอร์เกต..... | 28 |
| 9 ลักษณะการทำงานของแนนด์เกต..... | 29 |
| 10 ลักษณะการทำงานของนอตเกต..... | 29 |
| 11 ลักษณะการทำงานของเอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต..... | 30 |
| 12 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางด้านกระแส อินพุต/เอาต์พุตของวงจรรวมที่ทีแอลและซีมอส..... | 30 |
| 13 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอส..... | 33 |
| 14 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอส ควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกา..... | 34 |
| 15 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปชนิดดี (7474)..... | 35 |
| 16 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปเจเคหมายเลข (7476)..... | 36 |
| 17 แสดงผลการนับของวงจรรวมอะซิงโครนัสนับลงขนาด 3 บิต..... | 38 |
| 18 แสดงการทำงานของวงจรรับเลขฐานสองขนาด 4 บิต หมายเลข 7493..... | 41 |
| 19 แสดงการรีเซต/นับ..... | 41 |
| 20 แสดงการควบคุมการทำงานของวงจรรวมหมายเลข 74153..... | 43 |
| 21 แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมจากเครื่องคอมพิวเตอร์ กับเครื่องนับความถี่ ที่ความถี่ต่างๆ..... | 67 |
| 22 แสดงมุมที่รอกหมุนไปเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ได้เป็นระยะ 0.245 เมตร..... | 68 |
| 23 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอทูต กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.39552 \text{ kg}$ | 69 |
| 24 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอทูต กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.35552 \text{ kg}$ | 69 |

บัญชีตาราง (ต่อ)

| ตาราง | หน้า |
|---|------|
| 25 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอกทูด กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.31552$ kg..... | 69 |
| 26 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอกทูด กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.27552$ kg..... | 70 |
| 27 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอกทูด กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.23552$ kg. | 70 |
| 28 แสดงผลการทดลองหาค่ามวลยังผลของความเสียดทาน และค่าความชื้น..... | 74 |

บัญชีภาพประกอบ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| 1 การหมุนของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนตั้ง..... | 4 |
| 2 แสดงอนุภาคในวัตถุแข็งเกร็งเคลื่อนที่จากจุด A ไป B..... | 5 |
| 3 แสดงวัตถุหมุนรอบแกนตั้งที่ผ่านจุด O (ก) จุด P มีความเร็วเชิงเส้น \vec{v} สัมพันธ์กับเส้นรอบวงรัศมี r (ข) จุด P มีความเร็ว $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_r$ | 6 |
| 4 แสดงวัตถุหมุนรอบแกน z..... | 8 |
| 5 แสดงทอร์กเนื่องจากแรง \vec{F} | 10 |
| 6 แสดงแรง \vec{F}_1 และ \vec{F}_2 กระทำต่อวัตถุทำให้เกิดทอร์กรอบจุด O..... | 10 |
| 7 แสดงอนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลม..... | 11 |
| 8 แสดงการหมุนของวัตถุ..... | 12 |
| 9 เครื่องจักรแอกทูด..... | 13 |
| 10 แผนภาพวัตถุอิสระแสดงแรงที่กระทำต่อมวลที่แขวนบนเครื่องจักรแอกทูด (ก) สำหรับรอกที่เบาและไม่มีคามฝืด(ข) สำหรับรอกที่มีมวลและมีความฝืด.. | 14 |
| 11 แสดงลักษณะของพอร์ตชานาน..... | 18 |
| 12 ทิศการรับส่งข้อมูลของพอร์ตชานาน..... | 22 |
| 13 แผนผังของสายสัญญาณในพอร์ตชานาน..... | 22 |
| 14 สัญลักษณ์สัญญาณ..... | 23 |
| 15 ลักษณะของสัญญาณดิจิทัล..... | 24 |
| 16 แสดงระดับความต่างศักย์อินพุตและเอาต์พุตของวงจรรวมที่ทีแอลซีตามมาตรฐาน... .. | 26 |
| 17 สัญลักษณ์ของแอนด์เกต..... | 27 |
| 18 สัญลักษณ์ของออร์เกต..... | 27 |
| 19 สัญลักษณ์ของนอร์เกต..... | 28 |
| 20 สัญลักษณ์ของแนนด์เกต..... | 28 |
| 21 สัญลักษณ์ของนอตเกต..... | 29 |
| 22 สัญลักษณ์ของเอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต..... | 29 |
| 23 แสดงระดับความต่างศักย์อินพุตและเอาต์พุตของวงจรรวม แบบซีมอสอนุกรม 74HC00..... | 31 |
| 24 วงจรรวมหมายเลข 7413 และ 7414 ที่มีอินพุตเป็นวงจรมิตต์ทริกเกอร์..... | 31 |
| 25 แสดงการนำนอตเกตที่มีอินพุตเป็นวงจรมิตต์ทริกเกอร์ 7414 ไปใช้ใน การแปลงสัญญาณแอนะล็อก (Analog) เป็นสัญญาณดิจิทัล..... | 32 |

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| 53 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาของผลการทดลอง วัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูด..... | 62 |
| 54 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมกับเวลา ของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูด..... | 63 |
| 55 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา ของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูด..... | 64 |
| 56 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา ของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูด..... | 65 |
| 57 ตัวอย่างผลการทดลองจากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์..... | 66 |
| 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่อง จักรแอกทูดในกรณีมวล $m_2+m_1 = 0.39552 \text{ kg}$ โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = $0.05 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ และกราฟตัดแกน $y(m_f) = 0.0012 \pm 0.0002 \text{ kg}$ | 71 |
| 59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่อง จักรแอกทูด ในกรณีมวล $m_2+m_1 = 0.35552 \text{ kg}$ โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = $0.0459 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ และกราฟตัดแกน $y(m_f) = 0.0009 \pm 0.0002 \text{ kg}$ | 72 |
| 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่อง จักรแอกทูด ในกรณีมวล $m_2+m_1 = 0.31552 \text{ kg}$ โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = $0.0417 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ และกราฟตัดแกน $y(m_f) = 0.0007 \pm 0.0003 \text{ kg}$ | 72 |
| 61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่อง จักรแอกทูด ในกรณีมวล $m_2+m_1 = 0.27552 \text{ kg}$ โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = $0.0378 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ และกราฟตัดแกน $y(m_f) = 8 \times 10^{-6} \pm 0.0002 \text{ kg}$ | 73 |
| 62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่อง จักรแอกทูด ในกรณีมวล $m_2+m_1 = 0.23552 \text{ kg}$ โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = $0.0335 \text{ kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ และกราฟตัดแกน $y(m_f) = -2 \times 10^{-5} \pm 0.0003 \text{ kg}$ | 73 |
| 63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของมวล m_2+m_1 และ S ของเครื่องจักร แอกทูด ซึ่งมีค่าความชันของกราฟ $(g) = 9.77 \pm 0.07 \text{ m/s}^2$ และกราฟตัดแกน $y(m_p) = 0.0928 \pm 0.003 \text{ kg}$ | 75 |

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

การดำเนินชีวิตของคนเราในปัจจุบันมีความเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์เครื่องใช้ที่เป็นเทคโนโลยีระดับสูงมากมายหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นเครื่องใช้ในบ้าน อุปกรณ์ที่ใช้ในวงการธุรกิจ อุปกรณ์การสื่อสารโทรคมนาคม ตลอดจนวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในวงการศึกษาด้วยเช่นกัน อุปกรณ์ที่เป็นเทคโนโลยีระดับสูงอย่างหนึ่งที่น่าจะมีบทบาทสำคัญยิ่งในชีวิตประจำวันของคนเรา ได้แก่ คอมพิวเตอร์ ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในทุกวงการ ยิ่งเมื่อมีการประดิษฐ์เครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ซึ่งมีขนาดเล็กและราคาไม่สูงมากนักก็ทำให้มีการใช้อย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น

คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องจักรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกสร้างขึ้น เพื่อใช้ทำงานแทนมนุษย์ในด้าน การคิดคำนวณ สามารถจำข้อมูลทั้งตัวเลขและตัวอักษรเพื่อการเรียกใช้งานในครั้งต่อไป และยังสามารถจัดการกับสัญลักษณ์ได้ด้วยความเร็วสูง โดยปฏิบัติตามขั้นตอนของโปรแกรม นอกจากนี้คอมพิวเตอร์ยังมีความสามารถในด้านต่างๆ อีกมาก อาทิเช่น การเปรียบเทียบทางตรรกะ (Logic) การรับส่งข้อมูล การจัดเก็บข้อมูลไว้ในตัวเครื่อง และสามารถประมวลผลข้อมูลต่างๆ ได้

ในวงการศึกษา ได้มีการนำไมโครคอมพิวเตอร์มาใช้ทั้งในด้านการบริหารการจัดการการสอน และเป็นคอมพิวเตอร์ช่วยสอนโดยการสร้างโปรแกรมบทเรียนในรูปแบบต่างๆ เพื่อการเรียนการสอน ทำให้ผู้เรียนสามารถใช้ในลักษณะของการศึกษารายบุคคลได้เป็นอย่างดี เป็นต้น ในด้านวิทยาศาสตร์ก็เช่นเดียวกัน มีการใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมืออำนวยความสะดวกในการออกแบบจำลองการทดลองต่างๆ ช่วยในการบันทึกข้อมูลจำนวนมากๆ ช่วยในการวิเคราะห์คำนวณและอื่นๆ อีกมากมาย เราสามารถใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการทดลองในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์เบื้องต้น หรือในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับสูงได้

เราสามารถนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่อย่างแพร่หลายและราคาถูก มาออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดค่าปริมาณต่างๆ ในการทดลองทางฟิสิกส์ได้หลายอย่าง เช่น การเคลื่อนที่แบบหมุน ทอร์ก ลูกตุ้ม และแรงสู่ศูนย์กลาง เป็นต้น

การวัดปริมาณต่างๆ ทางฟิสิกส์ในการเคลื่อนที่แบบหมุน เช่น การหมุนของรอก จะเห็นว่าไม่สามารถวัดการเคลื่อนที่ของรอกขณะกำลังหมุนด้วยเครื่องมืออย่างง่ายๆ เช่น นาฬิกา ไม่บรรทัด หรือไม้บรรทัดวัดมุมได้ จากความสำคัญนี้ผู้วิจัยได้เลือกออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของระบบที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนอยู่ตลอดเวลา ยากแก่การวัดด้วยเครื่องมืออย่างง่าย โดย เครื่องมือนี้จะใช้ประกอบกับคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมภาษาซี ซึ่งเป็นภาษาระดับสูงที่มีประสิทธิภาพในการทำงาน สามารถใช้ในงานด้านต่างๆ มากมาย เช่น ระบบการจัดการฐานข้อมูล สิ่งงานอุปกรณ์ภายนอกและสามารถสร้างกราฟิก (Graphic) ได้ ข้อดีของภาษานี้ คือ ทำงานได้รวดเร็ว และแสดงผลได้ทันที เมื่อเทียบกับภาษาอื่นๆ สามารถทำงานได้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ประเภท

การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน จะทำให้ได้เครื่องมือวัดค่ามุมที่ เวลาต่างๆ ซึ่งจะนำไปสู่การคำนวณอัตราเร็วเชิงมุม อัตราเร่งเชิงมุม อัตราเร็วเชิงเส้น และอัตราเร่งเชิงเส้น ขณะใดขณะหนึ่งของระบบได้

ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน และเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการเก็บข้อมูลการหมุน และหาสมบัติด้านความผิด ความเฉื่อยของเครื่องมือวัดด้วยเครื่องจักรแอกทูเอต
2. ได้เครื่องมือวัดและโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่แบบหมุนสำหรับใช้ในการศึกษา

ความสำคัญของงานวิจัย

1. ได้เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนสำหรับการวิเคราะห์การทดลองทางฟิสิกส์
2. เป็นแนวทางในการนำความรู้ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ มาประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กับการหมุนซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกัน

ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบอุปกรณ์ที่มีแกนหมุนและวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ ซึ่งให้สัญญาณเป็นตัวเลขฐานสองที่สอดคล้องกับมุมที่หมุนไปของแกนหมุน
2. เขียนโปรแกรมคำสั่ง เพื่อควบคุมการรับส่งข้อมูล และเก็บข้อมูลตำแหน่งของการเคลื่อนที่เชิงมุมที่เปลี่ยนไปในแต่ละช่วงเวลา ผ่านพอร์ตขนาน
3. เขียนโปรแกรมคำสั่ง เพื่อประมวลผล และแสดงผลการวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูเอตในรูปภาพ
4. ทดสอบโปรแกรมที่เขียนขึ้นของเครื่องมือวัด และหาสมบัติด้านความผิด ความเฉื่อยค่า g กับการทดลองเครื่องจักรแอกทูเอต
5. ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือโดยการหาค่า g เทียบกับค่ามาตรฐานจากสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

1. ได้เครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน และโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่แบบหมุน
2. สามารถนำอุปกรณ์ที่เป็นเครื่องมือวัด และโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ไปใช้กับเครื่องจักรแอทวูด และการทดลองในทางฟิสิกส์ที่มีลักษณะของการเคลื่อนที่แบบหมุนได้

บทที่ 2

ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

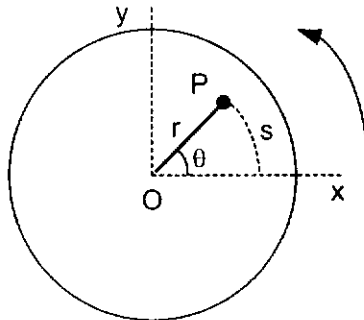
ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนตั้ง
2. ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนตั้ง

ในการศึกษาการหมุนของวัตถุ เราจะต้องวิเคราะห์ว่าวัตถุนั้นเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ซึ่งมีสมบัติเป็นวัตถุที่ไม่สามารถผิดรูป (Nondeformable) หรืออธิบายได้ว่าระยะห่างระหว่างอนุภาคในวัตถุนั้นมีค่าคงที่¹

1. อัตราเร็วเชิงมุมและอัตราเร่งเชิงมุม



ภาพประกอบ 1 การหมุนของวัตถุแข็งเกร็งรอบแกนตั้ง

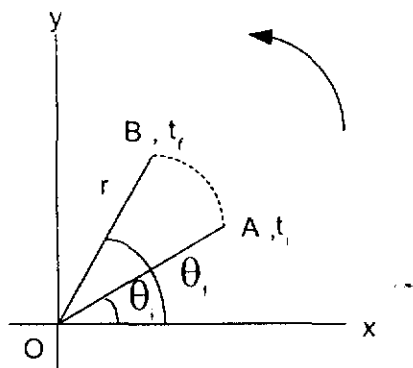
พิจารณาภาพประกอบ 1 ซึ่งแสดงวัตถุที่เป็นแผ่นกลมกำลังหมุนรอบแกนตั้งผ่านจุด O และตั้งฉากกับระนาบ xy อนุภาคที่จุด P มีระยะห่างจาก O เป็นระยะ r และหมุนเป็นวงกลมด้วยรัศมี r พิจารณาระบบพิกัดเชิงขั้ว (r, θ) ซึ่ง r จะคงที่ตลอดเวลา แต่ค่าของ θ จะเปลี่ยนแปลงไปขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลมจากแกน x ไปยังจุด P อนุภาคจะเคลื่อนที่ได้เป็นส่วนโค้งของวงกลมยาว s ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างส่วนโค้ง s กับมุม θ ได้ว่า

¹Raymond A. Serway; & John W. Jewett. (2004). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. pp. 292-308.

$$s = r\theta$$

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

ซึ่ง θ เป็นอัตราส่วนของส่วนโค้งของวงกลมกับรัศมี



ภาพประกอบ 2 แสดงอนุภาคในวัตถุแข็งเกร็งเคลื่อนที่จากจุด A ไป B

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B โดยใช้เวลา Δt ดังภาพประกอบ 2 จะพบว่ารัศมี r กวาดมุมได้ $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$ ปริมาณ $\Delta\theta$ นี้คือการกระจัดเชิงมุมของวัตถุแข็งเกร็ง ซึ่งทำให้สามารถหาอัตราเร็วเชิงมุมเฉลี่ยได้จาก

$$\bar{\omega} = \frac{\theta_f - \theta_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (2)$$

ดังนั้นอัตราเร็วเชิงมุมขณะใดขณะหนึ่ง หาได้จาก

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

ในกรณีที่วัตถุหมุนโดยมีอัตราเร็วเชิงมุมเปลี่ยนแปลงจาก ω_i เป็น ω_f โดยใช้เวลา Δt วัตถุจะมีอัตราเร่งเชิงมุมเฉลี่ยคือ

$$\bar{\alpha} = \frac{\omega_f - \omega_i}{t_f - t_i} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (4)$$

ในทำนองเดียวกันเราจะหาอัตราเร่งเชิงมุมขณะใดขณะหนึ่งได้จาก

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

2. การหมุนด้วยอัตราเร่งเชิงมุมคงที่

จากสมการ (5) จะเขียนได้ว่า $d\omega = \alpha dt$ และถ้ากำหนดให้เวลาเริ่มต้น $t_i = 0$ และที่เวลาใด ๆ $t_f = t$ แล้วอินทิเกรตจะได้

$$\omega_f = \omega_i + \alpha t \quad (6)$$

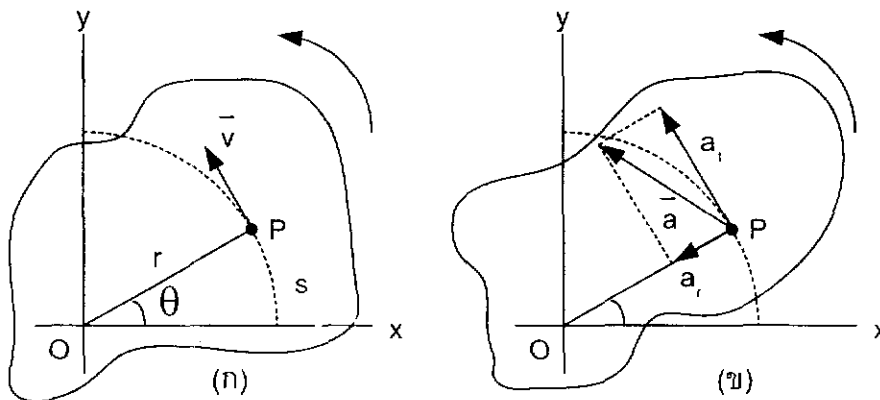
ซึ่ง ω_i คือ อัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุแข็งเกร็งที่เวลา $t=0$ เมื่อแทนค่า ω_f ซึ่งเป็นอัตราเร็วเชิงมุมที่เวลา t ลงในสมการ (3) แล้วอินทิเกรตอีกครั้งหนึ่งจะได้ว่า

$$\theta_f = \theta_i + \omega_i t + \frac{1}{2} \alpha t^2 \quad (7)$$

ซึ่ง θ_i คือ ตำแหน่งเชิงมุมของวัตถุแข็งเกร็งที่เวลา $t=0$ และ θ_f คือ ตำแหน่งเชิงมุมที่เวลา t ถ้าเรากำจัด t ออกจากสมการ (6) และ (7) จะได้

$$\omega_f^2 = \omega_i^2 + 2\alpha(\theta_f - \theta_i) \quad (8)$$

3. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเชิงมุมกับปริมาณเชิงเส้น



ภาพประกอบ 3 แสดงวัตถุหมุนรอบแกนตั้งที่ผ่านจุด O (ก) จุด P มีความเร็วเชิงเส้น \vec{v} สัมผัสกับเส้นรอบวงรัศมี r (ข) จุด P มีความเร่ง $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_r$

จากภาพประกอบ 3 แสดงการหมุนของวัตถุรอบแกนตั้ง อนุภาคทุกอนุภาคในวัตถุนี้จะเคลื่อนที่เป็นวงกลมโดยมีศูนย์กลางอยู่บนแกนหมุน ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมกับความเร็วเชิงเส้นของจุด P ในวัตถุ เนื่องจาก P เคลื่อนที่เป็นวงกลม ดังนั้นความเร็ว \vec{v} จะมีทิศสัมผัสกับเส้นรอบวงกลม ขนาดความเร็วในแนวเส้นสัมผัสนี้มีค่าเท่ากับ $\frac{ds}{dt}$ เมื่อ s คือระยะทางที่จุด P เคลื่อนที่ตามแนวเส้นรอบวงกลม จากสมการ (1) จะได้ว่า $s = r\theta$ โดยที่ r คือรัศมีซึ่งคงที่ ดังนั้น

$$v = \frac{ds}{dt} = r \frac{d\theta}{dt}$$

$$v = r\omega \quad (9)$$

จากสมการ (9) จะได้ว่า อัตราเร็วในแนวเส้นสัมผัสของจุดที่เคลื่อนที่จะมีค่าเท่ากับระยะห่างระหว่างจุดนั้นกับแกนหมุนคูณด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ดังนั้นทุก ๆ ตำแหน่งในวัตถุจะมีอัตราเร็วเชิงมุมเท่ากัน แต่จะมีอัตราเร็วเชิงเส้นไม่เท่ากัน

จากสมการ (9) สามารถหาอัตราเร่งเชิงมุมในเทอมของอัตราเร็วเชิงเส้นได้คือ

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

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

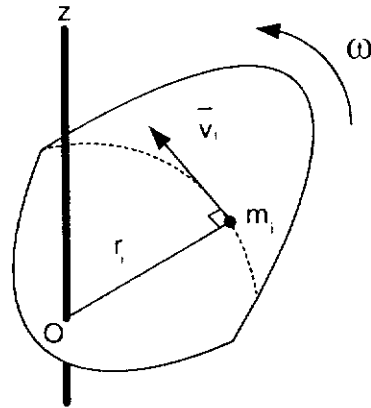
จากสมการ (10) จะเห็นว่าอัตราเร่งเชิงมุมจะเท่ากับอัตราเร่งในแนวเส้นสัมผัสหารด้วยรัศมี r และเมื่อวัตถุเคลื่อนที่เป็นวงกลม อัตราเร่งของวัตถุจะพุ่งเข้าสู่จุดศูนย์กลางของวงกลมและมีขนาด $a_c = \frac{v^2}{r}$ ซึ่งสามารถเขียนได้ในเทอมของอัตราเร็วเชิงมุม ω คือ

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

จากภาพประกอบ 3(ข) ถ้าให้ความเร่งในแนวสัมผัสเป็น \vec{a}_t และความเร่งในแนวรัศมีเป็น \vec{a}_c ความเร่งรวมของจุด P คือ $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_c$ ดังนั้นขนาดความเร่งของจุด P คือ

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

4. พลังงานจลน์ของการหมุน



ภาพประกอบ 4 แสดงวัตถุหมุนรอบแกน z

พิจารณาวัตถุประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กๆ จำนวนมาก และวัตถุนี้หมุนรอบแกน z ด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω ดังแสดงในภาพประกอบ 4 แต่ละอนุภาคจะมีพลังงานจลน์หาได้จากการทราบมวลและอัตราเร็ว ถ้ามวลของอนุภาคที่ i มีมวลเป็น m_i อัตราเร็ว v_i ดังนั้นพลังงานจลน์ คือ

$$E_{k_i} = \frac{1}{2} m_i v_i^2$$

แม้ว่าทุกอนุภาคจะมีอัตราเร็วเชิงมุมเท่ากัน แต่จะมีอัตราเร็วในแนวเส้นสัมผัส v_i ไม่คงที่ โดยมีค่า $v_i = r_i \omega$ และสามารถเขียนค่าพลังงานจลน์ของวัตถุที่กำลังหมุนได้ว่า

$$E_k = \sum_i E_{k_i} = \sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \frac{1}{2} \left(\sum_i m_i r_i^2 \right) \omega^2$$

โดยที่ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย $I = \sum_i m_i r_i^2$ ดังนั้นค่าพลังงานจลน์ E_k คือ

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

5. โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

โมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุเป็นสภาพต้านการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเชิงมุม¹ สำหรับระบบของอนุภาค โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุน หาได้จาก

$$I = \sum_i m_i r_i^2$$

เมื่อ r_i เป็นระยะทางตั้งฉากจากมวล m_i ถึงแกนหมุน

สำหรับวัตถุแข็งเกร็งซึ่งมีมวลกระจายอย่างต่อเนื่องเป็นเนื้อเดียวกัน โมเมนต์ของความเฉื่อยรอบแกนหมุนใดๆ หาได้จาก

$$I = \int r^2 dm \quad (14)$$

เมื่อ r เป็นระยะตั้งฉากจากมวล dm ถึงแกนหมุนและ dm เป็นมวลน้อยๆ

ถ้า วัตถุมีรูปร่างเป็น 1 มิติ เช่น เส้นลวด และมีมวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวเท่ากับ λ จะมีโมเมนต์ความเฉื่อย

$$I = \int r^2 \lambda dl$$

เมื่อ dl เป็นความยาวน้อยๆ (Length Element)

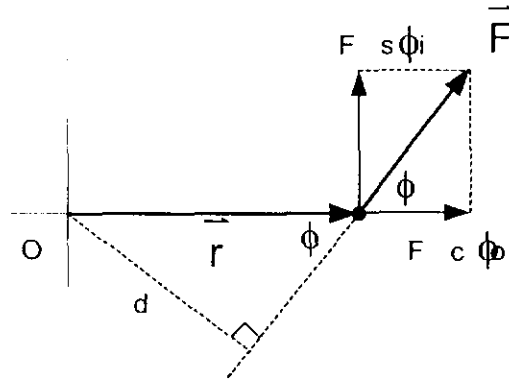
วัตถุมีรูปร่างเป็น 2 มิติ เช่น แผ่นบาง และมีมวลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เท่ากับ σ จะมีโมเมนต์ความเฉื่อย

$$I = \int r^2 \sigma dA$$

เมื่อ dA เป็นพื้นที่น้อยๆ (Area Element)

¹พีเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ. (2541). กลศาสตร์เชิงวิเคราะห์. หน้า 246-248.

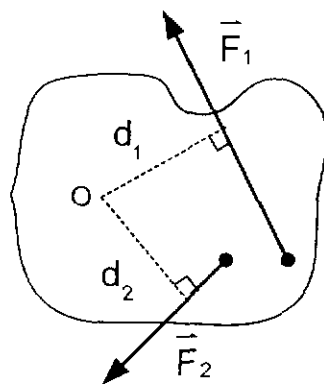
5. ทอร์ก

ภาพประกอบ 5 แสดงทอร์กเนื่องจากแรง \vec{F}

ทอร์กเป็นผลของแรงที่พยายามทำให้วัตถุเปลี่ยนสภาพการหมุน พิจารณาภาพประกอบ 5 เมื่อออกแรง \vec{F} กระทำกับวัตถุในแนวทำมุม ϕ กับ \vec{r} วัตถุจะมีการหมุนรอบจุดนั้น และสามารถเขียนได้ว่า

$$\tau = rF \sin \phi = Fd \quad (15)$$

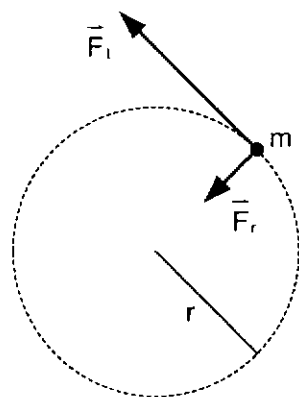
เมื่อ r คือ ระยะระหว่างจุดหมุนกับจุดที่มีแรงกระทำ และ d คือระยะทางตั้งฉากจากจุดหมุนไปยังแนวแรง

ภาพประกอบ 6 แสดงแรง \vec{F} และ \vec{F}_1 กระทำต่อวัตถุทำให้เกิดทอร์กรอบจุด O

ถ้ามีแรง 2 แรงหรือมากกว่ากระทำต่อวัตถุตั้งแสดงในภาพประกอบ 6 ขนาดของทอร์กรวมคือ

$$\sum \tau = \tau_1 + \tau_2 = F_1 d_1 - F_2 d_2$$

6. ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กกับอัตราเร่งเชิงมุม



ภาพประกอบ 7 แสดงอนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลม

พิจารณาอนุภาคมวล m เคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี r โดยมีแรงในแนวเส้นสัมผัส \vec{F}_t และแรงสู่ศูนย์กลาง \vec{F}_r กระทำต่ออนุภาคดังแสดงในภาพประกอบ 7 ซึ่งแรงในแนวเส้นสัมผัสทำให้เกิดความเร่งในแนวเส้นสัมผัส \vec{a}_t กล่าวคือ

$$F_t = ma_t$$

ดังนั้นทอร์กคือ

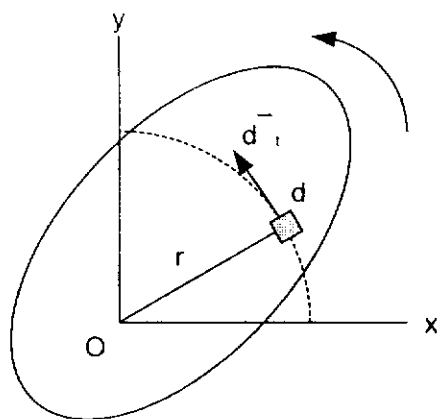
$$\tau = F_t r = (ma_t)r$$

เนื่องจาก $a_t = r\alpha$ จึงสามารถเขียนได้ว่า

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

$$\tau = I\alpha \tag{16}$$

จึงสรุปได้ว่าค่าทอร์กมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราเร่งเชิงมุม



ภาพประกอบ 8 แสดงการหมุนของวัตถุ

พิจารณาการหมุนของวัตถุรอบแกนตั้งที่จุด O ดังแสดงในภาพประกอบ 8 เนื่องจากวัตถุมีรูปทรงแน่นอน พิจารณาส່วนของมวลเล็กๆ dm จะเขียนได้ว่า

$$dF_t = (dm)a_t$$

ขนาดของทอร์ก $d\tau$ ที่เกิดจากขนาดของแรง dF_t จะมีค่าเป็น

$$d\tau = rdF_t = a_t r dm$$

แทนค่า $a_t = r\alpha$ จะได้ว่า

$$d\tau = \alpha r^2 dm$$

เนื่องจากมวลเล็กๆ จะมีอัตราเร่งเชิงมุมเท่ากัน และเมื่ออินทิเกรตจะได้

$$\int d\tau = \alpha \int r^2 dm$$

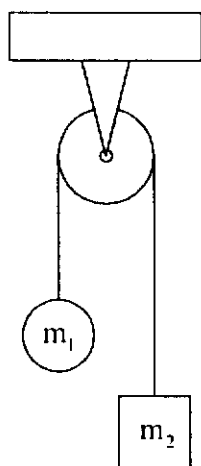
เนื่องจาก $\int r^2 dm$ คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อย I จึงสรุปได้ว่าทอร์กสุทธิคือ

$$\tau_{\text{net}} = I\alpha \quad (17)$$

เมื่อ τ_{net} คือทอร์กบนวัตถุ

7. เครื่องจักรแอทวูด (Atwood's Machine)

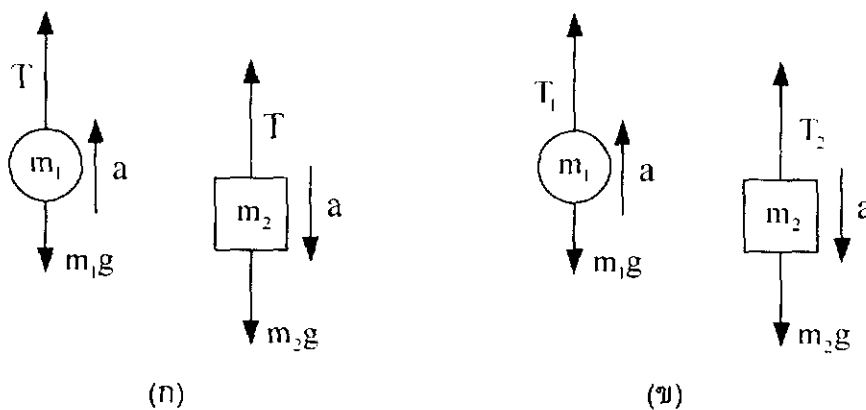
1.1 สำหรับรอกที่เบาและไม่มีความเสียด



ภาพประกอบ 9 เครื่องจักรแอทวูด

เมื่อเอาวัตถุ 2 ก้อนมาผูกติดกันด้วยเชือก แล้วนำไปคล้องพาดรอกที่แขวนอยู่ในแนวตั้ง ดังภาพประกอบ 9 จะได้อุปกรณ์ที่เรียกว่า เครื่องจักรแอทวูด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในการทดลองหาความเร่งโน้มถ่วงของโลก¹

¹Raymond A. Serway; & John W. Jewett. (2004). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. pp. 129-130.



ภาพประกอบ 10 แผนภาพวัตถุอิสระแสดงแรงที่กระทำต่อมวลที่แขวนบนเครื่องจักรแอกทูต
 (ก) สำหรับรอกที่เบาและไม่มีคามฝืด (ข) สำหรับรอกที่มีมวลและมีความฝืด

ถ้ารอกเบาและไม่มีแรงเสียดทาน จะวิเคราะห์การเคลื่อนที่ตามกฎข้อ 2 ของนิวตันได้ดังนี้
 ถ้ามวล m_2 มากกว่า m_1 จะเห็นว่า m_2 เคลื่อนที่ลง m_1 เคลื่อนที่ขึ้น ดังภาพประกอบ 10 (ก)
 พิจารณามวล m_1 ของเครื่องจักรแอกทูต

$$T - m_1g = m_1a \quad (18)$$

เมื่อ T แทนขนาดของแรงดึงเชือกทางด้านมวล m_1 และ a แทนอัตราเร่ง
 พิจารณามวล m_2 ของเครื่องจักรแอกทูต

$$m_2g - T = m_2a \quad (19)$$

เมื่อ T แทนขนาดของแรงดึงเชือกทางด้านมวล m_2 และ a แทนอัตราเร่ง
 นำสมการ (18)+(19) ได้

$$-m_1g + m_2g = m_1a + m_2a$$

เราจะได้

$$a = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right) g \quad (20)$$

นำค่า a จากสมการ (20) ไปแทนในสมการ (18) จะได้

$$T = \left(\frac{2m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) g \quad (21)$$

จากสมการ (21) จะเห็นว่า ขนาดของแรงดึงเชือกของระบบขึ้นกับมวลและสนามความโน้มถ่วง โดยไม่ขึ้นกับอัตราเร่งในการเคลื่อนที่ของมวลทั้งสอง

1.2 สำหรับรอกที่มีมวลและมีความฝืด

เนื่องด้วยการเคลื่อนที่แบบหมุนมีผลของความเสียดทานของแบริ่ง (Bearing) และความเฉื่อยของรอกรวมอยู่ด้วย¹ จากภาพประกอบ 10 (ข) ให้ $m_2 > m_1$ พิจารณามวล m_2

$$m_2 g - T_2 = m_2 a \quad (22)$$

โดย T_2 คือ ขนาดของแรงดึงเชือกที่ผูกติดกับมวล m_2 และ a คืออัตราเร่งพิจารณามวล m_1

$$T_1 - m_1 g = m_1 a \quad (23)$$

โดย T_1 คือ ขนาดของแรงดึงเชือกด้านที่ผูกติดกับมวล m_1 และ a คืออัตราเร่ง

พิจารณารอกที่มีมวล และมีโมเมนต์ความเฉื่อย I ขนาดของแรงดึงเส้นเชือกและผลของแรงเสียดทานดลับลูกปืน ทำให้เกิดทอร์กกระทำกับรอก โดยขนาดของทอร์กสุทธิ จะทำให้รอกหมุนด้วยอัตราเร่งเชิงมุม และจาก

$$\tau_{net} = I\alpha$$

เมื่อ τ คือ ขนาดของทอร์ก α คือ อัตราเร่งเชิงมุม จะได้

¹Gordon O. Johnson. (2001, March). Making Atwood's Machine Work. *The Physics Teacher*. 39 : pp. 154-158.

$$T_2 r - T_1 r - \tau_f = I_p \alpha \quad (24)$$

โดย r คือ รัศมีของรอก τ_f คือ ขนาดของทอร์กที่เกิดจากแรงเสียดทานของดรัมลูกปืนของรอก I_p คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของรอก และ α คือ อัตราเร่งเชิงมุมของรอก
อัตราเร่งของวัตถุจะเท่ากับอัตราเร่งของขอบรอกในแนวเส้นสัมผัสของเส้นเชือก

$$\alpha r = a$$

ถ้าสมมติให้ขนาดทอร์กของแรงเสียดทานสามารถหักล้างได้พอดี ด้วยขนาดของทอร์กจากการแขวนมวลขนาด m_f บนรอก

$$\tau_f = m_f g r$$

โดย m_f คือ มวลยังผลของความเสียดทาน (Effective Frictional Mass) และถ้าให้รอกมีโมเมนต์ความเฉื่อยเป็น I_p

$$I_p = m_p r^2$$

โดย m_p คือ มวลยังผล (Effective Mass) ของรอก จากสมการ (24) เขียนใหม่ได้เป็น

$$T_2 r - T_1 r - m_f g r = m_p r^2 \alpha \quad (25)$$

r หารสมการ (25) ตลอด และเขียน α ในเทอมของ a

$$T_2 - T_1 - m_f g = m_p a \quad (26)$$

แก้สมการ (22),(23) และ (26) เราจะได้

$$g = \frac{a(m_2 + m_1 + m_p)}{(m_2 - m_1 - m_f)} \quad (27)$$

จัดรูปแบบของสมการ (27) ใหม่ จะได้

$$m_2 - m_1 = \frac{a(m_2 + m_1 + m_p)}{g} + m_1 \quad (28)$$

จากสมการ (28) ถ้าให้ผลรวมของมวล m_2+m_1 เป็นค่าคงที่ และ m_p ซึ่งเป็นมวลยังผลของรอกคงที่ ความแตกต่างของมวลทั้งสอง (m_2-m_1) จะแปรตามอัตราเร่ง a โดยเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่าง ความแตกต่างของมวลทั้งสอง (m_2-m_1) กับอัตราเร่ง a จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเป็น $\frac{(m_2 + m_1 + m_p)}{g}$ และมีจุดตัดแกน y เป็นค่าคงที่ m_1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผลต่างของมวลเพิ่มขึ้นทำให้อัตราเร่งเพิ่มขึ้น

กำหนดให้ความชันของกราฟจากสมการ (28) เป็น

$$S = \frac{(m_2 + m_1 + m_p)}{g} \quad (29)$$

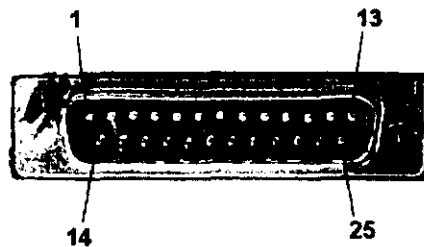
จัดรูปสมการ (29) ใหม่ จะได้

$$m_2 + m_1 = gS - m_p \quad (30)$$

จากสมการ (30) ถ้าให้ค่า g เป็นค่าคงที่ ผลรวมของมวลทั้งสอง (m_2+m_1) จะแปรตามค่า S โดยเมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างผลรวมของมวลทั้งสอง (m_2+m_1) กับค่า S จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเป็นค่า g และมีจุดตัดแกน y เป็นค่าคงที่ m_p

ทฤษฎีทางอิเล็กทรอนิกส์

1. พอร์ตขนาน (Parallel Port)



ภาพประกอบ 11 แสดงลักษณะของพอร์ตขนาน

พอร์ตขนาน (Parallel Port) นั้นเดิมเรียกว่า พริ้นเตอร์พอร์ต (Printer Port) เพราะการใช้งานส่วนใหญ่กับพอร์ตขนานเป็นการใช้งานโดยต่อกับเครื่องพิมพ์เป็นหลัก โดยที่พอร์ตขนานนั้นสามารถให้ความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลได้รวดเร็วกว่าพอร์ตอนุกรม (Serial Port) ราว 8-10 เท่า สามารถส่งข้อมูลได้ 8 บิต พร้อมกัน¹

ลักษณะหัวต่อของพอร์ตขนานจะเป็นแบบ ดี-ชนิด 25 ขา (D-type 25 pin) อยู่หลังเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปดังภาพประกอบ 11 ปกติแล้วจะใช้ในการติดต่อกับเครื่องพิมพ์

อย่างไรก็ตามนอกจากพอร์ตขนานจะใช้ติดต่อกับเครื่องพิมพ์แล้ว ยังสามารถใช้งานเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ได้อีก ซึ่งการใช้พอร์ตขนานในงานการเชื่อมต่อนั้นถูกใช้กันอย่างแพร่หลายมาก ทั้งนี้เพราะสามารถรับและส่งข้อมูลในลักษณะขนานได้ ทำให้นำไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้ ลักษณะความต่างศักย์ที่ให้ออกมาจากคอมพิวเตอร์ก็เป็นทีทีแอล (TTL-Transistor-Transistor Logic) โดยสัญญาณตรรกะ 1 จะเท่ากับ 5 โวลต์และตรรกะ 0 จะเท่ากับ 0 โวลต์ ทำให้สะดวกในการหาวัสดุมาออกแบบวงจรและการประยุกต์ใช้งาน

พอร์ตขนานของเครื่องคอมพิวเตอร์ประกอบด้วยสัญญาณทั้งหมด 25 เส้นสัญญาณ แต่ใช้งานกันจริงๆ 17 เส้นสัญญาณ โดยพอร์ตจะแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ตามลักษณะของสัญญาณประกอบด้วย

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

¹อภิชาติ ภูพลับ. (2546). เริ่มต้นเขียนโปรแกรมติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์ด้วยวีซวลเบสิก. หน้า 77-82.

1.1 ลักษณะของสัญญาณ

1.1.1 พอร์ตข้อมูล จะมีขาอยู่ 8 ขา (ตั้งแต่ขาที่ 2 ถึง ขาที่ 9) บางที่เรียกพอร์ตข้อมูลนี้ว่า เรจิสเตอร์ข้อมูล (Data Register) ซึ่ง เรจิสเตอร์ (Register) ตัวนี้จะส่งค่าจากคอมพิวเตอร์ไปยังอุปกรณ์ได้อย่างเดียวไม่สามารถรับค่าได้ ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 แสดงลักษณะสัญญาณของพอร์ตข้อมูล

| Name | Read / Write | Bit No. | Signal Name |
|-----------|--------------|---------|----------------|
| Data Port | Write | Bit 7 | Data 7 (pin 9) |
| | | Bit 6 | Data 6 (pin 8) |
| | | Bit 5 | Data 5 (pin 7) |
| | | Bit 4 | Data 4 (pin 6) |
| | | Bit 3 | Data 3 (pin 5) |
| | | Bit 2 | Data 2 (pin 4) |
| | | Bit 1 | Data 1 (pin 3) |
| | | Bit 0 | Data 0 (pin 2) |

1.1.2 พอร์ตสถานะ เป็นพอร์ตที่อ่านได้อย่างเดียวไม่สามารถเขียนข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังอุปกรณ์ได้ พอร์ตนี้จะมีสัญญาณเข้าอยู่ 5 สัญญาณ และสัญญาณขอขัดจังหวะ (IRQ-Interrupt Request) กับสัญญาณสงวนไว้อีกสองบิต ดังแสดงใน ตาราง 2

ตาราง 2 ลักษณะสัญญาณของพอร์ตสถานะ

| Name | Read / Write | Bit No. | Signal Name |
|-------------|--------------|---------|-------------|
| Status Port | Read | Bit 7 | Busy |
| | | Bit 6 | nAck |
| | | Bit 5 | PaperEnd |
| | | Bit 4 | Select |
| | | Bit 3 | NError |
| | | Bit 2 | IRQ (Not) |
| | | Bit 1 | Reserved |
| | | Bit 0 | Reserved |

ลักษณะการทำงานของแต่ละบิตใน พอร์ตสถานะจะเป็นดังนี้คือ

| | | |
|---------------------|-----------|--|
| Bit 7 | Busy | เมื่อแอ็กทิว หมายถึง เครื่องพิมพ์จะไม่รับข้อมูล |
| Bit 6 | nAck | เมื่อแอ็กทิว หมายถึง เครื่องพิมพ์พร้อมที่จะทำงาน แอ็กทิวโลว์ |
| Bit 5 | Paper End | เมื่อแอ็กทิว หมายถึง เครื่องพิมพ์ไม่มีกระดาษ |
| Bit 4 | Select | เมื่อแอ็กทิว หมายถึง เลือกเครื่องพิมพ์ |
| Bit 3 | nError | เมื่อแอ็กทิว หมายถึง เครื่องพิมพ์เกิดข้อผิดพลาด แอ็กทิวโลว์ |
| Bit 2, Bit 1, Bit 0 | | ไม่ใช้ |

1.1.3 พอร์ตควบคุม เป็นพอร์ตที่ใช้ในการควบคุมเครื่องพิมพ์ ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 แสดงลักษณะสัญญาณของพอร์ตควบคุม

| Name | Read / Write | Bit No. | Signal Name |
|--------------|--------------|---------|----------------------|
| Control Port | Read / Write | bit 3 | nESelect (pin 17) |
| | | bit 2 | nInitialize (pin 16) |
| | | bit 1 | nAutofeed (pin 14) |
| | | bit 0 | nStrobe (pin 1) |

ลักษณะการทำงานของแต่ละบิตในพอร์ตควบคุม

| | | |
|-------|-----------------|---|
| Bit 3 | nSelect Printer | เมื่อแอ็กทิว หมายถึง เลือกเครื่องพิมพ์ |
| Bit 2 | nInitialize | เมื่อแอ็กทิว หมายถึง ตั้งเครื่องพิมพ์ใหม่ |
| Bit 1 | nAuto Feed | เมื่อแอ็กทิว หมายถึง เครื่องพิมพ์กระทำการป้อนบรรทัด (Line Feed) |
| Bit 0 | nStrobe | เมื่อแอ็กทิว หมายถึง การบอกให้เครื่องพิมพ์ทราบว่ามี ข้อมูลเข้ามาแล้ว |

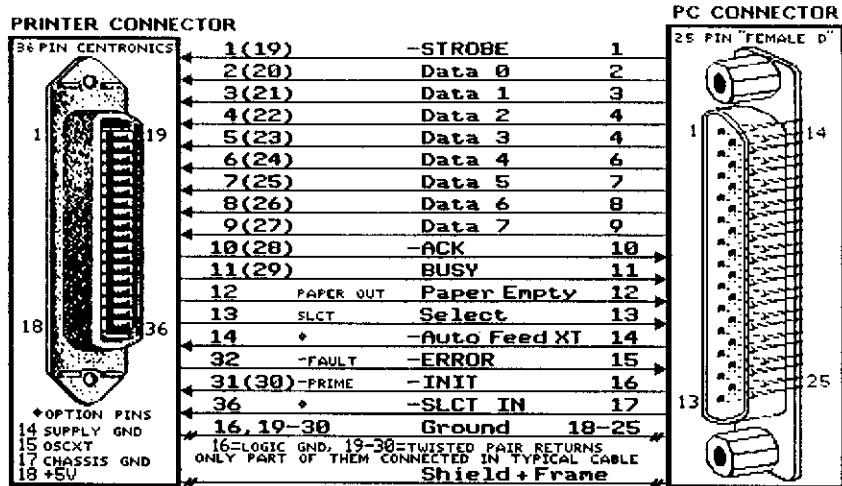
สรุปลักษณะของพอร์ตขนานทั้งหมดแสดงดังตาราง 4

ตาราง 4 ลักษณะของสัญญาณของพอร์ตขนาน

| Pin No. (D-Type 25) | Signal Name | Bit | Direction (In / Out) |
|---------------------|----------------|-----------------|----------------------|
| 1 | NStrobe | -C ₀ | Output |
| 2 | Data 0 (Bit 0) | D ₀ | Output |
| 3 | Data 1 (Bit 1) | D ₁ | Output |
| 4 | Data 2 (Bit 2) | D ₂ | Output |
| 5 | Data 3 (Bit 3) | D ₃ | Output |
| 6 | Data 4 (Bit 4) | D ₄ | Output |
| 7 | Data 5 (Bit 5) | D ₅ | Output |
| 8 | Data 6 (Bit 6) | D ₆ | Output |
| 9 | Data 7 (Bit 7) | D ₇ | Output |
| 10 | nAck | S ₆ | Input |
| 11 | Busy | -S ₇ | Input |
| 12 | PaperEnd | S ₅ | Input |
| 13 | Select | S ₄ | Input |
| 14 | nAutoFeed | -C ₁ | Output |
| 15 | nError | S ₃ | Input |
| 16 | nInitialize | C ₂ | Output |
| 17 | nSelectPrinter | -C ₃ | Output |
| 18-25 | Ground | | - |

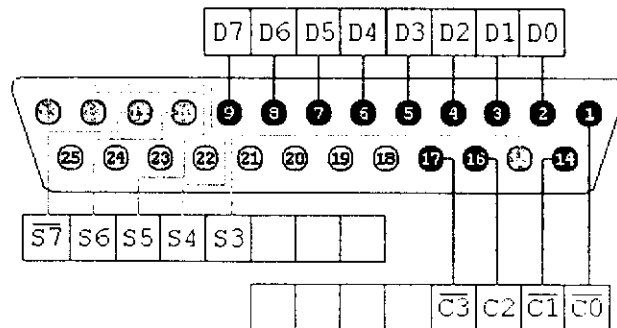
1.2 ทิศของการรับส่งข้อมูล (Pin Outs)

สำหรับการต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับพอร์ตขนานที่ขาต่างๆ จะมีทิศของการรับส่งข้อมูลของพอร์ตขนานดังภาพประกอบ 12 และมีแผนผังของสายสัญญาณในพอร์ตขนานดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 12 ทิศการรับส่งข้อมูลของพอร์ตขนาน

ที่มา: Gary Ewer. (1999). *Pin Outs for Various PC Related Connectors* . (Online).



ภาพประกอบ 13 แผนผังของสายสัญญาณในพอร์ตขนาน

ที่มา: อภิชาติ ภูพลับ. (2546). เริ่มต้นเขียนโปรแกรมติดต่อควบคุมฮาร์ดแวร์ด้วยวิซวลเบสิก. หน้า 80.

- 8 Output pins Data Port
- 8 Input pins (1 invert) STATUS PORT
- 4 Output (3 invert) CONTROL PORT
- 8 pins Ground

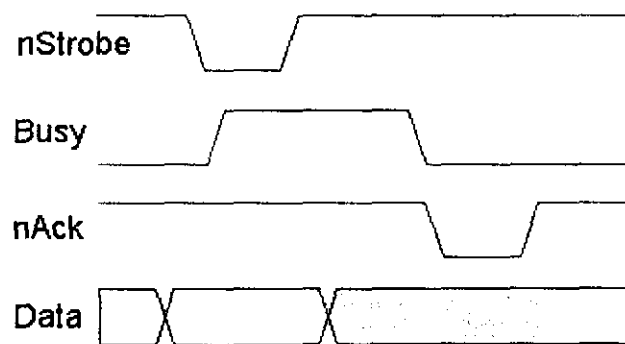
1.3 รูปแบบการติดต่อผ่านทางพอร์ตขนาน

จากภาพประกอบ 14 เมื่อมีการติดต่อกับอุปกรณ์ หรือเครื่องพิมพ์ใดๆ ผ่านทางพอร์ตขนานนั้นการทำงานจะเริ่มต้นจากคอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณข้อมูลขนาด 8 บิต ออกทางพอร์ตข้อมูล แล้วสร้างสัญญาณ Strobe ให้เป็นสถานะต่ำ (Low) ส่งไปยังอุปกรณ์ หรือเครื่องพิมพ์ เพื่อบอกให้ทราบว่าข้อมูลพร้อมเตรียมจะส่งให้แล้ว

จากนั้นคอมพิวเตอร์จะรอรับการตอบกลับจากอุปกรณ์ หรือเครื่องพิมพ์ ที่ต่อกับพอร์ตขนานนั้น โดยสิ่งที่ตอบกลับมามีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

สัญญาณ nAck เพื่อเป็นการแสดงว่าอุปกรณ์ หรือเครื่องพิมพ์พร้อมที่จะรับสัญญาณข้อมูล โดยจะสร้างสัญญาณ Acknowledge เป็นสถานะต่ำตอบกลับไป

ในกรณีที่เกิดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล เครื่องพิมพ์จะให้สัญญาณ Error ไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อให้คอมพิวเตอร์ส่งสัญญาณ Reset กลับไปยังเครื่องพิมพ์เพื่อตั้งเครื่องพิมพ์ใหม่



ภาพประกอบ 14 สัญญาณลักษณะสัญญาณ

จากรูปข้างต้นเราสามารถสรุปรายละเอียดเกี่ยวกับสัญญาณที่ใช้ในพอร์ตขนานได้ดังตาราง 5

ตาราง 5 รูปแบบการติดต่อผ่านพอร์ตขนาน

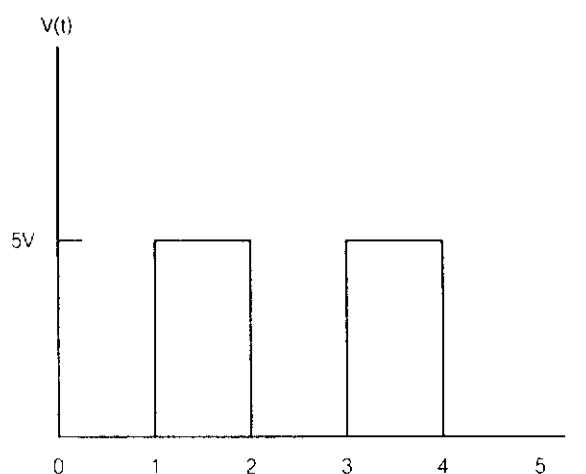
| สัญญาณ | ผู้ส่ง | สิ่งที่ส่ง | ผู้รับ |
|--------------|-------------|--|-------------|
| ข้อมูล 8 บิต | คอมพิวเตอร์ | ข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ส่งไปให้พอร์ต | พอร์ตขนาน |
| Strobe | คอมพิวเตอร์ | แจ้งให้พอร์ตทราบว่าข้อมูลชุดใหม่ส่งมา | พอร์ตขนาน |
| Acknowledge | พอร์ตขนาน | ตอบกลับมาว่าพร้อมรับข้อมูลแล้ว | คอมพิวเตอร์ |
| Busy | พอร์ตขนาน | ตอบกลับมาว่าไม่พร้อม | คอมพิวเตอร์ |
| Error | พอร์ตขนาน | แจ้งข้อผิดพลาดกลับมาให้คอมพิวเตอร์ | คอมพิวเตอร์ |
| Reset | คอมพิวเตอร์ | ให้ตั้งข้อมูลใหม่ หรือตั้งเครื่องพิมพ์ใหม่ | พอร์ตขนาน |

1.4 แอดเดรสของพอร์ต (Port Address)

แอดเดรสของพอร์ตขนานจะอยู่ที่ตำแหน่ง 378H สำหรับ LPT1 และ 278H สำหรับ LPT2 โดยพอร์ตขนานถูกกำหนดให้มีพอร์ตสื่อสารตามมาตรฐานของไบออส (BIOS) โดยใช้ระบุตำแหน่งของพอร์ตขนานที่คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องสนับสนุนการใช้งาน ประกอบไปด้วยข้อมูลชนิด 16 บิตที่ใช้ระบุหมายเลขพอร์ต LPT1 และ LPT2 เป็น 0378 ฐานสิบหก (378h) และ 0278 ฐานสิบหก (278H) ตามลำดับ

2. ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัล (Digital Electronic System)

ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบดิจิทัล คือ อิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวกับระบบการประมวลผลทางดิจิทัลโดยใช้เลขฐานสอง การนับจำนวนในระบบเลขฐานสองจะมีสองสถานะ คือ 0 และ 1 ซึ่งสำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อาจแทนด้วยระดับของศักย์ไฟฟ้า เช่น ความต่างศักย์ 0 โวลต์ คือ 0 และความต่างศักย์ 5 โวลต์ คือ 1 เป็นต้น ลักษณะของสัญญาณดิจิทัลจึงเป็นสัญญาณที่มีความต่างศักย์ต่างกันสองระดับดังภาพประกอบ 15 สัญญาณนี้มีความต่างศักย์ที่กำหนดไว้สองระดับ คือ 0 โวลต์ กับ 5 โวลต์ สัญญาณมีค่า 5 โวลต์ในช่วงเวลาระหว่าง $t = 1$ ถึง 2 กับในช่วงเวลาระหว่าง $t = 3$ ถึง 4 นอกจากช่วงเวลาทั้งสองนี้สัญญาณมีค่าเป็น 0 โวลต์



ภาพประกอบ 15 ลักษณะของสัญญาณดิจิทัล

2.1 ระบบเลขฐานสิบ

ระบบเลขฐานสิบ (Decimal System) เป็นระบบที่มีค่าประจำหลัก 10^n คือ $10^0, 10^1, 10^2, \dots, 10^n$ ซึ่งเลขหลักต่างๆ เรียกว่า หลักหน่วย หลักสิบ หลักร้อย หลักพัน ฯลฯ แต่ละหลักอาจเป็นตัวเลขใดตัวเลขหนึ่ง คือ 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9 ซึ่งมีจำนวน 10 ตัว ตัวเลขนี้ใช้เป็นตัวคูณของหลักนั้นๆ เพื่อให้ได้ค่าเป็นจำนวนเท่าของค่าประจำหลัก ตัวอย่างเช่น จำนวน 6789 มีความหมายว่า

| | หลักพัน | หลักร้อย | หลักสิบ | หลักหน่วย |
|--------------|-------------------|------------------|-----------------|----------------|
| ค่าประจำหลัก | 10^3 | 10^2 | 10^1 | 10^0 |
| ตัวคูณ | 6 | 7 | 8 | 9 |
| ค่า | (6×1000) | (7×100) | (8×10) | (9×1) |

ผลรวมของค่าทั้งหมด คือ $(6 \times 1000) + (7 \times 100) + (8 \times 10) + (9 \times 1) = 6789$

2.2 ระบบเลขฐานสอง

ระบบเลขฐานสอง (Binary System) เป็นระบบที่มีค่าประจำหลัก 2^n ซึ่ง n มีค่าเป็นจำนวนเต็ม ตั้งแต่ 0 ถึง n ระบบเลขฐานสองมีตัวเลขให้ใช้สองตัวคือ 0 กับ 1 ซึ่งตัวเลขเหล่านี้จะแสดงถึงสถานะของระบบ ปัจจุบันระบบเลขฐานสองเป็นระบบพื้นฐานของระบบดิจิทัล จำนวนหลักของเลขฐานสองเรียกว่า บิต (Bit) ย่อมาจาก Binary Digital เช่น เลขฐานสอง 8 หลัก เรียกว่า เลข 8 บิต และ 4 หลักเรียก 4 บิต ตัวอย่างเช่น จำนวนเลข 1010 มีความหมายว่า

| | บิตสูงสุด | ... | บิตต่ำสุด | |
|--------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| ค่าประจำหลัก | $2^3 = (8)$ | $2^2 = (4)$ | $2^1 = (2)$ | $2^0 = (1)$ |
| ตัวคูณ | 1 | 0 | 1 | 0 |
| ค่า | (1×8) | (0×4) | (1×2) | (0×1) |

ผลรวมของค่าทั้งหมด คือ $(1 \times 8) + (0 \times 4) + (1 \times 2) + (0 \times 1) = 8+0+2+0 = 10$
 ค่ารวมของจำนวนเลขฐานสอง 1010 คือ 10 ของจำนวนเลขฐานสิบ

| | | | | |
|---------------|--------------|--------------|-------|-------|
| ระบบเลขฐานสอง | 4 บิต (หลัก) | แสดงจำนวนได้ | 16 | จำนวน |
| | 8 บิต | แสดงจำนวนได้ | 256 | จำนวน |
| | 16 บิต | แสดงจำนวนได้ | 65536 | จำนวน |
| | : | : | : | จำนวน |
| | n บิต | แสดงจำนวนได้ | 2^n | จำนวน |

3. เกต (Gate)

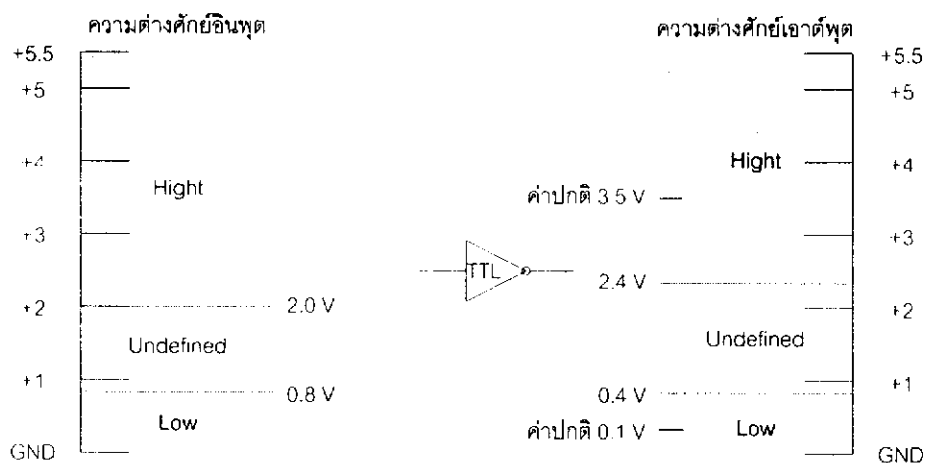
เกตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการตัดสินใจระบบเลขฐานสองของวงจรดิจิทัล เกตเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เฉพาะอย่างตามฟังก์ชันตรรกะ โดยอาศัยหลักการตามกระบวนการพื้นฐานของพีชคณิตแบบบูลีน (Boolean Algebra)¹

วงจรรวมที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายตระกูล ดังนี้

| | |
|------------------|--|
| RLT | -Resistor-transistor Logic |
| DTL | -Diode-Transistor Logic |
| TTL | -Transistor –Transistor Logic |
| ECL | -Emitter Coupled Logic |
| MOS | -Metal-Oxide-Semiconductor Logic |
| CMOS | -Complementary Metal-Oxide-Semiconductor-Logic |
| I ² L | -Integrated Injection Logic |

3.1 เกตตรรกะชนิดทีทีแอล (TTL Logic Gate)

ทีทีแอล (Transistor Transistor Logic) เป็นวงจรรวมที่สร้างขึ้นมาจากวงจรรวมที่ทำงานด้วยทรานซิสเตอร์ ซึ่งประกอบกันเป็นเกตแบบต่างๆ เช่น แอนด์เกต ออร์เกต เป็นต้น ระดับความต่างศักย์ตรรกะของเกตแบบทีทีแอลชนิดมาตรฐาน ดังแสดงในภาพประกอบ 16

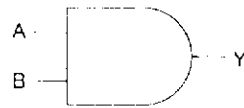


ภาพประกอบ 16 แสดงระดับความต่างศักย์อินพุตและเอาต์พุตของวงจรรวมทีทีแอลชนิดมาตรฐาน

¹ จีระวัฒน์ ใจอ่อนนุ่ม; และ นภัทร วัจนเทพินทร์. (2541). วงจรดิจิทัล. หน้า 86-104.

วงจรรวมที่ทีแอลมีหลายตระกูล เช่น ทีทีแอลมาตรฐาน ทีทีแอลกำลังต่ำ (L-Low-Power) ทีทีแอลชอตต์กี (S-Schottky) ทีทีแอลชอตต์กีกำลังต่ำ (LS-Low-Power Schottky) และแบบที่ทีแอลความเร็วสูง (H-Hight Speed) แต่ละชนิดจะมีโครงสร้างของอุปกรณ์ภายในวงจรที่แตกต่างกัน แต่ยังคงใช้ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นสวิตช์ ให้วงจรรวมชนิดที่ทีแอลทำงานตามที่ได้ออกแบบและสร้างไว้เป็นเกตต่างๆ ทรรกะพื้นฐานมีการทำงานดังนี้

3.1.1 แอนด์เกต (AND Gate)



ภาพประกอบ 17 สัญลักษณ์ของแอนด์เกต

ตาราง 6 ลักษณะการทำงานของแอนด์เกต

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

3.1.2 ออร์เกต (OR Gate)

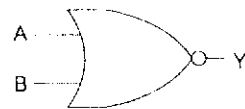


ภาพประกอบ 18 สัญลักษณ์ของออร์เกต

ตาราง 7 ลักษณะการทำงานของออร์เกต

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 |

3.1.3 นอร์เกต (NOR Gate)

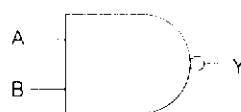


ภาพประกอบ 19 สัญลักษณ์ของนอร์เกต

ตาราง 8 ลักษณะการทำงานของนอร์เกต

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 |

3.1.4 แนนด์เกต (NAND Gate)

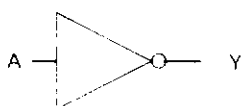


ภาพประกอบ 20 สัญลักษณ์ของแนนด์เกต

ตาราง 9 ลักษณะการทำงานของแนนด์เกต

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

3.1.5 นอตเกต (NOT Gate) หรืออินเวอร์เตอร์เกต (Inverter Gate)

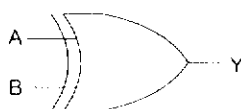


ภาพประกอบ 21 สัญลักษณ์ของนอตเกต

ตาราง 10 ลักษณะการทำงานของนอตเกต

| A | Y |
|---|---|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

3.1.6 เอ็กส์คลูซีฟออร์เกต (Exclusive OR Gate)



ภาพประกอบ 22 สัญลักษณ์ของเอ็กส์คลูซีฟออร์เกต

ตาราง 11 ลักษณะการทำงานของเอ็กซ์คลูซีฟออร์เกต

| A | B | Y |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 |

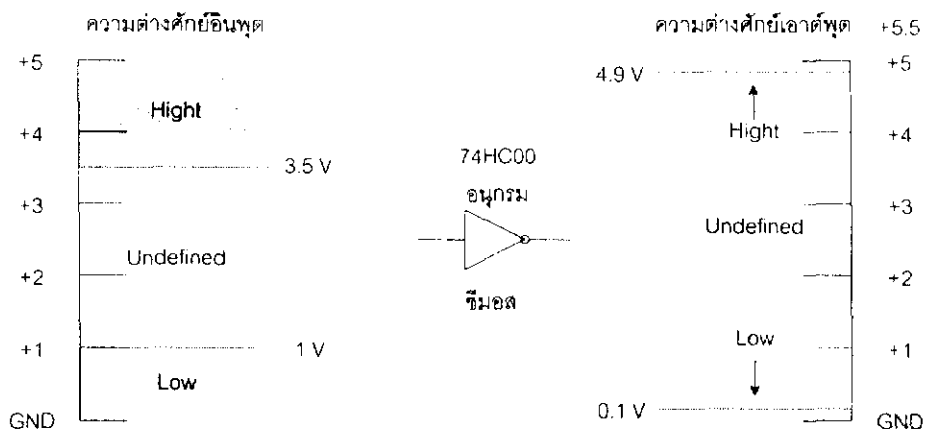
3.2 เกตตรรกะชนิดซีมอส (CMOS Logic Gate)

เกตตรรกะที่มีโครงสร้างภายในประกอบด้วยทรานซิสเตอร์ คือ เกตตรรกะในตระกูลทีทีแอล มีขีดจำกัดในเรื่องการสร้างให้มีความสามารถในการรวมวงจรรขนาดใหญ่ (LSI Large Scale Integrated Circuit) จึงมีการพัฒนาเพื่อสร้างตรรกะจากมอสเฟต (MOSFET) เรียกว่า วงจรรวมแบบมอสและซีมอส ซึ่งสามารถสร้างให้ทำงานได้ตามฟังก์ชันเหมือนกับวงจรรวมทีทีแอล แต่แตกต่างกันที่วงจรรวมภายในของวงจรรวมแบบมอสและซีมอส ใช้มอสเฟตแทนทรานซิสเตอร์ ทำให้คุณลักษณะทางความต่างศักย์ของตรรกะอินพุตและเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไป แต่คุณสมบัติที่เด่นมากของมอสและซีมอส คือกินกระแสอินพุตต่ำกว่าวงจรรวมทีทีแอลประมาณ 40 เท่า

ตาราง 12 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางด้านกระแสอินพุต/เอาต์พุตของวงจรรวมทีทีแอลและซีมอส

| ตระกูลของวงจรรวม | | กระแสเอาต์พุต | กระแสอินพุต |
|------------------|----------------|-----------------------|----------------------|
| TTL | Standard TTL | $I = 400 \mu\text{A}$ | $I = 40 \mu\text{A}$ |
| | | $I = 16 \text{ mA}$ | $I = 1.6 \text{ mA}$ |
| | Low Power | $I = 400 \mu\text{A}$ | $I = 20 \mu\text{A}$ |
| | Schottky | $I = 8 \text{ mA}$ | $I = 400 \text{ mA}$ |
| | Advanced Low | $I = 400 \mu\text{A}$ | $I = 20 \mu\text{A}$ |
| | Power Schottky | $I = 8 \text{ mA}$ | $I = 100 \text{ mA}$ |
| CMOS | 4000 Series | $I = 400 \mu\text{A}$ | $I = 1 \mu\text{A}$ |
| | 74HC00 Series | $I = 4 \text{ mA}$ | $I = 1 \mu\text{A}$ |

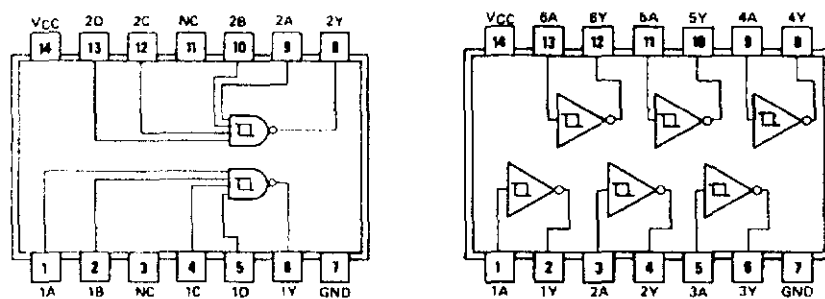
ระดับความต่างศักย์อินพุตและเอาต์พุตของวงจรรวมแบบซีมอส แตกต่างจากที่ทีแอล คือ ระดับ อินพุต 1 ประมาณ 3.5-5 V และระดับอินพุต 0 ประมาณ 0-1 V และระดับความต่างศักย์เอาต์พุต 1 ประมาณ 4.95-5 V และเอาต์พุต 0 ประมาณ 0-0.05 V ดังแสดงในภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 แสดงระดับความต่างศักย์อินพุตและเอาต์พุตของวงจรรวมแบบซีมอสอนุกรม 74HC00

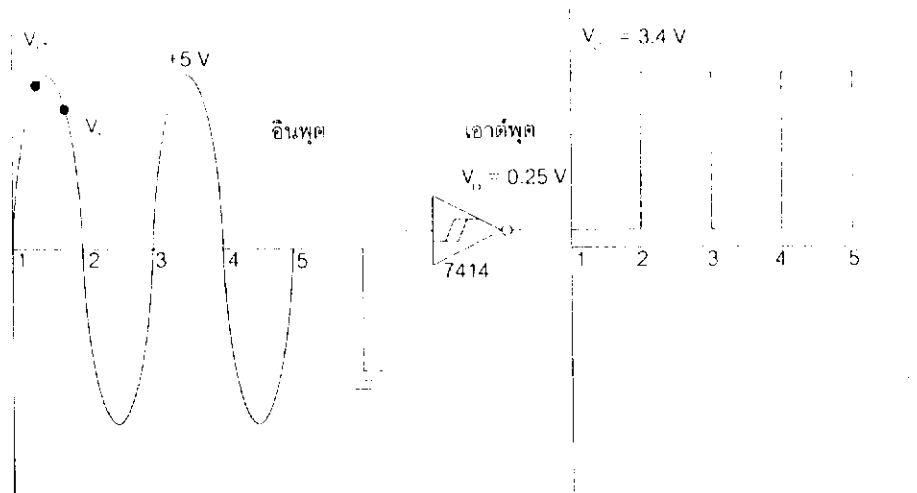
4. วงจรชนิดต์ทริกเกอร์ (Schmitt Trigger)

วงจรมิตต์ทริกเกอร์ เป็นวงจรที่ใช้ในการปรับสัญญาณดิจิทัลในลักษณะเป็นพัลส์สี่เหลี่ยมที่มีความชันของการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าสูง สำหรับวงจร รวมตระกูลที่ทีแอล มีวงจรรวมที่ทำหน้าที่เป็นวงจรมิตต์ทริกเกอร์อยู่หลายหมายเลข เช่น 7413 (Dual 4-Input Positive-NAND-Schmitt-trigger) และหมายเลข 7414 (Hex Schmitt-Trigger Inverter)¹ ดังแสดงในภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 วงจรรวมหมายเลข 7413 และ 7414 ที่มีอินพุตเป็นวงจรมิตต์ทริกเกอร์

¹จิระวัฒน์ ใจอ่อนนุ่ม; และ นภัทร วจนเทพินทร์. (2541). วงจรดิจิตอล. หน้า 86-104.

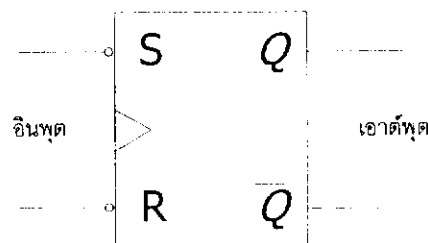


ภาพประกอบ 25 แสดงการนำเอาต์พุตที่มีอินพุตเป็นวงจรมิตต์ทริกเกอร์ 7414 ไปใช้ในการแปลงสัญญาณแอนะล็อก (Analog) เป็นสัญญาณดิจิทัล

5. ฟลิปฟล็อป (Flip Flop)

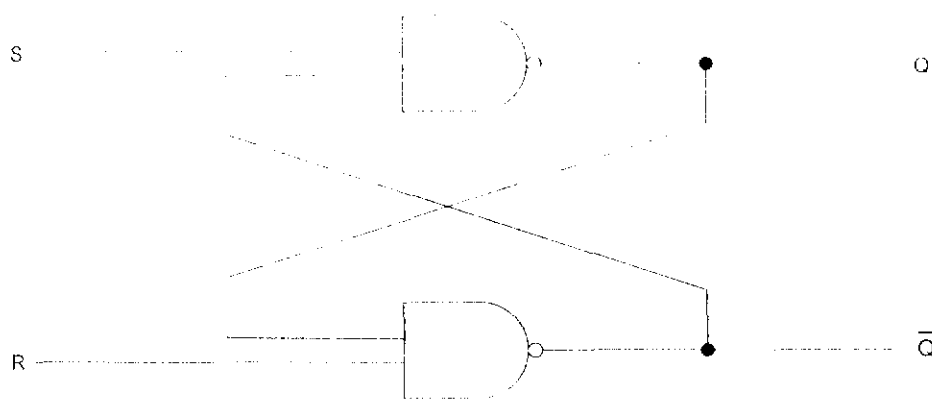
ฟลิปฟล็อป เป็นอุปกรณ์ตรรกะพวกไบสเทเบิล (Bistable) ที่มีอินพุตเดี่ยวหรือมากกว่า และมีเอาต์พุต 2 เอาต์พุต เอาต์พุตทั้งสองนี้จะต้องแสดงสภาวะตรงกันข้ามกัน ฟลิปฟล็อปเป็นวงจรพื้นฐาน ที่จะนำไปใช้ในการสร้างวงจรดิจิทัลต่างๆ ที่เกี่ยวกับวงจรตรรกะเชิงลำดับ (Sequential Logic) ฟลิปฟล็อปมีอยู่หลายชนิดดังต่อไปนี้¹

5.1 ฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอส (RS Flip-flop) มี 2 อินพุตเรียกว่า เซต (Set S) และ รีเซต (Reset R) มี 2 เอาต์พุตคือ Q และ \bar{Q} มีสัญลักษณ์และวงจรภายในดังภาพประกอบ 26 และ



ภาพประกอบ 26 แสดงสัญลักษณ์ของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอส

¹จิระวัฒน์ ใจอ่อนนุ่ม; และ นภัทร วัจนเทพินทร์. (2541). วงจรดิจิทัล. หน้า 86-104.



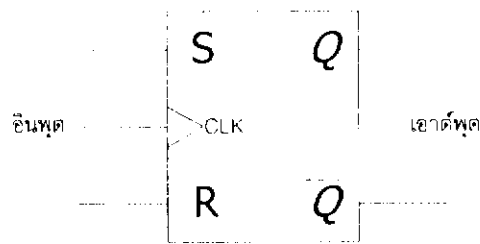
ภาพประกอบ 27 แสดงวงจรตรรกะภายในของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอส

การทำงานของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอสที่ใช้แชนด์เกตมี 4 สภาวะ เป็นไปตามตารางความเป็นจริงของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอสที่แสดงดังตาราง 13

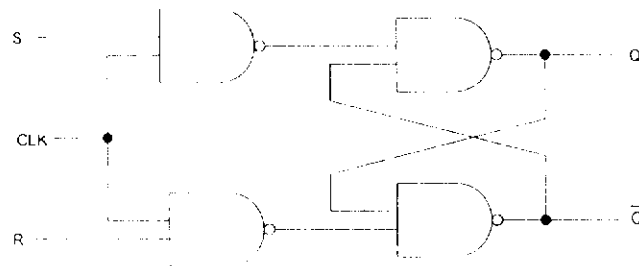
ตาราง 13 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอส

| รูปแบบการทำงาน | อินพุต | | เอาต์พุต | | |
|----------------|--------|---|----------|-----------|-----------------|
| | S | R | Q | \bar{Q} | ผลของเอาต์พุต Q |
| Prohibited | 0 | 0 | 1 | 1 | ห้ามใช้งาน |
| Set | 0 | 1 | 1 | 0 | เซตให้ Q=1 |
| Reset | 1 | 0 | 0 | 1 | รีเซตให้ Q=0 |
| Hold | 1 | 1 | Q | \bar{Q} | ไม่เปลี่ยนแปลง |

5.2 ฟลิปฟล็อป ชนิดอาร์เอสควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกา (R-S Flip-Flop With Clock) เป็นฟลิปฟล็อปที่มีขาอินพุต 3 ขา คือ เซต รีเซตและคล็อก ทำหน้าที่เป็นขาควบคุมเอาต์พุต ซึ่งมี 2 ขาคือ Q และ \bar{Q} ขาคล็อกจะเป็นขาควบคุมการทำงานของฟลิปฟล็อป ซึ่งถ้าไม่มีการป้อนสัญญาณนาฬิกาเข้าขาคล็อก ก็จะทำให้ฟลิปฟล็อปไม่ทำงาน แม้จะได้รับสัญญาณตรรกะเข้าที่ขา S และ R ฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอสควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกา มีสัญลักษณ์และวงจรภายในดังภาพประกอบ 28 และ 29



ภาพประกอบ 28 แสดงสัญลักษณ์ของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอสควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกา



ภาพประกอบ 29 แสดงวงจรภายในของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอสควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกา

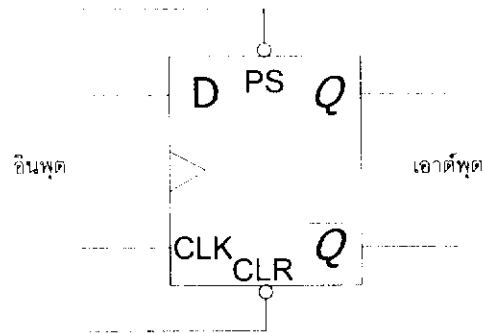
ตาราง 14 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปชนิดอาร์เอสควบคุมด้วยสัญญาณนาฬิกา

| รูปแบบการทำงาน | อินพุต | | | เอาต์พุต | | |
|----------------|--------|---|---|----------------|-----------|-----------------|
| | CLK | S | R | Q | \bar{Q} | ผลของเอาต์พุต Q |
| Hold | | 0 | 0 | ไม่เปลี่ยนแปลง | | ไม่เปลี่ยนแปลง |
| Reset | | 0 | 1 | 0 | 1 | รีเซ็ตให้ Q=0 |
| Set | | 1 | 0 | 1 | 0 | เซตให้ Q=1 |
| Prohibited | | 1 | 1 | 1 | 1 | ห้ามใช้งาน |

5.3 ฟลิปฟล็อปชนิดดี (D Flip-flop) เป็นฟลิปฟล็อปที่มีอินพุต 2 ชุดคือ

1. อินพุตซิงโครนัส (Synchronous Input) ประกอบด้วยขาข้อมูล (D) และขาคล็อก (CLK) ซึ่งทำงานร่วมกัน เมื่อป้อนข้อมูลสัญญาณเข้าที่ขา D ข้อมูลสัญญาณตรรกะจะถูกส่งผ่านไปเอาต์พุต Q ได้เมื่อมีสัญญาณพัลส์ป้อนเข้าขา CLK มาควบคุมการทำงานเท่านั้น

2. อินพุตอะซิงโครนัส (Asynchronous Input) ประกอบด้วยขาพรีเซต (PS) และขาเคลียร์ (CLR) ซึ่งทำงานด้วยตรรกะ 0 กล่าวคือ เมื่อป้อน 0 ให้ขา PS จะทำให้ Q=1 เมื่อป้อน 0 ให้ขา CLR จะทำให้ Q=0 ฟลิปฟล็อปชนิดดี ดังแสดงในภาพประกอบ 30



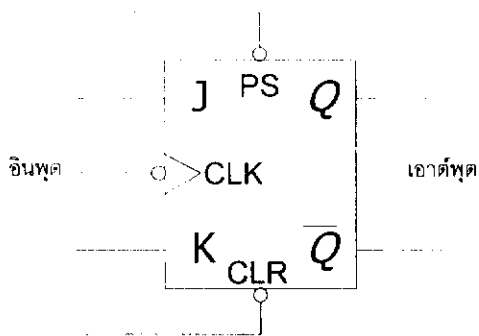
ภาพประกอบ 30 แสดงสัญลักษณ์ของฟลิปฟล็อปชนิดดี (7474)

ตาราง 15 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปชนิดดี (7474)

| รูปแบบการทำงาน | อินพุต | | | | เอาต์พุต | |
|--------------------|-------------|-----|-----------|---|----------|-----------|
| | อะซิงโครนัส | | ซิงโครนัส | | Q | \bar{Q} |
| | PS | CLR | CLK | D | | |
| 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 |

5.4 ฟลิปฟล็อปชนิดजेके (JK Flip-flop) ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางมากในงานดิจิทัล ฟลิปฟล็อปชนิดजेकेที่นิยมใช้คือ หมายเลข 7476 มีอินพุต 2 ชุด คือ

1. อินพุตซิงโครนัส ประกอบด้วยขา J K และ CLK
2. อินพุตอะซิงโครนัส ประกอบด้วยขา PS และขา CLR ทำงานเหมือนกับ PS และขา CLR ของฟลิปฟล็อปชนิดดี สัญลักษณ์และตารางความจริงแสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปजेके หมายเลข 7476 ดังแสดงในภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 แสดงสัญลักษณ์ของฟลิปฟล็อปเจเคหมายเลข (7476)

ตาราง 16 แสดงการทำงานของฟลิปฟล็อปเจเคหมายเลข (7476)

| รูปแบบการทำงาน | อินพุต | | | | | เอาต์พุต | |
|--------------------|-------------|-----|-----------|---|---|----------------|-----------|
| | อะซิงโครนัส | | ซิงโครนัส | | | Q | \bar{Q} |
| | PS | CLR | CLK | J | K | | |
| Asynchronous | 0 | 1 | X | X | X | 1 | 0 |
| Asynchronous reset | 1 | 0 | X | X | X | 0 | 1 |
| Prohibited | 0 | 0 | X | X | X | 1 | 1 |
| Hold | 1 | 1 | | 0 | 0 | ไม่เปลี่ยนแปลง | |
| Reset | 1 | 1 | | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Set | 1 | 1 | | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Toggle | 1 | 1 | | 1 | 1 | สภาวะตรงข้าม | |

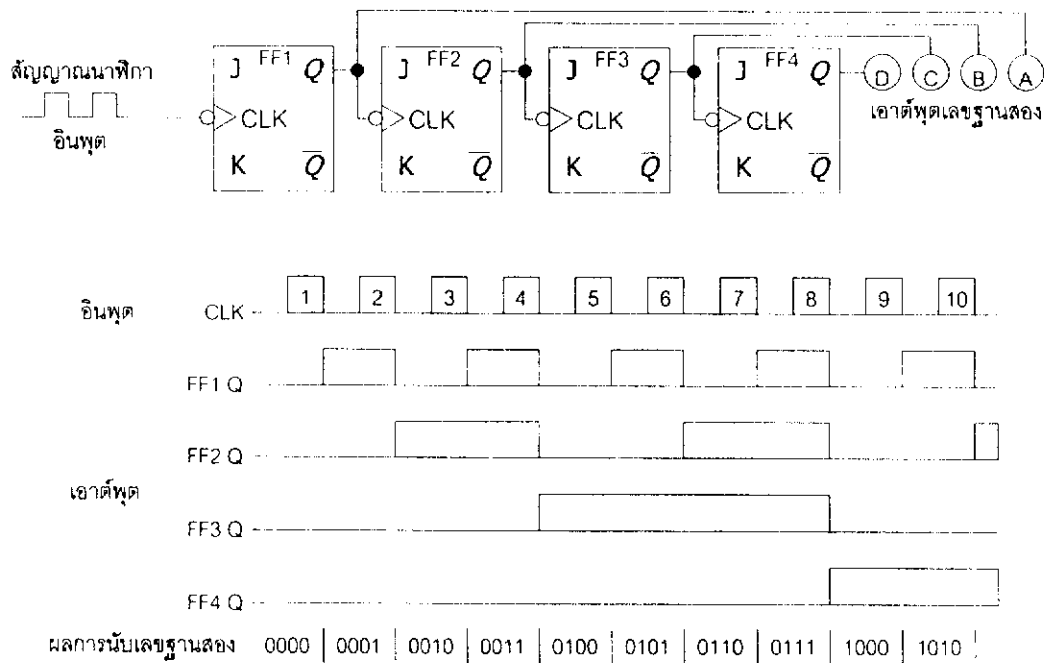
6. วงจรนับ

วงจรถับ (Counter Circuits) เป็นวงจรที่นำฟลิปฟล็อปมาใช้ประกอบในการทำหน้าที่นับจำนวนพัลส์ทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลมาจากเหตุการณ์หรือปรากฏการณ์ของสิ่งที่ต้องการนับจำนวน ผลลัพธ์ของการนับออกมาเป็นแบบดิจิทัล วงจรถับแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ วงจรถับแบบซิงโครนัส และวงจรถับแบบอะซิงโครนัส¹

¹จิระวัฒน์ ใจอ่อนนุ่ม; และ นภัทร วัจนเทพินทร์. (2541). วงจรดิจิทัล. หน้า 86-104.

6.1 วงจรนับแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous Counter)

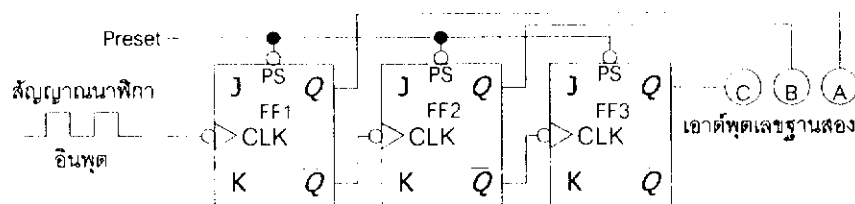
วงจรถับแบบอะซิงโครนัส เป็นวงจรถับที่ใช้ฟลิปฟล็อปชนิดเจเคต่ออนุกรมกัน สัญญาณที่จะทำการนับ จะเป็นพัลส์ไฟฟ้า โดยป้อนสัญญาณพัลส์เข้าที่ CLK ของฟลิปฟล็อปตัวแรก เอาต์พุตของฟลิปฟล็อปตัวแรกจะถูกป้อนเข้าที่ทางเข้า CLK ของฟลิปฟล็อปตัวที่สอง และทางออกตัวที่สองจะป้อนไปยังทางเข้าตัวต่อไป เป็นลำดับจนครบทุกตัว เอาต์พุตที่แสดงการนับเป็นเลขฐานสองคือสถานะที่ Q ของฟลิปฟล็อปทุกตัว โดย Q ของฟลิปฟล็อปตัวแรกเป็นบิตต่ำสุดของเลขฐานสอง



ภาพประกอบ 32 แสดงวงจรถับแบบอะซิงโครนัส 4 บิตแบบนับขึ้น และแผนภาพเวลาแสดงเอาต์พุตของฟลิปฟล็อปแต่ละตัว

จำนวนครั้งของการนับขึ้นขึ้นอยู่กับจำนวนตัวของฟลิปฟล็อป เช่น วงจรถับ 4 บิต จะใช้ฟลิปฟล็อป 4 ตัว นับได้จำนวน $2^4 = 16$ ครั้ง เป็นต้น ถ้าต่อ Q ของฟลิปฟล็อปตัวหน้าให้กับ CLK ของฟลิปฟล็อปตัวต่อไป จะเป็นวงจรถับขึ้น เช่น ต่อฟลิปฟล็อป 4 ตัวแบบนับขึ้น ดังภาพประกอบ 32 เรียกว่า วงจระอะซิงโครนัส 4 บิตแบบนับขึ้น (4 Bit Asynchronous Counter Count Up)

ถ้าทำการต่อวงจรใหม่โดยการนำ \bar{Q} ของฟลิปฟล็อปตัวหน้า ต่อเข้ากับ CLK ของฟลิปฟล็อปตัวต่อไปจนครบทุกตัว จะได้วงจระอะซิงโครนัสแบบนับลง เช่น ใช้ฟลิปฟล็อป 3 ตัวต่อวงจรถับแบบอะซิงโครนัสแบบนับลงขนาด 3 บิตได้ ดังภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 33 แสดงวงจรนับแบบอะซิงโครนัสนับลงขนาด 3 บิต

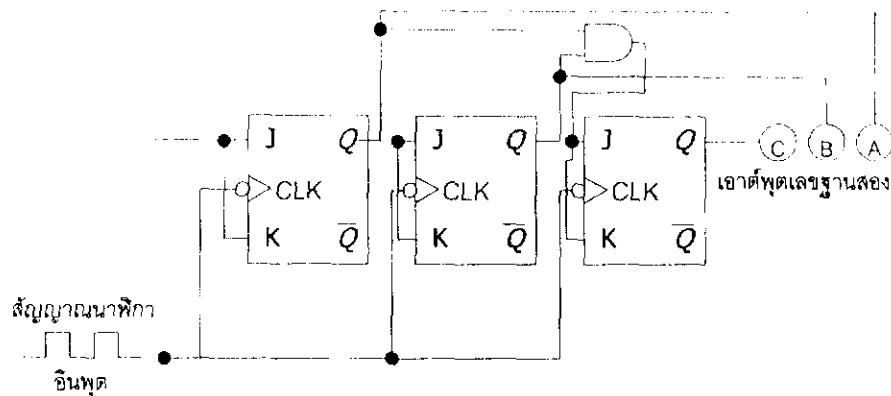
ตาราง 17 แสดงผลการนับของวงจรแบบอะซิงโครนัสนับลงขนาด 3 บิต

| ลำดับของสัญญาณนาฬิกา | ลำดับการนับเลขฐานสอง | | | ผลการนับเลขฐานสิบ |
|----------------------|----------------------|---|---|-------------------|
| | C | B | A | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 7 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 6 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 5 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 4 | 0 | 1 | 1 | 3 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| 6 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 7 |

6.2 วงจรนับแบบซิงโครนัส (Synchronous Counter)

วงจรนับแบบซิงโครนัส สร้างขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาในการออกแบบวงจรนับเลขฐานสองหลายๆ บิต ถ้าใช้วงจรนับแบบอะซิงโครนัสซึ่งเป็นวงจรที่นำฟลิปฟล็อปมาต่ออนุกรมกัน จะใช้เวลาในการทำงานสูงขึ้น ทำให้ระบบดิจิทัลทำงานช้าลง

วงจรนับแบบซิงโครนัสจะใช้ฟลิปฟล็อปต่อกับสัญญาณนาฬิกาเพื่อควบคุมการทำงานโดยต่อขนานกัน และจำนวนครั้งของการนับขึ้นอยู่กับจำนวนตัวของฟลิปฟล็อปคือ จำนวนครั้งของการนับเท่ากับ 2^n (เมื่อ n คือจำนวนตัวฟลิปฟล็อป) ดังภาพประกอบ 34

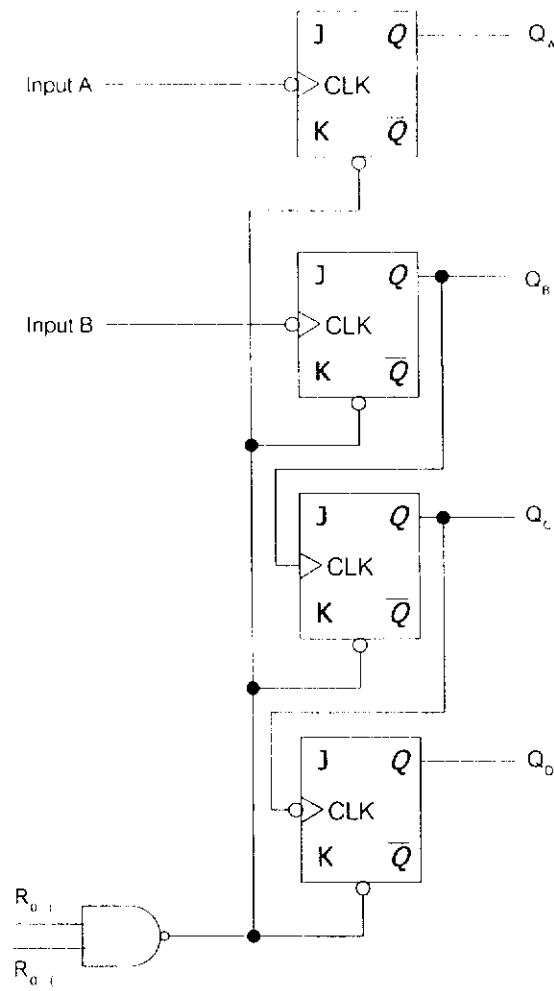


ภาพประกอบ 34 แสดงการต่อสัญญาณนาฬิกาให้กับวงจรนับ 3 บิตแบบซิงโครนัส

6.3 วงจรรวมนับเลขฐานสอง (IC Binary Counter)

วงจรรวมเลขฐานสองที่สร้างจากฟลิปฟล็อปชนิดजेके เมื่อนำมาใช้งานมักเกิดข้อผิดพลาด เช่น จากการต่อวงจร และจากการทำงานผิดพลาดของฟลิปฟล็อปแต่ละตัว จึงมีการสร้างวงจรรวมที่ทำหน้าที่นับเลขฐานสองขึ้นมาหลายแบบ เช่น หมายเลข 7492 เป็นวงจรรวม 12 (Divide-By-2 and Divide-By-6) หมายเลข 7490 เป็นวงจรรวม 10 (Decade Counter) หรือหมายเลข 7493 เป็นวงจรรวม 16 (Divide-By-2 and Divide-By-8) เป็นต้น เพื่อให้ผู้ออกแบบวงจรรวมเลขฐานสองนำไปใช้งานได้สะดวก และลดปัญหาเรื่องขนาดของวงจรที่อาจจะมีขนาดใหญ่และซับซ้อนมากให้ลดลงได้

วงจรรวมหมายเลข 7493 เป็นวงจรรวมเลขฐานสองขนาด 4 บิต โครงสร้างภายในประกอบด้วยฟลิปฟล็อปชนิดजेके 4 ตัว โดยตัวที่ 1 (A) เป็นวงจรรวม 2 และตัวที่ 2, 3, 4 (B, C, D) ต่อแบบอะซิงโครนัส เป็นวงจรรวม 8 โดยมีเกตเป็นตัวควบคุมการทำงาน ถ้าต่อ Q_A เข้ากับอินพุต B จะทำให้ 7493 สามารถนับ 16 (2×8) ได้อีกด้วย ดังตาราง 18 และภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 แสดงโครงสร้างภายในของวงจรรนับเลขฐานสองขนาด 4 บิต หมายเลข 7493

ตาราง 18 แสดงการทำงานของวงจรมีเลขฐานสองขนาด 4 บิต หมายเลข 7493

| Count | เอาต์พุต | | | |
|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Q _D | Q _C | Q _B | Q _A |
| 0 | L | L | L | L |
| 1 | L | L | L | H |
| 2 | L | L | H | L |
| 3 | L | L | H | H |
| 4 | L | H | L | L |
| 5 | L | H | L | H |
| 6 | L | H | H | L |
| 7 | L | H | H | H |
| 8 | H | L | L | L |
| 9 | H | L | L | H |
| 10 | H | L | H | L |
| 11 | H | L | H | H |
| 12 | H | H | L | L |
| 13 | H | H | L | H |
| 14 | H | H | H | L |
| 15 | H | H | H | H |

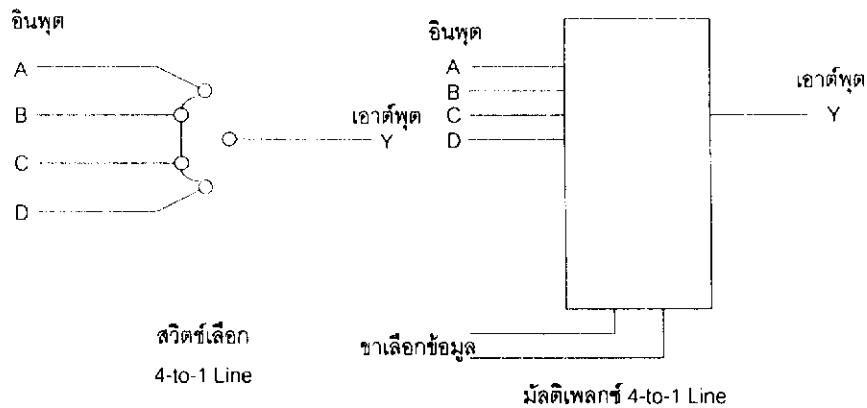
ตาราง 19 แสดงการรีเซต/นับ

| รีเซตอินพุต | | เอาต์พุต | | | |
|-------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| R ₀₍₁₎ | R ₀₍₂₎ | Q _D | Q _C | Q _B | Q _A |
| H | H | L | L | L | L |
| L | X | | | Count | |
| X | L | | | Count | |

การทำงานของ ผลการนับของวงจรมีแสดงในตาราง 19 โดยต้องกำหนดตรรกะที่ขาควบคุม คือ R₀₍₁₎ R₀₍₂₎ ให้ถูกต้องตามที่กำหนดไว้ในตารางรีเซต/นับ คือ ต้องให้ R₀₍₁₎ หรือ R₀₍₂₎ ขาใดขาหนึ่ง เป็น L วงจรมีหมายเลข 7493 จึงจะทำการนับเลขฐานสองได้

7. วงจรมัลติเพลกเซอร์ (Multiplexer)

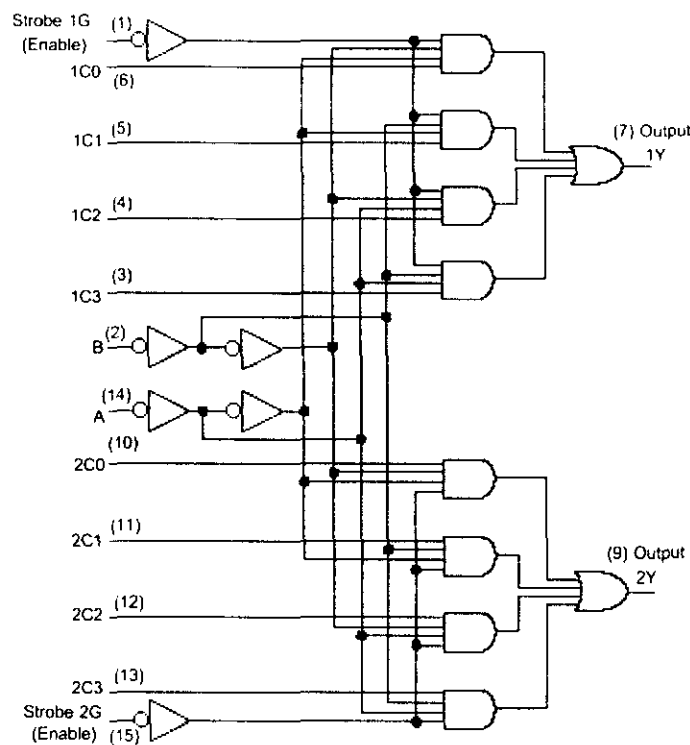
วงจรมัลติเพลกเซอร์หรือวงจรถูกเลือกข้อมูล (Data Selectors) ใช้ในกรณีที่มีข้อมูลดิจิทัลหลายชุด และต้องการเลือกบิตใดบิตหนึ่งมาใช้งาน โดยการใช้สัญญาณตรรกะเป็นตัวกำหนดลำดับการเลือกข้อมูล การทำงานของวงจรมัลติเพลกเซอร์คล้ายกับสวิตช์เลือก (Selector Switch)¹ ดังภาพประกอบ 36



ภาพประกอบ 36 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างสวิตช์เลือกกับวงจรมัลติเพลกเซอร์

¹จิระวัฒน์ ใจอ่อนนุ่ม; และ นภัทร วัจนเทพินทร์. (2541). วงจรดิจิทัล. หน้า 86-104.

วงจรรวมหมายเลข 74153 (Dual 4 to 1 Line Multiplexers) มีวงจรการทำงานและตารางแสดงการทำงานและการควบคุมดังภาพประกอบ 37



ภาพประกอบ 37 แสดงโครงสร้างภายในของวงจรรวมหมายเลข 74153

ตาราง 20 แสดงการควบคุมการทำงานของวงจรรวมหมายเลข 74153

| Select | Inputs | Data Inputs | | | | Strobe | Output |
|--------|--------|-------------|----|----|----|--------|--------|
| B | B | C0 | C1 | C2 | C3 | G | Y |
| X | X | X | X | X | X | H | L |
| L | L | L | X | X | X | L | L |
| L | L | H | X | X | X | L | H |
| L | L | X | X | X | X | L | L |
| L | L | X | X | X | X | L | H |
| H | H | X | L | L | X | L | L |
| H | H | X | H | H | X | L | H |
| H | H | X | X | X | L | L | L |
| H | H | X | X | X | H | L | H |

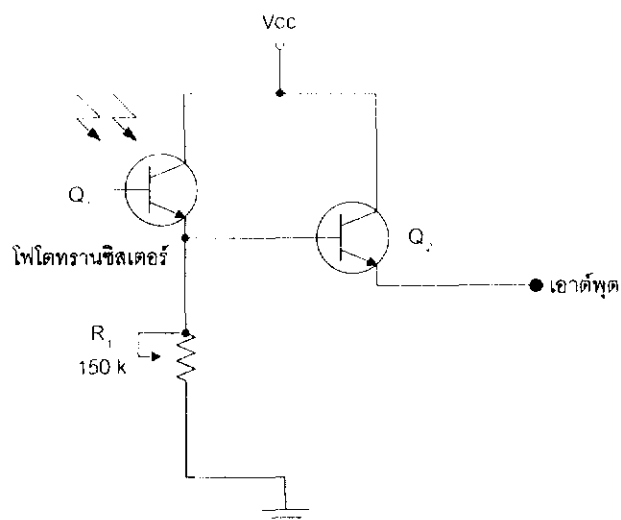
การทำงานของวงจรรวมหมายเลข 74153 ภายในมีวงจรมัลติเพลกเซอร์ 2 ชุด แต่ใช้ขาเลือก ข้อมูลร่วมกันคือขา A และ B ข้อมูลชุดที่ 1 ป้อนเข้าที่ 1C0 1C1 1C2 1C3 มีเอาต์พุตชุดที่ 1 ออกที่ 1Y และข้อมูลชุดที่ 2 ป้อนเข้าที่ 2C0 2C1 2C2 2C3 มีเอาต์พุตชุดที่ 2 ออกที่ 2 Y ชุดที่ 1 มีขาอีน่าเบิล (Enable) แยกจากชุดที่ 2 เราสามารถเลือกชุดใดชุดหนึ่งให้ทำงานเป็นขาเข้า 4 ออก 1 ได้ การทำงานอธิบายได้จากตาราง 20

8. โฟโตทรานซิสเตอร์ (Phototransistor)

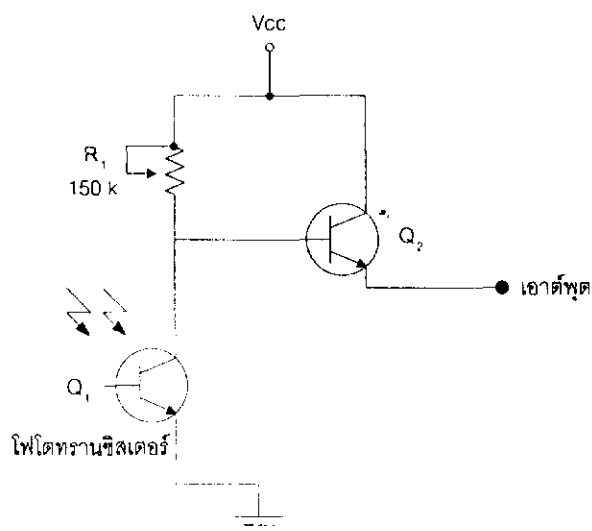
โฟโตทรานซิสเตอร์ เป็นอุปกรณ์รับรู้ (Sensor) ทางแสงชนิดหนึ่งที่ถูกออกแบบมาเป็นพิเศษ โดยพื้นที่ของขาเบส (B) จะมีขนาดใหญ่กว่าทรานซิสเตอร์ปกติทั่วไป และตัวที่ห่อหุ้มจะถูกทำให้มีช่องไว้สำหรับแสงส่องลงมา โดยปกติแล้วโฟโตทรานซิสเตอร์จะมีขาคอลเล็กเตอร์ (C) และขาอิมิตเตอร์ (E) โผล่ออกมา ช่องที่เปิดไว้ให้แสงเข้าถูกปิดด้วยแก้วหรือควอตซ์ (Quartz)¹

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

¹โกวิท ไชวสุวรรณ; และธีรวุฒิ หน่อคำ. (2546, ธันวาคม). เซนเซอร์และวงจรรใช้งาน. *Hobby Electronics*. 137 : หน้า 74-75.



ภาพประกอบ 38 ลักษณะการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์เมื่อมีแสง



ภาพประกอบ 39 ลักษณะการทำงานของโฟโตทรานซิสเตอร์เมื่อไม่มีแสง

วงจรในภาพประกอบ 38 ใช้โฟโตทรานซิสเตอร์ต่อเป็นวงจรตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแสง โฟโตทรานซิสเตอร์ (Q_1) จะอยู่ในลักษณะเปิดวงจร คือไม่นำกระแสในสภาวะที่ไม่มีแสง เมื่อ Q_1 ไม่ทำงาน ทรานซิสเตอร์ (Q_2) ก็จะไม่นำกระแส

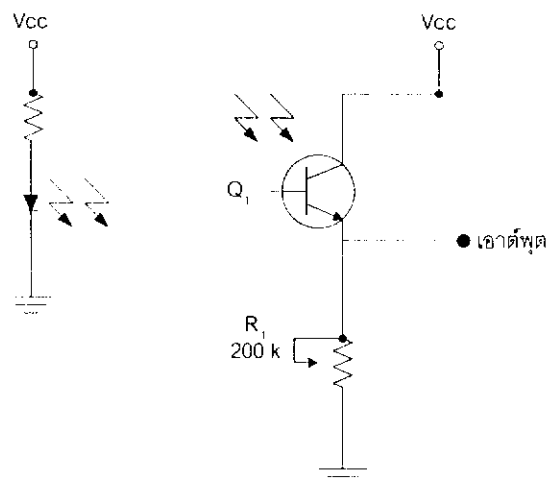
เมื่อมีแสงส่อง โฟโตทรานซิสเตอร์จะเริ่มนำกระแส ความต่างศักย์จะตกคร่อมตัวต้านทาน R_1 ซึ่งมีหน้าที่ปรับความไวในการรับแสง ความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R_1 นี้มากพอที่จะทำให้ ทรานซิสเตอร์ Q_2 นำกระแส การปรับแต่งค่าความต้านทาน R_1 จะเป็นการหาจุดที่ทรานซิสเตอร์ Q_2

ทำงาน ถ้าปรับค่านี้ให้มากขึ้น จะทำให้วงจรต้องการแสงเพียงเล็กน้อย Q_2 ก็สามารถทำงานได้แล้ว แต่ถ้าปรับค่า R_1 ให้น้อยลง วงจรจำเป็นต้องการแสงมากๆ Q_2 จึงทำงาน

ในกรณีที่ต้องการกลับการทำงานของวงจร จำเป็นต้องย้ายตำแหน่งของ Q_1 และ R_1 ดังภาพประกอบ 39 ในวงจรนี้ Q_1 จะไม่นำกระแสเมื่ออยู่ในที่มืดหรือไม่มีแสงทำให้มีความต่างศักย์ตกคร่อมส่งไปให้ Q_2 ทำงาน แต่เมื่อมีแสงส่องมาที่ตัวโฟโตทรานซิสเตอร์ ก็จะนำกระแส ยิ่งเมื่อมีแสงส่องมากเท่าใดก็จะทำให้ความต่างศักย์ตกคร่อม Q_1 น้อยลงเรื่อยๆ จนไม่สามารถทำให้ Q_2 นำกระแสต่อไปได้ การปรับแต่งค่า R_1 คือการปรับความไวแสงของวงจรเช่นเดียวกัน

9. แอลอีดีอินฟราเรด (Infrared LED)

แอลอีดีอินฟราเรดถูกออกแบบมาให้เปล่งเฉพาะอินฟราเรดเท่านั้นเอง ที่สำคัญอินฟราเรดนี้ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เมื่อแอลอีดีอินฟราเรดนี้ได้รับการไบแอส (Bias) ตรงอิเล็กตรอน (Electron) จะเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อสารกึ่งตัวนำภายในตัวไดโอด เป็นเหตุให้มันปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน (Photon) ปริมาณของพลังงานที่ปล่อยออกมาจากตัวแอลอีดีอินฟราเรดนั้น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน ความยาวคลื่นของแสงที่ปล่อยออกมานั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างแอลอีดี ถ้าเป็นชนิดแกเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) จะให้ความยาวคลื่น 940 นาโนเมตร แต่ถ้าทำมาจากแกเลียมอะลูมิเนียมอาร์เซไนด์ (GaAlAs) จะให้ความยาวคลื่น 880 นาโนเมตร¹



ภาพประกอบ 40 วงจรสมบรูณ์ของอินฟราเรดแบบพื้นฐานของตัวรับและตัวส่ง

¹โกวิท ไชวสุวรรณ; และธีรวุฒิ หน่อคำ. (2546, ธันวาคม). เซนเซอร์และวงจรใช้งาน. *Hobby Electronics*. 137 : หน้า 75-78.

ในภาพประกอบ 40 เป็นวงจรรับอินฟราเรดพื้นฐาน แอลอีดีอินฟราเรดเป็นตัวส่งและโฟโตทรานซิสเตอร์ชนิดอินฟราเรดเป็นตัวรับ ในส่วนของระบบการส่งนั้น อินฟราเรดจะพุ่งตรงไปข้างหน้า โดยแอลอีดีอินฟราเรดจะได้รับไบแอสตรง จึงส่งอินฟราเรดออกไปอย่างต่อเนื่อง กระแสที่ไหลผ่านแอลอีดีจะถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทาน R_1 ส่วนในการรับนั้นต่อวงจรในลักษณะได้รับแสงจึงจะทำงาน ซึ่งจะคล้ายกับวงจรในภาพประกอบ 38 แตกต่างกันเพียงแสงที่จะทำให้วงจรนี้ทำงานได้ต้องเป็นอินฟราเรดเท่านั้น หมายความว่าแสงอื่นๆ จะไม่มีผลต่อการทำงานของวงจรนี้ แต่อย่างไรก็ตามแสงทั่วไปก็ยังคงมีอินฟราเรดปะปนมาอยู่ด้วย ดังนั้นเพื่อการทำงานที่ดีขึ้น ควรนำแผ่นพลาสติกสีเข้ม เช่น สีแดง มาปิดไว้ที่ด้านหน้าของตัวรับ เมื่อมีอินฟราเรดจากตัวส่ง จะทำให้ Q_1 ในวงจรรับนำกระแส ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม R_1 ส่งผลให้ Q_2 นำกระแส โดยสามารถปรับความไวของวงจรได้ที่ค่าความต้านทาน R_1

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ. 2001 Gordon O. Johnson ได้ใช้เครื่องจักรแหวูด ในการทดลองเพื่อหาค่าความเร่งของแรงโน้มถ่วง (g) โดยได้นำค่าโมเมนต์ความเฉื่อย และความเสียดทานของรอกมาพิจารณาด้วย ในงานวิจัยได้แสดงผลของการทดลองในรูปของกราฟพร้อมทั้งนำผลไปเปรียบเทียบกับทางทฤษฎีและสามารถหาค่า g ได้ 9.81 เมตร/วินาที² แตกต่างจากค่าอ้างอิง 1.5 %

ปี ค.ศ. 2000 Ricardo Trumper and Moshe Gelbson ได้ทดลองเพื่อหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยและความเสียดทานของรอกจากการทดลองของเครื่องจักรแหวูด งานวิจัยได้แสดงผลการทดลองในรูปของกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาทางจอมอนิเตอร์ของคอมพิวเตอร์

ปี ค.ศ. 2000 R. O. Ocaya ได้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของลูกตุ้ม และใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยภาษาซี เป็นโปรแกรมสั่งงานสำหรับตรวจวัดการเคลื่อนที่ของระบบผ่านพอร์ตขนาน ในงานวิจัยได้แสดงผลของการทดลองในรูปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลากับระยะทาง ทางจอภาพของคอมพิวเตอร์

ปี ค.ศ. 1997 O. Romulo Ochoa และ N. Franklin Kolp ได้ศึกษาการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกของตัวแกว่งกวัด (Oscillator) โดยแยกการศึกษาออกเป็น 3 กรณี คือ ตัวแกว่งกวัดที่มีการแกว่งกวัดแบบฮาร์มอนิกที่มีการหน่วง ลูกตุ้มเดี่ยว ลูกตุ้มประกอบที่มีการหน่วง โดยในการวิจัยได้ออกแบบเมาส์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือตรวจวัดตำแหน่งของลูกตุ้ม แล้วคำนวณหาแอมพลิจูดออกมา พร้อมทั้งใช้โปรแกรมในการตรวจสอบเวลา และแสดงผลออกมาเป็นกราฟของการกระจัดกับเวลา

ปี ค.ศ. 1996 Joel T. Handler, O. Romulo Ochoa และ N. Franklin Kolp ได้ดัดแปลงเมาส์มาใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์ เพื่อเป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ของระบบที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก และแสดงผลการทดลองในรูปของกราฟทางจอมอนิเตอร์ของคอมพิวเตอร์ โดยใช้ภาษาปาสคาล

ปี ค.ศ. 1996 E. Bulur, S. O. Anilturk และ A. M. Ozer ได้ใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของลูกตุ้ม และใช้ภาษาปาสคาลเป็นโปรแกรมสั่งงานสำหรับตรวจวัดเวลาของระบบ โดยแสดงผลการทดลองในรูปของกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลาทางจอภาพของคอมพิวเตอร์

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

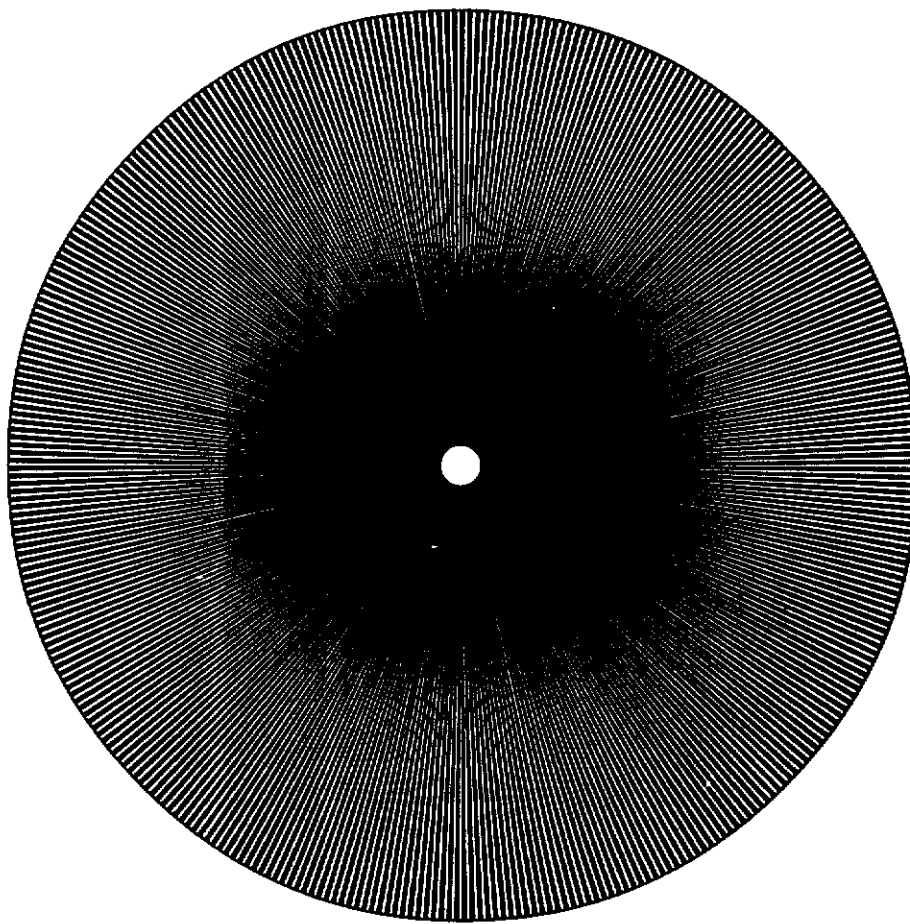
1. ออกแบบสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม
2. ทดสอบและปรับเทียบเครื่องมือวัด
3. หาสมบัติด้านความผิด ความเฉื่อยของเครื่องมือวัด และตรวจสอบความถูกต้อง

การออกแบบสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม

1. ขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม
2. ขั้นตอนการออกแบบวงจรการวัดการกระจัดเชิงมุม
3. ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเครื่องมือวัด

1. ขั้นตอนการออกแบบและสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม

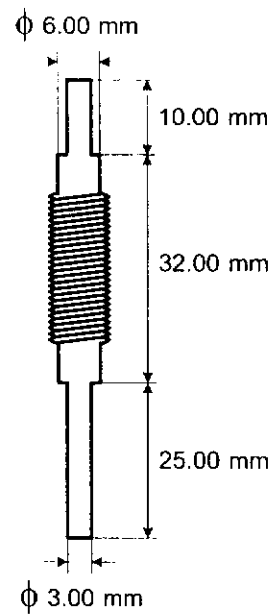
1.1 สร้างอุปกรณ์ตัดลำแสงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ พร้อมทั้งพิมพ์ลงบนแผ่นใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.00 cm โดยให้เส้นแต่ละเส้นที่ลากจากจุดศูนย์กลางไปยังเส้นรอบวงทำมุมระหว่างกัน 1 องศา จำนวน 360 เส้น ดังภาพประกอบ 41



ภาพประกอบ 41 แบบแผ่นใสวัดมุมด้วยการตัดลำแสง

- รูตรงกลาง
- 1.2 สร้างอุปกรณ์ประกบแผ่นใสจากแผ่นพลาสติก โดยตัดเป็นรูปวงกลมพร้อมทั้งเจาะรูตรงกลาง
 - 1.3 สร้างฐานรูปตัวแอลจากแผ่นพลาสติก เพื่อใช้สำหรับยึดตัวรับ-ส่งอินฟราเรด

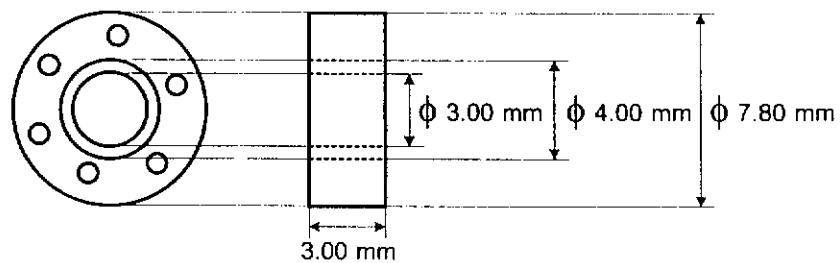
1.4 สร้างแกนหมุนจากแท่งทองเหลืองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.00 mm ดังภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 แบบแกนหมุนที่ทำขึ้นจากแท่งทองเหลือง

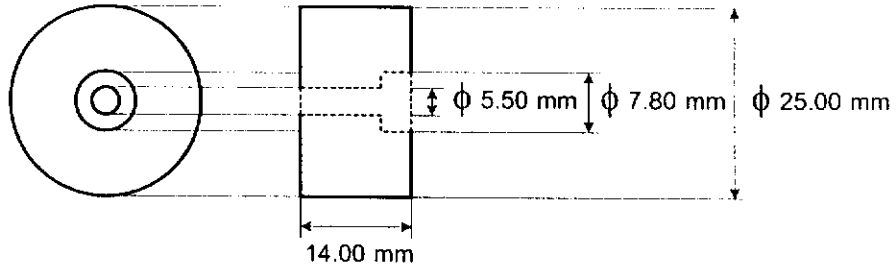
1.5 จัดหาแปรงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.00 mm หน้า 3.00 mm ดังภาพประกอบ

43



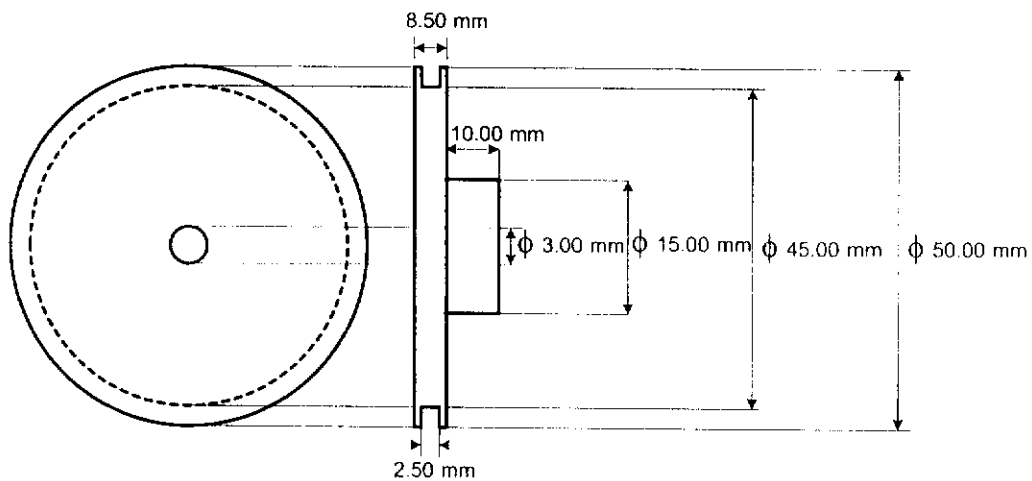
ภาพประกอบ 43 แบบแปรง

1.6 สร้างฐานสำหรับยึดแบริงจากแท่งพลาสติก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.80 mm
หนา 14.00 mm ดังภาพประกอบ 44



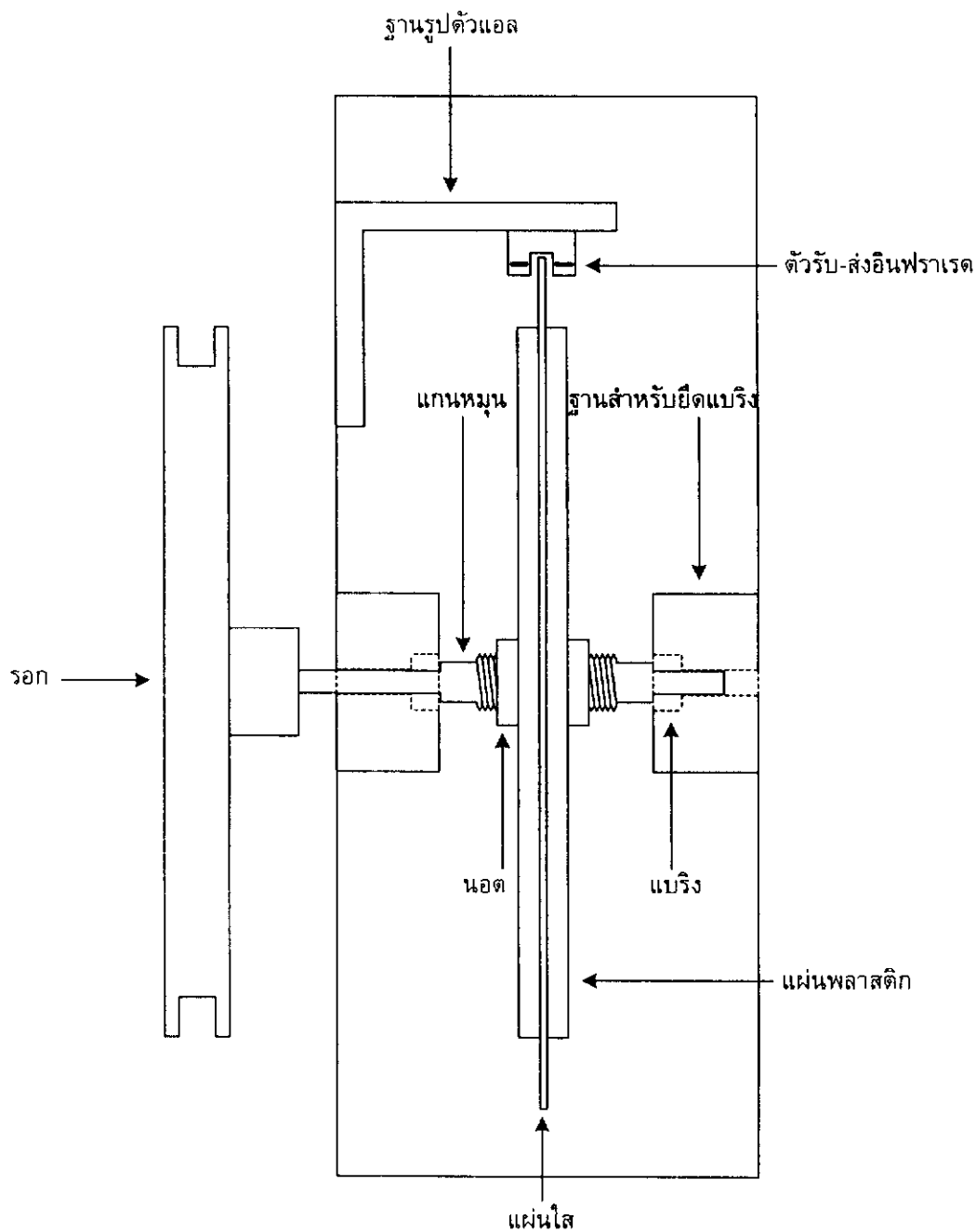
ภาพประกอบ 44 แบบฐานสำหรับยึดแบริงซึ่งทำจากแท่งพลาสติก

1.7 จัดหารอกพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.00 mm หนา 8.50 mm ดังภาพ
ประกอบ 45



ภาพประกอบ 45 แบบรอกพลาสติก

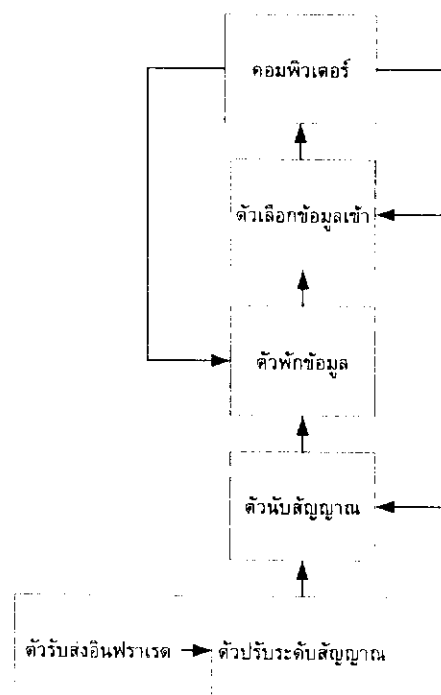
1.8 ติดตั้งอุปกรณ์การทดลองซึ่งบรรจุในกล่องพลาสติกขนาด $130 \times 192 \times 67 \text{ mm}^3$
 ดังภาพประกอบ 46



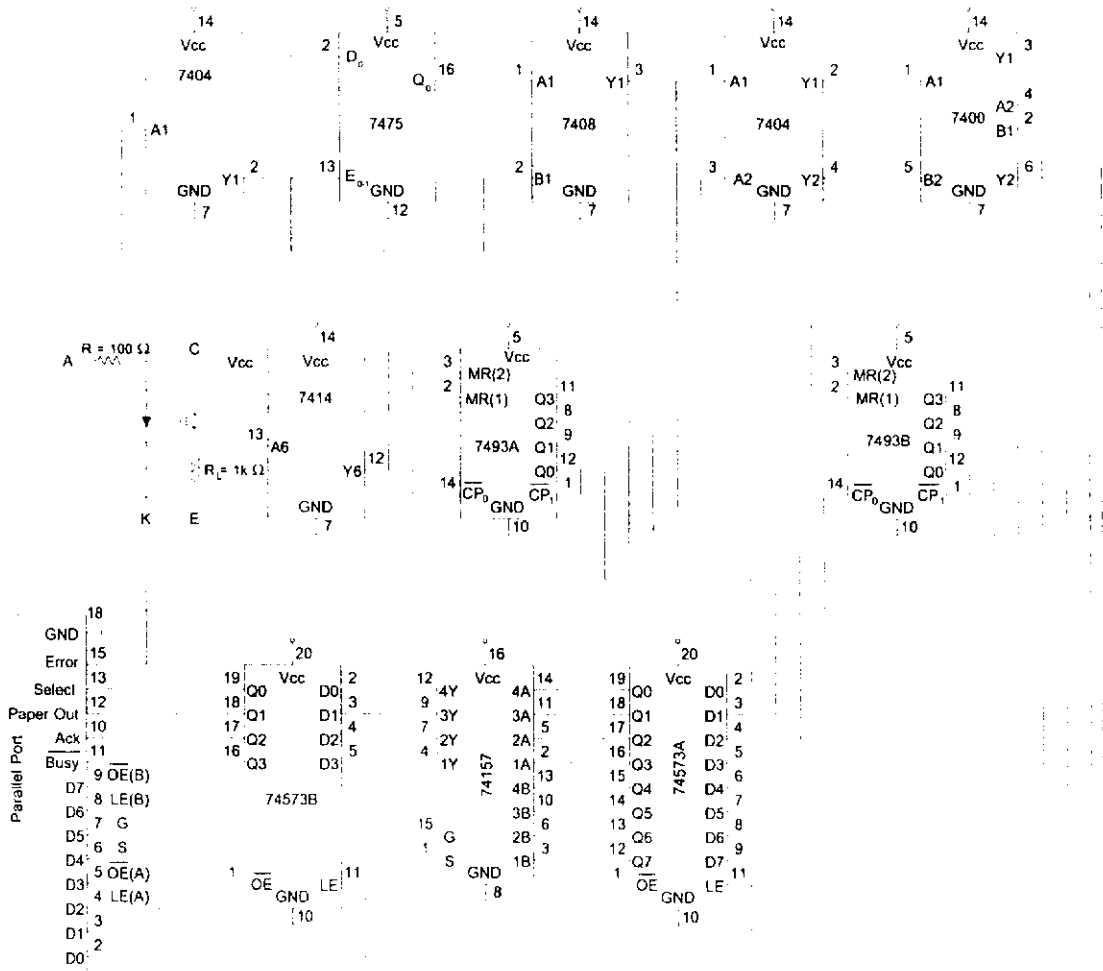
ภาพประกอบ 46 ส่วนประกอบเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน

2. ขั้นตอนการออกแบบวงจรการวัดการกระจัดเชิงมุม

การวัดการกระจัดเชิงมุม ได้ออกแบบให้มีแผนภาพแสดงการทำงานดังภาพประกอบ 47 การทำงานเริ่มจากเมื่อมีการหมุนแกนหมุน เส้นที่ขึงบนแผ่นใสจะหมุนตัดผ่านลำแสงอินฟราเรด เป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า คือเมื่อตัวรับอินฟราเรดได้รับอินฟราเรดจากตัวส่ง ศักย์ไฟฟ้าที่ทางออกของตัวรับจะมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ แต่เมื่อตัวรับส่งอินฟราเรดถูกบัง จะทำให้ความต่างศักย์นี้มีค่าประมาณ 3-4 โวลต์ ซึ่งสัญญาณไฟฟ้จะถูกส่งไปยังวงจรของระบบวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนดังภาพประกอบ 42 เพื่อปรับให้มีขนาดและรูปสัญญาณที่เหมาะสมกับวงจรประมวลผลทางดิจิทัลด้วยวงจรมิตต์ทริกเกอร์ซึ่งประกอบด้วยวงจรรวมหมายเลข 7414 จากนั้นจึงไปผ่านตัวนับสัญญาณซึ่งประกอบด้วยวงจรรวม 7493 จำนวน 2 ตัวที่นับได้ 8 บิต เพื่อนับจำนวนครั้งของการตัดลำแสงอินฟราเรดว่ามีจำนวนเท่าใด ค่าที่นับได้ซึ่งเป็นสัญญาณข้อมูลดิจิทัลจะถูกส่งผ่านไปตัวพักข้อมูลที่ควบคุมการเข้าออกของสัญญาณด้วยคอมพิวเตอร้ ซึ่งประกอบด้วยวงจรรวมหมายเลข 74573 เพื่อรอการส่งผ่านข้อมูล สัญญาณนี้จะถูกส่งต่อไปยังวงจรเลือกข้อมูลที่ประกอบด้วยวงจรรวมหมายเลข 74157 ซึ่งมีอินพุต 8 สายสัญญาณ และเอาต์พุต 4 สายสัญญาณ โดยส่งข้อมูลทีละ 4 บิต ไปยังพอร์ตขนานที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร้เพื่อประมวลและแสดงผลทางจอภาพ โดยคอมพิวเตอร้จะทำหน้าที่ควบคุมการนับ การควบคุมการเข้าออกของสัญญาณ และการเลือกข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร้



ภาพประกอบ 47 แผนภาพการทำงานของเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น



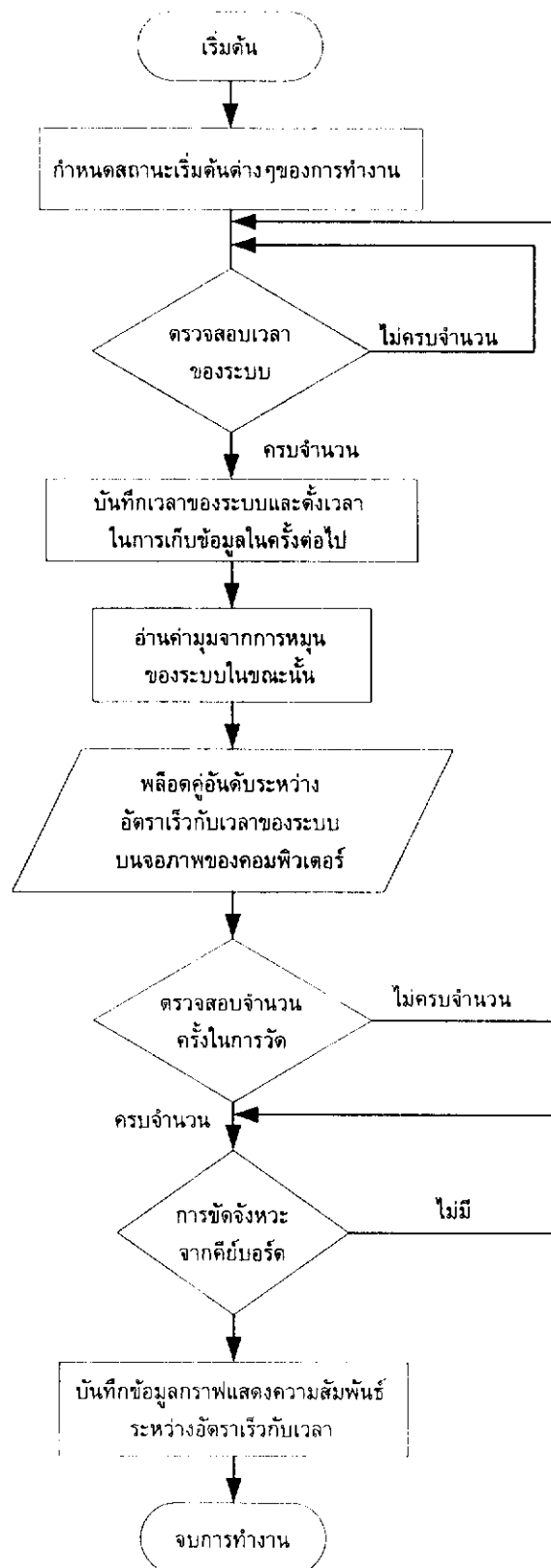
ภาพประกอบ 48 แสดงวงจรของระบบจัดการเคลื่อนที่แบบหมุน

3. ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเครื่องมือวัดงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ภาษาซี ซึ่งเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกอย่างพอร์ตขนานได้ นำมาเขียนโปรแกรมคำสั่งในการตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยโปรแกรมจะวัดการกระจัดเชิงมุมที่เวลาต่างๆ และสามารถนำค่าการกระจัดเชิงมุม ไปคำนวณหาอัตราเร็วเชิงมุม อัตราเร็วเชิงเส้น อัตราเร่งเชิงเส้น และระยะทางเชิงเส้น โดยรายละเอียดของโปรแกรมจะรวมส่วนที่เป็นการควบคุมการทำงานการรับส่งข้อมูลทางพอร์ตขนาน การเก็บข้อมูล และการแสดงผลของการวัดในรูปของกราฟทางจอภาพคอมพิวเตอร์ เอาไว้ในโปรแกรมเดียวกัน

ลักษณะการแสดงผลของการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน สามารถทำได้โดยใช้คอมพิวเตอร์เก็บข้อมูล หลังจากนั้นนำข้อมูลไปแสดงผลในรูปของกราฟ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา อัตราเร็วเชิงมุมกับเวลา ระยะทางเชิงเส้นกับเวลา และอัตราเร็วเชิงเส้นกับเวลา โดยผลของข้อมูลที่บันทึกได้จะนำไปวิเคราะห์ การเคลื่อนที่แบบหมุน เปรียบเทียบกับทฤษฎี ทำให้ทราบสมบัติด้านความผิด และโมเมนต์ความเฉื่อยของรอกหรือเครื่องมือวัด

สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำสั่ง แสดงไว้ในแผนผังการทำงาน (Flow Chart) ดังต่อไปนี้

โปรแกรมแสดงผลการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา



การทดสอบและเปรียบเทียบเครื่องมือวัด

1. การทดสอบเครื่องมือวัด
2. การเปรียบเทียบเครื่องมือวัด

1. การทดสอบเครื่องมือวัด

1.1 นำรอกติดบนแกนของเครื่องมือวัด ขับเคลื่อนให้รอกหมุนด้วยความถี่ในการหมุนคงที่โดยมอเตอร์ ตรวจสอบจำนวนนับต่อวินาทีที่ได้จากการเก็บข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ เทียบกับเครื่องนับความถี่ โดยทำการทดลองที่รอบการหมุนในช่วง 1 Hz ถึง 5 Hz

1.2 จากผลที่ได้ถ้ามีความผิดพลาดก็จะวิเคราะห์หาสาเหตุและทำการแก้ไขจนค่าที่ได้มีความถูกต้องตรงกันหรือต่างกันไม่มากกว่าร้อยละ 1

2. การเปรียบเทียบเครื่องมือวัด

2.1 เปรียบเทียบเครื่องมือเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ โดยแขวนมวลกับรอกซึ่งติดบนแกนของเครื่องมือวัด

2.2 วัดมุมที่รอกเคลื่อนที่ได้ด้วยระยะทาง 0.245 เมตร จำนวน 10 ครั้ง จากคอมพิวเตอร์

2.3 คำนวณระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ต่อมุมที่เปลี่ยนไปหนึ่งองศา

การหาสมบัติด้านความถี่ ความเฉื่อยของเครื่องมือวัด และตรวจสอบความถูกต้อง

1. การหาความถี่และความเฉื่อยของเครื่องมือ
2. การตรวจสอบความถูกต้อง

1. การหาความถี่และความเฉื่อยของเครื่องมือ

ทำการศึกษาสมบัติจำเพาะได้แก่ ความถี่ ความเฉื่อยของเครื่องมือและรอก ด้วยการหาค่า m_f , m_0 จากการทดลองเครื่องจักรแอกทูด โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

1.1 หาค่าของ m_f

1.1.1 แขนมวล m_1 และมวล m_2 กับรอกด้วยเชือก ดังภาพประกอบ 9 โดยให้มวล $m_2 + m_1$ คงที่ และความแตกต่างของมวลทั้งสองเป็น 10 กรัม หรือที่เพียงพอในการทำให้เครื่องจักรแอกทูดเริ่มเคลื่อนที่ โดยในการทดลองนี้จะเริ่มจากมวล 0.39552 kg

1.1.2 ปล่อยมวล m_1 จะพบว่ามวลทั้งสองเคลื่อนที่ ซึ่งจะให้ได้ค่าอัตราเร่งของระบบจากการประมวลผลด้วยโปรแกรม ทำการทดลองซ้ำจนครบ 10 ครั้ง พร้อมทั้งหาอัตราเร่งเฉลี่ย

1.1.3 เปลี่ยนความแตกต่างของมวล m_1 กับมวล m_2 อีก 9 ค่า โดยให้ m_2+m_1 คงเดิม และทำการทดลองเช่นเดียวกับในข้อ 1.1.2

1.1.4 นำอัตราเร่งเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละการทดลอง ไปลงจุดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง m_2-m_1 กับ a โดยให้ความแตกต่างของมวลทั้งสอง m_2-m_1 อยู่บนแกน y และอัตราเร่ง (a) อยู่บนแกน x ซึ่งจะได้จุดตัดบนแกน y และค่าความชันของเส้นกราฟ โดยที่จุดตัดเป็นค่าของ m_1 ตามสมการ (28)

1.1.5 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1.1.1, 1.1.2, 1.1.3 และ 1.1.4 แต่เปลี่ยนผลรวมของมวล m_2+m_1 เป็น 0.35552, 0.31552, 0.27552 และ 0.23552 ตามลำดับ

1.2 หาค่าของ m_p

1.2.1. นำความชันที่ได้จากการทดลอง 1.1.5 ไปลงจุดกราฟระหว่าง m_2+m_1 กับ S ซึ่งกำหนดตามสมการ (29) โดยให้ m_2+m_1 อยู่บนแกน y และ S อยู่บนแกน x

1.2.2. หาสมการเส้นตรงของกราฟ ซึ่งจะให้จุดตัดบนแกน y เป็นค่าของ m_p ตามสมการ (30)

2. การตรวจสอบความถูกต้อง

ทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของการทดลอง ด้วยการเปรียบเทียบค่าสนามความโน้มถ่วง (g) ที่ได้จากข้อมูลกับค่าสนามความโน้มถ่วงที่สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติทำการวัด ดังนี้

2.1 หาค่าสนามความโน้มถ่วง g จากค่าความชันของกราฟการทดลอง 1.2

2.2 เปรียบเทียบค่า g ที่ได้เทียบกับการทดลองของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

เครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนได้รับการออกแบบและสร้าง ตามขั้นตอนต่างๆ ดังนี้ คือ

1. ออกแบบสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม
2. ทดสอบและปรับเทียบเครื่องมือวัด
3. หาสมบัติด้านความผิด ความเฉื่อยของเครื่องมือวัด และตรวจสอบความถูกต้อง

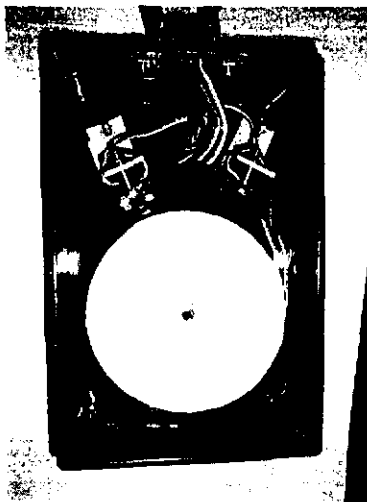
ผลการออกแบบสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม

ผลการออกแบบสร้างแบ่งออกเป็น 3 ตอนดังนี้

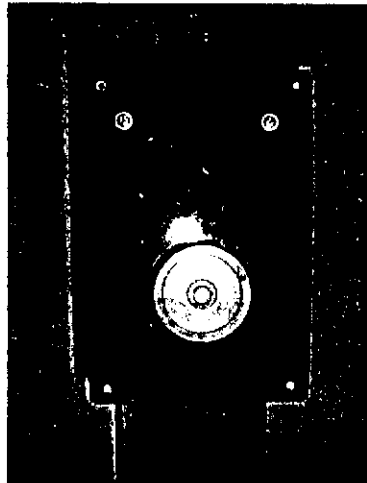
1. ผลการออกแบบและสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม
2. ผลการออกแบบวงจรการวัดการกระจัดเชิงมุม
3. ผลการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเครื่องมือวัด

1. ผลการออกแบบและสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุม

ในการออกแบบสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ได้ทำการสร้างตามแบบภาพประกอบ 46 ได้เครื่องมือดังภาพประกอบ 49 และ 50



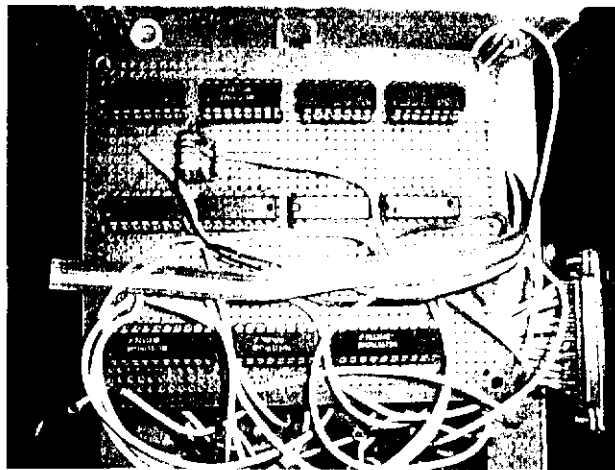
ภาพประกอบ 49 แสดงส่วนประกอบเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน



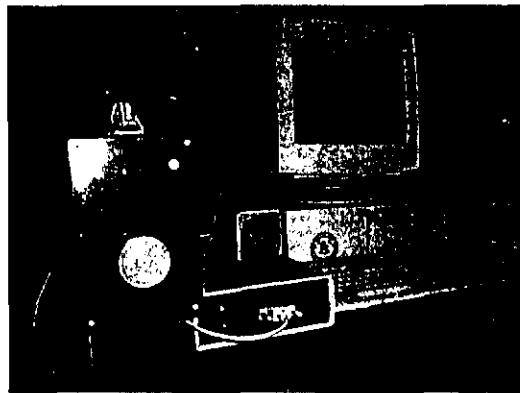
ภาพประกอบ 50 แสดงส่วนประกอบเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนเมื่อประกอบเสร็จ

2. ผลการออกแบบวงจรการวัดการกระจัดเชิงมุม

ในการออกแบบสร้างวงจรการวัดการกระจัดเชิงมุม ได้ทำการสร้างตามแบบภาพประกอบ 48 ได้เครื่องมือดังภาพประกอบ 51 และ 52



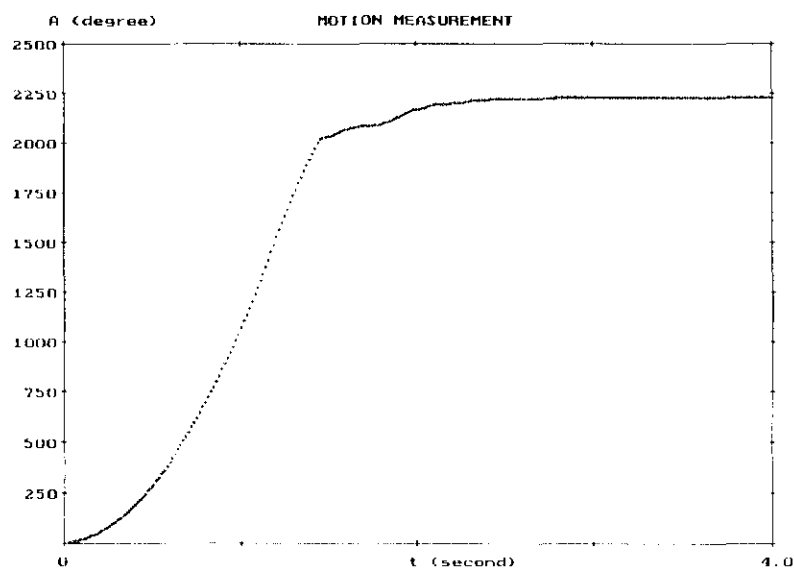
ภาพประกอบ 51 แสดงวงจรของระบบวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน



ภาพประกอบ 52 แสดงการติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนเมื่อประกอบเสร็จ

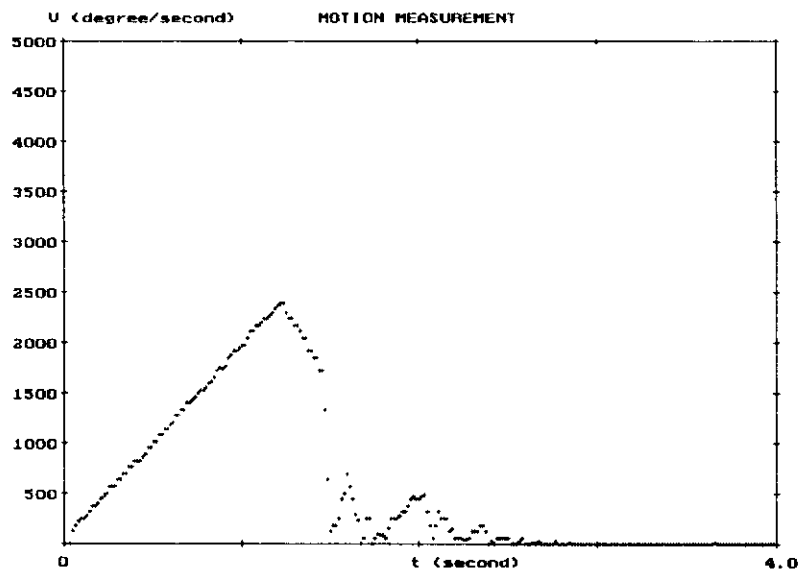
3. ผลการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเครื่องมือวัด

ในการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเครื่องมือวัด ได้ทำการเขียนโปรแกรมตามแบบแผนผังการทำงานในบทที่ 3 และทดลองวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเครื่องจักรแอกทูต ได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา อัตราเร็วเชิงมุมกับเวลา ระยะทางกับเวลา และอัตราเร็วกับเวลา ดังภาพประกอบ 53 54 55 และ 56 ตามลำดับ และแสดงผลที่ได้บันทึกไว้ดังภาพประกอบ 57



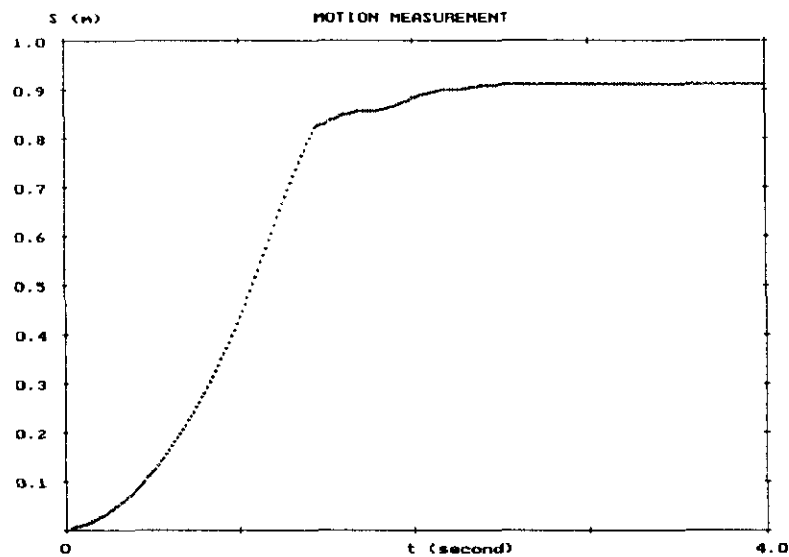
ภาพประกอบ 53 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลาของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูต

จากภาพประกอบ 53 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงสัมพันธ์ระหว่างมุมกับเวลา ของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอทวูด โดยเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งและจะคงที่ในที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัตถุมีการเคลื่อนที่ได้การกระจัดเชิงมุมเพิ่มขึ้น จนกระทั่งไม่มีการเพิ่มขึ้นของการกระจัดเชิงมุมเมื่อวัตถุที่แขวนอยู่นรอกตกถึงพื้นฟองน้ำพอดี



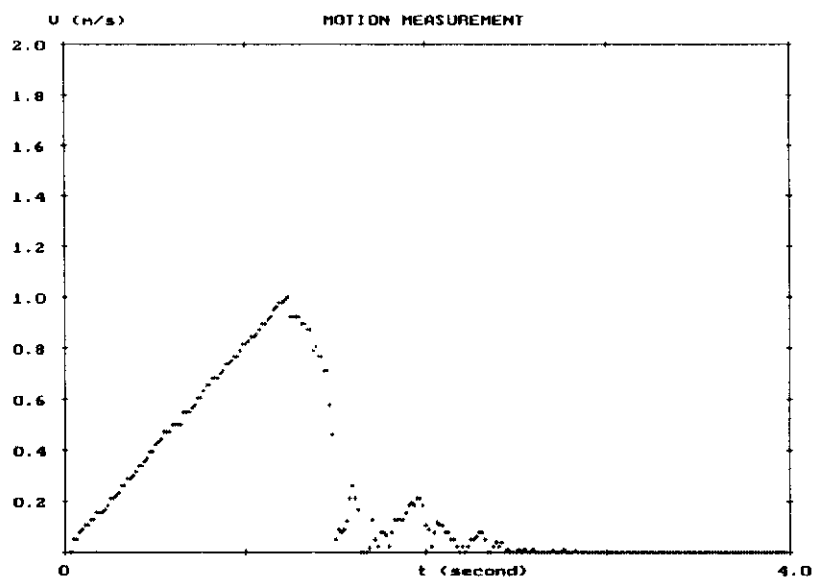
ภาพประกอบ 54 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมกับเวลาของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอทวูด

จากภาพประกอบ 54 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุม ของวัตถุกับเวลาของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอทวูด โดยเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วเชิงมุมของวัตถุกับเวลา มีลักษณะเป็นเส้นตรง จนเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง อัตราเร็วเชิงมุมจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์ในที่สุด ซึ่งการลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากวัตถุตกกระทบพื้นฟองน้ำ ลักษณะกราฟขณะตกลงบนฟองน้ำจะมีทั้งอัตราเร็วเชิงมุมเพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากฟองน้ำที่นำมารองรับมีความยืดหยุ่น และพยายามต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุจนหยุดนิ่ง สำหรับการวิจัยนี้ จะพิจารณาเฉพาะช่วงกราฟที่เป็นเชิงเส้นจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดที่วัตถุตกถึงพื้นฟองน้ำ



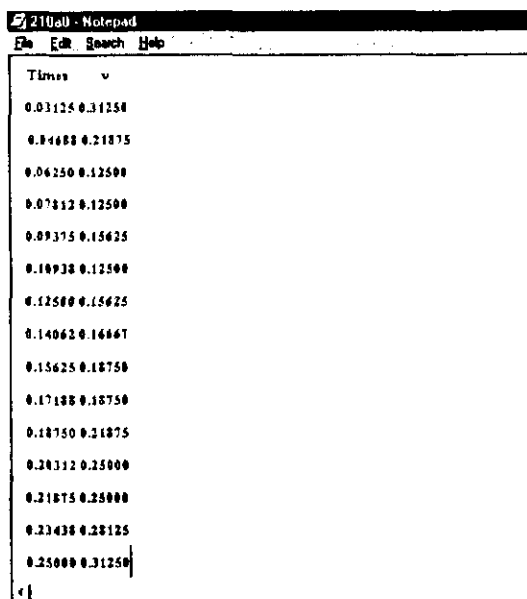
ภาพประกอบ 55 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา ของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูต

จากภาพประกอบ 55 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับเวลา ของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูต โดยเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งและจะคงที่ในที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัตถุมีการเคลื่อนที่ได้ระยะทางเพิ่มขึ้น จนกระทั่งไม่มีการเพิ่มขึ้นของระยะทางเมื่อวัตถุที่แขวนอยู่บนรอกตกถึงพื้นฟองน้ำพอดี



ภาพประกอบ 56 ตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูต

จากภาพประกอบ 56 เป็นตัวอย่างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของวัตถุกับเวลา ของผลการทดลองวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูต โดยเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของวัตถุกับเวลา มีลักษณะเป็นเส้นตรง จนเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นถึงจุดหนึ่ง อัตราเร็วจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเป็นศูนย์ในที่สุด ซึ่งการลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลมาจากวัตถุตกกระทบพื้นพองน้ำ ลักษณะกราฟขณะตกลงบนพองน้ำจะมีทั้งอัตราเร็วเพิ่มขึ้นและลดลง เนื่องจากพองน้ำที่นำมารองรับมีความยืดหยุ่น และพยายามต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุจนหยุดนิ่ง สำหรับการวิจัยนี้ จะพิจารณาเฉพาะช่วงกราฟที่เป็นเชิงเส้นจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดที่วัตถุตกถึงพื้นพองน้ำ



```

Times
0.03125 0.31250
0.04688 0.21875
0.06250 0.12500
0.07812 0.12500
0.09375 0.15625
0.10938 0.12500
0.12500 0.15625
0.14062 0.14447
0.15625 0.18750
0.17188 0.18750
0.18750 0.21875
0.20312 0.25000
0.21875 0.25000
0.23438 0.28125
0.25000 0.31250

```

ภาพประกอบ 57 ตัวอย่างผลการทดลองจากการบันทึกผลด้วยคอมพิวเตอร์

ผลทดสอบและเปรียบเทียบเครื่องมือวัด

ขั้นตอนนี้เป็น การทดสอบและเปรียบเทียบเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน มีผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ตอนดังนี้

1. ผลการทดสอบเครื่องมือวัด
2. ผลการเปรียบเทียบเครื่องมือวัด

1. ผลการทดสอบเครื่องมือวัด

ขั้นตอนการทดสอบทำได้โดยนำรอกติดบนแกนของเครื่องมือวัด ขับเคลื่อนให้รอกหมุนด้วยความถี่ในการหมุนคงที่โดยมอเตอร์ ตรวจสอบจำนวนนับต่อวินาทีที่ได้จากการเก็บข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เทียบกับเครื่องนับความถี่ โดยทำการทดลองที่รอบการหมุนในช่วง 1 Hz ถึง 5 Hz มีผลการวิจัยดังตาราง 21

ตาราง 21 แสดงการเปรียบเทียบค่ามุมจากเครื่องคอมพิวเตอร์กับเครื่องนับความถี่ ที่ความถี่ต่างๆ

| เครื่องมือ ที่ใช้ในการวัด | ค่ามุมที่อ่านได้ (องศา) | | | | | | | | | | ค่า เฉลี่ย (องศา) | แตก ต่าง (%) | ความ ถี่ (Hz) |
|------------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | | |
| เครื่องนับความถี่ | 433 | 374 | 397 | 396 | 396 | 400 | 411 | 412 | 422 | 419 | 406.0 | 0.10 | 1.13 |
| คอมพิวเตอร์ | 432 | 373 | 397 | 396 | 395 | 400 | 411 | 412 | 422 | 418 | 405.6 | | 1.13 |
| เครื่องนับความถี่ | 760 | 749 | 750 | 748 | 744 | 738 | 739 | 732 | 725 | 729 | 741.4 | 0.11 | 2.06 |
| คอมพิวเตอร์ | 759 | 749 | 749 | 747 | 743 | 737 | 739 | 731 | 724 | 728 | 740.6 | | 2.06 |
| เครื่องนับความถี่ | 1096 | 1093 | 1091 | 1085 | 1080 | 1078 | 1079 | 1072 | 1079 | 1088 | 1084.1 | 0.03 | 3.01 |
| คอมพิวเตอร์ | 1096 | 1093 | 1091 | 1084 | 1080 | 1078 | 1078 | 1072 | 1078 | 1088 | 1083.8 | | 3.01 |
| เครื่องนับความถี่ | 1444 | 1455 | 1462 | 1490 | 1472 | 1465 | 1460 | 1496 | 1499 | 1484 | 1472.7 | 0.09 | 4.09 |
| คอมพิวเตอร์ | 1434 | 1454 | 1462 | 1490 | 1472 | 1465 | 1459 | 1496 | 1499 | 1483 | 1471.4 | | 4.09 |
| เครื่องนับความถี่ | 1882 | 1877 | 1894 | 1900 | 1894 | 1858 | 1848 | 1853 | 1863 | 1826 | 1869.5 | 0.01 | 5.19 |
| คอมพิวเตอร์ | 1882 | 1877 | 1893 | 1900 | 1893 | 1858 | 1848 | 1853 | 1863 | 1826 | 1869.3 | | 5.19 |

ผลการวัดความถูกต้องในการวัดมุมที่ได้ ปรากฏว่าค่ามุมที่ได้จากโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับมุมที่อ่านได้จากเครื่องนับความถี่ โดยค่ามุมที่วัดได้จากโปรแกรมมีค่าต่างจากเครื่องนับความถี่มากที่สุดเท่ากับ 0.8 องศา และมีค่าแตกต่างอยู่ระหว่าง 0.01 - 0.11 %

2. ผลการเปรียบเทียบเครื่องมือวัด

ขั้นตอนการเปรียบเทียบทำได้โดยแขวนมวลกับรอกซึ่งติดบนแกนของเครื่องมือวัด แล้ววัดระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ได้เทียบกับมุมที่แสดงผลจากคอมพิวเตอร์ มีผลการวิจัยดังแสดงในตาราง 22

ตาราง 22 แสดงมุมที่รอกหมุนไปเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ได้เป็นระยะ 0.245 เมตร

| ครั้งที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | เฉลี่ย | เมตร/ องศา |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------|-----------------------|
| มุม (องศา) | 593 | 593 | 593 | 594 | 592 | 593 | 593 | 593 | 593 | 593 | 593 | 4.13×10^{-4} |

ผลการเปรียบเทียบเครื่องมือวัดระหว่างระยะทางกับมุม พบว่าเมื่อวัดระยะทางทุกๆ 0.245 เมตร รอกจะหมุนไปเป็นมุมเฉลี่ย 593 องศา ผลที่ได้นี้ให้ค่าระยะทางต่อองศาเท่ากับ 4.13×10^{-4} เมตร/องศา ซึ่งจะได้นำไปใช้ในโปรแกรมคำนวณการเคลื่อนที่ต่อไป

ผลการหาสมบัติด้านความผิด ความเฉื่อยของเครื่องมือวัด และตรวจสอบความถูกต้อง

นำเครื่องมือวัดที่ทดสอบแล้วในข้อ 1 ไปวัดการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรแอกทูตตามลำดับขั้นการทดลอง ได้ผลการวัดแสดงผลในรูปแบบกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา การวิเคราะห์เพื่อหาอัตราเร่งจากข้อมูลอัตราเร็วได้แสดงในตาราง 23 24 25 26 และ 27 มีผลการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ตอนดังนี้

1. ผลการหาสมบัติด้านความผิด ความเฉื่อยของเครื่องมือวัด
2. ผลการตรวจสอบความถูกต้อง

ตาราง 23 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอกทูด กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.39552$ kg

| ครั้งที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| มวล m_2-m_1 (kg) | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.025 | 0.030 | 0.035 | 0.040 | 0.045 | 0.050 | 0.060 |
| อัตราเร่ง (m/s^2) | 0.170 | 0.282 | 0.374 | 0.485 | 0.575 | 0.683 | 0.777 | 0.876 | 0.978 | 1.176 |

ตาราง 24 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอกทูด กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.35552$ kg

| ครั้งที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| มวล m_2-m_1 (kg) | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.025 | 0.030 | 0.035 | 0.040 | 0.045 | 0.050 | 0.060 |
| อัตราเร่ง (m/s^2) | 0.190 | 0.318 | 0.409 | 0.528 | 0.630 | 0.747 | 0.847 | 0.965 | 1.065 | 1.286 |

ตาราง 25 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอกทูด กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.31552$ kg

| ครั้งที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| มวล m_2-m_1 (kg) | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.025 | 0.030 | 0.035 | 0.040 | 0.045 | 0.050 | 0.060 |
| อัตราเร่ง (m/s^2) | 0.217 | 0.358 | 0.453 | 0.589 | 0.698 | 0.838 | 0.937 | 1.070 | 1.170 | 1.426 |

ตาราง 26 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอกทูเอต กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.27552$ kg

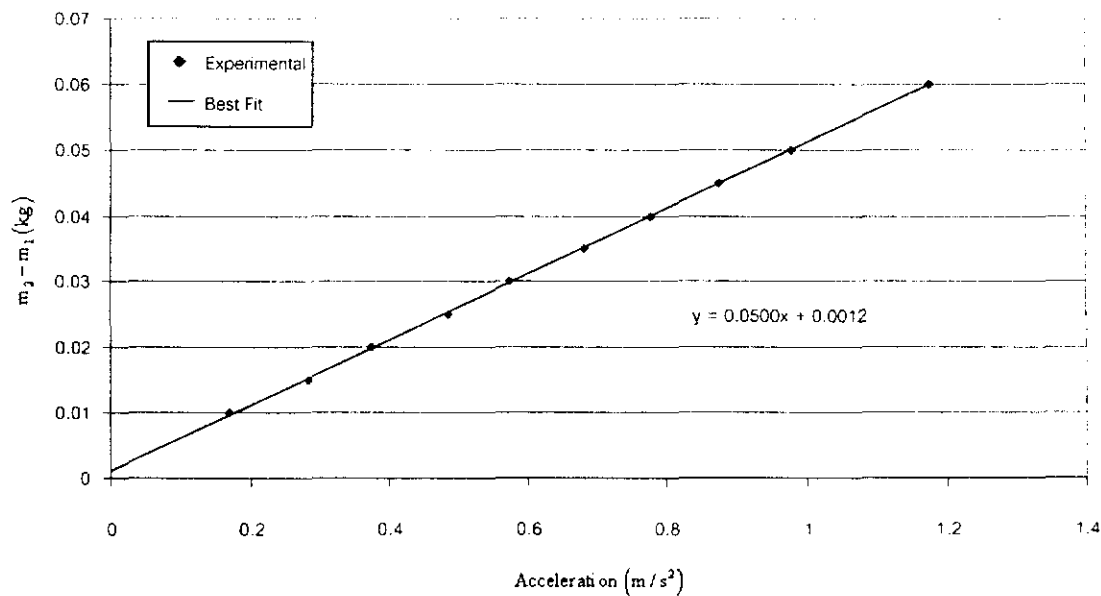
| ครั้งที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| มวล m_2+m_1 (kg) | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.025 | 0.030 | 0.035 | 0.040 | 0.045 | 0.050 | 0.060 |
| อัตราเร่ง (m/s^2) | 0.259 | 0.404 | 0.526 | 0.664 | 0.796 | 0.921 | 1.058 | 1.194 | 1.312 | 1.592 |

ตาราง 27 แสดงผลการทดลองหาค่าอัตราเร่งของเครื่องจักรแอกทูเอต กรณีมวล $m_2+m_1 = 0.23552$ kg

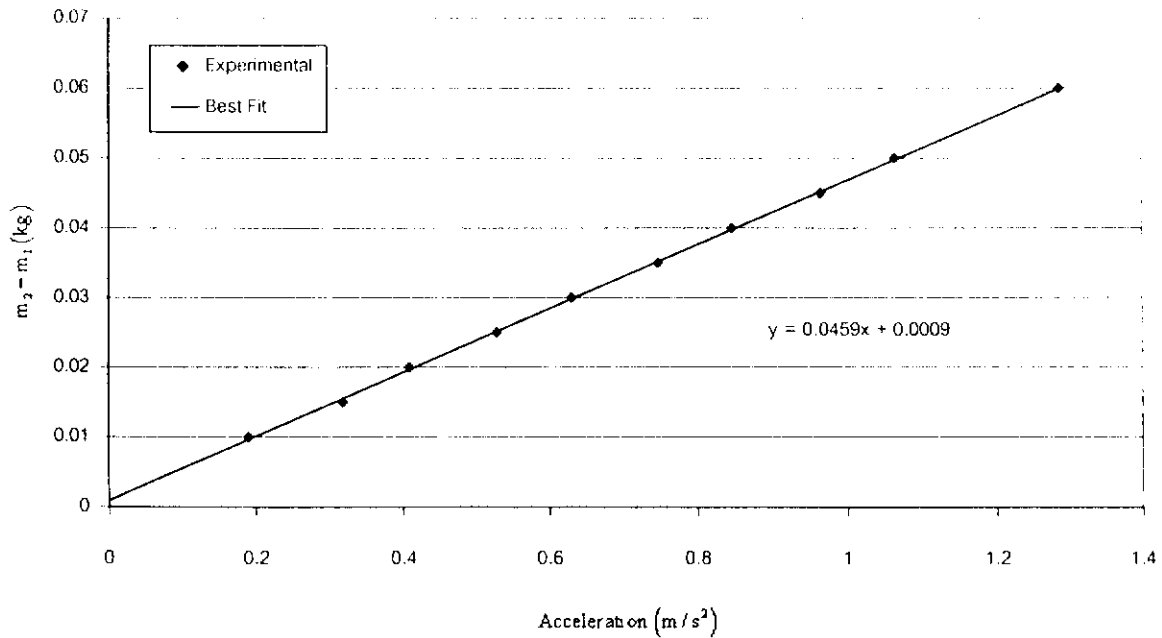
| ครั้งที่ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| มวล m_2+m_1 (kg) | 0.010 | 0.015 | 0.020 | 0.025 | 0.030 | 0.035 | 0.040 | 0.045 | 0.050 | 0.060 |
| อัตราเร่ง (m/s^2) | 0.293 | 0.463 | 0.589 | 0.747 | 0.899 | 1.047 | 1.193 | 1.336 | 1.475 | 1.804 |

1. ผลการหาความผิดและความเอนของเครื่องมือวัด

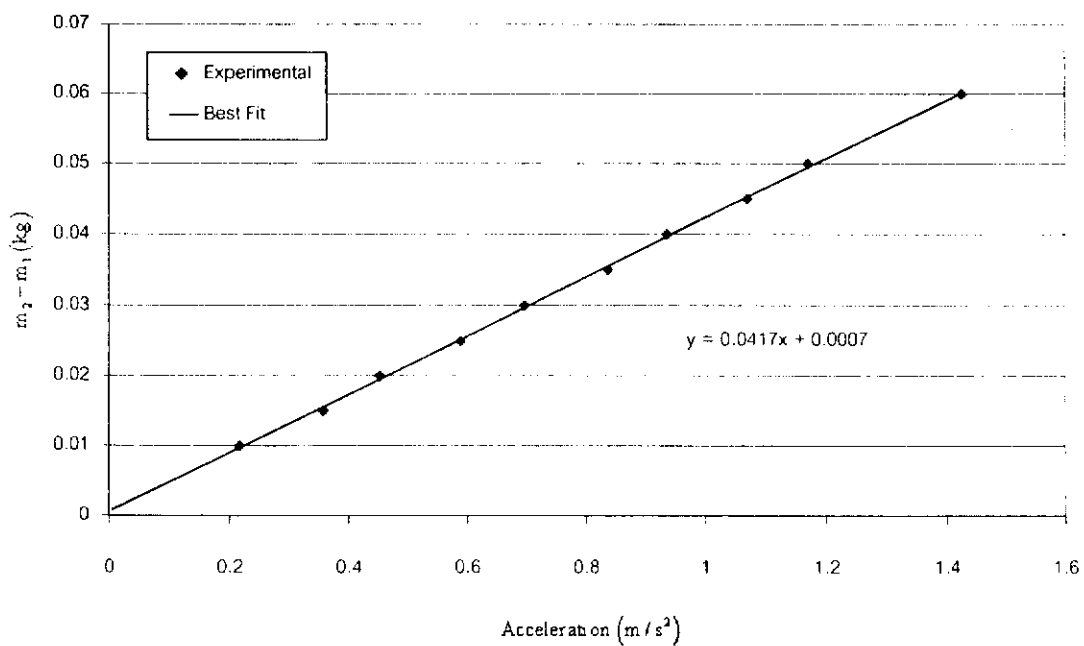
หลังจากได้ค่าอัตราเร่งของแต่ละการทดลองดังตาราง 23 24 25 26 และ 27 แล้ว นำค่าอัตราเร่งที่ได้ไปลงจุดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวล ($m_2 - m_1$) กับอัตราเร่ง ของแต่ละการทดลองเพื่อหาค่าความชัน (S) ของกราฟ และคำนวณยังผลของความเสียหาย (m_f) ของแต่ละการทดลอง ดังภาพประกอบ 58 59 60 61 และ 62 ตามลำดับ



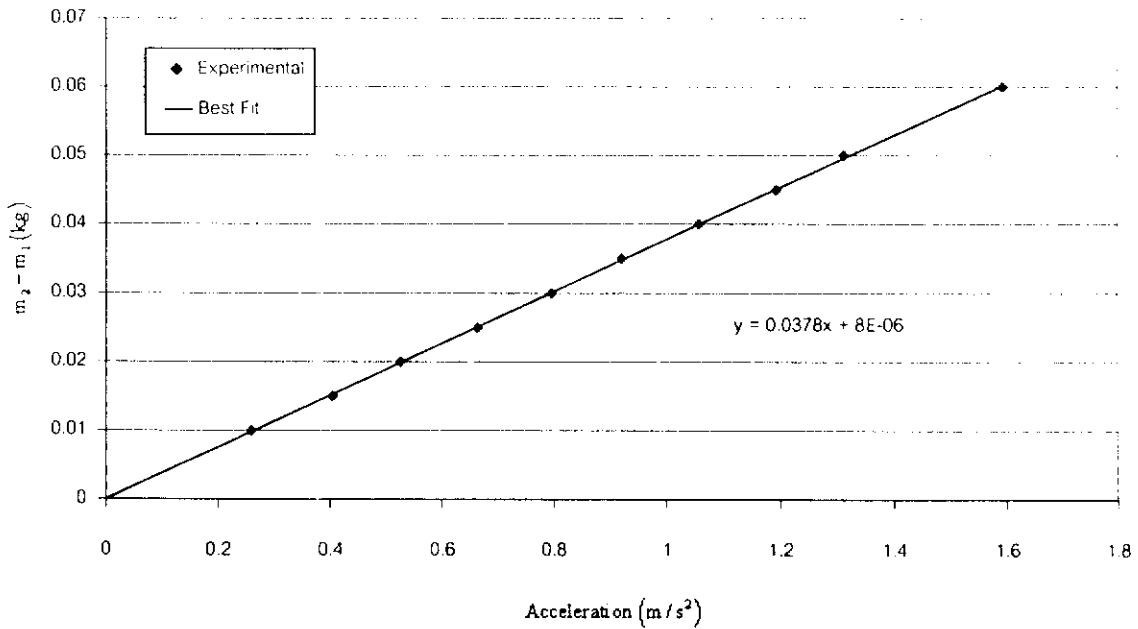
ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่องจักรแอกทูต ในกรณีมวล $m_2 + m_1 = 0.39552$ kg โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = 0.0500 $kg \cdot s^2 / m$ และกราฟตัดแกน y (m_f) = 0.0012 ± 0.0002 kg



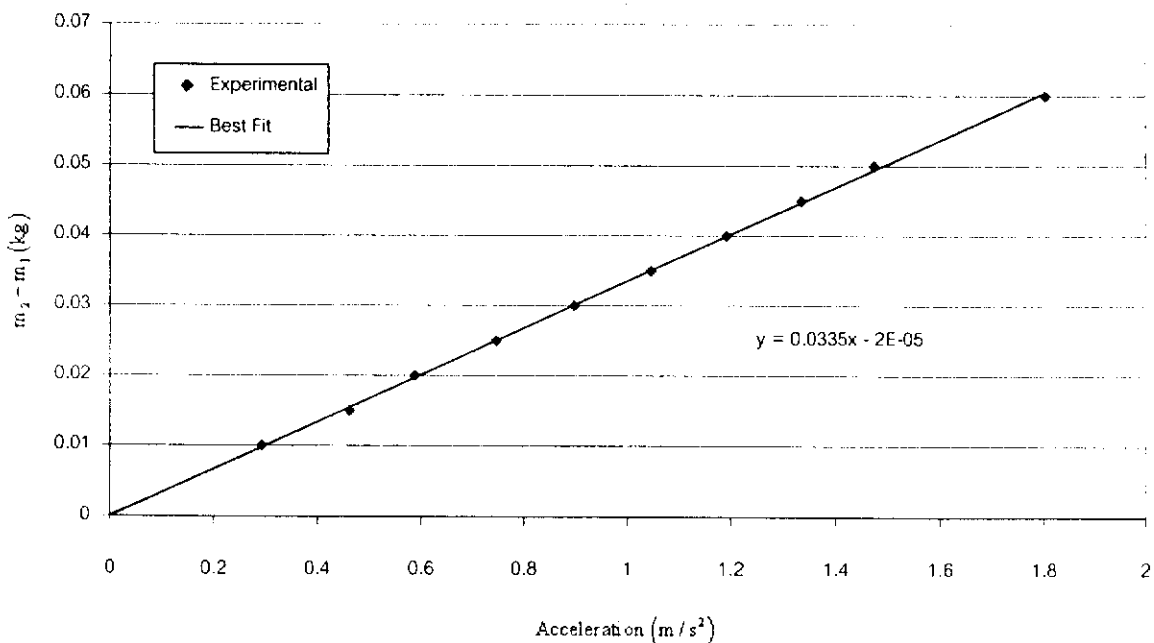
ภาพประกอบ 59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่องจักรแกทวูด ในกรณีมวล $m_2 + m_1 = 0.35552 \text{ kg}$ โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = 0.0459 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}/\text{m}$ และกราฟตัดแกน y (m_f) = $0.0009 \pm 0.0002 \text{ kg}$



ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่องจักรแกทวูด ในกรณีมวล $m_2 + m_1 = 0.31552 \text{ kg}$ โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = 0.0417 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}/\text{m}$ และกราฟตัดแกน y (m_f) = $0.0007 \pm 0.0003 \text{ kg}$



ภาพประกอบ 61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่องจักรแกว่ง ในกรณีมวล $m_2 + m_1 = 0.27552 \text{ kg}$ โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = 0.0378 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}/\text{m}$ และกราฟตัดแกน y (m_f) = $8 \times 10^{-6} \pm 0.0002 \text{ kg}$



ภาพประกอบ 62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของมวลและอัตราเร่งของเครื่องจักรแกว่ง ในกรณีมวล $m_2 + m_1 = 0.23552 \text{ kg}$ โดยมีค่าความชันของกราฟ (S) = 0.0335 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}/\text{m}$ และกราฟตัดแกน y (m_f) = $-2 \times 10^{-5} \pm 0.0003 \text{ kg}$

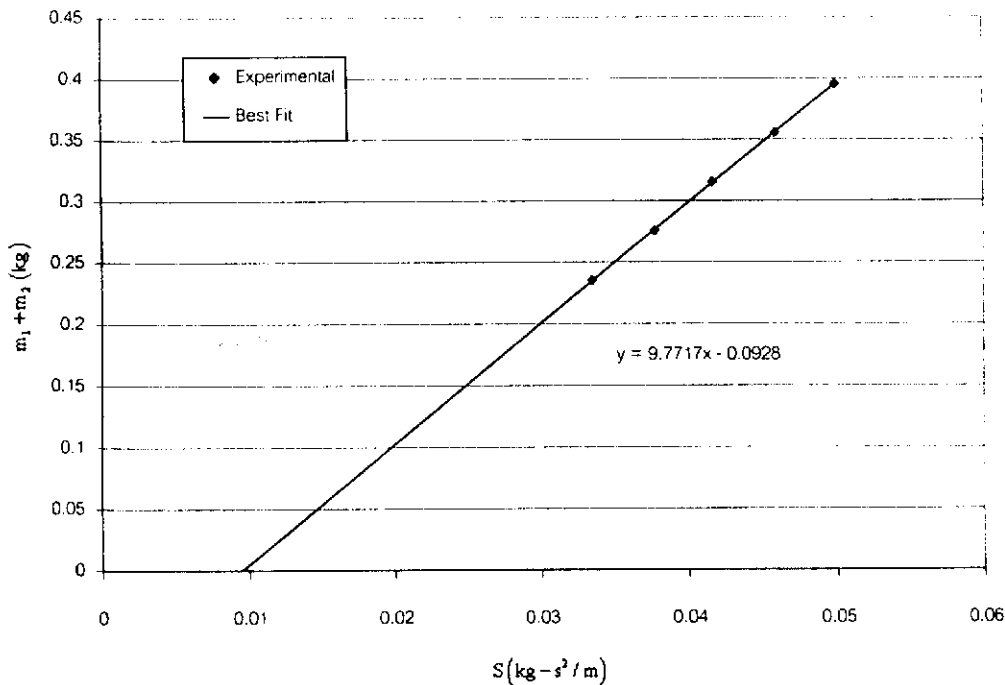
จากกราฟทั้ง 5 เราจะได้กราฟเส้นตรงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างมวลกับอัตราเร่ง ในกรณีของมวลรวม 0.39552 kg, 0.35552 kg, 0.31552 kg, 0.27552 kg, 0.23552 kg โดยมีสมการเส้นตรงเป็น $y = 0.0500x + 0.0012$, $y = 0.0459x + 0.0009$, $y = 0.0417x + 0.0007$, $y = 0.0378x + 8 \times 10^{-6}$, $y = 0.0335x - 2 \times 10^{-5}$ ซึ่งมีค่ามวลยังผลของความเสียหาย (m_f) เป็น 0.0012 kg, 0.0009 kg, 0.0007 kg, 8×10^{-6} kg, -2×10^{-5} kg และจากสมการพบว่า ในกรณีมวลรวมเป็น 0.39552 kg, 0.35552 kg, 0.31552 kg ค่ามวลยังผลของความเสียหายจะมีค่าลดลงตามลำดับขึ้นอยู่กับมวลรวมที่แขวนอยู่นอก และในกรณีมวลรวมเป็น 0.27552 kg และ 0.23552 kg จะมีค่ามวลยังผลของความเสียหายน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าความไม่แน่นอนจากการวัด ดังนั้นค่ามวลยังผลของความเสียหายของทั้ง 2 กรณีนี้อาจประมาณว่ามีค่าเท่ากับ 0.0000 ± 0.0002 kg และ 0.0000 ± 0.0003 kg ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองหาค่ามวลยังผลของความเสียหายและค่าความชันสามารถสรุปได้ดังตาราง 28

ตาราง 28 แสดงผลการทดลองหาค่ามวลยังผลของความเสียหายและค่าความชัน

| มวลรวม (m_2+m_1) (kg) | มวลยังผลของความเสียหาย (m_f) (kg) | ค่าความชัน (S) (kg-s ² /m) |
|------------------------------|--|--|
| 0.39552 | 0.0012 ± 0.0002 | 0.0500 |
| 0.35552 | 0.0009 ± 0.0002 | 0.0459 |
| 0.31552 | 0.0007 ± 0.0003 | 0.0417 |
| 0.27552 | 0.0000 ± 0.0002 | 0.0378 |
| 0.23552 | 0.0000 ± 0.0003 | 0.0335 |

2. ผลการตรวจสอบความถูกต้อง

เมื่อได้ค่าความชัน (S) ของแต่ละการทดลองของเครื่องจักรแอกทูวูดตั้งตาราง 28 แล้ว นำค่าที่ได้ไปลงจุดกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมวลผลรวม (m_2+m_1) กับความชันของแต่ละการทดลองเพื่อหาค่า g ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังภาพประกอบ 63



ภาพประกอบ 63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของมวล m_2+m_1 และ S ของเครื่องจักรแอกทูวูด ซึ่งมีค่าความชันของกราฟ (g) = $9.77 \pm 0.07 \text{ m/s}^2$ และกราฟตัดแกน y (m_p) = $0.0928 \pm 0.003 \text{ kg}$

จากภาพประกอบ 63 จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลรวมของมวล m_2+m_1 และ S ของเครื่องจักรแอกทูวูดเป็นสมการเส้นตรงเป็น $y = 9.7717x - 0.0928$ ซึ่งมีค่ามวลยังผลของรอก (m_p) เป็น $0.093 \pm 0.003 \text{ kg}$ และกราฟมีค่าความชัน (g) เท่ากับ $9.77 \pm 0.07 \text{ m/s}^2$ ซึ่งก็คือค่าสนามความโน้มถ่วงของโลก ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (30) และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับสถาบันมาตรฐานวิทยาศาสตร์ซึ่งวัดค่า g ได้ 9.78 m/s^2 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ศึกษาการออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนดังนี้

1. ผู้วิจัยออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ประกอบด้วยรอกที่หมุนได้คล้องยึดติดกับแกนหมุนการขับเคลื่อนรอกให้หมุนจะเกิดสัญญาณพัลส์ส่งไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านทางวงจรนับจำนวนพัลส์ เพื่อเก็บบันทึกข้อมูลและใช้ประมวลผลการเคลื่อนที่ จำนวนพัลส์ที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับมุมที่รอกหมุนไป ซึ่งสัญญาณนี้จะเกิดขึ้นทุกครั้งที่รอกหมุนไป 1 องศา โดยพัลส์จะเกิดขึ้นเมื่อมีการหมุนรอก ทำให้แผ่นไมกอลที่มีลายพิมพ์เป็นเส้นที่ไปตามแนวรัศมีจำนวน 360 เส้น ซึ่งติดอยู่กับแกนหมุนหมุนตามไปด้วย โดยแผ่นใสนี้จะหมุนติดกับลำแสงอินฟราเรดของอุปกรณ์รับส่งอินฟราเรด ทำให้เกิดพัลส์ขึ้น

2. การเขียนโปรแกรม ได้ใช้ภาษา C ในการเขียนโปรแกรมสำหรับเก็บตำแหน่งของมุมที่หมุนไปของแกนหมุน โดยโปรแกรมจะทำการจับเวลาและส่งสัญญาณไปยังพรินเตอร์พอร์ต เพื่อทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 1/64 วินาที โดยช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงที่มีความแตกต่างของข้อมูลระหว่างการเก็บแต่ละครั้ง ซึ่งข้อมูลที่ได้อาจจะถูกจัดเก็บเป็นไฟล์ข้อมูลคู่อันดับมุมกับเวลา สำหรับใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่

3. วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนที่ออกแบบขึ้น จะประกอบด้วยวงจรนับพัลส์และสัญญาณควบคุมสำหรับสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ วงจรนี้จะนับพัลส์ที่เกิดจากการหมุนรอก และส่งพัลส์ที่นับได้ผ่านไปยังพรินเตอร์พอร์ต เมื่อคอมพิวเตอร์ส่งสัญญาณให้วงจรถ่ายทอดข้อมูลไปยังพอร์ตได้

4. การทดลองใช้เครื่องมือวัดการเคลื่อนที่นี้กับเครื่องจักรแอกทูต เครื่องมือสามารถแสดงผลการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเครื่องจักรแอกทูตในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะการเคลื่อนที่ของวัตถุกับเวลา และอัตราเร็วกับเวลา โดยโปรแกรมคำสั่งที่ใช้ประมวลผลการวัดจะทำหน้าที่คำนวณตำแหน่งของมุมในการหมุนของแผ่นใสแล้วเปลี่ยนเป็นค่าอัตราเร็วของแผ่นใส ณ เวลาต่างๆ แล้วนำค่าดังกล่าวไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา

5. การทดสอบเครื่องมือวัดและโปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยใช้วัดความถี่ของสัญญาณพัลส์ที่เกิดจากการหมุน พบว่าเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องวัดความถี่ มีความแตกต่างจากเครื่องวัดความถี่ไม่เกินร้อยละ 1 และการใช้เครื่องมือนี้ทดลองกับเครื่องจักรแอกทูตเพื่อหาค่าสนามความโน้มถ่วงของโลก พบว่าเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ที่ผู้วิจัยออกแบบขึ้น สามารถแสดงผลการเคลื่อนที่ในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลา ทำให้เห็นถึงการกระจัดเชิงมุมที่เปลี่ยนไปต่อช่วง

เวลาของการเคลื่อนที่และหาค่ามวลยังผลของความเสียดทาน (m_f) ของมวลรวม 0.39552 kg, 0.35552 kg, 0.31552 kg, 0.27552 kg, 0.23552 kg ได้ 0.0012 ± 0.0002 kg, 0.0009 ± 0.0002 kg, 0.0007 ± 0.0003 kg, 0.0000 ± 0.0002 kg, 0.0000 ± 0.0003 kg ตามลำดับ ได้ค่ามวลยังผลของรอก (m_p) เท่ากับ 0.093 ± 0.003 kg และได้ค่าสนามความโน้มถ่วง (g) เท่ากับ 9.77 ± 0.07 m/s² และเมื่อนำมาเทียบกับค่าที่หาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติพบว่ามีความแตกต่างเท่ากับ 0.1%

อภิปรายผลการวิจัย

เครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นสามารถนำไปใช้กับการทดลองเครื่องจักรแอกทูเอต เพื่อหาค่าสนามความโน้มถ่วง ซึ่งต้องมีการนำค่าของแรงเสียดทานที่เกิดจากความฝืดของแบริง และค่าของโมเมนต์ความเฉื่อยของรอกมาคำนวณด้วย สำหรับการวิจัยนี้ไม่ได้มีการหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของรอกและค่าแรงเสียดทานของแบริง แต่หาออกมาในรูปของมวลยังผลของรอก (m_p) ซึ่งสามารถหาได้จากจุดตัดของกราฟดังแสดงในภาพประกอบ 57 และมวลยังผลของความเสียดทาน (m_f) ซึ่งหาได้จากจุดตัดของกราฟเช่นกัน ดังภาพประกอบ 52 53 54 55 และ 56 และจากตาราง 28 แสดงให้เห็นว่าค่าของ m_f มีค่าขึ้นกับผลรวมของมวล $m_2 + m_1$ นั่นคือค่าของแรงเสียดทานจะมีค่าขึ้นกับมวลที่คล้องอยู่บนรอก สำหรับค่าสนามความโน้มถ่วงสามารถหาค่าได้จากค่าความชันของกราฟดังภาพประกอบ 57 ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างจากค่าอ้างอิงของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติเพียง 0.1 % วิธีการหาค่า g นี้่นำมาจากผลการทดลองของ Gordon O. Johnson เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องมือเทียบกับทฤษฎีเครื่องจักรแอกทูเอต และกล่าวได้ว่าเครื่องมือที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ได้กับการทดลองทางฟิสิกส์ในการเคลื่อนที่แบบหมุนได้ โดยสามารถแสดงผลการทดลองได้ทันทีพร้อมกับบันทึกผลการทดลอง

เครื่องมือที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นสามารถเก็บข้อมูลจากการทดลองได้ทุก ๆ 1/64 วินาที วัดได้ละเอียดถึง 0.4 มิลลิเมตร หรือ 1 องศา และสามารถเก็บข้อมูลเป็นคู่อันดับระหว่างเวลากับมุม อัตราเร็วเชิงมุม ระยะทาง อัตราเร็ว การแสดงผลเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วกับเวลาสามารถคำนวณได้จากการรับข้อมูลที่ส่งจากวงจรวัดมุมผ่านทางพรีนเตอร์พอร์ต ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้จะเป็นข้อมูลของจำนวนองศาที่เปลี่ยนไปในช่วง 1/64 วินาที นำข้อมูลที่ได้นี้ไปหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เปลี่ยนไปเทียบกับระยะทางว่ามีค่าเท่าใด แล้วนำไปหารด้วยช่วงเวลาเก็บข้อมูล สิ่งที่ได้ก็จะเป็นอัตราเร็วซึ่งสามารถนำไปวิเคราะห์ได้

เครื่องมือนี้นอกจากจะใช้ในการทดลองเครื่องจักรแอกทูเอตแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ในการทดลองที่มีการพาดเชือกบนรอกได้ เช่น การเคลื่อนที่ของวัตถุบนพื้นเอียง การตกของวัตถุ หรือนำไปใช้วัดอัตราเร็วลมที่หมุนกังหัน เป็นต้น

ข้อเสนอแนะ

1. ในการออกแบบและสร้างเครื่องมือสำหรับวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ต้องออกแบบแผ่นใสให้มีขนาดใหญ่พอควร และลากเส้นที่มีความทึบตลอดทั้งเส้น เพื่อป้องกันความผิดพลาดจากการประมวลผล จากการวิจัยพบว่าการจัดวางตำแหน่งของแผ่นใสจะต้องวางให้อยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างตัวรับส่งอินฟราเรดพอดี ไม่เช่นนั้นจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่ามุมของแผ่นใส

2. ในการใช้แผ่นใสและตัวรับส่งอินฟราเรด เป็นอุปกรณ์บอกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ สัญญาณจากตัวรับอินฟราเรดจะถูกส่งผ่านวงจรของระบบวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ซึ่งเชื่อมต่อไปยังพอร์ตขนาน เพื่อใช้วัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ผลการวิจัยที่ได้พบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแผ่นใสเนื่องจากจังหวะของการตัดลำแสงซึ่งนำไปสู่การคำนวณการกระจัดเชิงมุมของแผ่นใส จะขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นใส ความทึบของเส้นบนแผ่นใสและความเข้มของอินฟราเรด

3. การกำหนดช่วงเวลาในการจัดเก็บข้อมูลนั้น ควรเลือกให้เหมาะสมกับการทดลองนั้นๆ เพื่อที่จะทำให้ได้ช่วงข้อมูลที่เหมาะแก่การศึกษา

4. ความไวของอุปกรณ์รับส่งอินฟราเรดสามารถปรับเปลี่ยนได้จากการปรับเปลี่ยนตัวต้านทาน R และ R_L ที่ต่ออยู่กับตัวรับส่งอินฟราเรด

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- โกวิท ไชวสุวรรณ; และธีรวุฒิ หน่อคำ. (2546, ธันวาคม). เซนเซอร์และวงจรใช้งาน. *Hobby Electronics*. 137 : 69-78.
- คู่มือดูชาวไอซี. (2540). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น.
- จิระวัฒน์ ใจอ่อนนุ่ม; และ นภัทร วัจนเทพินทร์. (2541). วงจรดิจิทัล. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพฯ: สยามสปอร์ต ซินดิเคท.
- ณสรร์ค ผลโภค. (2538). *กลศาสตร์ 1*. กรุงเทพฯ: SCIENCE CENTER.
- ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานันท์. (2542). อิเล็กทรอนิกส์ระบบดิจิทัล. กรุงเทพฯ: พิมพ์งาม.
- ปาริชาติ แนนเนียน. (2546). การออกแบบและสร้างเทรนซิโอมิเตอร์สำหรับเก็บค่าศักย์วัสดุพื้นของน้ำในดิน. วิทยานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต. (ฟิลิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- พิเชษฐ์ ลิ้มสุวรรณ. (2541). *กลศาสตร์เชิงวิเคราะห์*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์เสียงเชียง.
- วิสูตร ตูลยสุข. (2546). การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัมบิด. วิทยานิพนธ์การศึกษามหาบัณฑิต. (ฟิลิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- อภิชาติ ภูพลับ. (2546). เริ่มต้นเขียนโปรแกรมติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์ด้วยวิชวลเบสิก. กรุงเทพฯ: ด่านสุทธาการพิมพ์.
- Bogart, Theodore F., Jr.. (1992). *Introduction to Digital Circuits*. Lake Forest: Glencoe.
- Bulur, E.; Anilturk, S. O.; & Ozer, A. M. (1996, October). Computer Analysis of Pendulum Motion. *American Journal of Physics*. 64 : 1333-1337.
- Chow, Tai L. (1995). *Classical Mechanics*. New York: Wiley.
- Eric Weisstein's World of Physics. Retrieved 2004, from <http://scienceworld.wolfram.com/physics/>
- Gottfried, Byron S.. (1990). *Schaum's Outline of Theory and Problems of Programming with C*. New York: McGraw-Hill.
- Greenslade, Thomas B., Jr.. (1985, January). Atwood's Machine. *The Physics Teacher*. 23 : 24-28.
- Halliday, David; Resnick, Robert; & Walker, Jearl. (2001). *Fundamentals of Physics*. 6th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Handler, Joel T.; Ochoa, O. Romulo; & Kolp, N. Franklin. (1996). A Mouse in our Laboratory. *The Physics Teacher*. 34 : 488-490.

- HyperPhysics*. Retrieved 2004, from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- Infrared Emitter and Decoder*. Retrieved 2004, from <http://www.boondog.com>
- Johnson, Gordon O.. (2001, March). Making Atwood's Machine Work. *The Physics Teacher*. 39 : 154-158.
- Kleitz, William. (2002). *Digital Electronics : a Practical Approach*. 6th ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Ocaya, R. O.. (2000, July). A Simple Computer Interface to Time Relatively Slow Physical Events. *Physics Education*. 35(4) : 267-275.
- Ochoa, O. Romulo; & Kolp, N. Franklin. (1997, November). The Computer Mouse as a Data Acquisition Interface. *American Journal of Physics*. 65 : 1115-1118.
- Sedra, Adel S.; & Smith, Kenneth Carless. (1998). *Microelectronic circuits*. New York: Oxford.
- Serway, Raymond A; & Jewett, John W.. (2004). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*. 6th ed. Philadelphia: Saunders College Pub.
- Smith, George A.. (2000). *Computer interfacing*. Oxford: Newnws.
- Trumper, Ricardo; & Gelbman, Moshe. (2000, September). A Computer-Based Revitalization of Atwood's Machine. *Physics Education*. 35(5) : 354-358.
- Wang, Charles T. P.. (1973, July). The Improved Determination of Acceleration in Atwood's Machine. *American Journal of Physics*. 41 : 917-919.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
โปรแกรมคำสั่งในการวัดมุมกับเวลา

```

#include <timeint.h>          // Header File สำหรับแสดงเวลา
#include <ppio.h>            // Header File สำหรับสื่อสารข้อมูลกับพริ้นเตอร์พอร์ต
#include <scrnptaa.h>        // Header File สำหรับแสดงหน้าจอกราฟ
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

ScreenPhaseTime SCPT;

unsigned long TimeInterval(unsigned long, unsigned long); //กำหนดช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล

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;
}

main()
{
    clrscr();

    //กำหนดค่าเริ่มต้นและตัวแปร ที่ใช้สำหรับการเก็บและประมวลผลของโปรแกรม//

    int count,h=255,Frame=0,newh,NumberPage=1,yinitial,i,j,z[256];
    unsigned long time,n=16,Data_x[256];
    unsigned addposition,initialtime,checktime,deltatime;
    float Data_y[256],y,x1,x2,y1,y2,Multi[256];

```

//ติดต่อกับพริ้นเตอร์พอร์ตพร้อมทั้งกำหนดสถานะเริ่มต้นของพอร์ต

```

wheel.ResetPort();
wheel.OpenPort();
wheel.Set_y();
yinitial=wheel.Calculate_y();

SCPT.Screen(NumberPage);
getche();

x1=50;y1=yinitial+420;

Time70h.init70h();           //เรียกสัญญาณขัดจังหวะเวลา
time=ticks_70h;
ticks_70h=0;

TimeInterval(time,n);       //ตรวจสอบเวลาของระบบ
time=TimeInterval(time,n);
initialtime=time;
initialtime=checktime;

while(Frame<1)
{
    deltatime=checktime-initialtime;
    addposition=((deltatime)%4);
    newh=h-addposition;
    SCPT.DrawLine(50+addposition,60,addposition,0,15);

    for(count=0;count<newh;count++)
    {
        wheel.OpenPort();

        TimeInterval(time,n);
        time=TimeInterval(time,n);
    }
}

```

```
Data_x[count]=time;

x2=(count*2)+4;

wheel.CheckBit();
z[count]=wheel.CheckBit();

{
if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.5*wheel.Calculate_y();
y=0.5*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.333333*wheel.Calculate_y();
y=0.33333*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.25*wheel.Calculate_y();
y=0.25*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==1))
{
wheel.Calculate_y();
```

```

    Data_y[count]=0.2*wheel.Calculate_y();
    y=0.2*wheel.Calculate_y();
}
else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.166666*wheel.Calculate_y();
    y=0.166666*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
&&(z[count-7]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.142857*wheel.Calculate_y();
    y=0.142857*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
&&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.125*wheel.Calculate_y();
    y=0.125*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
&&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==0)&&(z[count-9]==1))
{
    wheel.Calculate_y();

```

```

        Data_y[count]=0.111111*wheel.Calculate_y();
        y=0.111111*wheel.Calculate_y();
    }

    else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==0)&&(z[count-9]==0)
    &&(z[count-10]==1))
    {
        wheel.Calculate_y();
        Data_y[count]=0.1*wheel.Calculate_y();
        y=0.1*wheel.Calculate_y();
    }

    else if(z[count-1]==1)
    {
        wheel.Calculate_y();
        Data_y[count]=wheel.Calculate_y();
        y=wheel.Calculate_y();
    }
}

y2=((y+Multi[count-1])*0.144);
SCPT.DrawCircle(x2+addposition,y2);

x1=(count*2)+50+4;
y1=(-y)+420;
Multi[count]=(y2*6.9444444);

}

x1=50+4;
y1=y+420;

Frame=Frame++;

```

```

count=0;
h=255;

TimeInterval(time,n);
time=TimeInterval(time,n);
checktime=time;
}

{
FILE *fp;
fp=fopen("c:/Data.txt","w+t"); //บันทึกข้อมูล

if(fp==NULL)
{
printf("Error");
exit(0);
}
else
{fprintf(fp,"Times Degree\n");
for(i=0;i<256;i++)
fprintf(fp,"%0.5f %0.5f\n",((Data_x[i])*(0.0009765625)),Multi[i]);
}
fclose(fp);
}
getche();
closegraph();
wheel.ResetPort();
Time70h.quit70h();
return 0;
}

```

ภาคผนวก ข
โปรแกรมคำสั่งในการวัดอัตราเร็วเชิงมุมกับเวลา

```

#include <timeint.h>          // Header File สำหรับแสดงเวลา
#include <ppio.h>            // Header File สำหรับสื่อสารข้อมูลกับพริ้นเตอร์พอร์ต
#include <scrntav.h>         // Header File สำหรับแสดงหน้าจอกราฟ
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

ScreenPhaseTime SCPT;

unsigned long TimeInterval(unsigned long, unsigned long); //กำหนดช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล

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;
}

main()
{
    clrscr();

//กำหนดค่าเริ่มต้นและตัวแปร ที่ใช้สำหรับการเก็บและประมวลผลของโปรแกรม//

    int count,h=255,Frame=0,newh,NumberPage=1,yinitial,i,j,z[256];
    unsigned long time,n=16,Data_x[256];
    unsigned  addposition,initialtime,checktime,deltatime;
    float Data_y[256],y,x1,x2,y1,y2,Multi[256];

```

```
//ติดต่อกับพริ้นเตอร์พอร์ตพร้อมทั้งกำหนดสถานะเริ่มต้นของพอร์ต//
```

```
wheel.ResetPort();
wheel.OpenPort();
wheel.Set_y();
yinitial=wheel.Calculate_y();
```

```
SCPT.Screen(NumberPage);
getche();
```

```
x1=50;y1=yinitial+420;
```

```
Time70h.init70h(); //เรียกสัญญาณขัดจังหวะเวลา
time=ticks_70h;
ticks_70h=0;
```

```
TimeInterval(time,n); //ตรวจสอบเวลาของระบบ
time=TimeInterval(time,n);
initialtime=time;
initialtime=checktime;
```

```
while(Frame<1)
{
    deltatime=checktime-initialtime;
    addposition=((deltatime)%4);
    newh=h-addposition;
    SCPT.DrawLine(50+addposition,60,addposition,0,15);

    for(count=0;count<newh;count++)
    {
        wheel.OpenPort();

        TimeInterval(time,n);
        time=TimeInterval(time,n);
        Data_x[count]=time;
```

```
x2=(count*2)+4;
wheel.CheckBit();
z[count]=wheel.CheckBit();

{
if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.5*wheel.Calculate_y();
y=0.5*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.333333*wheel.Calculate_y();
y=0.333333*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.25*wheel.Calculate_y();
y=0.25*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.2*wheel.Calculate_y();
y=0.2*wheel.Calculate_y();
}
```

```

}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.166666*wheel.Calculate_y();
    y=0.166666*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
&&(z[count-7]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.142857*wheel.Calculate_y();
    y=0.142857*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
&&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.125*wheel.Calculate_y();
    y=0.125*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
&&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==0)&&(z[count-9]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.111111*wheel.Calculate_y();

```

```

        y=0.111111*wheel.Calculate_y();
    }

    else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==0)&&(z[count-9]==0)
    &&(z[count-10]==1))
    {
        wheel.Calculate_y();
        Data_y[count]=0.1*wheel.Calculate_y();
        y=0.1*wheel.Calculate_y();
    }

    else if(z[count-1]==1)
    {
        wheel.Calculate_y();
        Data_y[count]=wheel.Calculate_y();
        y=wheel.Calculate_y();
    }
}

y2=(y*4.608);
SCPT.DrawCircle(x2+addposition,y2);

x1=(count*2)+50+4;
y1=(-y)+420;

}

x1=50+4;
y1=(y)+420;

Frame=Frame++;
count=0;
h=255;

```

```

    TimeInterval(time,n);
    time=TimeInterval(time,n);
    checktime=time;

    }
{
FILE *fp;
fp=fopen("c:/Data.txt","w+t");           //บันทึกข้อมูล

if(fp==NULL)
{
    printf("Error");
    exit(0);
}
else
{fprintf(fp,"Times av\n");}
{ for(i=0;i<256;i++)
fprintf(fp,"%0.5f %0.5f\n",((Data_x[i])*(0.0009765625)),((Data_y[i])*64));
}
fclose(fp);
}
getche();
closegraph();
wheel.ResetPort();
Time70h.quit70h();
return 0;
}

```

ภาคผนวก ค
โปรแกรมคำสั่งในการวัดระยะทางกับเวลา

```

#include <timeint.h>           // Header File สำหรับแสดงเวลา
#include <ppio.h>             // Header File สำหรับสื่อสารข้อมูลกับพริ้นเตอร์พอร์ต
#include <scrptls.h>          // Header File สำหรับแสดงหน้าจอกราฟ
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

ScreenPhaseTime SCPT;

unsigned long TimeInterval(unsigned long, unsigned long); //กำหนดช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล

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;
}

main()
{
    clrscr();

//กำหนดค่าเริ่มต้นและตัวแปร ที่ใช้สำหรับการเก็บและประมวลผลของโปรแกรม//

    int count,h=255,Frame=0,newh,NumberPage=1,yinitial,i,j,z[256];
    unsigned long time,n=16,Data_x[256];
    unsigned addposition,initialtime,checktime,deltatime;
    float Data_y[256],y,x1,x2,y1,y2,Multi[256];

```

```

//ติดต่อกับพริ้นเตอร์พอร์ตพร้อมทั้งกำหนดสถานะเริ่มต้นของพอร์ต//
wheel.ResetPort();
wheel.OpenPort();
wheel.Set_y();
yinitial=wheel.Calculate_y();

SCPT.Screen(NumberPage);
getche();

x1=50;y1=yinitial+420;

Time70h.init70h();           //เรียกสัญญาณขัดจังหวะเวลา
time=ticks_70h;
ticks_70h=0;

TimeInterval(time,n);       //ตรวจสอบเวลาของระบบ
time=TimeInterval(time,n);
initialtime=time;
initialtime=checktime;

while(Frame<1)
{
    deltatime=checktime-initialtime;
    addposition=((deltatime)%4);
    newh=h-addposition;
    SCPT.DrawLine(50+addposition,60,addposition,0,15);

    for(count=0;count<newh;count++)
    {
        wheel.OpenPort();

        TimeInterval(time,n);
        time=TimeInterval(time,n);
        Data_x[count]=time;
    }
}

```

```
x2=(count*2)+4;

wheel.CheckBit();
z[count]=wheel.CheckBit();

{

if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.5*wheel.Calculate_y();
    y=0.5*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.333333*wheel.Calculate_y();
    y=0.33333*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.25*wheel.Calculate_y();
    y=0.25*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.2*wheel.Calculate_y();
```

```

        y=0.2*wheel.Calculate_y();
    }

    else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==1))
    {
        wheel.Calculate_y();
        Data_y[count]=0.166666*wheel.Calculate_y();
        y=0.166666*wheel.Calculate_y();
    }

    else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==1))
    {
        wheel.Calculate_y();
        Data_y[count]=0.142857*wheel.Calculate_y();
        y=0.142857*wheel.Calculate_y();
    }

    else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==1))
    {
        wheel.Calculate_y();
        Data_y[count]=0.125*wheel.Calculate_y();
        y=0.125*wheel.Calculate_y();
    }

    else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==0)&&(z[count-9]==1))
    {
        wheel.Calculate_y();

```

```

        Data_y[count]=0.111111*wheel.Calculate_y();
        y=0.111111*wheel.Calculate_y();
    }
    else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==0)&&(z[count-9]==0)
    &&(z[count-10]==1))
    {
        wheel.Calculate_y();
        Data_y[count]=0.1*wheel.Calculate_y();
        y=0.1*wheel.Calculate_y();
    }

    else if(z[count-1]==1)
    {
        wheel.Calculate_y();
        Data_y[count]=wheel.Calculate_y();
        y=wheel.Calculate_y();
    }
}

y2=((y+Multi[count-1])*0.14873524);
SCPT.DrawCircle(x2+addposition,y2);

x1=(count*2)+50+4;
y1=(-y)+420;
Multi[count]=(y2*6.7233562);

}

x1=50+4;
y1=(y)+420;

Frame=Frame++;
count=0;

```

```

    h=255;

    TimeInterval(time,n);
    time=TimeInterval(time,n);
    checktime=time;
    }
{
FILE *fp;
fp=fopen("c:/Data.txt","w+t");           //บันทึกข้อมูล

if(fp==NULL)
{
    printf("Error");
    exit(0);
}
else
{fprintf(fp,"Times Distance\n");
{ for(i=0;i<256;i++)
fprintf(fp,"%0.5f %0.5f\n",((Data_x[i])*(0.0009765625)),Multi[i]);
}
fclose(fp);

}
getche();
closegraph();
wheel.ResetPort();
Time70h.quit70h();
return 0;
}

```

ภาคผนวก ง
โปรแกรมคำสั่งในการวัดอัตราเร็วกับเวลา

```
#include <timeint.h> // Header File สำหรับแสดงเวลา
#include <ppio.h> // Header File สำหรับสื่อสารข้อมูลกับพริ้นเตอร์พอร์ต
#include <scrpt.h> // Header File สำหรับแสดงหน้าจอกราฟ
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
```

```
ScreenPhaseTime SCPT;
```

```
unsigned long TimeInterval(unsigned long, unsigned long); //กำหนดช่วงเวลาในการเก็บข้อมูล
```

```
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;
}
```

```
main()
```

```
{ clrscr();
```

```
//กำหนดค่าเริ่มต้นและตัวแปร ที่ใช้สำหรับการเก็บและประมวลผลของโปรแกรม
```

```
int count,h=255,Frame=0,newh,NumberPage=1,yinitial,i,j,z[256];
unsigned long time,n=16,Data_x[256];
unsigned addposition,initialtime,checktime,deltatime;
float Data_y[256],y,x1,x2,y1,y2;
```

//ติดต่อกับพริ้นเตอร์พอร์ตพร้อมทั้งกำหนดสถานะเริ่มต้นของพอร์ต

```

wheel.ResetPort();
wheel.OpenPort();
wheel.Set_y();
yinitial=wheel.Calculate_y();

SCPT.Screen(NumberPage);
getche();

x1=50;y1=yinitial+420;

Time70h.init70h();           //เรียกสัญญาณขัดจังหวะเวลา
time=ticks_70h;
ticks_70h=0;

TimeInterval(time,n);       //ตรวจสอบเวลาของระบบ
time=TimeInterval(time,n);
initialtime=time;
initialtime=checktime;

while(Frame<1)
{
    deltatime=checktime-initialtime;
    addposition=((deltatime)%4);
    newh=h-addposition;
    SCPT.DrawLine(50+addposition,60,addposition,0,15);

for(count=0;count<newh;count++)
{
    wheel.OpenPort();

    TimeInterval(time,n);
    time=TimeInterval(time,n);

```

```
Data_x[count]=time;
x2=(count*2)+4;

wheel.CheckBit();
z[count]=wheel.CheckBit();
{
if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.5*wheel.Calculate_y();
y=0.5*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.333333*wheel.Calculate_y();
y=0.333333*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)&&(z[count-4]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.25*wheel.Calculate_y();
y=0.25*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
&&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==1))
{
wheel.Calculate_y();
Data_y[count]=0.2*wheel.Calculate_y();
y=0.2*wheel.Calculate_y();
}
}
```

```
else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.166666*wheel.Calculate_y();
    y=0.166666*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.142857*wheel.Calculate_y();
    y=0.142857*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.125*wheel.Calculate_y();
    y=0.125*wheel.Calculate_y();
}

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==0)&&(z[count-9]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.111111*wheel.Calculate_y();
    y=0.111111*wheel.Calculate_y();
}
```

```

else if((z[count-1]==0)&&(z[count-2]==0)&&(z[count-3]==0)
    &&(z[count-4]==0)&&(z[count-5]==0)&&(z[count-6]==0)
    &&(z[count-7]==0)&&(z[count-8]==0)&&(z[count-9]==0)
    &&(z[count-10]==1))
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=0.1*wheel.Calculate_y();
    y=0.1*wheel.Calculate_y();
}

else if(z[count-1]==1)
{
    wheel.Calculate_y();
    Data_y[count]=wheel.Calculate_y();
    y=wheel.Calculate_y();
}
}

y2=(y*4.7595278);
SCPT.DrawCircle(x2+addposition,y2);

x1=(count*2)+50+4;
y1=(-y*4.7595278)+420;

}
x1=50+4;
y1=(y*4.7595278)+420;

Frame=Frame++;
count=0;
h=255;

```

```

TimeInterval(time,n);
time=TimeInterval(time,n);
checktime=time;
}

{
    FILE *fp;                //บันทึกข้อมูล
    fp=fopen("c:/Data.txt","w+t");

    if(fp==NULL)
    {
        printf("Error");
        exit(0);
    }
    else
    {fprintf(fp,"Times av\n");
    { for(i=0;i<256;i++)
    fprintf(fp,"%0.5f %0.5f,((Data_x[i])*(0.0009765625)),((Data_y[i])*(0.0264418)));
    }
    fclose(fp);
    }

    closegraph();
    wheel.ResetPort();
    Time70h.quit70h();
    return 0;
}

```

ภาคผนวก จ

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
```

```

#ifndef _PPIO_H
#define _PPIO_H

#include <dos.h>

#define PP 0x378 //กำหนดตำแหน่งของพรีนเตอร์พอร์ต

class Pulley
{
public:
    void ResetPort();
    void OpenPort();
    int Calculate_y();
    int CheckBit();
    void Set_y();
    int Get_y();
private:
    int y,z;
};

Pulley wheel;

int intl[1],inth[1];

void Pulley::ResetPort() //กำหนดสถานะพอร์ตตั้งใหม่
{
    outportb(PP,0xAB);
}

void Pulley::OpenPort() //กำหนดสถานะพอร์ตพร้อมทำงาน
{
    outportb(PP,0xA8);
    outportb(PP,0xA4);
}

```

```

int Pulley::Calculate_y()                                     //เก็บค่าของมุม
{
    {
        outportb(PP,0xA0);
        outportb(PP,0xA2);
        outportb(PP,0xA0);
        outportb(PP,0x80);
        outportb(PP,0x40);

        intl[0]=((inportb(PP+1)^0x88)&0xF0)>>4;

        outportb(PP,0x80);
        outportb(PP,0x90);
        outportb(PP,0x50);

        inth[0]=(inportb(PP+1)^0x88)&0xF0;
        y=(intl[0]+inth[0]);
    }
    return y;
}

int Pulley::CheckBit()                                     //ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล
{
    {
        outportb(PP,0xA0);
        outportb(PP,0xA1);
        z=(inportb(PP+1)>>3)&1;
    }
    return z;
}

```

```
void Pulley::Set_y()                //กำหนดค่าเริ่มต้น
{
    y=0;
}

int Pulley::Get_y()                //การเก็บข้อมูล
{
    return y;
}

#endif
```

ภาคผนวก ฉ

โปรแกรมส่วนหัวสำหรับทำงานร่วมกับโปรแกรมวัดมุมกับเวลา

```

#ifndef _SCRNPTAA_H
#define _SCRNPTAA_H

#include <conio.h>
#include <graphics.h>

class ScreenPhaseTime
{
public:
    void Frame();
    void ScaleTime();
    void ScaleDisplacement();
    void Screen(int Frame);
    void RunPageScreen(int Frame);
    void DrawLine(int x1 ,int y1,int x2,int y2,int colorline);
    void DrawCircle(int x2,int y2);
};

ScreenPhaseTime SCREENPT;

void ScreenPhaseTime::Frame()                //กำหนดการแสดงผลหน้าจอ
{
    int gd = DETECT, gm;
    initgraph(&gd, &gm,"c:\\tc\\bgi");
    setbkcolor(BLACK);
    setcolor (WHITE);
    rectangle(50 ,60 ,562 ,420);
    outtextxy(40 ,40 ,"A (degree)");
    outtextxy(300 ,430 ,"t (second)");
    outtextxy(235 ,40 ,"MOTION MEASUREMENT");
}

void ScreenPhaseTime::ScaleDisplacement()    //แบ่งสเกลในแนวตั้ง
{
    line(48 ,60 ,52 ,60);        line(564 ,60 ,560 ,60);
    line(48 ,96 ,52 ,96);        line(564 ,96 ,560 ,96);
}

```

```

line(48 ,132 ,52 ,132);      line(564 ,132 ,560 ,132);
line(48 ,168 ,52 ,168);      line(564 ,168 ,560 ,168);
line(48 ,204 ,52 ,204);      line(564 ,204 ,560 ,204);
line(48 ,240 ,52 ,240);      line(564 ,240 ,560 ,240);
line(48 ,276 ,52 ,276);      line(564 ,276 ,560 ,276);
line(48 ,312 ,52 ,312);      line(564 ,312 ,560 ,312);
line(48 ,348 ,52 ,348);      line(564 ,348 ,560 ,348);
line(48 ,384 ,52 ,384);      line(564 ,384 ,560 ,384);
line(48 ,420 ,52 ,420);      line(564 ,420 ,560 ,420);

outtextxy(14 ,58 ,"2500");
outtextxy(14 ,94 ,"2250");
outtextxy(14 ,130 ,"2000");
outtextxy(14 ,166 ,"1750");
outtextxy(14 ,202 ,"1500");
outtextxy(14 ,238 ,"1250");
outtextxy(14 ,274 ,"1000");
outtextxy(14 ,310 ," 750");
outtextxy(14 ,346 ," 500");
outtextxy(14 ,382 ," 250");
}
void ScreenPhaseTime::ScaleTime()      //แบ่งสเกลในแนวนอน
{
    line(50 ,418 ,50 ,422);      line(50 ,58 ,50 ,62);
    line(178 ,418 ,178 ,422);    line(178 ,58 ,178 ,62);
    line(306 ,418 ,306 ,422);    line(306 ,58 ,306 ,62);
    line(434 ,418 ,434 ,422);    line(434 ,58 ,434 ,62);
    line(562 ,418 ,562 ,422);    line(562 ,58 ,562 ,62);
}
void ScreenPhaseTime::DrawLine(int x1 ,int y1,int x2,int y2,int colorline)  //วาดเส้นตรง
{
    setcolor(colorline);line(x1,y1,x2+50 ,-(y2)+420);
}

```

```

void ScreenPhaseTime::DrawCircle(int x2,int y2)           //วาดวงกลม
{
    setcolor(14);circle(x2+50,-(y2)+420,1);
}
void ScreenPhaseTime::RunPageScreen(int Frame)          //แสดงจำนวนหน้า
{
    switch(Frame)
    {
        case 1: outtextxy(46 ,430 ,"0");  outtextxy(554 ,430 ,"4.0"); break;
        case 2: outtextxy(46 ,430 ,"4.0"); outtextxy(554 ,430 ,"8.0"); break;
        case 3: outtextxy(46 ,430 ,"8.0"); outtextxy(554 ,430 ,"12.0"); break;
        case 4: outtextxy(46 ,430 ,"12.0"); outtextxy(554 ,430 ,"16.0"); break;
        case 5: outtextxy(46 ,430 ,"16.0"); outtextxy(554 ,430 ,"20.0"); break;
    }
}
void ScreenPhaseTime::Screen(int Frame)                 //กำหนดการแสดงผลหน้าจอ
{
    SCREENPT.Frame();
    SCREENPT.ScaleTime();
    SCREENPT.ScaleDisplacement();
    SCREENPT.RunPageScreen(Frame);
    setcolor(RED);
    outtextxy(50 ,450 ,"    Department of Physics, Srinakharinwirot University");
}

#endif

```

ภาคผนวก ช

โปรแกรมส่วนหัวสำหรับทำงานร่วมกับโปรแกรมวัดอัตราเร็วเชิงมุมกับเวลา

```

#ifndef _SCRNPTAV_H
#define _SCRNPTAV_H

#include <conio.h>
#include <graphics.h>

class ScreenPhaseTime
{
public:
    void Frame();
    void ScaleTime();
    void ScaleDisplacement();
    void Screen(int Frame);
    void RunPageScreen(int Frame);
    void DrawLine(int x1 ,int y1,int x2,int y2,int colorline);
    void DrawCircle(int x2,int y2);
};

ScreenPhaseTime SCREENPT;

void ScreenPhaseTime::Frame()                //กำหนดการแสดงผลหน้าจอ
{
    int gd = DETECT, gm;
    initgraph(&gd, &gm,"c:\\tc\\bgi");
    setbkcolor(BLACK);
    setcolor (WHITE);
    rectangle(50 ,60 ,562 ,420);
    outtextxy(40 ,40 ,"V (degree/second)");
    outtextxy(300 ,430 ,"t (second)");
    outtextxy(235 ,40 ,"MOTION MEASUREMENT");
}

void ScreenPhaseTime::ScaleDisplacement()    //แบ่งสเกลในแนวตั้ง
{
    line(48 ,60 ,52 ,60);                line(564 ,60 ,560 ,60);
    line(48 ,96 ,52 ,96);                line(564 ,96 ,560 ,96);
}

```

```

line(48 ,132 ,52 ,132);      line(564 ,132 ,560 ,132);
line(48 ,168 ,52 ,168);      line(564 ,168 ,560 ,168);
line(48 ,204 ,52 ,204);      line(564 ,204 ,560 ,204);
line(48 ,240 ,52 ,240);      line(564 ,240 ,560 ,240);
line(48 ,276 ,52 ,276);      line(564 ,276 ,560 ,276);
line(48 ,312 ,52 ,312);      line(564 ,312 ,560 ,312);
line(48 ,348 ,52 ,348);      line(564 ,348 ,560 ,348);
line(48 ,384 ,52 ,384);      line(564 ,384 ,560 ,384);
line(48 ,420 ,52 ,420);      line(564 ,420 ,560 ,420);

outtextxy(14 ,58 ,"5000");
outtextxy(14 ,94 ,"4500");
outtextxy(14 ,130 ,"4000");
outtextxy(14 ,166 ,"3500");
outtextxy(14 ,202 ,"3000");
outtextxy(14 ,238 ,"2500");
outtextxy(14 ,274 ,"2000");
outtextxy(14 ,310 ,"1500");
outtextxy(14 ,346 ,"1000");
outtextxy(14 ,382 ," 500");
}

void ScreenPhaseTime::ScaleTime()          //แบ่งสเกลในแนวนอน
{
    line(50 ,418 ,50 ,422);      line(50 ,58 ,50 ,62);
    line(178 ,418 ,178 ,422);    line(178 ,58 ,178 ,62);
    line(306 ,418 ,306 ,422);    line(306 ,58 ,306 ,62);
    line(434 ,418 ,434 ,422);    line(434 ,58 ,434 ,62);
    line(562 ,418 ,562 ,422);    line(562 ,58 ,562 ,62);
}

void ScreenPhaseTime::DrawLine(int x1 ,int y1,int x2,int y2,int colorline)  //วาดเส้นตรง
{
    setcolor(colorline);line(x1,y1,x2+50 ,-(y2)+420);
}

```

```

void ScreenPhaseTime::DrawCircle(int x2,int y2)           //วาดวงกลม
{
    setcolor(14);circle(x2+50,-(y2)+420,1);
}
void ScreenPhaseTime::RunPageScreen(int Frame)          //แสดงจำนวนหน้า
{
    switch(Frame)
    {
        case 1: outtextxy(46 ,430 ,"0"); outtextxy(554 ,430 ,"4.0"); break;
        case 2: outtextxy(46 ,430 ,"4.0"); outtextxy(554 ,430 ,"8.0"); break;
        case 3: outtextxy(46 ,430 ,"8.0"); outtextxy(554 ,430 ,"12.0"); break;
        case 4: outtextxy(46 ,430 ,"12.0"); outtextxy(554 ,430 ,"16.0"); break;
        case 5: outtextxy(46 ,430 ,"16.0"); outtextxy(554 ,430 ,"20.0"); break;
    }
}
void ScreenPhaseTime::Screen(int Frame)                 //กำหนดการแสดงผลหน้าจอ
{
    SCREENPT.Frame();
    SCREENPT.ScaleTime();
    SCREENPT.ScaleDisplacement();
    SCREENPT.RunPageScreen(Frame);
    setcolor(RED);
    outtextxy(50 ,450 ,"    Department of Physics, Srinakharinwirot University");
}

#endif

```

ภาคผนวก ช

โปรแกรมส่วนหัวสำหรับทำงานร่วมกับโปรแกรมวัดระยะทางกับเวลา

```

#ifndef _SCRNPTLS_H
#define _SCRNPTLS_H

#include <conio.h>
#include <graphics.h>

class ScreenPhaseTime
{
public:
    void Frame();
    void ScaleTime();
    void ScaleDisplacement();
    void Screen(int Frame);
    void RunPageScreen(int Frame);
    void DrawLine(int x1 ,int y1,int x2,int y2,int colorline);
    void DrawCircle(int x2,int y2);
};

ScreenPhaseTime SCREENPT;

void ScreenPhaseTime::Frame()                //กำหนดการแสดงผลหน้าจอ
{
    int gd = DETECT, gm;
    initgraph(&gd, &gm,"c:\\tc\\bgi");
    setbkcolor(BLACK);
    setcolor (WHITE);
    rectangle(50 ,60 ,562 ,420);
    outtextxy(40 ,40 ,"S (m)");
    outtextxy(300 ,430 ,"t (second)");
    outtextxy(235 ,40 ,"MOTION MEASUREMENT");
}

void ScreenPhaseTime::ScaleDisplacement()    //แบ่งสเกลในแนวตั้ง
{
    line(48 ,60 ,52 ,60);                    line(564 ,60 ,560 ,60);
    line(48 ,96 ,52 ,96);                    line(564 ,96 ,560 ,96);
}

```

```

line(48 ,132 ,52 ,132);      line(564 ,132 ,560 ,132);
line(48 ,168 ,52 ,168);      line(564 ,168 ,560 ,168);
line(48 ,204 ,52 ,204);      line(564 ,204 ,560 ,204);
line(48 ,240 ,52 ,240);      line(564 ,240 ,560 ,240);
line(48 ,276 ,52 ,276);      line(564 ,276 ,560 ,276);
line(48 ,312 ,52 ,312);      line(564 ,312 ,560 ,312);
line(48 ,348 ,52 ,348);      line(564 ,348 ,560 ,348);
line(48 ,384 ,52 ,384);      line(564 ,384 ,560 ,384);
line(48 ,420 ,52 ,420);      line(564 ,420 ,560 ,420);

outtextxy(14 ,58 ,"1.0");
outtextxy(14 ,94 ,"0.9");
outtextxy(14 ,130 ,"0.8");
outtextxy(14 ,166 ,"0.7");
outtextxy(14 ,202 ,"0.6");
outtextxy(14 ,238 ,"0.5");
outtextxy(14 ,274 ,"0.4");
outtextxy(14 ,310 ,"0.3");
outtextxy(14 ,346 ,"0.2");
outtextxy(14 ,382 ,"0.1");
}
void ScreenPhaseTime::ScaleTime()           //แบ่งสเกลในแนวนอน
{
    line(50 ,418 ,50 ,422);      line(50 ,58 ,50 ,62);
    line(178 ,418 ,178 ,422);    line(178 ,58 ,178 ,62);
    line(306 ,418 ,306 ,422);    line(306 ,58 ,306 ,62);
    line(434 ,418 ,434 ,422);    line(434 ,58 ,434 ,62);
    line(562 ,418 ,562 ,422);    line(562 ,58 ,562 ,62);
}
void ScreenPhaseTime::DrawLine(int x1 ,int y1,int x2,int y2,int colorline) //วาดเส้นตรง
{
    setcolor(colorline);line(x1,y1,x2+50 ,-(y2)+420);
}

```

```

void ScreenPhaseTime::DrawCircle(int x2,int y2)           //วาดวงกลม
{
    setcolor(14);circle(x2+50,-(y2)+420,1);
}
void ScreenPhaseTime::RunPageScreen(int Frame)          //แสดงจำนวนหน้า
{
    switch(Frame)
    {
        case 1: outtextxy(46 ,430 ,"0");  outtextxy(554 ,430 ,"4.0"); break;
        case 2: outtextxy(46 ,430 ,"4.0"); outtextxy(554 ,430 ,"8.0"); break;
        case 3: outtextxy(46 ,430 ,"8.0"); outtextxy(554 ,430 ,"12.0"); break;
        case 4: outtextxy(46 ,430 ,"12.0"); outtextxy(554 ,430 ,"16.0"); break;
        case 5: outtextxy(46 ,430 ,"16.0"); outtextxy(554 ,430 ,"20.0"); break;
    }
}
void ScreenPhaseTime::Screen(int Frame)                 //กำหนดการแสดงผลหน้าจอ
{
    SCREENPT.Frame();
    SCREENPT.ScaleTime();
    SCREENPT.ScaleDisplacement();
    SCREENPT.RunPageScreen(Frame);
    setcolor(RED);
    outtextxy(50 ,450 ,"    Department of Physics, Srinakharinwirot University");
}

#endif

```

ภาคผนวก ฅ

โปรแกรมส่วนหัวสำหรับทำงานร่วมกับโปรแกรมวัดอัตราเร็วกับเวลา

```

#ifndef _SCRNPT_H
#define _SCRNPT_H

#include <conio.h>
#include <graphics.h>

class ScreenPhaseTime
{
public:
    void Frame();
    void ScaleTime();
    void ScaleDisplacement();
    void Screen(int Frame);
    void RunPageScreen(int Frame);
    void DrawLine(int x1 ,int y1,int x2,int y2,int colorline);
    void DrawCircle(int x2,int y2);
};

ScreenPhaseTime SCREENPT;

void ScreenPhaseTime::Frame() //กำหนดการแสดงหน้าจอ
{
    int gd = DETECT, gm;
    initgraph(&gd, &gm,"c:\\tc\\bgi");

    setbkcolor(BLACK);
    setcolor (WHITE);
    rectangle(50 ,60 ,562 ,420);

    outtextxy(265 ,40 ,"MOTION MEASUREMENT");
    outtextxy(40 ,40 ,"v (m/s)");
    outtextxy(300 ,430 ,"t (second)");
}

```

```

void ScreenPhaseTime::ScaleDisplacement()           //แบ่งสเกลในแนวตั้ง
{
    line(48 ,60 ,52 ,60);           line(564 ,60 ,560 ,60);
    line(48 ,96 ,52 ,96);           line(564 ,96 ,560 ,96);
    line(48 ,132 ,52 ,132);         line(564 ,132 ,560 ,132);
    line(48 ,168 ,52 ,168);         line(564 ,168 ,560 ,168);
    line(48 ,204 ,52 ,204);         line(564 ,204 ,560 ,204);
    line(48 ,240 ,52 ,240);         line(564 ,240 ,560 ,240);
    line(48 ,276 ,52 ,276);         line(564 ,276 ,560 ,276);
    line(48 ,312 ,52 ,312);         line(564 ,312 ,560 ,312);
    line(48 ,348 ,52 ,348);         line(564 ,348 ,560 ,348);
    line(48 ,384 ,52 ,384);         line(564 ,384 ,560 ,384);
    line(48 ,420 ,52 ,420);         line(564 ,420 ,560 ,420);

    outtextxy(14 ,58 ,"2.0");
    outtextxy(14 ,94 ,"1.8");
    outtextxy(14 ,130 ,"1.6");
    outtextxy(14 ,166 ,"1.4");
    outtextxy(14 ,202 ,"1.2");
    outtextxy(14 ,238 ,"1.0");
    outtextxy(14 ,274 ,"0.8");
    outtextxy(14 ,310 ,"0.6");
    outtextxy(14 ,346 ,"0.4");
    outtextxy(14 ,382 ,"0.2");
}

void ScreenPhaseTime::ScaleTime()                 //แบ่งสเกลในแนวนอน
{
    line(50 ,418 ,50 ,422);           line(50 ,58 ,50 ,62);
    line(178 ,418 ,178 ,422);         line(178 ,58 ,178 ,62);
    line(306 ,418 ,306 ,422);         line(306 ,58 ,306 ,62);
    line(434 ,418 ,434 ,422);         line(434 ,58 ,434 ,62);
    line(562 ,418 ,562 ,422);         line(562 ,58 ,562 ,62);
}

```

```

void ScreenPhaseTime::DrawLine(int x1 ,int y1,int x2,int y2,int colorline)    //วาดเส้นตรง
{
    setcolor(colorline);line(x1,y1,x2+50 ,-(y2)+420);
}

void ScreenPhaseTime::DrawCircle(int x2,int y2)                            //วาดวงกลม
{
    setcolor(14);circle(x2+50,-(y2)+420,1);
}

void ScreenPhaseTime::RunPageScreen(int Frame)                            //แสดงจำนวนหน้า
{
    switch(Frame)
    {
        case 1: outtextxy(46 ,430 ,"0");  outtextxy(554 ,430 ,"4.0"); break;
        case 2: outtextxy(46 ,430 ,"4.0"); outtextxy(554 ,430 ,"8.0"); break;
        case 3: outtextxy(46 ,430 ,"8.0"); outtextxy(554 ,430 ,"12.0"); break;
        case 4: outtextxy(46 ,430 ,"12.0"); outtextxy(554 ,430 ,"16.0"); break;
        case 5: outtextxy(46 ,430 ,"16.0"); outtextxy(554 ,430 ,"20.0"); break;
    }
}

void ScreenPhaseTime::Screen(int Frame)                                    //กำหนดการแสดงผลหน้าจอ
{
    SCREENPT.Frame();
    SCREENPT.ScaleTime();
    SCREENPT.ScaleDisplacement();
    SCREENPT.RunPageScreen(Frame);
    setcolor(RED);
    outtextxy(50 ,450 ,"    Department of Physics, Srinakharinwirot University");
}
#endif

```

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

| | |
|---------------------|---|
| ชื่อ ชื่อสกุล | นาย ศุภเดช สุจินพรัหม |
| วันเดือนปีเกิด | 22 มกราคม พุทธศักราช 2523 |
| สถานที่เกิด | อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ |
| สถานที่อยู่ปัจจุบัน | 147 หมู่ 13 ตำบล นอกเมือง อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ 32000 |
| ประวัติการศึกษา | |
| พ.ศ. 2540 | มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสุรวิทยาคาร จังหวัดสุรินทร์ |
| พ.ศ. 2544 | กศ.บ. (วิทยาศาสตร์-ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| พ.ศ. 2548 | กศ.ม. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |