

การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือวัดพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัมบิด

ปริญญาานิพนธ์

ของ

วิสูตร ดุลยสุข

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มกราคม 2546

ลิขสิทธิ์เป็นของ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๒๑๑.๑๑๑

๒๑๑.๑๑๑

๒๑๑

การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัมบิด

๑

บทคัดย่อ

ของ

วิสูตร ดุลยสุข

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มกราคม 2546

๒๑๑๑๑

วิสูตร ดุลยสุข. (2545). การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือวัดพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัม  
บิต. ปริญญาโท กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย  
ศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข,  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรมล ปิตะนีละผลิน.

เมาส์ชนิดสื่อสารแบบอนุกรมได้รับการดัดแปลงเพื่อใช้เป็นเครื่องมือวัดการกระจัด  
เชิงมุมของจานหมุนในระบบเพนดูลัมบิต ข้อมูลที่วัดได้จากเมาส์จะถูกเปลี่ยนเป็นค่าการกระจัด  
เชิงมุมของจานหมุนที่เวลาต่างๆ ด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นสำหรับควบคุมการสื่อสารข้อมูล  
ระหว่างเมาส์กับคอมพิวเตอร์ ผลการวัดแสดงทางจอภาพและพิมพ์ออกมาในรูปกราฟความ  
สัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลาและกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับ  
การกระจัดเชิงมุม จากการทดสอบความเที่ยงและความแม่นยำของเครื่องมือในการวัดมุมระหว่าง  
15 ถึง 180 องศาโดยวัดค่ามุมซ้ำกัน 10 ครั้งในแต่ละมุม พบว่าเครื่องมือสามารถวัดค่าการ  
กระจัดเชิงมุมได้ใกล้เคียงกับค่ามุมจากแผ่นสเกลวัดมุมซึ่งใช้เป็นมุมสำหรับเปรียบเทียบโดยมี  
ค่าความแตกต่างสูงสุดอยู่ในช่วง  $\pm 0.6$  องศา และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.3 ถึง 0.5  
องศา เมื่อนำเครื่องมือไปวัดพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัมบิตโดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น  
ต่างๆ ที่ทำให้ความถี่ของแกว่งอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.25 รอบต่อวินาที เครื่องมือสามารถวัด  
พฤติกรรมของระบบได้โดยแสดงให้เห็นถึงการแกว่งแบบเป็นคาบ ขนาดของแอมพลิจูดและ  
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุมที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา อันเป็น  
ผลมาจากแรงต้านการเคลื่อนที่ เครื่องมือวัดการกระจัดเชิงมุมที่สร้างจากเมาส์มีความเหมาะสม  
สำหรับใช้ติดตามวัดการกระจัดเชิงมุมของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้อย่างต่อเนื่องและ  
สามารถแสดงผลของพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของระบบในรูปกราฟได้ทันที

USING MOUSE AS A TOOL IN MEASURING MOTION  
OF TORSION PENDULUM

AN ABSTRACT  
BY  
WISOOT TULYASOK

Presented in partial fulfillment of the requirements  
for the Master of Education in Physics  
at Srinakharinwirot University  
January 2003

Wisoot Tulyasok. (2002). *Using Mouse as a Tool in Measuring Motion of Torsion Pendulum*. Master thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Assist Prof. Buncha Silskulsuk, Assist Prof. Niramol Pitanilaphalin.

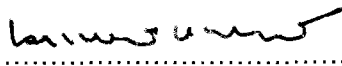
A serial mouse was adapted to be used as a tool to measure angular displacement of a torsion pendulum. The measuring data were converted to angular displacement at any instant of time by a home-developed program that controlled communication between the mouse and the computer. Graph of the measuring values of angular displacement versus time as well as that of angular displacement versus angular velocity may be displayed on screen or printed out on paper. Accuracy and precision of the instrument were tested by measuring 10 values of angular displacement from 15 to 180 degrees. The measuring data when compared with a drawing template revealed maximum discrepancy range of  $\pm 0.6$  degree and standard deviation of 0.3 to 0.5 degree. The tool was used to detect oscillating motion in the frequency range of 0.15 to 0.25 Hz. The graphs showed oscillation with decreasing amplitude. This tool will be suitable to track motion of objects in real time.

ปริญญาโท  
เรื่อง


การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัมบิด

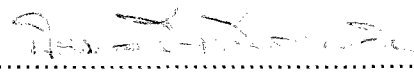
ของ  
นายวิสูตร ดุลยสุข

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์  
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

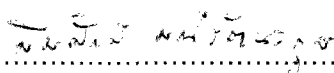
  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. นภาพรณ์ หะวานนท์)  
วันที่ ...๕๕... เดือน ...๕... พ.ศ. ...๕๕...

คณะกรรมการสอบปริญญาโท

  
.....ประธาน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข)

  
.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรมล ปิตะนีละผลิน)

  
.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม  
(อาจารย์ ชุมพล พัฒนสุวรรณ)

  
.....กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม  
(อาจารย์ สมศักดิ์ มณีรัตน์กุล)

## ประกาศคุณูปการ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา ศิลป์สกุลสุข ประธานควบคุมปริญญาโท และผู้ช่วยศาสตราจารย์นิรมล ปีตะนี้ละผลิน กรรมการควบคุมปริญญาโท ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ตรวจสอบแก้ไขและช่วยเหลือในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ชุมพล พัฒนสุวรรณ และอาจารย์สมศักดิ์ มณีรัตน์ที่กรุณาให้คำแนะนำต่าง ๆ ทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้ความเมตตาแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท วิชาเอกฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ทุกท่านที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอโน้มรำลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา และทุกๆ คนในครอบครัว ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนในการศึกษาแก่ข้าพเจ้า จนสามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

วิสูตร ดุลยสุข

## สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
จุดมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
2 ทฤษฎีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
เพนดูลัมบิด.....	4
ลักษณะของเพนดูลัมบิด.....	4
สมการการเคลื่อนที่ของเพนดูลัมบิด.....	6
คำตอบสมการการเคลื่อนที่ของเพนดูลัมบิด.....	9
เม้าส์.....	17
ลักษณะของเม้าส์.....	18
ชนิดของเม้าส์.....	18
ส่วนประกอบภายในของเม้าส์ชนิดที่ใช้หลักการเชิงกลร่วมกับแสง.....	19
วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้า.....	22
หลักการทำงานของเม้าส์ชนิดที่ใช้หลักการเชิงกลร่วมกับแสง.....	24
การบอกทิศทางการหมุนของส่วนประกอบภายในเม้าส์.....	25
การหาขนาดมุมการหมุนของจานเข้ารหัสภายในเม้าส์.....	29
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
การสร้างเครื่องมือวัดการกระจัดเชิงมุมของจานหมุนเพื่อตรวจวัด	
การเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด.....	32

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3(ต่อ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ขั้นตอนการดัดแปลงเมาส์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ของเพนดูลัมบิด..... 32</li> <li>ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ของเพนดูลัมบิด..... 37</li> <li>การเปรียบเทียบและทดสอบเครื่องมือวัดพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนที่แบบหมุน ของเพนดูลัมบิด..... 42</li> <li>การทดลองและเก็บรวบรวมข้อมูล..... 49</li> <li>การวิเคราะห์ข้อมูล..... 50</li> </ul>
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>ผลการวิจัย..... 52                             <ul style="list-style-type: none"> <li>การทดสอบเครื่องมือวัดที่สร้างจากเมาส์..... 52                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>ผลการทดสอบความถูกต้องในการวัดมุมของจานหมุน..... 52</li> <li>ผลการทดสอบความถูกต้องในการวัดเวลาของโปรแกรม..... 56</li> </ul> </li> <li>การทดสอบวัดพฤติกรรมกรรมการเคลื่อนที่เชิงมุมของเพนดูลัมบิด..... 57                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่ จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและมีเพียงสปริงติดกับจาน หมุนเท่านั้น..... 57</li> <li>ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุนและมี แรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ..... 60</li> <li>ระบบที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน แต่ไม่มีสปริงและไม่มีแรงต้านการ เคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ..... 62</li> <li>ระบบที่ไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีแรงต้านการ เคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ..... 64</li> <li>ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบ กระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วง ติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนาม แม่เหล็ก..... 66</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
5	
สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	70
สรุปผลการวิจัย.....	70
อภิปรายผลการวิจัย.....	71
ข้อเสนอแนะ.....	73
บรรณานุกรม.....	74
ภาคผนวก.....	77
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	132

## บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ค่าตัวเลขที่ส่งมาจากเมาส์(ค่า Y)เมื่อหมุนจานหมุนไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	44
2 ค่าตัวเลขที่ส่งมาจากเมาส์(ค่า Y)เมื่อหมุนจานหมุนไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	46
3 การเปรียบเทียบค่ามุมจากโปรแกรมกับค่ามุมจากแผ่นสเกลวัดมุม เมื่อเปลี่ยนมุมของจานหมุนเป็นค่าต่างๆ.....	53
4 ค่าเวลาที่วัดได้จากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าเวลาจากนาฬิกาจับเวลา.....	56
5 ค่าความถี่ที่คำนวณได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีต่างๆ.....	108
6 ค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีที่ 1.....	110
7 ค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีที่ 2.....	112
8 ค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีที่ 3.....	113
9 ค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีที่ 4.....	115
10 ค่าตัวประกอบการหน่วงจากการใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง.....	116
11 ค่าความถี่จากกราฟและค่าตัวประกอบการหน่วง เมื่อเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ (กรณีที่ 2 ในภาคผนวก ง).....	125
12 ค่าความถี่จากกราฟและค่าตัวประกอบการหน่วง เมื่อเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ (กรณีที่ 4 ในภาคผนวก ง).....	131

## บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แผนภาพส่วนประกอบต่างๆ ของเพนดูลัมบิด.....	4
2 รูปเพนดูลัมบิดที่ใช้ในงานวิจัย.....	5
3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น.....	10
4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กและมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น.....	11
5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยมีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ.....	12
6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิกโดยมีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ.....	13
7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยมีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ.....	16
8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ.....	16
9 เมาส์ที่มีปุ่มกดทำงาน 2 ปุ่มและ 3 ปุ่ม ตามลำดับ.....	18
10 ส่วนประกอบภายในของเมาส์.....	19
11 อุปกรณ์ต่างๆที่อยู่บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	20
12 ลักษณะตำแหน่งการจัดวางตัวส่งรังสีอินฟราเรด และตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด บริเวณรอบๆ จานหมุน.....	21

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
13 ส่วนหนึ่งของวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้าภายในเมาส์.....	22
14 ระดับความต่างศักย์ที่วัดได้ ที่ขาไอซีขาที่ 10 และ 12 ขณะที่ตัวตรวจจ็ับรังสีสามารถตรวจจ็ับรังสีอินฟราเรดที่ส่งมาจากตัวส่งรังสีอินฟราเรด และที่ขาไอซีขาที่ 11 และ 13 ขณะที่ตัวตรวจจ็ับรังสีถูกบังโดยจานเข้ารหัสภายในเมาส์ .....	23
15 การเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกันของช่อง สัญญาณเอ (ต่อกับขาไอซีขาที่ 10) และสัญญาณบี(ต่อกับขาไอซีขาที่ 12).....	24
16 แผนภาพของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (ในภาพประกอบ 13) ที่ต่ออยู่กับ ออสซิลโลสโคป.....	26
17 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสภายในเมาส์.....	26
18 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสที่หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	27
19 สัญญาณจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถบอกทิศทางการหมุนของจานเข้ารหัส ในเมาส์ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	27
20 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสที่หมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	28
21 สัญญาณจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถบอกทิศทางการหมุนของจาน เข้ารหัสในเมาส์ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	28
22 ภาพด้านหลังของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และบริเวณตัดแยกออก.....	33
23 ชิ้นส่วนของแกนหมุนที่ตัดแยกออกมาจาก แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์.....	33
24 การนำแกนหมุน และสายไฟติดตั้งบนบอร์ด.....	34
25 การนำท่อทรงกระบอกขนาดเล็ก ต่อตรงปลายของแกนหมุน.....	34
26 การเชื่อมต่อแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กับแกนหมุน.....	35
27 การนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บรรจุกล่อง.....	35
28 อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ของเพนดูลัมบิด.....	36
29 ด้านข้างของเพนดูลัมบิด ที่มีการนำวงล้อติดกับจานหมุน.....	36
30 การนำสายพานคล้องระหว่างแกนหมุน กับวงล้อบนจานหมุน.....	37
31 แผ่นสเกลสำหรับวัดมุม.....	42
32 การติดตั้งแผ่นสเกลสำหรับวัดมุม บนจานหมุนของเพนดูลัมบิด.....	43

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขที่ส่งจากเมาส์(ค่า Y) กับมุมของจานหมุน เมื่อหมุนจานหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา.....	45
34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขที่ส่งจากเมาส์(ค่า Y) กับมุมของจานหมุน เมื่อหมุนจานหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา.....	47
35 เวลาที่ปรากฏบนจอภาพ ขณะโปรแกรมกำลังวัดมุมของจานหมุน.....	48
36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อไม่มีแรงต้านจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดอยู่กับจานหมุน ในช่วงเวลา 0 – 30 วินาที.....	57
37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อไม่มีแรงต้านจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดอยู่กับจานหมุน ในช่วงเวลา 30 – 60 วินาที.....	58
38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อไม่มีแรงต้านจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดอยู่กับจานหมุน ในช่วงเวลา 60 – 90 วินาที.....	58
39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อไม่มีแรงต้านจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดอยู่กับจานหมุนเท่านั้น.....	59
40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ.....	60
41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ.....	61
42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีมวลถ่วงติดบนจานหมุนแต่ไม่มีสปริงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ.....	62

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบมีมวลถ่วงติดบนจานหมุนแต่ไม่มีสปริงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ.....	63
44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบไม่มีสปริงแต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่มากกระทำกับระบบ.....	64
45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุมเมื่อระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุนและมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ.....	65
46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ ในช่วงเวลา 0 – 30 วินาที.....	66
47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ ในช่วงเวลา 30 – 60 วินาที.....	67
48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ ในช่วงเวลา 150 – 180 วินาที....	67
49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำ ในช่วงเวลา 0 – 60 วินาที..	68

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบ แกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากกระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการ เคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำในช่วงเวลา 150 – 180 วินาที.....	69
51 สเกลสำหรับอ่านค่าแอมพลิจูดที่เวลาต่าง ๆ.....	106
52 การนำแผ่นสเกลไปอ่านค่าแอมพลิจูด ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการ กระจัดเชิงมุมกับเวลา.....	107
53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ในกรณีที่ 1.....	111
54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ในกรณีที่ 2.....	113
55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ในกรณีที่ 3.....	114
56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ในกรณีที่ 4.....	115
57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่ง แบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จาก การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ เท่ากับ 3 โวลต์) ในช่วงเวลา 0 – 30 วินาที.....	118
58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่ง แบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จาก การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ เท่ากับ 3 โวลต์) ในช่วงเวลา 30 – 60 วินาที.....	119
59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการ เคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่ม ความต่างศักย์เท่ากับ 3 โวลต์) .....	119
60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่ง แบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จาก การเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์ เท่ากับ 5 โวลต์) ในช่วงเวลา 0 – 30 วินาที.....	120

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์) ในช่วงเวลา 30 – 60 วินาที.....	121
62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบ แกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ(เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์).....	121
63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 7 โวลต์).....	122
64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ(เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 7 โวลต์).....	123
65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 9 โวลต์).....	124
66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 9 โวลต์).....	124

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบไม่มีสปริงแต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 3 โวลต์).....	126
68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 3 โวลต์).....	126
69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์).....	127
70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์).....	128
71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 7 โวลต์).....	129
72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 7 โวลต์).....	129

## บัญชีภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
73 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 9 โวลต์).....	130
74 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบ ไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 9 โวลต์).....	131

# บทที่ 1

## บทนำ

### ภูมิหลัง

ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีบทบาทในชีวิตประจำวันของเรามากขึ้น เช่น มีบทบาทในด้านการสื่อสาร การคมนาคม อุตสาหกรรม และการศึกษา เป็นต้น ด้านการศึกษาเริ่มมีการใช้คอมพิวเตอร์แพร่หลายมาก เช่น การใช้คอมพิวเตอร์เป็นสื่อการสอน การใช้คอมพิวเตอร์สร้างบทเรียนสำเร็จรูป เป็นต้น ในด้านของวิทยาศาสตร์ก็เช่นเดียวกันมีการใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือช่วยอำนวยความสะดวกในการออกแบบจำลองของการทดลองต่างๆ ช่วยในการบันทึกข้อมูลจำนวนมากๆ ช่วยในการวิเคราะห์คำนวณและอื่นๆอีกมากมาย เราสามารถใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือในการทดลองในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์เบื้องต้น หรือในห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ระดับสูงได้

เราสามารถนำอุปกรณ์ประกอบคอมพิวเตอร์ที่มีอยู่อย่างแพร่หลายและราคาถูก มาดัดแปลงใช้ประโยชน์ ในการทดลองทางฟิสิกส์ได้หลายอย่าง เช่น การดัดแปลงเมาส์เป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ การใช้จอภาพเป็นเครื่องมือแสดงกราฟของการทดลอง เป็นต้น

การนำเมาส์มาดัดแปลงเป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ สามารถนำมาใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์ได้หลายอย่าง เช่น

- การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือตรวจวัดหาระยะทางการเคลื่อนที่ ของเครื่องกลแอทวูด (Atwood 's Machine)
- การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือตรวจวัดหาระยะทางการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัม
- การใช้เมาส์เป็นอุปกรณ์ร่วมในการหาความเร็วของการแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกา

ผู้วิจัยเล็งเห็นว่าการศึกษาเมาส์มีความสำคัญ และมีประโยชน์ต่อการทดลองทางฟิสิกส์มาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงศึกษาการทำงานของเมาส์เพื่อดัดแปลงเมาส์เป็นเครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน และระบบที่ผู้วิจัยเลือกนำมาเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้คือ เพนดูลัมบิต ซึ่งเป็นระบบทางพลศาสตร์อย่างหนึ่งที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุนและเป็นระบบที่ที่มงานวิจัย ซึ่งเป็นคณะอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้ออกแบบเครื่องมือเอาไว้แล้ว

เนื่องจากงานหมุนในระบบเพนดูลัมบิตมีการเคลื่อนที่หมุนอยู่ตลอดเวลา จึงเกิดปัญหาว่าเราไม่สามารถใช้เครื่องมืออย่างง่าย(เช่น ไม้บรรทัด ไม้โปรเจคเตอร์ เป็นต้น) วัดมุมของงานหมุนที่หมุนเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ดัดแปลงส่วนประกอบภายในของเมาส์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบหมุน(ส่วนประกอบภายในนี้ มีลักษณะเป็นแกนหมุนที่เคลื่อนที่หมุนไปมาได้อย่างอิสระ) เพื่อใช้ติดตามการเคลื่อนที่ของงานหมุนได้ตลอดเวลา และนอกจากนี้สาเหตุอื่นๆ ที่ผู้วิจัยเลือกใช้เมาส์มาเป็นเครื่องมือตรวจวัดก็เนื่องมาจาก

- เมาส์เป็นอุปกรณ์ที่มี ราคาถูก สามารถหาทดแทนได้ง่าย และเป็นอุปกรณ์ที่รับส่งสัญญาณกับคอมพิวเตอร์ได้อย่างรวดเร็ว

- เมาส์เป็นอุปกรณ์ที่มีโปรแกรมขับเคลื่อน(Driver) ซึ่งให้ความสะดวกในการสื่อสารข้อมูลระหว่างเมาส์ กับโปรแกรมที่สร้างขึ้น

- เมาส์เป็นอุปกรณ์ที่สามารถประยุกต์ใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์ได้หลากหลาย นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ภาษาซี อันเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่สามารถ สังกานกับอุปกรณ์ภายนอกและเป็นที่ยอมรับในงานควบคุม มาเขียนโปรแกรมคำสั่งควบคุมการทำงานการรับส่งข้อมูลของเมาส์ด้วย ดังนั้นการใช้เมาส์มาดัดแปลงเป็นเครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน จะทำให้ได้ค่าตำแหน่งที่เวลาต่างๆ ซึ่งนำไปสู่การคำนวณความเร็วเชิงมุมขณะใดขณะหนึ่งของเพนดูลัมบิตได้

## จุดมุ่งหมายของการวิจัย

เพื่อศึกษาการใช้เมาส์ เป็นเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิต

### ขอบเขตของการวิจัย

1. ดัดแปลงเมาส์เพื่อใช้เป็นเครื่องมือตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด
2. เขียนโปรแกรมคำสั่ง เพื่อควบคุมการทำงานการรับส่งข้อมูลของเมาส์ และเก็บตำแหน่งของจานหมุน ที่หมุนเปลี่ยนไปในแต่ละเวลา
3. เขียนโปรแกรมคำสั่ง เพื่อประมวลผล และแสดงผลของการวัดในรูปกราฟการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด
4. ทดสอบเครื่องมือวัด และโปรแกรมที่เขียนขึ้นเพื่อวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด

### ความสำคัญของงานวิจัย

1. ทำให้ได้เครื่องมือสำหรับตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด
2. สามารถนำอุปกรณ์ที่เป็นเครื่องมือวัด และโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ไปประยุกต์ใช้กับการทดลองในทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่แบบหมุนเรื่องอื่น ๆ ได้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

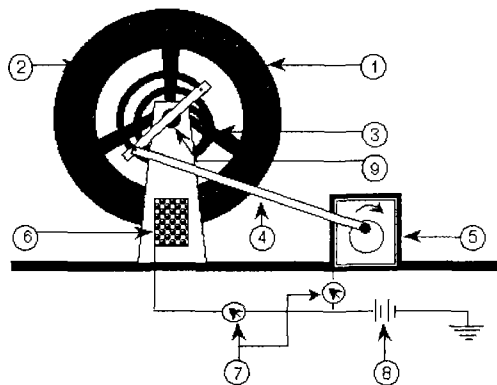
ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1. เพนดูลัมบิด (Torsion Pendulum)
2. เมาส์ (Mouse)

#### 1. เพนดูลัมบิด ( Torsion Pendulum )

##### 1.1 ลักษณะของเพนดูลัมบิด

เพนดูลัมบิดที่ใช้ประกอบการวิจัยนี้ เป็นระบบทางพลศาสตร์อย่างหนึ่งที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน ส่วนประกอบต่างๆ ในระบบ แสดงดังภาพประกอบ 1

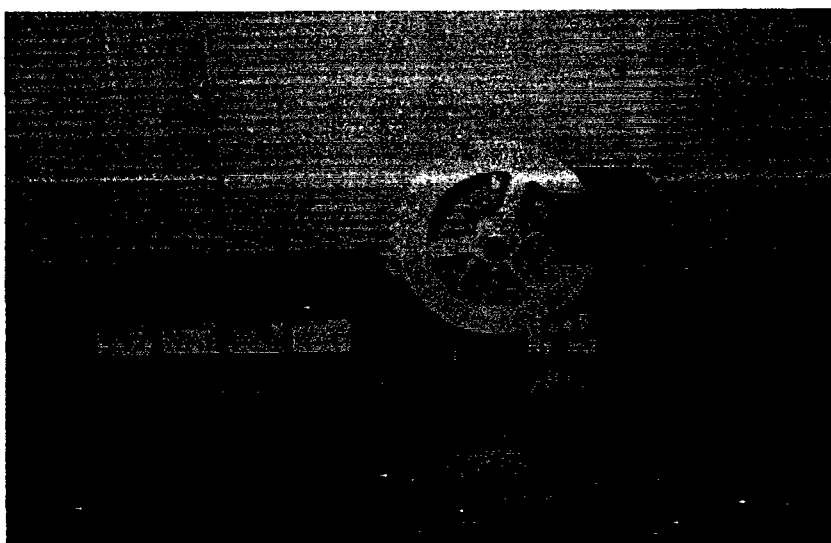


1. จานหมุน
2. มวลตัว
3. สปริงขด
4. ก้านส่งแรง
5. มอเตอร์ไฟฟ้า
6. ขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก
7. แอมมิเตอร์
8. แหล่งกำเนิดไฟฟ้า
9. แกนตั้งฉากกับจานหมุน

ภาพประกอบ 1 แผนภาพส่วนประกอบต่างๆ ของเพนดูลัมบิด

เพนดูลัมบิดในภาพประกอบ 1 มีลักษณะเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ประกอบด้วยจานหมุน มีลักษณะเป็นจานกลมแบน(หมายเลข 1) บริเวณขอบของจานหมุนมีมวลถ่วง(หมายเลข 2) ที่ทำให้เสียสมดุลติดอยู่ จานหมุนสามารถหมุนได้คล่องรอบแกนที่ตรึงอยู่กับที่ ซึ่งผ่านจุดศูนย์กลาง และตั้งฉากกับระนาบจานหมุน แกนนี้ยึดติดอยู่กับปลายข้างหนึ่งของสปริงชด (หมายเลข 3) ส่วนปลายอีกข้างหนึ่งของสปริงชดติดอยู่กับก้านส่งแรง(หมายเลข 4) ก้านส่งแรงต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้า(หมายเลข 5)ที่สามารถปรับรอบการหมุนได้ ใช้สำหรับเป็นต้นกำเนิดแรงขับที่มีลักษณะเป็นคาบ เพื่อส่งแรงกระทำกับระบบ(ในสภาวะปกติสปริงชดด้านที่ติดกับก้านส่งแรงจะอยู่กับที่ไม่เคลื่อนไหว แต่ถ้ามีแรงขับจากภายนอกมากระทำกับระบบ ปลายสปริงชดด้านนี้จะไม่อยู่กับที่อีกต่อไป)

นอกจากนี้ในระบบยังมีขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก(หมายเลข 6) ใช้เป็นตัวหน่วงการเคลื่อนที่ของจานหมุน มีหลักการทำงานคือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านจานหมุน การเคลื่อนที่ของจานหมุนส่งผลให้เกิดกระแสเหนี่ยวนำที่สร้างสนามแม่เหล็ก ในทิศทางต้านกับสนามแม่เหล็กเดิม(สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก) ทำให้เกิดการหน่วงการเคลื่อนที่ของจานหมุนในระบบ ทั้งมอเตอร์และขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก ต่ออยู่กับแอมมิเตอร์(หมายเลข7) โดยเราสามารถปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านอุปกรณ์ทั้งสองชนิดได้ ส่วนอุปกรณ์เพนดูลัมบิดที่ใช้ในงานจริง แสดงไว้ในภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 รูปเพนดูลัมบิดที่ใช้ในงานวิจัย

## 1.2 สมการการเคลื่อนที่ของเพนดูลัมบิด

เพนดูลัมบิดเป็นระบบทางพลศาสตร์ที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน สามารถอธิบายสภาวะการเคลื่อนที่ของระบบ ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ความเฉื่อยของเพนดูลัมบิดรอบแกนของจานหมุน(I) และทอร์กเนื่องจากแรงทั้งหมดที่กระทำต่อระบบ(N) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของการกระจัดเชิงมุม( $\theta$ ) และความเร็วเชิงมุม( $\dot{\theta}$ ) ที่ขณะเวลา(t)ใดๆดังสมการการเคลื่อนที่ดังนี้<sup>1</sup>

$$I (d^2\theta / dt^2) = N (\dot{\theta}, \theta, t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

พิจารณาทอร์กเนื่องจากแรงทั้งหมดที่กระทำต่อระบบ ประกอบด้วย

### 1.2.1 ทอร์กของแรงโน้มถ่วง

เป็นทอร์กที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำต่อมวลที่ติดอยู่บนขอบจานหมุน เมื่อติดมวลถ่วงบนขอบจานหมุน ทำให้จานหมุนเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุลงเป็นมุม  $\theta$  (เป็นมุมระหว่างเส้นรัศมีที่เชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางของจานหมุนและมวลถ่วง กับรัศมีที่ชี้ไปยังตำแหน่งสมดุลง) สมการของทอร์กอันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงกระทำกับมวลถ่วง แสดงดังสมการ(2)

$$\text{ทอร์กของแรงโน้มถ่วง} = - mgr \sin \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

โดยที่  $m$  คือ น้ำหนักมวลถ่วง , $g$  คือ ความโน้มถ่วงที่ผิวโลก และ  $r$  คือ ระยะทางจากจุดศูนย์กลางมวลถ่วงจนถึงจุดศูนย์กลางของจานหมุน

---

<sup>1</sup>นิรมล ปีตะนิละผลิน และคนอื่นๆ. (2536). "พฤติกรรมแบบเคออสของเพนดูลัมบิด," ใน *วิทยาศาสตร์ มศว.* หน้า 21 – 30.

### 1.2.2 ทอร์กของแรงดึงกลับ

มวลถ่วงที่ติดบนขอบของจานหมุน ทำให้จานหมุนเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุล เป็นการกระจัดเชิงมุม( $\theta$ ) ส่งผลให้เกิดแรงดึงกลับของสปริง ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับการกระจัดเชิงมุม ทอร์กของแรงดึงกลับ แสดงดังสมการ(3)

$$\text{ทอร์กของแรงดึงกลับ} = -\kappa\theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

โดยที่  $\kappa$  คือ ค่าคงที่ของการบิด(Torsion Constant) ซึ่งในที่นี้ขึ้นอยู่กับค่านิคของสปริง(Spring Constant)

### 1.2.3 ทอร์กของแรงต้านการเคลื่อนที่

เป็นทอร์กที่เกิดจากขดลวดสร้างสนามแม่เหล็กกระทำต่อจานหมุนในระบบ โดยแรงต้านการเคลื่อนที่มีทิศทางตรงข้ามกับความเร็วเชิงมุม ( $\dot{\theta}$ ) แสดงดังสมการ(4)

$$\text{ทอร์กของแรงต้านการเคลื่อนที่} = -\beta\dot{\theta} \quad \dots\dots\dots (4)$$

โดยที่  $\beta$  คือ ค่าคงที่ของการแปรผัน และ  $\dot{\theta}$  คือ ความเร็วเชิงมุม

### 1.2.4 ทอร์กของแรงขับภายนอก

เมื่อมีแรงขับจากภายนอกที่มีลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ ปลายสปริงขดด้านที่ติดกับก้านส่งแรงจะเคลื่อนที่ด้วยความถี่เชิงมุม  $\Omega$  ซึ่งเป็นความถี่เชิงมุมของแรงขับ ทอร์กของแรงขับภายนอก แสดงดังสมการ(5)

$$\text{ทอร์กของแรงขับภายนอก} = F_0 \cos(\Omega t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

โดยที่  $F_0$  คือ แอมพลิจูดของทอร์กจากแรงขับภายนอก

ดังนั้นเมื่อแทนส่วนประกอบทอร์กของแรงทั้งหมด ที่กระทำต่อจานหมุนของเพนดูลัม บิด ในสมการ(1) จะได้ว่า

$$I (d^2\theta / dt^2) = - mgr \sin(\theta) - \kappa\theta - \beta\dot{\theta} + F_0 \cos(\Omega t) \dots\dots\dots (6)$$

จากรายงานการวิจัยเกี่ยวกับพฤติกรรมของเพนดูลัมบิด<sup>1</sup> ในสภาวะสมดุลทอร์กเนื่อง จากแรงดึงกลับของสปริง จะเท่ากับพอดีกับทอร์กเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่อมวลบนขอบ จานหมุน และเมื่อบิดจานหมุนให้เคลื่อนไปจากตำแหน่งสมดุลแล้วปล่อยให้เคลื่อนที่อย่างอิสระ หากไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่กระทำต่อระบบ จานหมุนจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาผ่านตำแหน่ง สมดุล เป็นการเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิกที่มีแอมพลิจูดคงที่ แต่หากมีแรงต้านการ เคลื่อนที่กระทำต่อระบบ การเคลื่อนที่ของจานหมุนจะมีแอมพลิจูดค่อยๆลดลง และเมื่อเราใส่ แรงขับจากภายนอกที่มีลักษณะเป็นคาบกระทำต่อระบบ จานหมุนจะสามารถคงสภาพการ เคลื่อนที่ได้ตลอดไป ตราบเท่าที่ยังมีแรงขับจากภายนอกมากระทำอยู่

---

<sup>1</sup>นิรมล ปิตะนิละผลิน และคนอื่นๆ. (2536). “พฤติกรรมแบบเคออสของเพนดูลัมบิด,” ใน *วิทยาศาสตร์ มศว.* หน้า 21 – 30.

### 1.3 คำตอบสมการการเคลื่อนที่ของเพนดูลัมบิด ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา(Phase Time) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม(Phase Space)

ในการวิจัยนี้ ศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด 5 กรณี คือ

1.3.1 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิกโดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น

1.3.2 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ

1.3.3 ระบบที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน แต่ไม่มีสปริง และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ

1.3.4 ระบบที่ไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ

1.3.5 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบ (Periodic) กระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

การหาคำตอบของสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถทำได้หลายวิธี เช่น ใช้วิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์โดยวิธีการทั่วไป หรือใช้วิธีการเชิงตัวเลข(Numerical Method)ก็ได้ ขึ้นอยู่กับรูปแบบสมการการเคลื่อนที่ของแต่ละกรณี คำตอบของสมการสามารถเขียนในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา(Phase Time) และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม(Phase Space) ลักษณะเส้นกราฟที่ปรากฏในกราฟทั้งสองชนิด จะแสดงถึงพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของระบบ

ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้กราฟทั้งสองชนิดศึกษาพฤติกรรมของการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด ลักษณะเส้นกราฟที่ปรากฏในระบบทั้ง 5 กรณี แสดงดังต่อไปนี้

1.3.1 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิกโดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น สมการ(6) จะลดรูปสมการเป็น

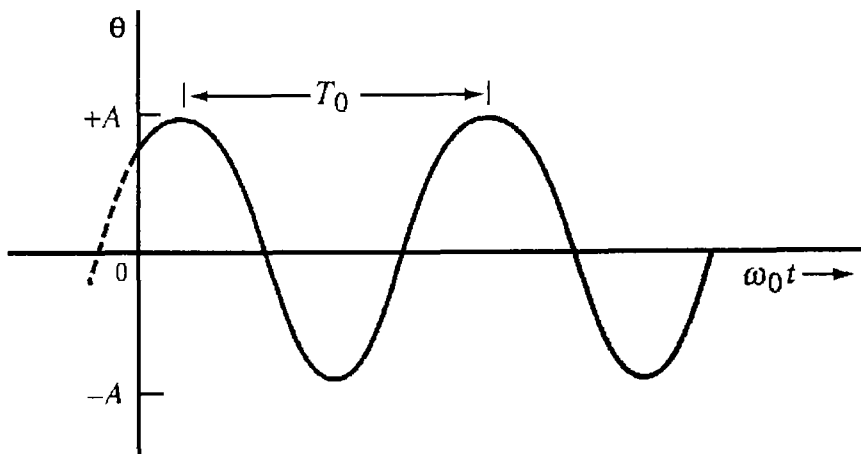
$$I (d^2\theta / dt^2) = -\kappa\theta \quad \dots\dots\dots (7)$$

จากสมการ(7) คำตอบของสมการมีรูปแบบทั่วไป ดังนี้

$$\theta(t) = A \sin(\omega_0 t + \phi) \quad \dots\dots\dots (8)$$

โดยที่  $A$  เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้นของการแกว่งเรียกว่า แอมพลิจูด,  $\omega_0$  คือ ความถี่เชิงมุม(Angular Frequency) มีค่าเท่ากับ  $\sqrt{K/I}$  และ  $\phi$  คือ มุมเฟส(Phase Angle)

สมการ(8) เขียนเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม กับเวลา ดังภาพประกอบ 3 ลักษณะเส้นกราฟที่ปรากฏจะแสดงการแกว่งแบบฮาร์มอนิก และมีขนาดของแอมพลิจูดคงที่



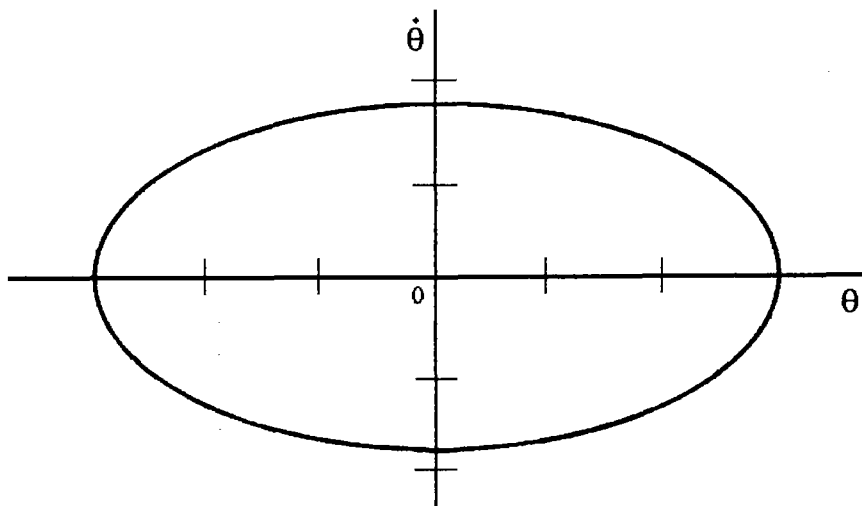
ภาพประกอบ 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น

จากสมการ(8) หาความเร็วเชิงมุมได้ดังสมการ(9) นำความเร็วเชิงมุมไปเขียนรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม ซึ่งเป็นกราฟที่มีองค์ประกอบในแนวตั้งเป็นแกนของความเร็วเชิงมุม และแนวนอนเป็นแกนของการกระจัดเชิงมุม ดังสมการ(10)

$$\dot{\theta}(t) = \omega_0 A \cos(\omega_0 t + \phi) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\theta^2 / A^2 + \dot{\theta}^2 / A^2 \omega_0^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (10)$$

สมการ(10) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม ลักษณะเส้นกราฟที่ปรากฏเป็นแบบวงปิด ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น

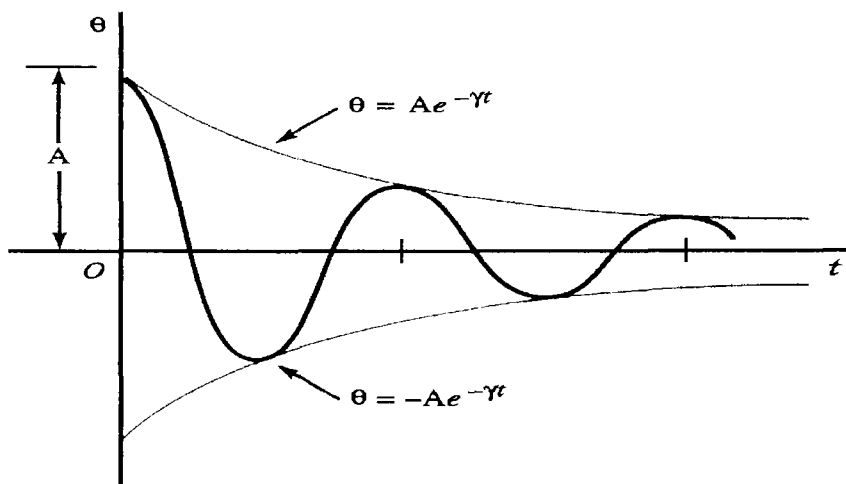
1.3.2 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ สมการ(6) จะลดรูปสมการเป็น

$$I(d^2\theta / dt^2) = -\kappa\theta - \beta\dot{\theta} \quad \dots\dots\dots (11)$$

คำตอบของสมการนี้มีรูปแบบทั่วไป ดังสมการ(12) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เขียนกราฟดังภาพประกอบ 5 ตามลำดับ

$$\theta(t) = e^{-\gamma t} (A \sin(\omega_d t + \phi)) \quad \dots\dots\dots (12)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ ตัวประกอบการหน่วง(Damping Factor) มีค่าเท่ากับ  $\beta / 2I$  ,  $A$  คือ แอมพลิจูด ,  $\phi$  คือ มุมเฟส และ  $\omega_d$  คือ ความถี่เชิงมุมของการหน่วง มีค่าเท่ากับ  $\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$

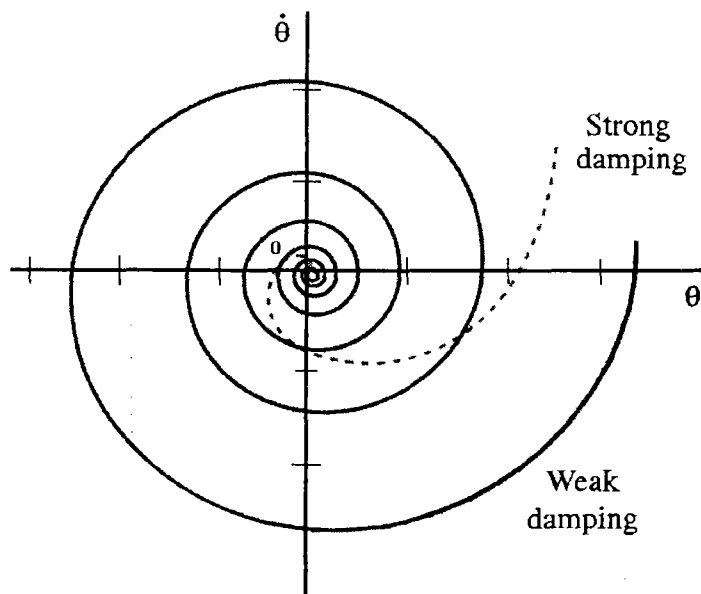


ภาพประกอบ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิกโดยมีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ

จากภาพประกอบ 5 ลักษณะเส้นกราฟแสดงการแกว่งแบบฮาร์มอนิกโดยขนาดของแอมพลิจูดลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ส่วนลักษณะกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เราใช้สมการเปลี่ยนรูปแบบเชิงเส้น(Linear Transformation)  $y = \dot{\theta} + \gamma\theta$  แทนในโคออร์ดิเนตของกราฟ จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta$  และ  $\dot{\theta}$  ดังสมการ

$$\theta^2/\rho^2 + (\dot{\theta} + \gamma\theta)^2/\rho^2\omega_d^2 = 1 \quad \dots\dots\dots (13)$$

โดยที่  $\rho$  มีค่าเท่ากับ  $Ae^{-\gamma t}$  จะเห็นได้ว่า  $\rho$  มีค่าลดลงตามเวลา ทำให้เส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม มีลักษณะเป็นเกลียว (Spiral) วนเข้าหาจุดกำเนิด ส่วนจำนวนรอบของการวนเป็นเกลียวจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าของตัวประกอบการหน่วง( $\gamma$ ) คือ ค่าตัวประกอบการหน่วงมีค่าน้อยจำนวนรอบของการวนเป็นเกลียวจะมาก และจะตรงข้ามกันเมื่อค่าตัวประกอบการหน่วงมีค่ามาก ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยมีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ

1.3.3 ระบบที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน แต่ไม่มีสปริง และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ มีสมการการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้

$$I (d^2\theta / dt^2) = - mgr \sin(\theta) \quad \dots\dots\dots ( 14 )$$

สมการ(14) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เอกพันธ์(Nonhomogeneous) การหาคำตอบของสมการสามารถใช้วิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์เชิงตัวเลข(Numerical Method) แล้วแสดงผลของคำตอบในรูปของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม

เมื่อ  $\theta$  มีค่าน้อยๆ เส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา จะแสดงลักษณะการแกว่งแบบฮาร์มอนิก และมีขนาดของแอมพลิจูดคงที่ เช่นเดียวกับภาพประกอบ 3 ขนาดของแอมพลิจูดอาจไม่เท่ากับกรณี 1.3.1 และเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม มีลักษณะเป็นวงปิดเช่นเดียวกับภาพประกอบ 4 แต่ขนาดของวงปิดอาจไม่เท่ากัน

1.3.4 ระบบที่ไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ มีสมการการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้

$$I (d^2\theta / dt^2) = - mgr \sin(\theta) - \beta \dot{\theta} \quad \dots\dots\dots (15)$$

เราสามารถใช่วิธีการแก้สมการเชิงอนุพันธ์เชิงตัวเลขหาคำตอบของสมการ(15)ได้ แล้วแสดงผลของคำตอบในรูปกราฟทั้งสองชนิด โดยเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา จะแสดงลักษณะการแกว่งแบบฮาร์มอนิก และมีขนาดของแอมพลิจูดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เช่นเดียวกับภาพประกอบ 5 และเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม มีลักษณะเป็นเกลียว เช่นเดียวกับภาพประกอบ 6

1.3.5 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ โดยที่งานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก มีสมการการเคลื่อนที่ดังต่อไปนี้

$$I (d^2\theta / dt^2) = -\kappa\theta + F_0 \cos(\Omega t) \quad \dots\dots\dots (16)$$

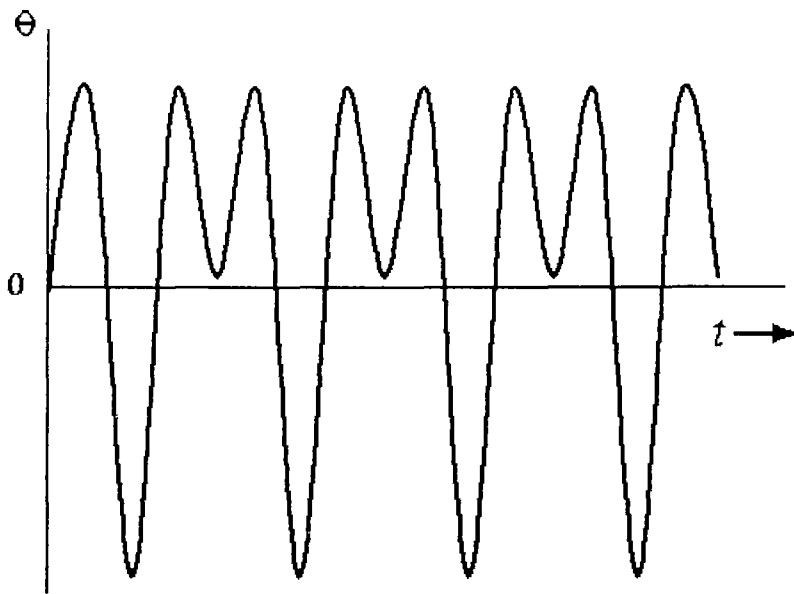
หรือ

$$I (d^2\theta / dt^2) + \kappa\theta = F_0 \cos(\Omega t) \quad \dots\dots\dots (17)$$

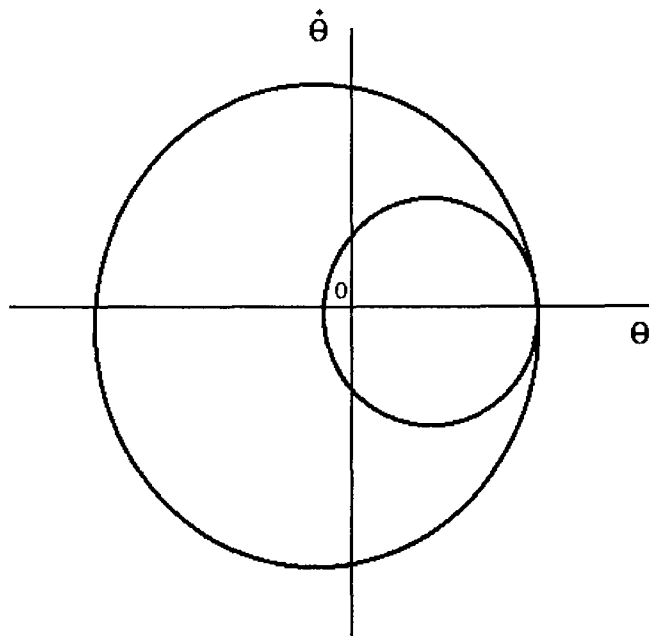
คำตอบของสมการ อยู่ในรูปของ

$$\theta(t) = A \sin(\omega_0 t) + B \cos(\Omega t) \quad \dots\dots\dots (18)$$

โดยที่ A คือ แอมพลิจูดของการแกว่งที่ความถี่ธรรมชาติ  $\omega_0$  และ B คือ แอมพลิจูดของการแกว่งเนื่องจากความถี่ของแรงขับภายนอกลักษณะเป็นคาบ  $\Omega$  หากงานหมุนเคลื่อนที่ด้วยความถี่ 2 ค่า ลักษณะเส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม แสดงดังภาพประกอบ 7 และ 8



ภาพประกอบ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยมีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ



ภาพประกอบ 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระตุ้นเชิงมุม เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ

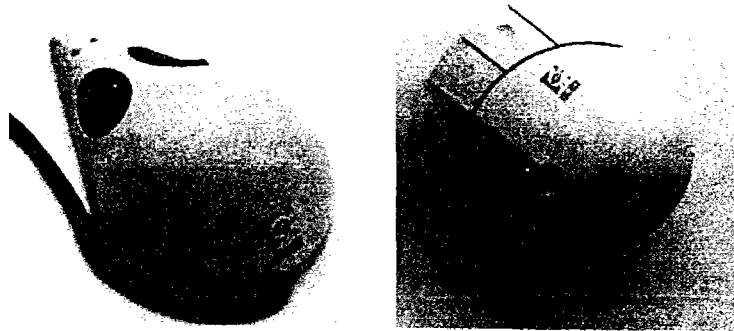
## 2. เมาส์ (Mouse)

ในอดีตอุปกรณ์เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับการป้อนข้อมูลหรือคำสั่ง มีเพียงอุปกรณ์ที่เรียกว่า “คีย์บอร์ด(Keyboard)” อย่างเดียวเท่านั้น เมื่อผู้ใช้งานคอมพิวเตอร์ใช้งานไปเรื่อยๆ พบว่าเริ่มมีปัญหาในการป้อนข้อมูลหรือคำสั่ง เช่น ไม่มีความสะดวกในการป้อนข้อมูลหรือไม่ทราบว่าจะป้อนที่ตรงไหนหรือจะกดบนคีย์บอร์ดตรงไหน และการใช้ซอฟต์แวร์(Software)บางอย่าง เช่น โปรแกรมโลตัส (Lotus Program) สำหรับผู้ใช้ที่ไม่มีความชำนาญอาจไม่ทราบว่าต้องกดปุ่มตัวอักษรใดในการเก็บข้อมูลลงแผ่นดิสก์(Floppy Disk) ทำให้เสียเวลาในการป้อนข้อมูลมาก เป็นต้น จากปัญหาเหล่านี้จึงมีการคิดประดิษฐ์อุปกรณ์ที่ผู้ใช้คอมพิวเตอร์สามารถป้อนข้อมูลหรือคำสั่งได้ง่ายและสะดวกขึ้น อุปกรณ์นี้ถูกออกแบบให้ผู้ใช้สามารถเคลื่อนย้ายตัวอุปกรณ์ด้วยมือ ซึ่งทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของภาพที่แทนการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์นั้น อุปกรณ์ชนิดนี้ถูกเรียกว่า “เมาส์ (Mouse)” เมาส์เป็นอุปกรณ์ที่มีราคาถูก หาซื้อได้ง่ายและเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับโปรแกรมทำงานในคอมพิวเตอร์ได้ดี เช่น ระบบปฏิบัติการวินโดวส์(Window Operating System) เป็นต้น หากผู้ใช้ต้องการจะทำงานหรือป้อนข้อมูล ก็เพียงแค่เลื่อนรูปภาพซึ่งเรียกว่า “เคอร์เซอร์(Cursor)” ไปยังตำแหน่งที่แทนงานหรือฟังก์ชันที่ต้องการ แล้วกดปุ่มบนเมาส์ก็จะทำให้ได้งานที่ต้องการ ดังนั้นเมาส์จึงเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้งานคอมพิวเตอร์มาก ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับเมาส์ ตามลำดับหัวข้อต่อไปนี้

- 2.1 ลักษณะของเมาส์
- 2.2 ชนิดของเมาส์
- 2.3 ส่วนประกอบภายในของเมาส์ชนิดที่ใช้หลักการเชิงกลร่วมกับแสง
- 2.4 วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้า
- 2.5 หลักการทำงานของเมาส์ชนิดที่ใช้หลักการเชิงกลร่วมกับแสง
- 2.6 การบอกทิศทางการหมุนของส่วนประกอบภายในเมาส์
- 2.7 การหาขนาดมุมของจานเข้ารหัสภายในเมาส์

## 2.1 ลักษณะของเมาส์

เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดนี้มีลักษณะภายนอกที่ประกอบด้วยตัวกล่องที่มีสายเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ติดอยู่ที่ปลายข้างหนึ่ง ทำให้มีลักษณะเหมือนหนูจึงถูกเรียกว่า “เมาส์(Mouse)”<sup>1</sup> บนตัวกล่องเมาส์มีปุ่มกดทำงานอยู่ อาจจะมี 2 หรือ 3 ปุ่มก็ได้ ดังภาพประกอบ 9 เราสามารถใช้ปลายนิ้วกดปุ่มบนเมาส์เพื่อสั่งงานตามความต้องการได้



ภาพประกอบ 9 เมาส์ที่มีปุ่มกดทำงาน 2 ปุ่มและ 3 ปุ่ม ตามลำดับ

ที่มา : Fuller, F. & Manning, W. (1997). *Computer and Information Processing*. 2nd ed. United State: Course Technology.

## 2.2 ชนิดของเมาส์

ในปัจจุบันมีการผลิตเมาส์ออกมามากมาย เราสามารถแบ่งชนิดของเมาส์ได้โดยใช้หลักการทำงานของเมาส์เป็นเกณฑ์ในการแบ่ง ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

### 2.2.1 เมาส์ที่ใช้หลักการเชิงกล (Mechanical Mouses)

เป็นเมาส์ชนิดบรรจุลูกบอลทรงกลมเอาไว้ที่ฐานของเมาส์ เมื่อลูกบอลทรงกลมสัมผัสกับพื้นผิวและมีการเคลื่อนที่ จะทำให้แกนวงล้อภายในเมาส์เคลื่อนที่ตามไปด้วย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของตัวต้านทานปรับค่าได้(Potentiometer) ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความต้านทานนี้ถูกนำไปคำนวณหาทิศทาง และระยะทางที่เมาส์เคลื่อนที่ไปได้

<sup>1</sup> White, R. (1994). *How Computers Work*. p. 128.

### 2.2.2 เมาส์ที่ใช้หลักการแสง (Optical Mouses)

เมาส์ชนิดนี้จะใช้งานร่วมกับแผ่นรองเมาส์ชนิดพิเศษ (Special Mouse Pad) ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตาราง มีหลักการทำงาน คือ ขณะที่เมาส์เคลื่อนที่ผ่านเส้นตาราง เมาส์จะอาศัยหลักการตกกระทบและการสะท้อนกลับของลำแสงภายในตัวกล่องเมาส์ เป็นข้อมูลในการคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางที่เมาส์เคลื่อนที่ไปได้

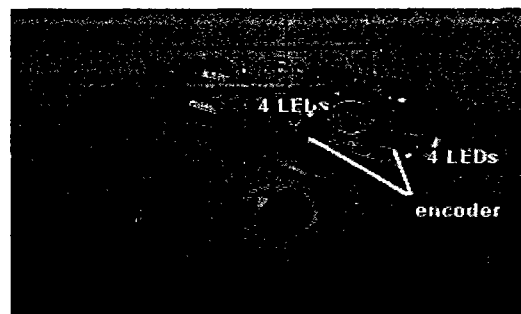
### 2.2.3 เมาส์ที่ใช้หลักการเชิงกลร่วมกับแสง (Optomechanical Mouses)

เป็นเมาส์ที่ใช้หลักการทำงาน 2 อย่างคือ หลักการเชิงกลและหลักการของแสง เมาส์ชนิดนี้มีลูกบอลทรงกลมอยู่ที่ฐานของตัวกล่อง เมื่อลูกบอลสัมผัสกับพื้นผิวและมีการเคลื่อนที่ ลูกบอลนี้จะกลิ้งส่งผลให้จานเข้ารหัสภายในเมาส์หมุนตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่อยู่ระหว่างตัวส่งรังสีอินฟราเรดและตัวตรวจจับรังสี ทำให้บอกได้ว่าในขณะนั้นเมาส์เคลื่อนที่ไปในทิศทางใดและมีระยะทางเท่าไร

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ เมาส์ที่ใช้หลักการเชิงกลร่วมกับแสง (Optomechanical Mouse) ที่มีสายเคเบิลเชื่อมต่อกับซีเรียลพอร์ตของคอมพิวเตอร์ (เป็นซีเรียลเมาส์ชนิดหนึ่ง) เป็นอุปกรณ์ที่ดัดแปลงเป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่เชิงมุมของเพนดูลัมบิด รายละเอียดของหลักการการทำงานของเมาส์ชนิดนี้จะกล่าวในหัวข้อ 2.5

## 2.3 ส่วนประกอบภายในของเมาส์ชนิดที่ใช้หลักการเชิงกลร่วมกับแสง

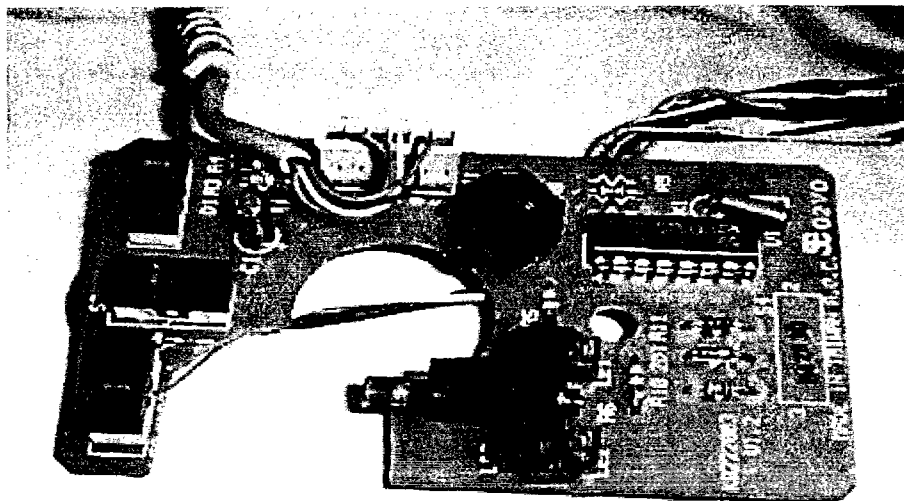
เมื่อถอดน็อตที่ยึดตัวกล่องเมาส์ออก จะพบว่า มีส่วนประกอบภายในที่เห็นได้เด่นชัดอยู่ 2 ชิ้น คือ ลูกบอลทรงกลม (Ball) และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Circuit Board) ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 ส่วนประกอบภายในของเมาส์

ที่มา : *Hacking a Mouse for Encoders*. (Online). (2000,June). Available Telnet: boondog.com.

อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างสัญญาณไฟฟ้า และตรวจวัดการเคลื่อนที่ของเมาส์อยู่บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 อุปกรณ์ต่างๆ ที่อยู่บนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ส่วนประกอบสำคัญ ที่ใช้ในการตรวจวัดการเคลื่อนที่ภายในเมาส์ คือ

2.3.1 วงจรอิเล็กทรอนิกส์แปลงสัญญาณไฟฟ้า จากรังสีอินฟราเรดไปเป็นพัลส์ (Pulse) ของศักย์ไฟฟ้า

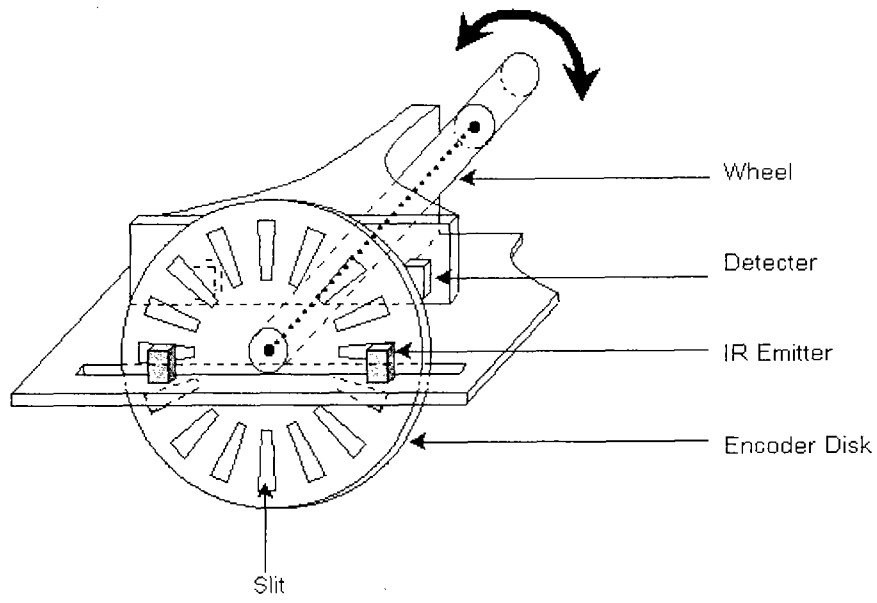
2.3.2 แกนวงล้อขนาดเล็ก 2 ชั้น (Wheels) ที่สัมผัสกับลูกบอล (แกนทั้งสองอยู่ในแนวตั้งฉากกัน) แกนวงล้อนี้สามารถหมุนได้อย่างอิสระตามการกลิ้งของลูกบอล และแกนวงล้อแต่ละชั้นเป็นอิสระต่อกัน

2.3.3 จานเข้ารหัส 2 ชั้น (Encoder Disks) ทำด้วยพลาสติกสีดำขนาดเล็กและบริเวณขอบของจานเข้ารหัสมีช่องที่ถูกเจาะเอาไว้หลายช่อง จานเข้ารหัสนี้ติดอยู่กับแกนวงล้อในข้อ 2.3.2

2.3.4 ตัวส่งรังสีอินฟราเรด 2 คู่ (IR Emitters)

2.3.5 ตัวตรวจจับรังสี 2 คู่ (Detectors)

อุปกรณ์ในข้อ 2.3.4 และข้อ 2.3.5 ถูกจัดวางรอบจานเข้ารหัสในตำแหน่งที่เหมาะสม แสดงดังภาพประกอบ 12

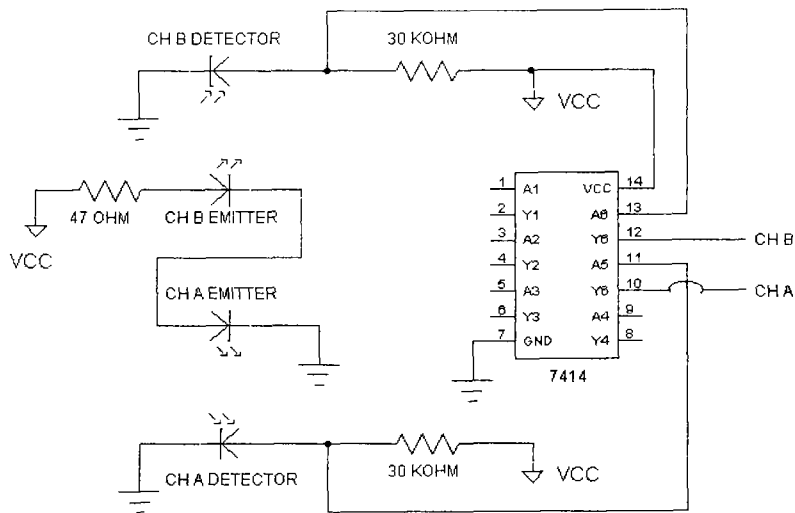


ภาพประกอบ 12 ลักษณะตำแหน่งการจัดวาง ตัวส่งรังสีอินฟราเรดและตัวตรวจจับรังสีอินฟราเรด บริเวณรอบๆ จานเข้ารหัส

1  
10/25/2564 7:07

## 2.4 วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้า

วงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้าเป็นวงจรที่อยู่ภายในเมาส์ เราสามารถศึกษาหลักการทำงานของวงจรนี้ได้ตามแผนภาพวงจร ในภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 ส่วนหนึ่งของวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้าภายในเมาส์

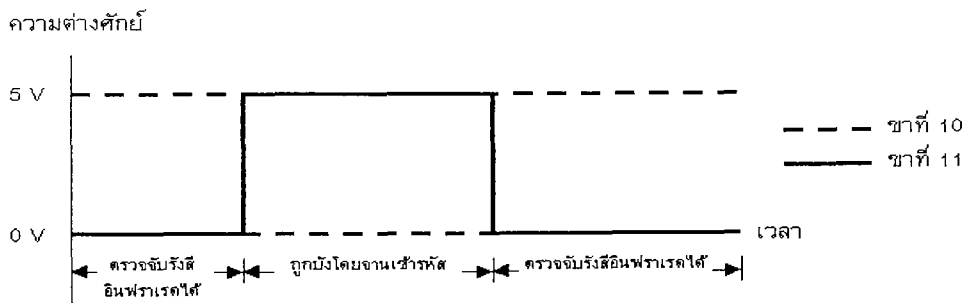
ที่มา : *Hacking a Mouse for Encoders.* (Online). (2000,June). Available Telnet: boondog.com.

ภาพประกอบ 13 เป็นการแสดงส่วนหนึ่งของแผงวงจรสร้างสัญญาณไฟฟ้าภายในเมาส์ ในวงจรมีการใช้ไอซีเบอร์ 7414 เป็นชิพที่รับส่งข้อมูลตำแหน่งงานเข้ารหัสภายในเมาส์ ในภาพประกอบ 13 มีการใช้ขาของไอซีทั้งหมด 6 ขา คือขาที่ 7 ,10 ,11 ,12 ,13 และ 14 ตามลำดับ รายละเอียดการทำงานของขาไอซีแต่ละขามีดังต่อไปนี้

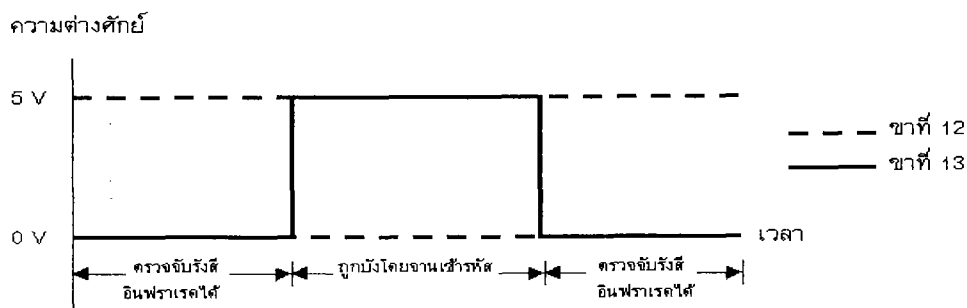
- ขาที่ 7 ใช้เชื่อมต่อเพื่อเป็นสายดิน (Ground) ของวงจร
- ขาที่ 10 และ 12 ต่อเข้ากับช่องสัญญาณเอและสัญญาณบี (Channel A and Channel B) ตามลำดับ เพื่อใช้เป็นทางส่งข้อมูลขาออก(Outputs)
- ขาที่ 11 และ 13 ต่อเข้ากับตัวตรวจจับรังสีเพื่อใช้เป็นทางเข้าของข้อมูล (Inputs)
- ขาที่ 14 ต่อเข้ากับแหล่งจ่ายไฟที่มีขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้า 5 โวลต์

พิจารณาขาไอซีขาที่ 10 และขาที่ 11 (เป็นคู่ของทางเข้าและทางออกข้อมูล) มีการเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ ดังภาพประกอบ 14(ก) คือ เมื่อตัวตรวจจับรังสีสามารถตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่ส่งมาจากตัวส่งรังสีอินฟราเรดได้ ความต่างศักย์ขาที่ 11 จะมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ และความต่างศักย์ขาที่ 10 มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ แต่ถ้าตัวตรวจจับรังสีถูกบังโดยจานเข้ารหัสภายในแมส จะทำให้ความต่างศักย์ขาที่ 11 มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์และความต่างศักย์ขาที่ 10 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์

ทำนองเดียวกันพิจารณาขาไอซีขาที่ 12 และขาที่ 13 (เป็นอีกคู่หนึ่งของทางเข้าและทางออกข้อมูล) จะมีการเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ ดังภาพประกอบ 14(ข) คือ เมื่อตัวตรวจจับรังสีสามารถตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่ส่งมาจากตัวส่งรังสีอินฟราเรดได้ ความต่างศักย์ขาที่ 13 จะมีค่าเท่ากับ 0 โวลต์ และความต่างศักย์ขาที่ 12 มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์ แต่ถ้าตัวตรวจจับรังสีถูกบังโดยจานเข้ารหัสภายในแมส ก็จะทำให้ความต่างศักย์ขาที่ 13 มีค่าเท่ากับ 5 โวลต์และความต่างศักย์ขาที่ 12 มีค่าเท่ากับ 0 โวลต์



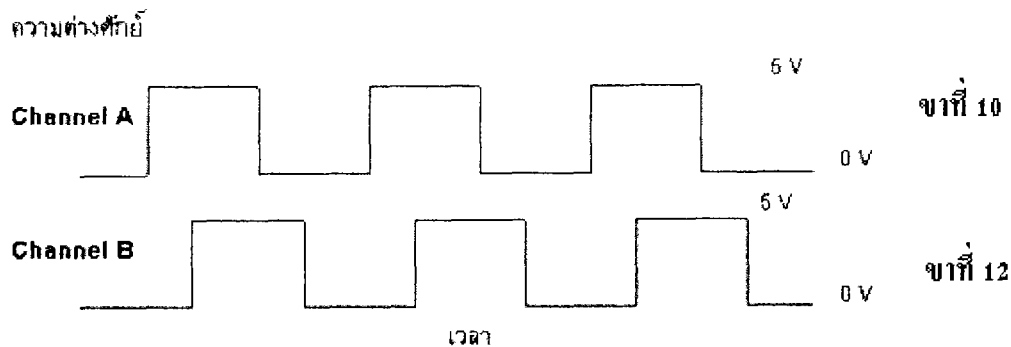
( ก )



( ข )

ภาพประกอบ 14 ระดับความต่างศักย์ที่วัดได้ ที่ขาไอซีขาที่ 10 และ 12 ขณะที่ตัวตรวจจับรังสีสามารถตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่ส่งมาจากตัวส่งรังสีอินฟราเรด และที่ขาไอซีขาที่ 11 และ 13 ขณะที่ตัวตรวจจับรังสีถูกบังโดยจานเข้ารหัสภายในแมส

การเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ขาที่ 10 และ 12 (ซึ่งทั้ง 2 ขานี้เป็นทางออกของข้อมูล และต่อเข้ากับช่องสัญญาณเอและบี ตามลำดับ)จะเกิดขึ้นไม่พร้อมกันดังภาพประกอบ 15 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการจัดวางตำแหน่งคู่ของตัวส่งรังสีอินฟราเรดกับตัวตรวจจับรังสี และทิศทางการหมุนของจานเข้ารหัสภายในเมาส์



ภาพประกอบ 15 การเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ของช่องสัญญาณเอ(ต่อกับขาไอซีขาที่ 10) และสัญญาณบี(ต่อกับขาไอซีขาที่ 12)

## 2.5 หลักการทำงานของเมาส์ชนิดที่ใช้หลักการเชิงกลร่วมกับแสง

เมื่อเมาส์สัมผัสกับพื้นผิวและมีการเคลื่อนที่ ลูกบอลที่อยู่ภายในเมาส์จะกลิ้ง ผิวสัมผัสของลูกบอลกับแกนวงล้อจะผลักให้แกนวงล้อเกิดการหมุน ส่งผลให้จานเข้ารหัสที่ติดอยู่กับแกนวงล้อหมุนไปด้วย ทำให้ช่องบนขอบของจานเข้ารหัสตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่อยู่ระหว่างตัวส่งรังสีอินฟราเรดกับตัวตรวจจับรังสี การหมุนของแกนวงล้อตัวหนึ่งจะบอกให้ทราบว่าการเลื่อนเมาส์ในแนวตั้ง และการหมุนของแกนวงล้ออีกตัวหนึ่งจะบอกให้ทราบว่าการเลื่อนเมาส์ในแนวนอน การตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดของช่องบนขอบของจานเข้ารหัสทำให้ทราบถึงข้อมูลต่างๆ เช่นในขณะนั้นแกนวงล้อหมุนไปในทิศทางใด แกนวงล้อหมุนไปเป็นมุมเท่าไร และจำนวนรอบของการหมุนของแกนวงล้อ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในเมาส์จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลเหล่านี้ในรูปของสัญญาณผ่านสายเคเบิลของเมาส์ไปยังคอมพิวเตอร์

ลักษณะของการส่งสัญญาณที่เมาส์ส่งไปยังคอมพิวเตอร์นั้นเป็นสัญญาณที่ต่อเนื่องกัน ขนาดของข้อมูลที่ส่งไปในแต่ละครั้งมีค่าเท่ากับ 3 ไบต์(byte) โดยแต่ละไบต์จะแทนข้อมูลดังต่อไปนี้<sup>1</sup>

— ไบต์ที่ 1 เป็นข้อมูลที่แสดงถึงระยะทางการเคลื่อนที่ของเมาส์ในแนวแกน x (แนวนอน)

— ไบต์ที่ 2 เป็นข้อมูลที่แสดงถึงระยะทางการเคลื่อนที่ของเมาส์ในแนวแกน y (แนวตั้ง)

— ไบต์ที่ 3 เป็นข้อมูลที่แสดงถึงสถานะของปุ่มบนเมาส์

และซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ที่เรียกว่า “โปรแกรมขับเคลื่อน(Driver)” จะทำหน้าที่รับข้อมูลแล้วนำไปประมวลผลเพื่อแสดงตำแหน่ง และทิศทางการเคลื่อนที่ของเมาส์เป็นรูปเคอร์เซอร์บนจอภาพคอมพิวเตอร์

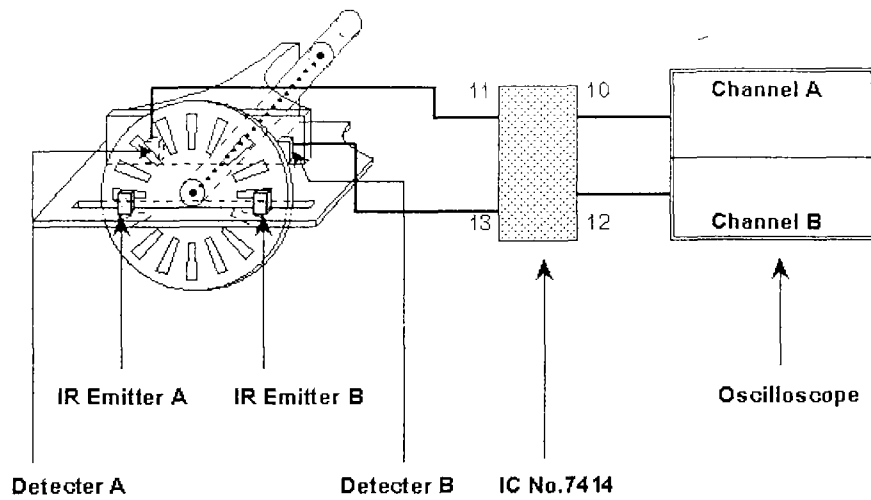
นอกจากนี้การส่งสัญญาณจะมีลักษณะอื่นๆ ที่แตกต่างจากที่ได้กล่าวมาในข้างต้น เช่น ไบต์ที่ 1 เป็นข้อมูลที่แสดงถึงสถานะของปุ่มบนเมาส์และข้อมูล 2 บิตบนสุดของการกระจัดแนวแกน x และแนวแกน y ,ไบต์ที่ 2 เป็นข้อมูล 6 บิตที่เหลือในการแสดงระยะทางการเคลื่อนที่ของเมาส์ในแนวแกน x และไบต์ที่ 3 เป็นข้อมูล 6 บิตที่เหลือในการแสดงระยะทางการเคลื่อนที่ของเมาส์ในแนวแกน y

## 2.6 การบอกทิศทางการหมุนของส่วนประกอบภายในเมาส์

การหมุนของจานเข้ารหัสภายในเมาส์ จะตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่อยู่ระหว่างตัวส่งรังสีอินฟราเรดกับตัวตรวจจับรังสี ทำให้สามารถบอกทิศทางการหมุนของจานเข้ารหัสภายในเมาส์ได้ ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นที่บริเวณขาของไอซี

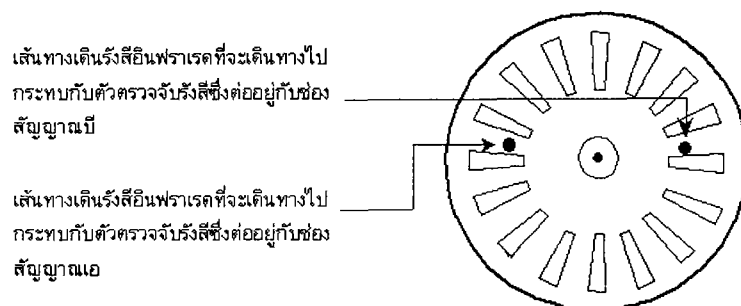
เราสามารถแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของระดับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นได้โดยนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไปต่อเข้ากับช่องสัญญาณของออสซิลโลสโคป ตัวอย่างเช่นนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในภาพประกอบ 13 ไปต่อเข้าช่องสัญญาณเอ และช่องสัญญาณบี แสดงดังภาพประกอบ 16

<sup>1</sup>Tanenbaum, A. S. (1999). *Structured Computer Organization*. p. 100.



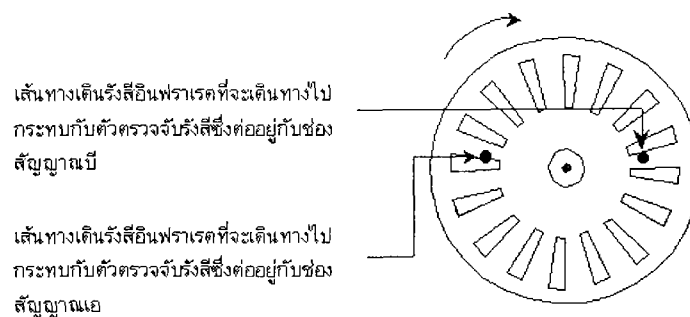
ภาพประกอบ 16 แผนภาพของวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ (ในภาพประกอบ 13) ที่ต่ออยู่กับ  
ออสซิลโลสโคป

จากภาพประกอบ 16 ต่อช่องสัญญาณเอเข้าที่ขาไอซีขาที่ 10 และต่อช่องสัญญาณบี  
เข้าที่ขาไอซีขาที่ 12 เพื่อให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นไม่พร้อม  
กันของทั้งสองช่องสัญญาณ เราสามารถพิจารณาทิศทางการหมุนของจานเข้ารหัสได้ แสดงดัง  
ภาพประกอบ 17

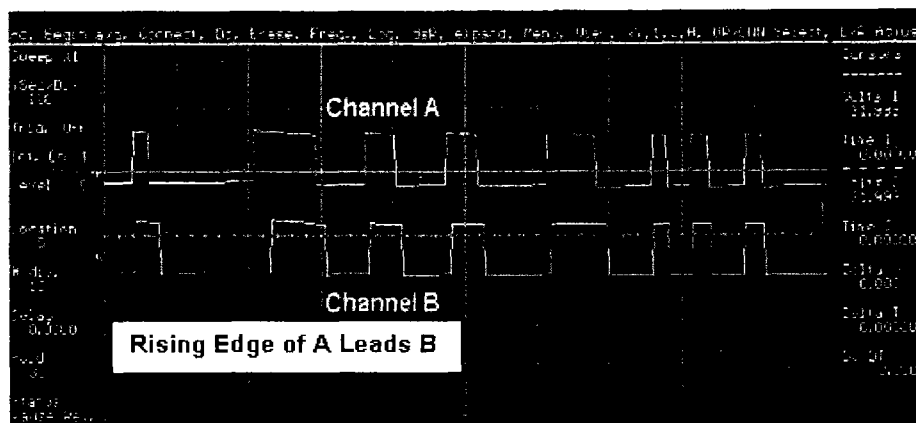


ภาพประกอบ 17 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสภายในเมาส์

ทิศทางการหมุนของจานเข้ารหัสมี 2 ทิศทาง คือ ทิศทางตามเข็มนาฬิกา และทิศทางทวนเข็มนาฬิกา พิจารณาภาพประกอบ 17 เมื่อจานเข้ารหัสหมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา เห็นได้ว่าขอบของจานเข้ารหัสนั้น ตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่เดินทางไปกระทบกับตัวตรวจจับรังสีที่ต่ออยู่กับช่องสัญญาณเอ ก่อนที่จะตัดเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่เดินทางไปกระทบกับตัวตรวจจับรังสีที่ต่ออยู่กับช่องสัญญาณบี ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ในช่องสัญญาณเอ ก่อนช่องสัญญาณบี ดังที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 18 และ 19 ตามลำดับ



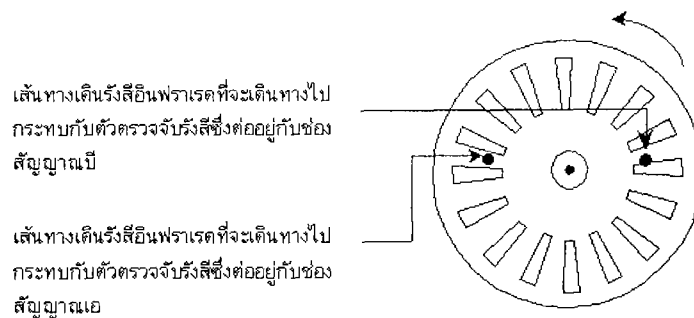
ภาพประกอบ 18 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสที่หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกา



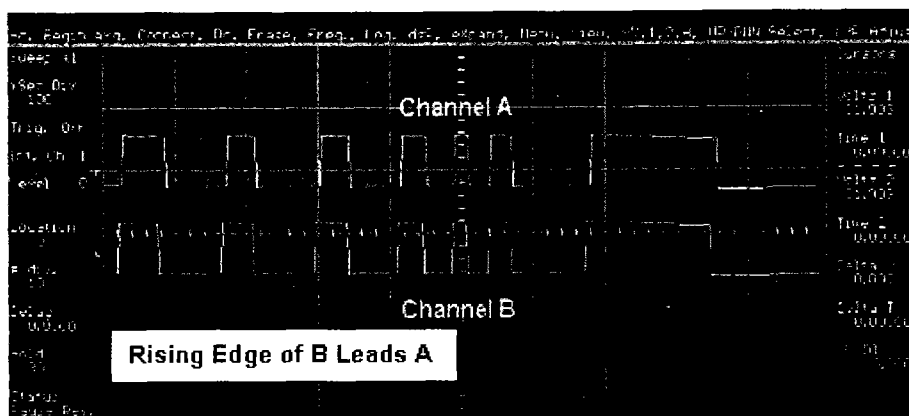
ภาพประกอบ 19 สัญญาณจากวงจรถออิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถบอกทิศทางการหมุน ของจานเข้ารหัสในเมาส์ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

ที่มา : *Hacking a Mouse for Encoders*. (Online). (2000,June). Available Telnet: boondog.com.

ในทางกลับกันเมื่อจานเข้ารหัสหมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เห็นได้ว่าขอบของจานเข้ารหัสนั้น ตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่เดินทางไปกระทบกับตัวตรวจจับรังสีที่อยู่กับช่องสัญญาณบี ก่อนที่จะตัดเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรดที่เดินทางไปกระทบกับตัวตรวจจับรังสีที่อยู่กับช่องสัญญาณเอ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับความต่างศักย์ในช่องสัญญาณบี ก่อนช่องสัญญาณเอ ดังที่แสดงไว้ในภาพประกอบ 20 และ 21 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 20 ภาพตัดขวางด้านหน้าของจานเข้ารหัสที่หมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา



ภาพประกอบ 21 สัญญาณจากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถบอกทิศทางการหมุน ของจานเข้ารหัสในเมาส์ ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ที่มา : *Hacking a Mouse for Encoders*. (Online). (2000,June). Available Telnet: boondog.com.

## 2.7 การหาขนาดมุมการหมุนของจานเข้ารหัสภายในเมาส์

การหาขนาดของมุมที่จานเข้ารหัสหมุนไป คำนวณได้จากจำนวนช่องของจานเข้ารหัสที่หมุนตัดผ่านเส้นทางเดินของรังสีอินฟราเรด<sup>1</sup> ( ซึ่งสังเกตจากขอบของสัญญาณรูปเหลี่ยมที่เปลี่ยนสถานะจากต่ำไปสูง ) มุมของจานเข้ารหัสที่หมุนไปสามารถคำนวณได้จากการใช้สูตร

$$\frac{\text{จำนวนช่องบนขอบจานเข้ารหัสที่ตัดผ่านเส้นทางเดินรังสีอินฟราเรด} \times 360 \text{ องศา}}{\text{จำนวนช่องทั้งหมดของจานเข้ารหัส}} \dots\dots\dots (19)$$

ภาพประกอบ 19 มีขอบของสัญญาณเกิดขึ้น 8 ครั้ง แสดงว่าช่องของจานเข้ารหัส 8 ช่อง ตัดผ่านเส้นทางเดินของรังสีอินฟราเรด ( สมมติว่าจานเข้ารหัสมีช่องทั้งหมด 32 ช่อง ) ดังนั้นมุมของจานเข้ารหัสที่หมุนไปเท่ากับ 90 องศา

การหาขนาดมุมของจานหมุนในระบบเพนดูลัมบิตที่หมุนเปลี่ยนไปทำได้ 2 วิธี คือ อ่านค่าตำแหน่งเมาส์โดยอาศัยโปรแกรมขับเคลื่อนแล้วแปลงเป็นค่ามุมของจานหมุน และวิธีการอ่านข้อมูลโดยตรงจากเมาส์แล้วแปลงเป็นค่ามุมของจานหมุน ทั้งสองวิธีทำได้โดยนำสายพานขนาดเล็กคล้องพาดบนวงล้อ(ซึ่งติดอยู่ที่จุดศูนย์กลางบนจานหมุนของเพนดูลัมบิต) กับแกนวงล้อของเมาส์ เมื่อจานหมุนเคลื่อนที่แกนวงล้อของเมาส์จะหมุนตามไปด้วย

การหาขนาดมุมของจานหมุนที่หมุนเปลี่ยนไปโดยวิธีการแรกนั้น ขนาดมุมของจานหมุนทำให้เกิดจำนวนพิกเซล(Pixel)บนจอภาพ โดยจำนวนพิกเซลนั้นได้มาจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ติดต่อกับโปรแกรมขับเคลื่อน จำนวนพิกเซลสัมพันธ์กับมุมของจานหมุนในระบบดังนี้

$$\text{มุมของจานหมุน} = C \times \text{จำนวนพิกเซลที่ปรากฏบนจอภาพ} \dots\dots\dots(20)$$

<sup>1</sup> *Hacking a Mouse for Encoders*. 2000. (Online).

โดยที่  $C$  คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ  $\frac{r \times 360 \text{ องศา}}{R \times N \times n}$  เมื่อ  $r$  คือ รัศมีของแกนวง

ล้อที่ติดอยู่กับจานเข้ารหัสภายในเม้าส์,  $R$  คือ รัศมีของวงล้อที่ติดบนจานหมุนของระบบ,  $N$  คือ จำนวนช่องทั้งหมดบนขอบจานเข้ารหัสของเม้าส์ และ  $n =$  จำนวนพิกเซลต่อหนึ่งช่องบนขอบของจานเข้ารหัส

วิธีการอ่านค่าตำแหน่งเม้าส์จากโปรแกรมขับเคลื่อนแล้วแปลงเป็นค่ามุมของจานหมุน มีผลจากความเร่งของเม้าส์เข้ามาเกี่ยวข้องทำให้การเปลี่ยนค่าจากจำนวนพิกเซลเป็นค่ามุมของจานหมุนคลาดเคลื่อนจากมุมจริงมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการรับส่งข้อมูลโดยตรงจากเม้าส์(เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานแตกต่างจากวิธีแรก) แล้วเก็บค่าข้อมูลที่อ่านได้จากโปรแกรมแปลงเป็นค่ามุมของจานหมุน ค่ามุมของจานหมุนในระบบสัมพันธ์กับข้อมูลที่อ่านได้จากโปรแกรมดังนี้

$$\text{มุมของจานหมุน} = D \times Y \dots\dots\dots(21)$$

โดยที่  $Y$  คือ ค่าตัวเลขที่ส่งจากเม้าส์ ซึ่งตัวเลขนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนช่องที่หมุนไปของจานเข้ารหัส และ  $D$  คือ ค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า  $Y$  กับมุมของจานหมุน

การหาค่า  $D$  ทำได้โดยทดลองเก็บค่าตัวเลขที่ส่งจากเม้าส์( $Y$ ) เมื่อหมุนจานหมุนไปยังตำแหน่งมุมต่าง ๆ ทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทิศทางทวนเข็มนาฬิกา จากนั้นก็นำข้อมูลดังกล่าวไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Y$  กับมุมของจานหมุน (กำหนดให้แกนตั้งและแกนนอนของกราฟเป็นค่ามุมของจานหมุนและค่า  $Y$  ตามลำดับ) แล้วหาค่าความชันของกราฟ โดยค่าความชันที่ได้เป็นค่าคงที่  $D$  ในสมการที่ (21)

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปีค.ศ. 1996 Bulur, E. Anilturk ,S.O. และ Ozer, A.M. ได้ใช้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของเพนดูลัม และใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นโดยภาษาปาสคาล(Pascal) เป็นโปรแกรมสั่งงานสำหรับตรวจวัดเวลาของระบบ ในงานวิจัยได้แสดงผลของการทดลองในรูปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูด(องศา) และเวลา(วินาที) ทางจอภาพของคอมพิวเตอร์

ปีค.ศ. 1996 Handle, J. T. Ochoa, O. R. และ Kolp, F. ได้ดัดแปลงเมาส์มาประยุกต์ใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์ เนื่องจากอุปกรณ์ และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางฟิสิกส์มีราคาแพง มิใช่เพียงพอสอดคล้องความต้องการใช้งานของนักเรียนในห้องทดลอง จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ทีมงานวิจัยนี้เลือกใช้เมาส์ซึ่งมีราคาถูก หาได้ง่าย และมีประสิทธิภาพ มาใช้วัดการเคลื่อนที่ของวัตถุ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบเมาส์เพื่อเป็นเครื่องมือวัดการเคลื่อนที่ของระบบที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิก และแสดงผลการทดลองในรูปของกราฟทางจอคอมพิวเตอร์ของคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมสั่งงานเป็นภาษาปาสคาล

ปีค.ศ. 1997 Ochoa, O. R. และ Kolp, N. F. ได้ศึกษาการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกของตัวแกว่ง(Oscillator) ซึ่งได้แยกศึกษาเป็น 3 กรณี คือ ตัวแกว่งที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิกที่มีการหน่วง เพนดูลัมอย่างง่าย เพนดูลัมประกอบที่มีการหน่วง โดยในการวิจัยได้ออกแบบเมาส์ให้เป็นเครื่องมือตรวจวัดตำแหน่งของตัวเพนดูลัม แล้วคำนวณหาแอมพลิจูดออกมา พร้อมทั้งใช้โปรแกรมในการตรวจสอบเวลา และแสดงผลออกมาเป็นกราฟของการกระจัดกับเวลา แล้วนำผลไปเปรียบเทียบกับทางทฤษฎี

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยนี้ ผู้วิจัยดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การสร้างเครื่องมือในการวัดการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน เพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด
2. การทดสอบเครื่องมือวัดพฤติกรรมผลการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด
3. การทดลอง และเก็บรวบรวมข้อมูล
4. การวิเคราะห์ข้อมูล

#### 1. การสร้างเครื่องมือวัดการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน เพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด

1.1 ขั้นตอนการดัดแปลงเมาส์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด

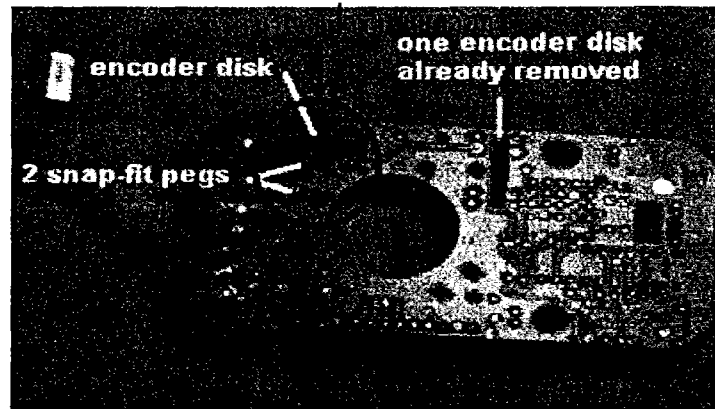
1.2 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด

##### 1.1 ขั้นตอนการดัดแปลงเมาส์เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด

1.1.1 เลือกเมาส์ ที่ต้องการดัดแปลงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยใช้เมาส์ชนิดที่มีสายเชื่อมต่อกับซีเรียลพอร์ตของคอมพิวเตอร์(ซีเรียลเมาส์)

1.1.2 แกะกล่องเมาส์ออก จะสังเกตเห็นว่ามีชิ้นส่วนหลักๆ คือ ลูกบอล และแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อยู่ภายในกล่อง

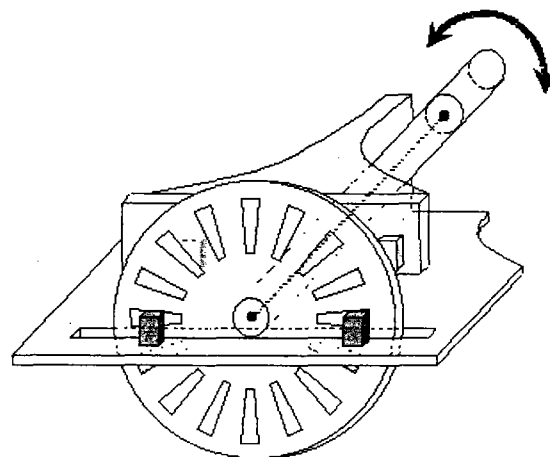
1.1.3 แยกแฉกหนุมนออกมาจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยตัดแยกออกมาทั้งบริเวณรอบ ๆ แฉกหนุมน เพียง 1 ตัวเท่านั้น ดังภาพประกอบ 22



ภาพประกอบ 22 ภาพด้านหลังของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และบริเวณตัดแยกออก

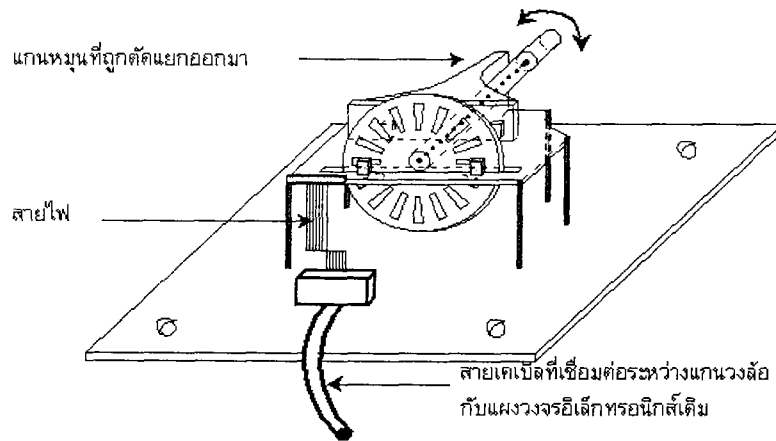
ที่มา : *Hacking a Mouse for Encoders*. (Online). (2000,June). Available Telnet:  
boondog.com.

ชิ้นส่วนแฉกหนุมนที่ถูกตัดแยกออกมา แสดงดังภาพประกอบ 23



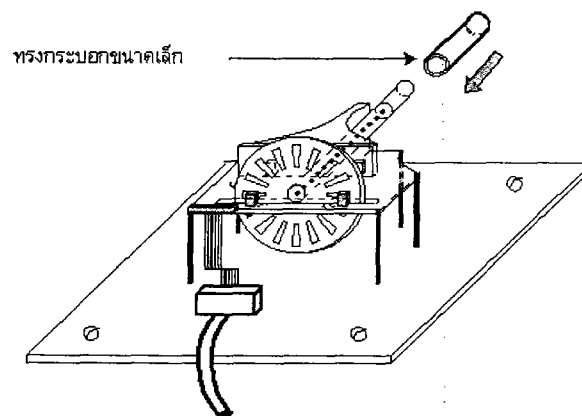
ภาพประกอบ 23 ชิ้นส่วนของแฉกหนุมนที่ตัดแยกออกมาจาก แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์

1.1.4 นำแกนหมุนที่ตัดแยกออกมาติดตั้งบนบอร์ดพร้อมทั้งสายไฟ แสดงดังภาพประกอบ 24



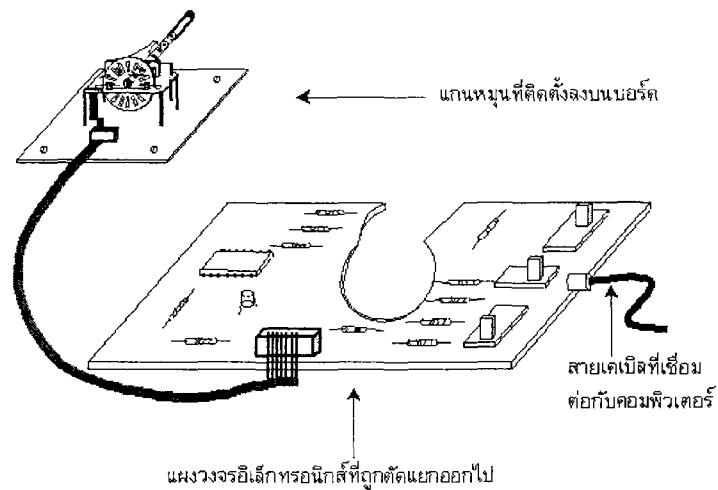
ภาพประกอบ 24 การนำแกนหมุน และสายไฟติดตั้งบนบอร์ด

1.1.5 นำท่อทรงกระบอกขนาดเล็กต่อตรงแกนหมุนให้ยาวมากขึ้น แสดงดังภาพประกอบ 25



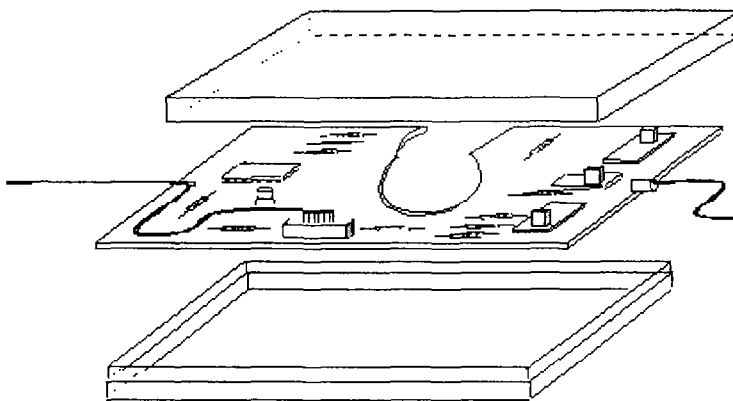
ภาพประกอบ 25 การนำท่อทรงกระบอกขนาดเล็ก ต่อตรงปลายของแกนหมุน

1.1.6 ใช้สายไฟบัดกรีบนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังภาพประกอบ 26 เพื่อเชื่อมต่อระหว่างแกนหมุนที่ยึดติดบนบอร์ด(ในข้อ 1.1.4) กับแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกตัดแยกออกไป(ในข้อ 1.1.3) อีกครั้งหนึ่ง



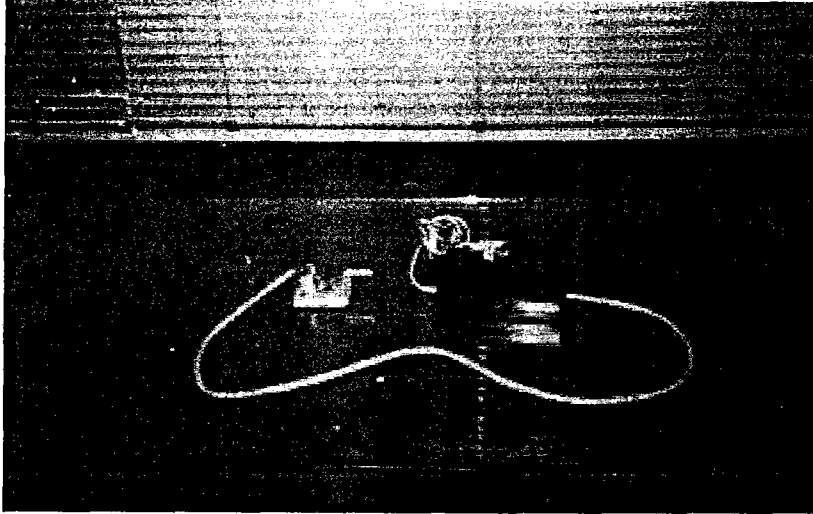
ภาพประกอบ 26 การเชื่อมต่อแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ กับแกนหมุน

1.1.7 นำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในข้อ 1.6 บรรจุใส่กล่อง ดังภาพประกอบ 27



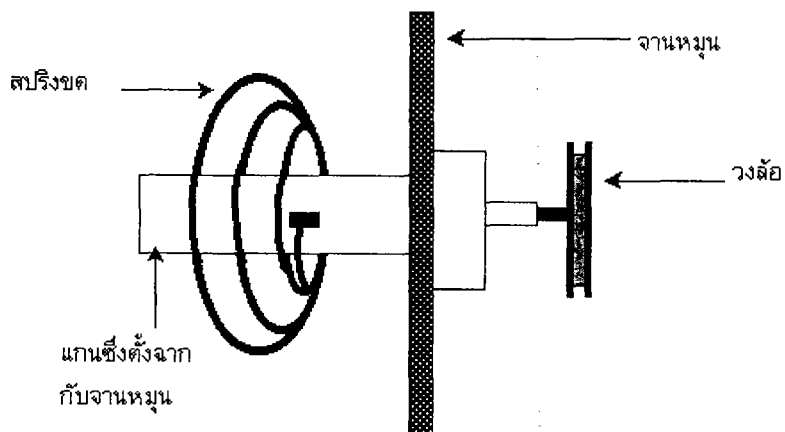
ภาพประกอบ 27 การนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บรรจุกล่อง

เมื่อนำแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์บรรจุกล่องแล้ว จะได้เครื่องมือสำหรับตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิต ดังภาพประกอบ 28



ภาพประกอบ 28 อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุน ของเพนดูลัมบิต

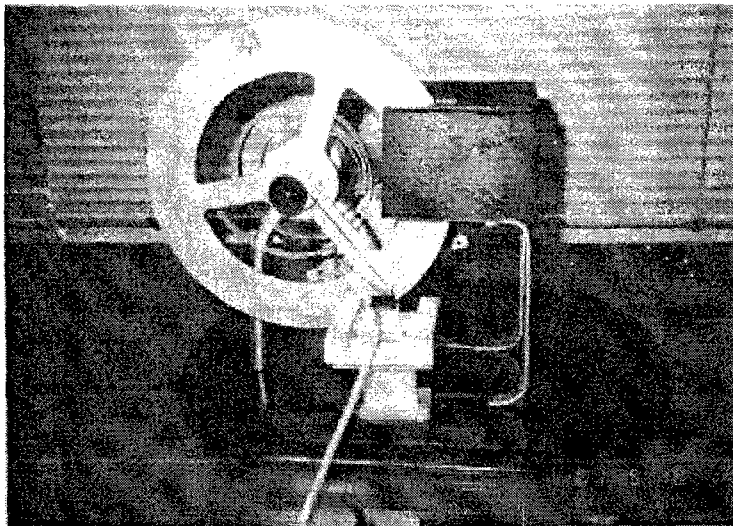
1.1.8 ติดวงลวดตรงกลางของจานหมุน(เพื่อใช้เป็นตัวคล้องสายพาน) แสดงดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 ด้านข้างของเพนดูลัมบิต ที่มีการนำวงล้อติดกับจานหมุน

1.1.9 สร้างฐานสำหรับวางแกนหมุน

1.1.10 นำสายพานขนาดเล็กคล้องระหว่างแกนหมุน กับวงล้อที่ติดบนจานหมุน  
ดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 การนำสายพานคล้องระหว่างแกนหมุน กับวงล้อบนจานหมุน

## 1.2 การเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ภาษาซี ซึ่งเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ที่สามารถติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกอย่างเม้าส์ได้ นำมาเขียนโปรแกรมคำสั่งในการตรวจวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด โดยโปรแกรมจะวัดการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน ( $\theta$ ) ที่เวลาต่างๆ และสามารถนำค่าการกระจัดเชิงมุมไปคำนวณความเร็วเชิงมุม ( $\dot{\theta}$ ) ได้ โดยรายละเอียดของโปรแกรมจะรวมส่วนที่เป็นการควบคุมการทำงานการรับส่งข้อมูลของเม้าส์ การเก็บข้อมูล และการแสดงผลของการวัดในรูปของกราฟทางจอภาพของคอมพิวเตอร์ เอาไว้ในโปรแกรมเดียวกัน

ลักษณะการแสดงผลของการวัดในรูปกราฟ แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

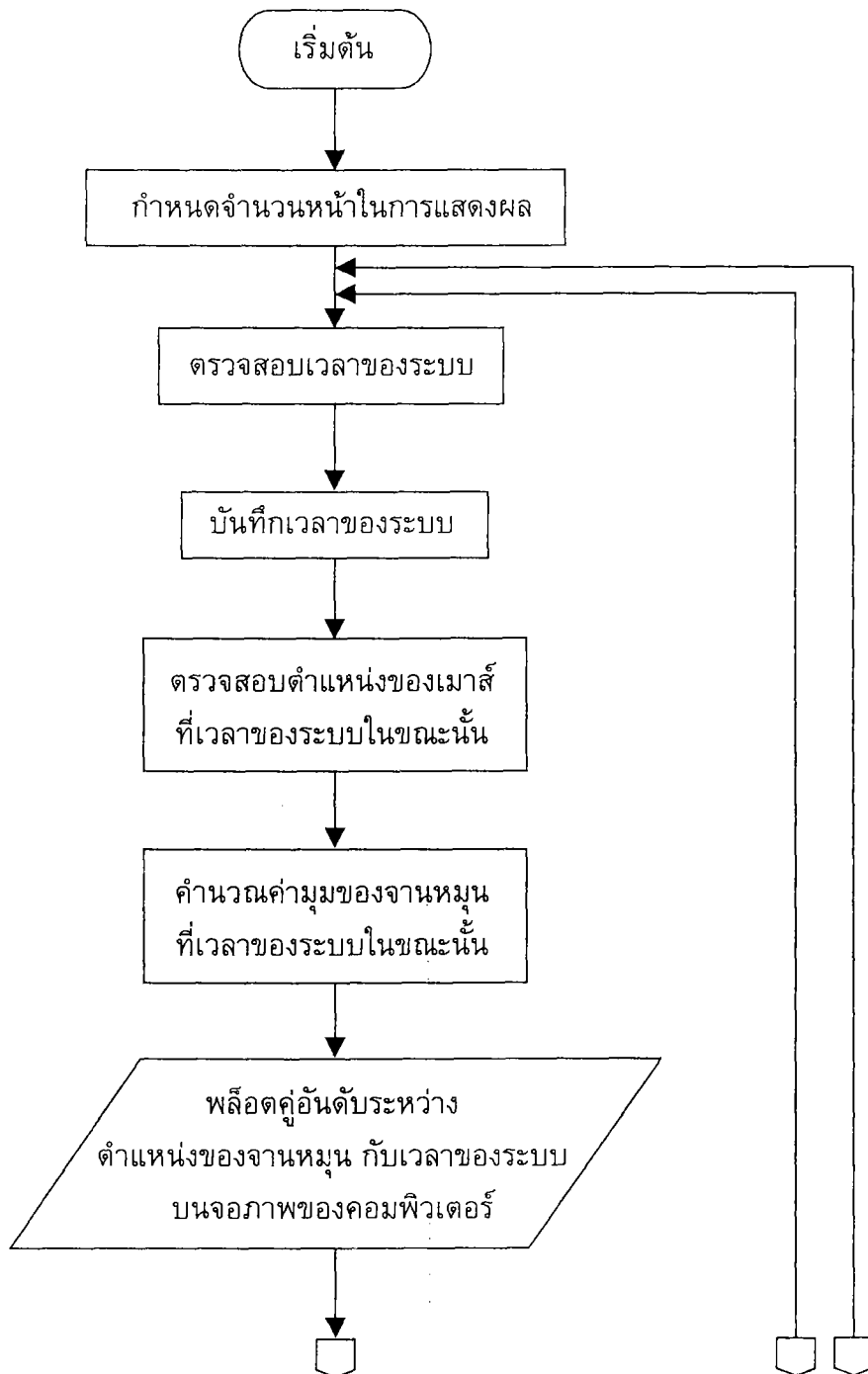
1.2.1 แสดงผลการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม กับเวลา

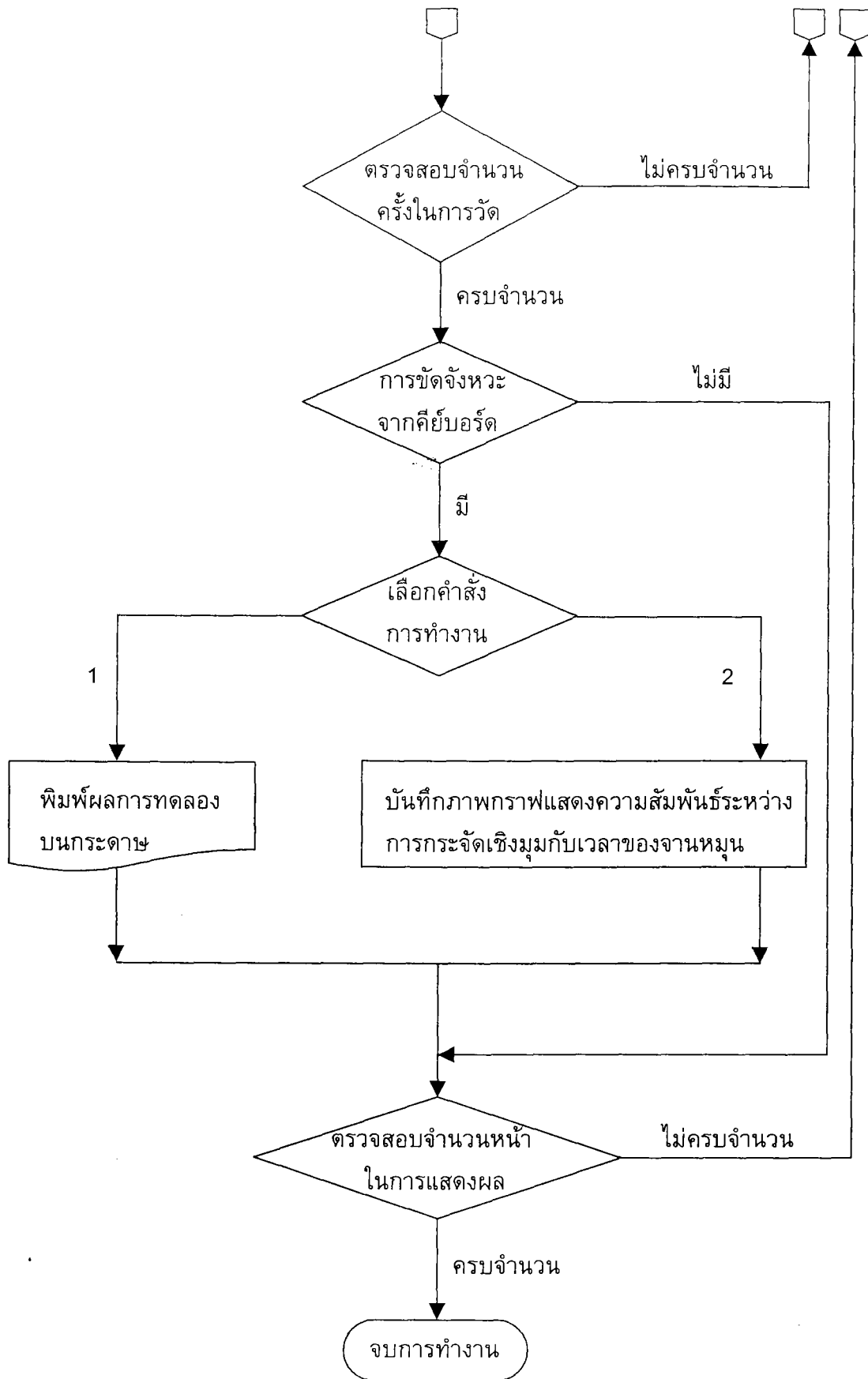
1.2.2 แสดงผลการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม กับการกระจัดเชิงมุม

ผลการวัดที่แสดงในรูปกราฟทั้ง 2 ลักษณะ จะนำไปใช้วิเคราะห์พฤติกรรมของการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด เปรียบเทียบกับทางทฤษฎี

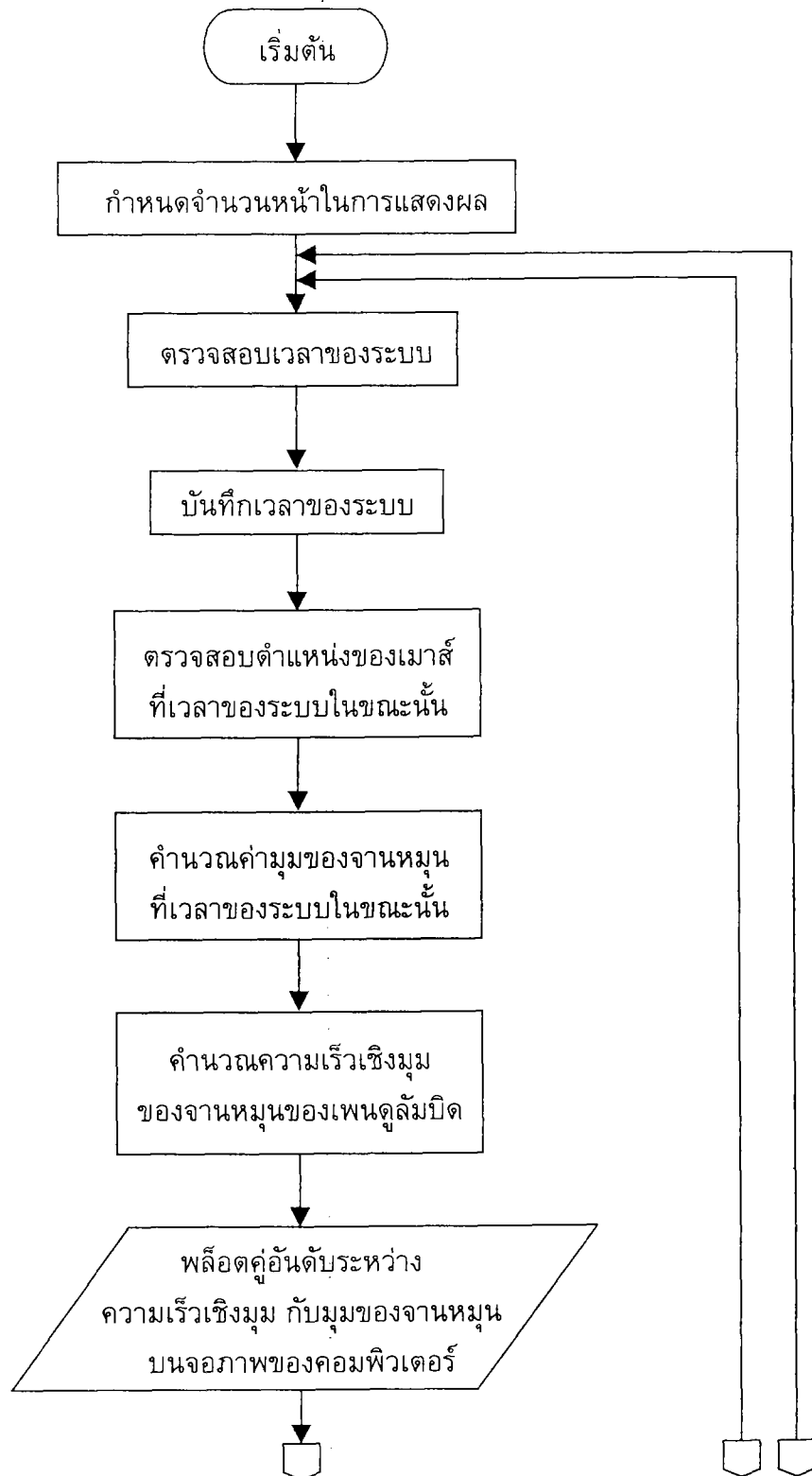
สำหรับขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคำสั่ง แสดงไว้ในแผนผังการทำงาน (Flow Chart) ดังต่อไปนี้

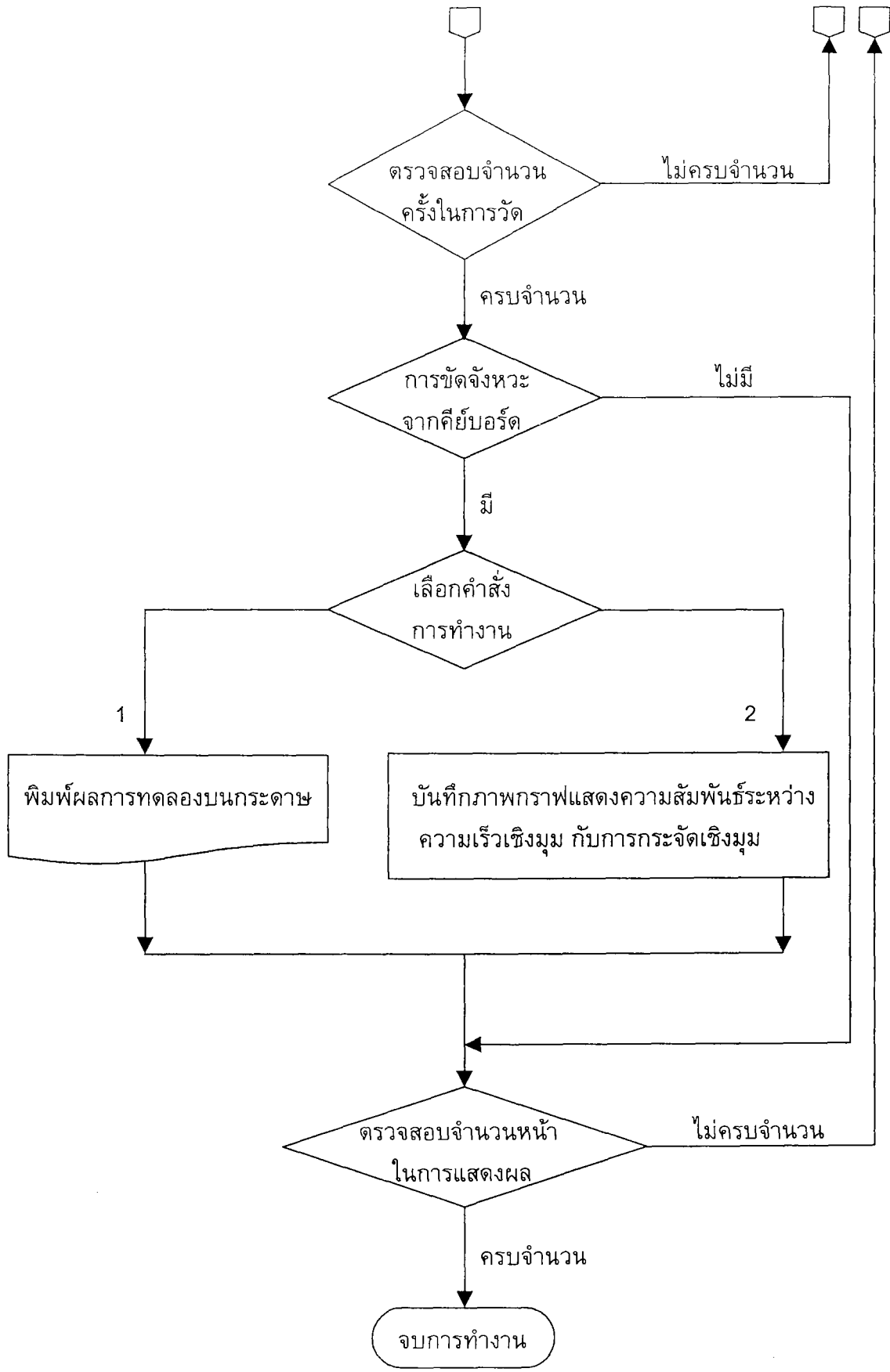
โปรแกรมที่ 1 แสดงผลการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิต ในรูปกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุม กับเวลา





โปรแกรมที่ 2 แสดงผลการวัดการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิต ในรูปกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม กับการกระจัดเชิงมุม

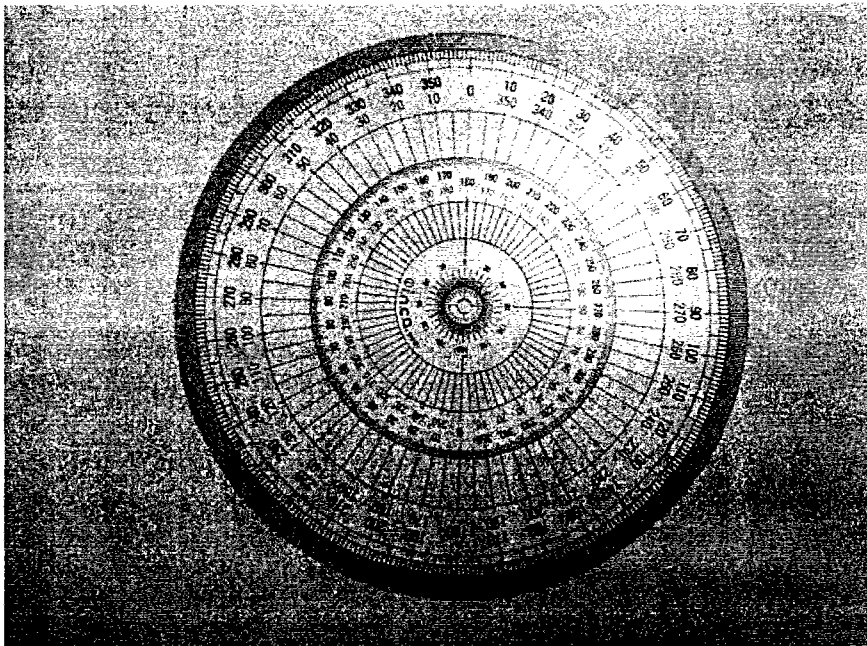




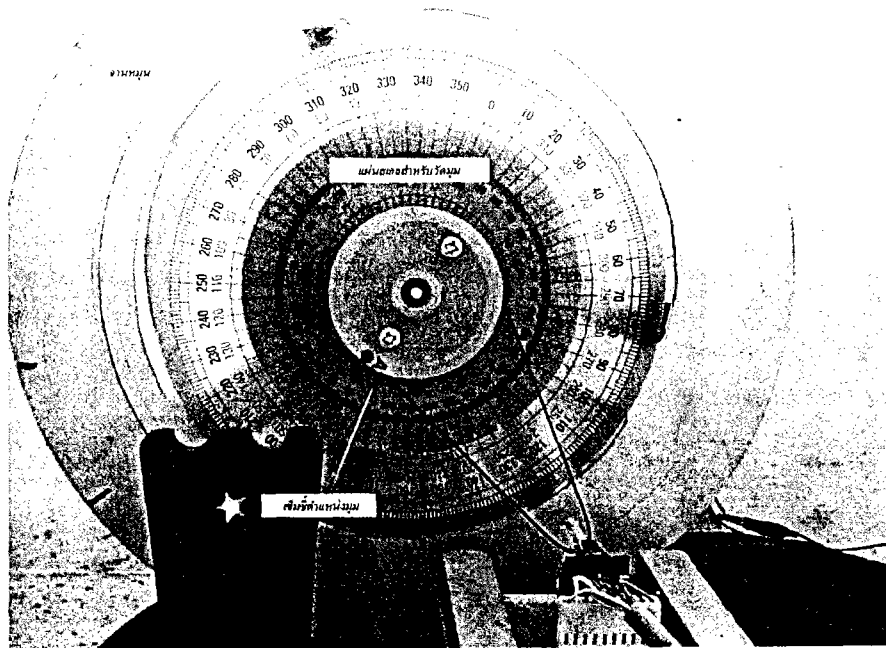
## 2. การเปรียบเทียบและทดสอบเครื่องมือวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด

### 2.1 การเปรียบเทียบเครื่องมือวัดที่สร้างจากเมาส์

ในการเปรียบเทียบนั้น ทำได้โดยนำแผ่นสเกลสำหรับวัดมุมในภาพประกอบ 31 ไปติดตั้งตรงกลางบนจานหมุน พร้อมทั้งนำเครื่องมือวัดที่สร้างจากเมาส์ต่อเข้ากับจานหมุนของเพนดูลัมบิดดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 31 แผ่นสเกลสำหรับวัดมุม



ภาพประกอบ 32 การติดตั้งแผ่นสเกลสำหรับวัดมุม บนจานหมุนของเพนดูลัมบิต

จากนั้นหมุนจานหมุนไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ ทั้งทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทิศทางทวนเข็มนาฬิกาแล้วบันทึกค่าตัวเลข( $Y$ )ที่ส่งจากเมาส์ซึ่งแสดงบนจอภาพ นำข้อมูลดังกล่าวไปเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $Y$  กับมุมของจานหมุน หาค่าความชันของกราฟโดยค่าความชันที่ได้เป็นค่าคงที่  $D$  ในสมการที่ (21)

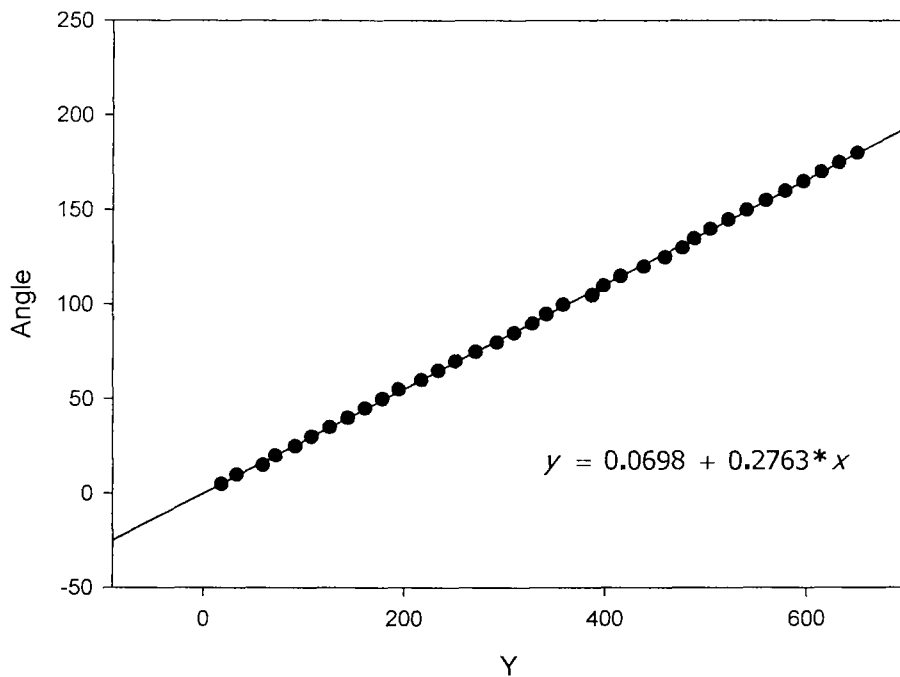
ค่าคงที่  $D$  ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากค่า  $D$  ในการหมุนจานในทิศทางตามเข็มนาฬิกาและทิศทางทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งการปรับเทียบเพื่อหาค่า  $D$  ในแต่ละทิศทางแสดงดังหัวข้อต่อไปนี้

2.1.1 การปรับเทียบเพื่อหาค่า  $D$  ในทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา ได้ข้อมูลมีรายละเอียดดังตาราง 1

ตาราง 1 ค่าตัวเลขที่ส่งมาจากเมตริก(ค่า Y)เมื่อหมุนงานหมุนไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

มุมของงานหมุน (องศา)	ค่าตัวเลขที่ส่ง มาจากเมตริก	มุมของงานหมุน (องศา)	ค่าตัวเลขที่ส่ง มาจากเมตริก
5.0	18	95.0	341
10.0	33	100.0	358
15.0	59	105.0	387
20.0	72	110.0	398
25.0	92	115.0	415
30.0	108	120.0	438
35.0	126	125.0	459
40.0	144	130.0	476
45.0	161	135.0	488
50.0	178	140.0	504
55.0	194	145.0	522
60.0	217	150.0	540
65.0	234	155.0	559
70.0	251	160.0	578
75.0	271	165.0	596
80.0	292	170.0	614
85.0	309	175.0	632
90.0	327	180.0	650

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Y กับมุมของจานหมุน จะพบว่าค่า Y เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่ามุมของจานหมุน และหาค่าความชันของกราฟจะได้ดังภาพประกอบ 33 โดยค่าคงที่ D ที่หาได้จากกราฟมีค่าเท่ากับ 0.2763 องศา



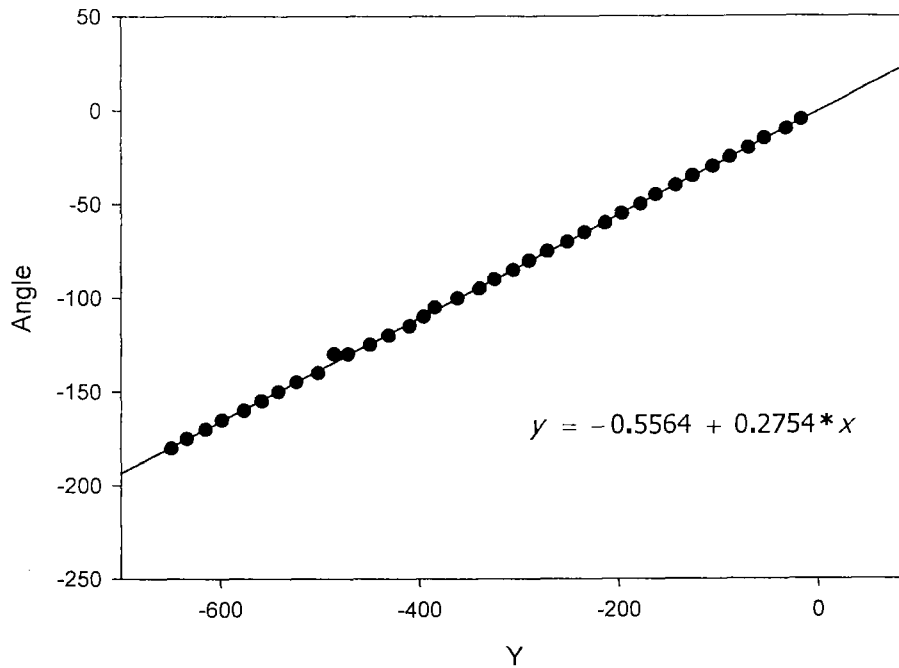
ภาพประกอบ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขที่ส่งจากเมาส์(ค่า Y) กับมุมของจานหมุน เมื่อหมุนจานหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา

2.1.2 การปรับเทียบเพื่อหาค่า D ในทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา ได้ข้อมูลมีรายละเอียดดังตาราง 2

ตาราง 2 ค่าตัวเลขที่ส่งมาจากเมาส์(ค่า Y)เมื่อหมุนจานหมุนไปยังตำแหน่งมุมต่างๆ ในทิศทาง  
ทวนเข็มนาฬิกา

มุมของจานหมุน (องศา)	ค่าตัวเลขที่ส่ง มาจากเมาส์	มุมของจานหมุน (องศา)	ค่าตัวเลขที่ส่ง มาจากเมาส์
-5.0	-17	-95.0	-340
-10.0	-32	-100.0	-362
-15.0	-54	-105.0	-385
-20.0	-70	-110.0	-396
-25.0	-89	-115.0	-410
-30.0	-106	-120.0	-431
-35.0	-126	-125.0	-450
-40.0	-143	-130.0	-472
-45.0	-163	-130.0	-486
-50.0	-178	-140.0	-502
-55.0	-197	-145.0	-524
-60.0	-214	-150.0	-542
-65.0	-235	-155.0	-559
-70.0	-252	-160.0	-577
-75.0	-272	-165.0	-599
-80.0	-290	-170.0	-615
-85.0	-306	-175.0	-634
-90.0	-325	-180.0	-649

เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Y กับมุมของจานหมุน แล้วหาค่าความชันของกราฟ จะได้ดังภาพประกอบ 34 โดยค่าคงที่ D ที่หาได้จากกราฟมีค่าเท่ากับ 0.2754 องศา



ภาพประกอบ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขที่ส่งจากเมาส์(ค่า Y) กับมุมของจานหมุน เมื่อหมุนจานหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

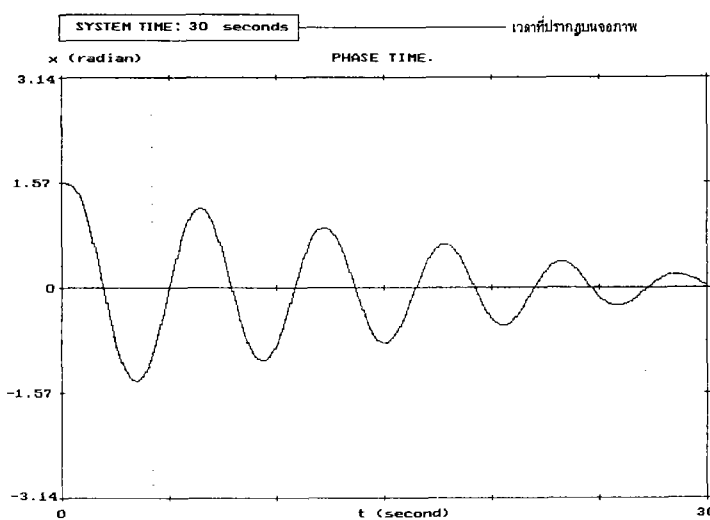
ดังนั้นค่าคงที่ D ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้มีค่าเท่ากับ  $\frac{0.2763 + 0.754}{2} = 0.2758$

องศา

## 2.2 การทดสอบเครื่องมือวัด และโปรแกรมคำสั่งที่ใช้วัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

2.2.1 ตรวจสอบความเที่ยงและความแม่นยำในการวัดการกระจัดเชิงมุม ของจานหมุนในระบบที่หมุนเปลี่ยนแปลงไปในตำแหน่งต่างๆ โดยนำแผ่นสเกลสำหรับวัดมุมในภาพประกอบ 31 ไปติดบนจานหมุน เพื่อใช้เปรียบเทียบมุมที่หมุนเปลี่ยนไปบนจานหมุนกับค่ามุมที่อ่านได้จากโปรแกรม วิธีการทดสอบทำได้โดยหมุนจานหมุนจากตำแหน่งศูนย์องศาไปยังตำแหน่งมุม  $\pm 15, \pm 30, \pm 45, \pm 60, \pm 75, \pm 90, \pm 105, \pm 120, \pm 135, \pm 150, \pm 165, \pm 180$  องศาตามลำดับ อ่านค่าการกระจัดเชิงมุมที่วัดได้จากโปรแกรม(กำหนดให้โปรแกรมแสดงผลของการวัดเป็นจำนวนตัวเลขบนจอภาพ) แล้วนำไปหาค่าเฉลี่ยเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับมุมที่เปลี่ยนไปบนแผ่นสเกลสำหรับวัดมุม เช่นหมุนจานหมุนจากตำแหน่งศูนย์องศาไปยังมุม 15 องศา(เทียบกับแผ่นสเกลวัดมุม) แล้วอ่านค่ามุมจากโปรแกรมเป็นจำนวน 10 ครั้ง บันทึกค่าเอาไว้จากนั้นหาค่าเฉลี่ยมุมที่วัดได้จากโปรแกรม นำค่าเฉลี่ยที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับมุมบนแผ่นสเกลสำหรับวัดมุม

2.2.2 ตรวจสอบความเที่ยงในการวัดเวลาของโปรแกรมที่เขียนขึ้น ในงานวิจัยนี้เขียนโปรแกรมให้บันทึกตำแหน่งของเมาส์ในแต่ละช่วงเวลา หน่วยเวลาที่ใช้ในการกำหนดให้โปรแกรมบันทึกตำแหน่งของเมาส์เป็นหน่วยเวลามาตรฐานในระบบเครื่องคอมพิวเตอร์สามารถกำหนดให้โปรแกรมแสดงเวลาขณะทำการวัดตำแหน่งมุมจานหมุนบนจอภาพได้ การตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมในการวัดเวลา ทำได้โดยอ่านค่าเวลาที่ปรากฏบนจอภาพเปรียบเทียบกับเวลาที่วัดได้จากนาฬิกาจับเวลา ดังภาพประกอบ 35



ภาพประกอบ 35 เวลาที่ปรากฏบนจอภาพ ขณะโปรแกรมกำลังวัดมุมของจานหมุน

### 3. การทดลอง และเก็บรวบรวมข้อมูล

3.1 นำเครื่องมือวัด และโปรแกรมคำสั่งที่ทดสอบแล้ว ไปวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด โดยพฤติกรรมที่ต้องการวัดแบ่งออกเป็นกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

3.1.1 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น

3.1.2 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ

3.1.3 ระบบที่ไม่มีสปริง แต่ที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ

3.1.4 ระบบที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน แต่ไม่มีสปริงติดอยู่ มีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ

3.1.5 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกที่มีลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ

3.2 ทดลองวัดพฤติกรรมในข้อ 1 ตามลำดับ โปรแกรมจะนำข้อมูลที่วัดได้ซึ่งก็คือการกระจัดเชิงมุม( $\theta$ ) และคำนวณความเร็วเชิงมุม( $\dot{\theta}$ ) ที่เวลาต่าง ๆ ของจานหมุน นำไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม การวัดพฤติกรรมในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะโดยนำค่าที่วัดได้แสดงผลทางจอภาพในรูปกราฟทันที

3.3 บันทึกผลการวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด (การกระจัดเชิงมุม และความเร็วเชิงมุมที่เวลาต่าง ๆ ของจานหมุน) ในไฟล์บันทึกข้อมูล ซึ่งผลที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของรูปภาพกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และรูปภาพกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม

3.4 นำข้อมูลรูปภาพในไฟล์บันทึกข้อมูล พิมพ์ลงบนกระดาษ เพื่อนำผลของการวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับทฤษฎี

#### 4. การวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 นำผลการวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด ไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกราฟทางทฤษฎี โดยพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิดที่เป็นไปตามทฤษฎีนั้น มีดังนี้

4.1.1 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก โดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เส้นกราฟแสดงลักษณะการแกว่งแบบฮาร์มอนิก และมีขนาดแอมพลิจูดคงที่

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นวงปิดวงหนึ่ง

4.1.2 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เส้นกราฟจะแสดงขนาดแอมพลิจูดลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เส้นกราฟแสดงลักษณะเป็นเกลียวที่มีทิศทางวนเข้าหาจุดกำเนิด

4.1.3 ระบบที่ไม่มีสปริง แต่ที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เส้นกราฟแสดงลักษณะการแกว่งแบบฮาร์มอนิก

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นวงปิด

4.1.4 ระบบที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน แต่ไม่มีสปริงติดอยู่ มีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เส้นกราฟแสดงขนาดแอมพลิจูดลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นวงเกลียวที่มีทิศทางวนเข้าหาจุดกำเนิด

4.1.5 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกที่มีลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ โดยที่งานหน่วงยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในสภาวะคงตัว เส้นกราฟจะมีขนาดแอมพลิจูดของการแกว่งคงที่

— กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม ในสภาวะคงตัวเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นวงปิด

4.2 นำผลการวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิดที่ไม่ตรงกับกราฟทางทฤษฎีไปวิเคราะห์หาสาเหตุ

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

การใช้เมาส์เป็นเครื่องมือวัดพฤติกรรมการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การทดสอบเครื่องมือวัดที่สร้างจากเมาส์
2. การนำเครื่องมือวัดที่ทดสอบแล้วในข้อ 1 ไปวัดพฤติกรรมการเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิด แล้วแสดงผลในรูปแบบกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับทฤษฎี

#### 1. การทดสอบเครื่องมือที่สร้างจากเมาส์

ขั้นตอนนี้เป็นการทดสอบเครื่องมือวัดการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน ที่สร้างจากเมาส์มีผลการทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ตอน ดังนี้

- 1.1 ผลการทดสอบความถูกต้องในการวัดมุมของจานหมุน
- 1.2 ผลการทดสอบความถูกต้องในการวัดเวลาของโปรแกรม

##### 1.1 ผลการทดสอบความถูกต้องในการวัดมุมของจานหมุน

ขั้นตอนการทดสอบทำได้โดยนำเครื่องมือวัด ต่อกับจานหมุนดังภาพประกอบ 32 จากนั้นใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นวัดค่ามุมที่ได้แสดงทางจอภาพของคอมพิวเตอร์ มีผลการวิจัยดังตาราง 3

ตาราง 3 การเปรียบเทียบค่ามุมจากโปรแกรม กับค่ามุมจากแผ่นสเกลวัดมุม เมื่อเปลี่ยนมุมของจานหมุนเป็นค่าต่างๆ

ค่ามุมจาก แผ่นสเกล วัดมุม (องศา)	ค่ามุมที่อ่านได้จากโปรแกรม (องศา)										ค่าเฉลี่ย มาตรฐาน (องศา)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
± 15	14.6	14.4	14.9	15.5	14.6	14.6	14.6	14.9	15.2	14.4	14.8	0.4
	-14.1	-14.1	-14.1	-15.2	-14.4	-14.4	-14.4	-14.4	-14.1	-15.5	-14.5	0.5
± 30	30.4	29.5	29.0	29.3	29.5	30.4	29.3	29.8	29.5	29.8	29.7	0.5
	-30.4	-30.6	-30.6	-29.0	-29.8	-29.8	-30.4	-30.1	-30.4	-30.6	-30.2	0.5
± 45	44.7	44.4	44.4	44.4	45.5	44.4	44.7	45.0	44.4	44.4	44.6	0.4
	-44.7	-44.2	-45.0	-44.4	-44.4	-44.7	-44.7	-44.4	-45.3	-45.0	-44.7	0.3
± 60	59.3	59.3	58.5	59.1	60.2	60.2	59.3	58.8	59.6	59.1	59.3	0.5
	-60.2	-59.6	-59.3	-60.2	-59.6	-59.3	-59.3	-60.2	-59.6	-60.4	-59.8	0.4

ตาราง 3 (ต่อ)

ค่ามุมจาก แผ่นสเกล วัดมุม (องศา)	ค่ามุมที่อ่านได้จากโปรแกรม (องศา)										ค่าเฉลี่ย (องศา)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
± 75	74.8	74.2	74.2	74.5	74.0	74.8	74.8	75.1	74.8	74.2	74.2	74.5	0.4
	-74.8	-74.8	-74.5	-74.8	-74.8	-74.2	-74.5	-74.2	-74.5	-75.1	-74.6	-74.6	0.3
± 90	89.7	90.3	89.1	90.0	89.1	89.4	89.4	89.1	89.4	88.9	89.4	89.4	0.4
	-89.4	-90.0	-89.4	-89.7	-89.1	-89.1	-89.7	-90.0	-89.4	-89.1	-89.5	-89.5	0.3
± 105	104.6	104.1	105.2	104.9	104.3	105.4	104.1	104.3	105.2	104.3	104.6	104.6	0.5
	-104.9	-104.6	-105.4	-104.3	-104.9	-104.3	-104.1	-105.2	-104.3	-105.2	-104.7	-104.7	0.5
± 120	119.0	119.5	119.2	120.3	119.5	119.8	119.5	119.2	119.5	119.2	119.5	119.5	0.4
	-119.5	-120.1	-120.3	-119.5	-119.8	-120.1	-120.1	-120.1	-119.2	-120.3	-119.9	-119.9	0.4

ตาราง 3 (ต่อ)

คำมุกจาก แผ่นสเกล วัดมุม (องศา)	คำมุกที่อ่านได้จากโปรแกรม (องศา)										ค่าเฉลี่ย (องศา)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน (องศา)	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
± 135	134.7	135.0	134.7	134.4	134.7	134.7	135.0	135.2	135.0	135.0	134.4	134.8	0.3
	-135.5	-135.2	-134.7	-135.0	-134.4	-134.4	-134.7	-135.0	-135.0	-135.0	-134.7	-134.9	0.3
± 150	149.9	149.3	150.4	149.3	150.1	149.3	149.3	149.0	149.9	149.9	150.1	149.7	0.5
	-149.0	-149.0	-149.6	-149.3	-149.3	-149.6	-149.3	-149.6	-149.9	-149.9	-149.6	-149.4	0.3
± 165	164.2	164.8	165.0	164.2	164.5	164.8	164.2	164.2	164.2	164.2	164.5	164.5	0.3
	-164.5	-164.2	-164.5	-164.2	-164.2	-165.0	-164.8	-165.0	-165.3	-165.3	-164.5	-164.6	0.4
± 180	180.8	180.5	179.4	180.2	180.2	179.1	180.0	180.2	179.4	179.4	179.7	180.0	0.5
	-179.7	-179.4	-179.4	-179.4	-178.8	-179.1	-179.7	-179.7	-179.4	-179.4	-179.4	-179.4	0.3

+ ทิศทางตามเข็มนาฬิกา

- ทิศทางทวนเข็มนาฬิกา

ผลการวัดความถูกต้องในการวัดมุมที่ได้ ปรากฏว่าค่ามุมที่วัดได้จากโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับค่ามุมที่อ่านได้จากแผ่นสเกลวัดมุม โดยค่ามุมที่วัดได้จากโปรแกรมมีค่าต่างจากแผ่นสเกลวัดมุมมากที่สุดเท่ากับ 0.6 องศาและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ระหว่าง 0.3 – 0.5 องศา

## 1.2 ผลการทดสอบความถูกต้องในการวัดเวลาของโปรแกรม

ขั้นตอนการทดสอบทำได้โดยนำเครื่องมือวัด ต่อกับจานหมุนดังภาพประกอบ 32 เช่นเดียวกับขั้นตอน 1.1 จากนั้นใช้โปรแกรมที่เขียนขึ้นแสดงค่าเวลาขณะทำการวัดการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน แสดงทางจอภาพของคอมพิวเตอร์ดังภาพประกอบ 35 ผลการวิจัยแสดงดังตาราง 2

ตาราง 4 ค่าเวลาที่วัดได้จากโปรแกรม เปรียบเทียบกับค่าเวลาจากนาฬิกาจับเวลา

ค่าเวลาจาก นาฬิกาจับเวลา (วินาที)	ค่าเวลาจากโปรแกรม (วินาที)										ค่าเฉลี่ย (วินาที)
	ครั้งที่										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
15	15	15	16	15	16	15	16	15	15	15	15
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
45	46	45	45	45	45	46	45	45	46	45	45
60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60

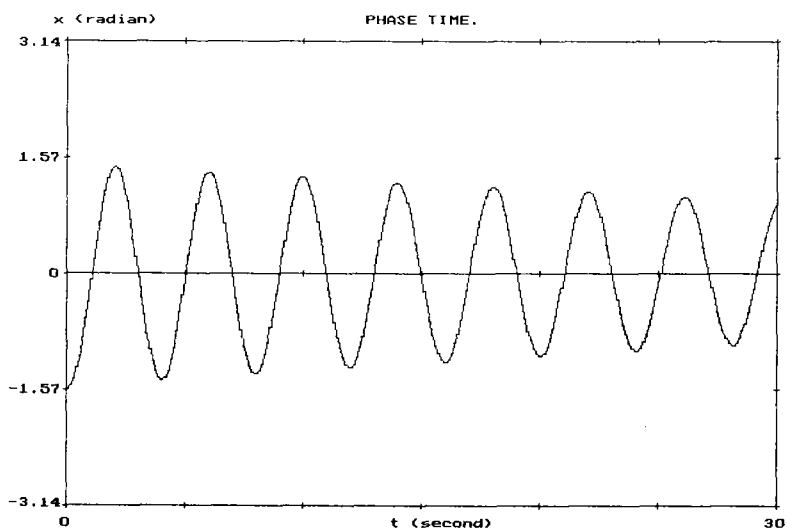
ผลการทดสอบวัดค่าเวลาจากโปรแกรมเปรียบเทียบกับค่าเวลาจากนาฬิกาจับเวลา พบว่าโปรแกรมสามารถวัดค่าเวลาได้ใกล้เคียงกับค่าเวลาจับเวลา โดยมีค่าความแตกต่างของเวลาในการวัดไม่เกิน 1 วินาที

## 2. การทดสอบวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่เชิงมุม ของเพนดูลัมบิต

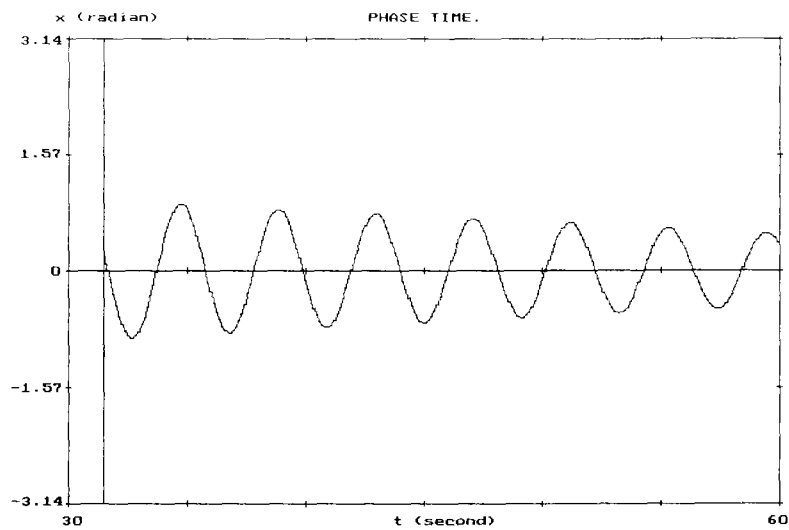
นำเครื่องมือวัดที่ทดสอบแล้วในข้อ 1 ไปวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุนของเพนดูลัมบิต แล้วแสดงผลในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม โดยแบ่งออกเป็น 5 กรณีตามลำดับดังนี้

2.1 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิกโดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่ จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น

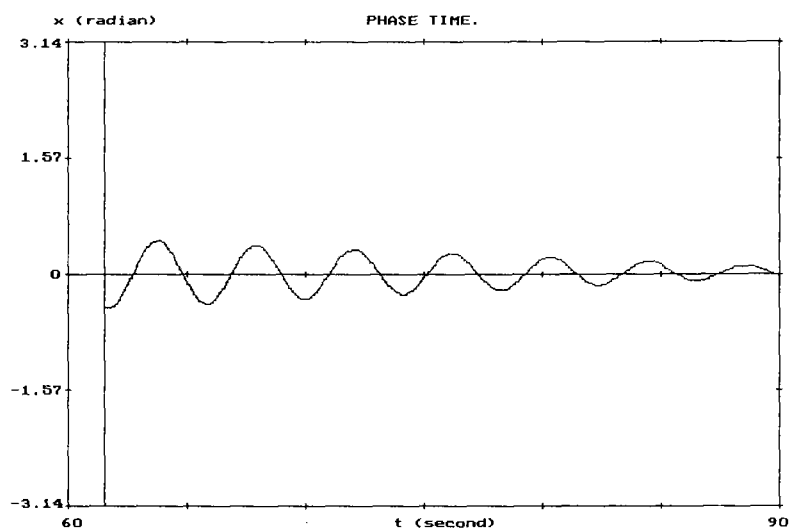
พฤติกรรมเคลื่อนที่ ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา มีผลการวิจัยแสดงดังภาพประกอบ 36 37 และ 38



ภาพประกอบ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อไม่มีแรงต้านจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดอยู่กับจานหมุน ในช่วงเวลา 0 – 30 วินาที

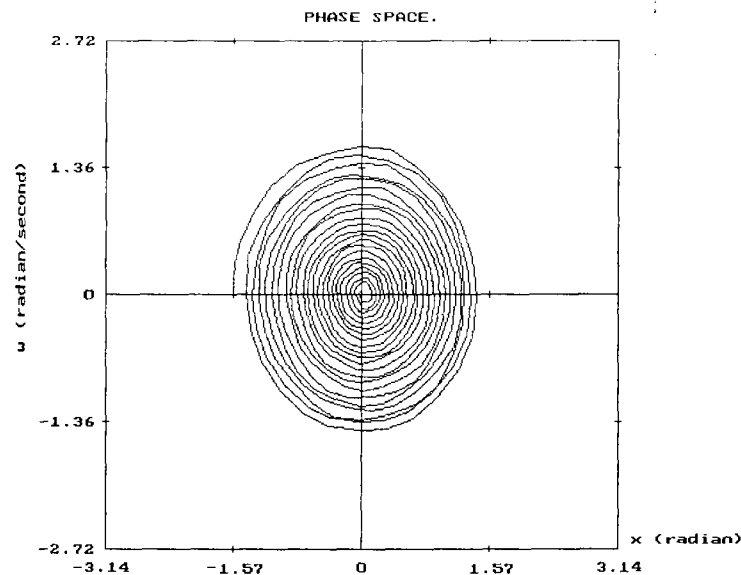


ภาพประกอบ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อไม่มีแรงต้าน จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดอยู่กับจานหมุน ในช่วงเวลา 30 – 60 วินาที



ภาพประกอบ 38 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อไม่มีแรงต้าน จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดอยู่กับจานหมุน ในช่วงเวลา 60 – 90 วินาที

และพฤติกรรมเคลื่อนที่ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม มีผลการวิจัยแสดงดังภาพประกอบ 39



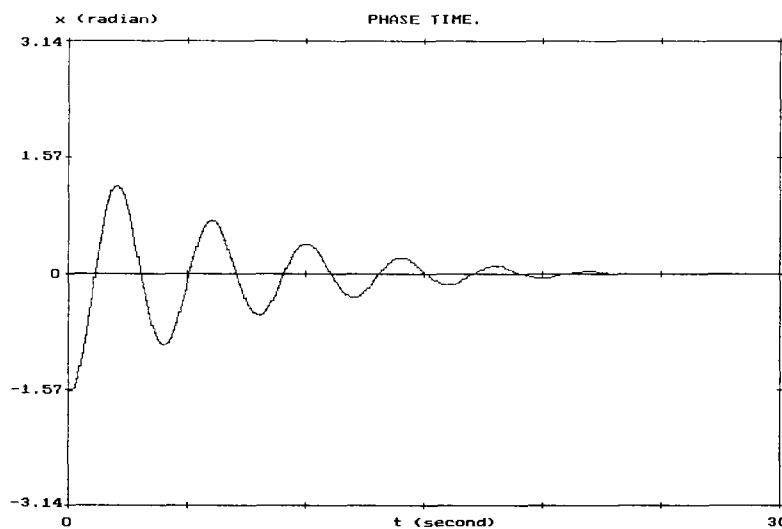
ภาพประกอบ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อไม่มีแรงต้านจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำกับระบบ และมีเพียงสปริงติดอยู่กับจานหมุนเท่านั้น

ผลการวัดที่ปรากฏในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา พบว่าพฤติกรรมเคลื่อนที่ของจานหมุนเป็นการแกว่งแบบฮาร์มอนิก ขนาดของแอมพลิจูดมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมื่อทำการวัดค่าความถี่เชิงมุมจากกราฟ( $\omega_0$ ) ได้เท่ากับ 1.56 เรเดียนต่อวินาที(รายละเอียดของการวัดค่าความถี่เชิงมุมจากกราฟแสดงในภาคผนวก ง) จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่มีผลของแรงต้านการเคลื่อนที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นเมื่อพล็อตกราฟระหว่างขนาดของแอมพลิจูดที่ลดลง ณ ตำแหน่งเวลาต่างๆ แล้วใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) โดยคิดว่าแรงต้านการเคลื่อนที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วเชิงมุม จะพบว่าตัวประกอบการหน่วง( $\gamma$ ) จากรูปกราฟ มีค่าเท่ากับ 0.02 เรเดียนต่อวินาที ซึ่งสามารถคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ( $\omega_0$ )ได้เท่ากับ  $\sqrt{(1.56)^2 + (0.02)^2} = 1.5601 \approx 1.56$  เรเดียนต่อวินาที ส่วนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม มีลักษณะเป็นเกลียววนเข้าหาจุดกำเนิด แสดงว่า ณ มุมเฟสเป็นศูนย์ในกราฟเมื่อจานหมุนเคลื่อนที่ครบรอบ ความเร็ว

เชิงมุมมีค่าลดลงหรืออาจกล่าวได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปนานๆ ทั้งค่าการกระจัดเชิงมุมและความเร็วเชิงมุมมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์

## 2.2 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ

พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา มีผลการวิจัยแสดงดังภาพประกอบ 40

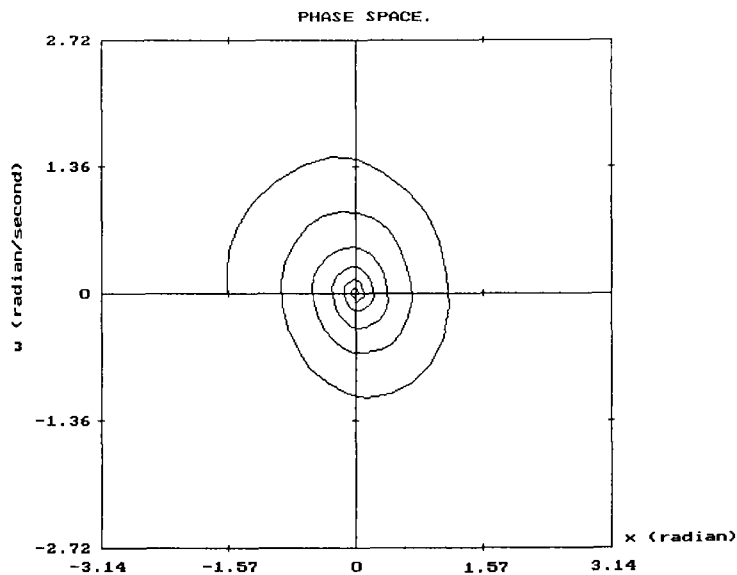


ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ

ผลการวัดที่ปรากฏในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา แสดงพฤติกรรมของการแกว่งแบบฮาร์มอนิก ขณะที่เวลาเพิ่มขึ้นแอมพลิจูดของการแกว่งจะลดลงจนเป็นศูนย์ เมื่อวัดความถี่เชิงมุม( $\omega_0$ )จากกราฟและคำนวณตัวประกอบการหน่วง( $\gamma$ ) มีค่าเท่ากับ 1.55 และ 0.14 เรเดียนต่อวินาทีตามลำดับ ค่าความถี่ธรรมชาติ( $\omega_0$ ) ได้เท่ากับ

1.5563  $\approx$  1.56 เรเดียนต่อวินาที หากเปรียบเทียบกับกรณีแรกพบว่า แอมพลิจูดของการแกว่งจะลดลงเร็วกว่า ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

ภาพประกอบ 41 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

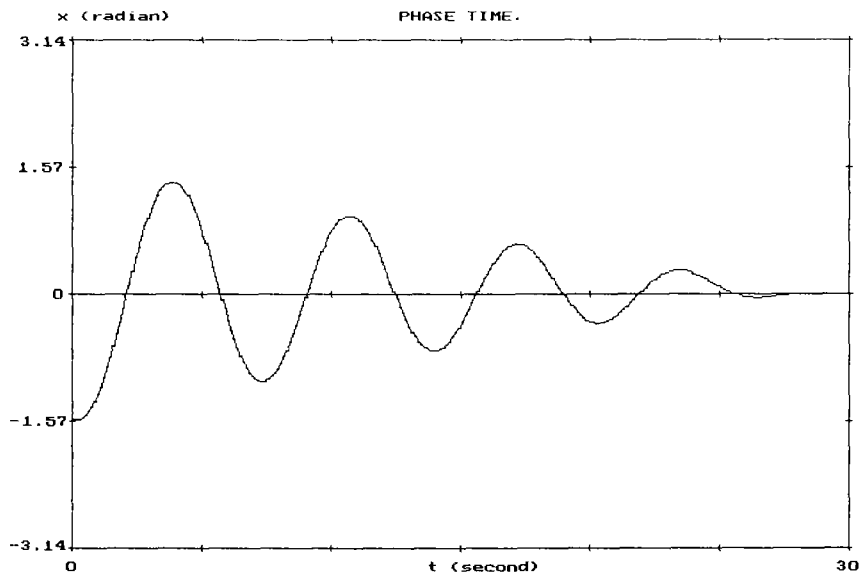


ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม แสดงลักษณะวนเป็นเกลียวเข้าหาจุดกำเนิดเช่นเดียวกับกรณี 2.1 แต่ความเร็วเชิงมุมของจานหมุนลดลงจนเป็นศูนย์เร็วกว่า

### 2.3 ระบบที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน แต่ไม่มีสปริง และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ

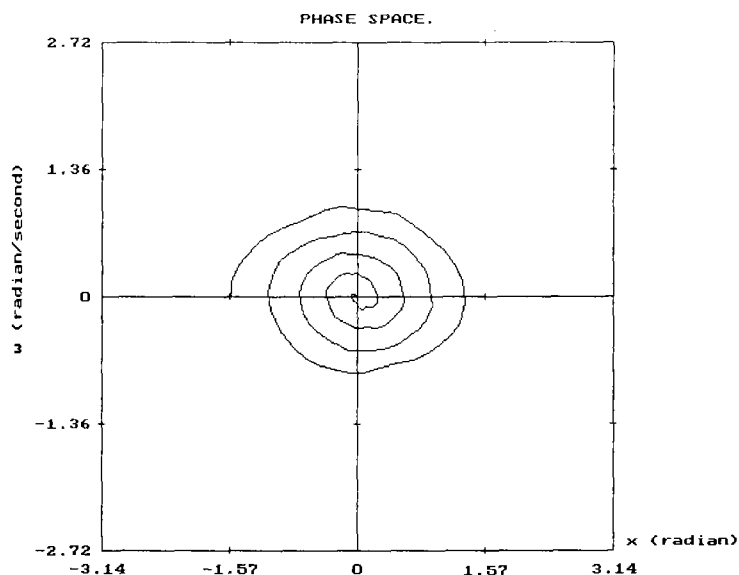
ผลการวิจัยแสดงดังภาพประกอบ 42 และ 43



ภาพประกอบ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีมวลถ่วงติดบนจานหมุนแต่ไม่มีสปริงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ

ในกรณีนี้กราฟแสดงลักษณะการแกว่งแบบฮาร์มอนิกที่มีแอมพลิจูดลดลง มีค่า  $\omega_0$  และ  $\gamma$  เท่ากับ 0.95 และ 0.07 เรเดียนต่อวินาทีตามลำดับ คำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_0$ ) ได้เท่ากับ  $0.9526 \approx 0.95$  เรเดียนต่อวินาที จะเห็นได้ว่า  $\omega_0$  มีค่าต่างจากในกรณี 2.1 ทั้งนี้เป็นเพราะระบบในกรณีนี้ต่างจากกรณี 2.1

พฤติกรรมเคลื่อนที่ในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม มีผลการวิจัยแสดงดังภาพประกอบ 43

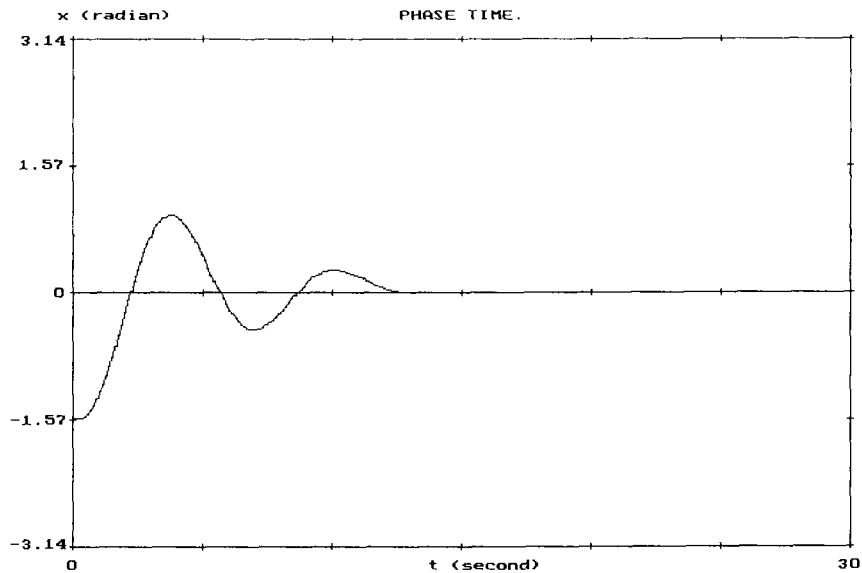


ภาพประกอบ 43 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบมีมวลถ่วงติดบนจานหมุนแต่ไม่มีสปริงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ

พฤติกรรมเคลื่อนที่ที่ปรากฏในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม แสดงถึงผลที่เกิดจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของระบบที่นอกเหนือจากแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเส้นทางเดินกราฟมีลักษณะวนเป็นเกลียวเข้าหาจุดกำเนิด ซึ่งแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการกระจัดเชิงมุมกับความเร็วเชิงมุมที่ลดลงจนเป็นศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป

## 2.4 ระบบที่ไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ

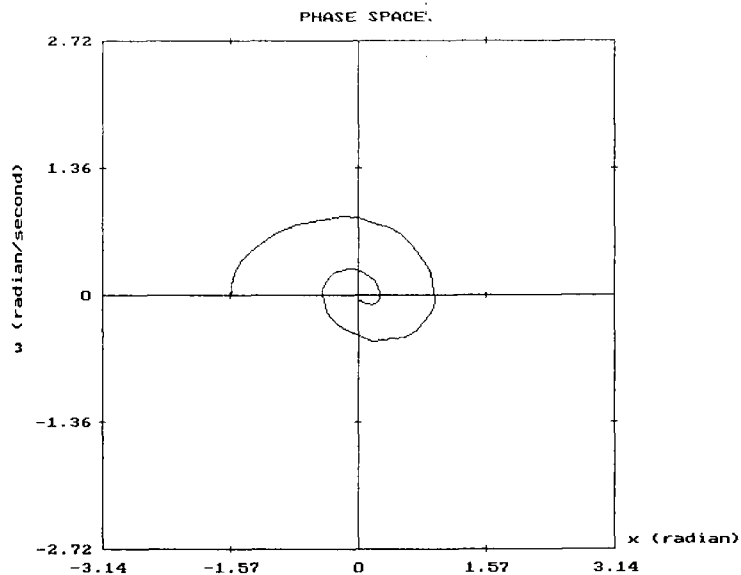
ผลการวิจัยแสดงดังภาพประกอบ 44



ภาพประกอบ 44 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลาเมื่อระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่มากระทำกับระบบ

พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ในกรณีนี้จะแสดงลักษณะการแกว่งแบบฮาร์มอนิกที่มีแอมพลิจูดลดลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น มีค่า  $\omega_D$  และ  $\gamma$  เท่ากับ 0.97 และ 0.17 เรเดียนต่อวินาที ตามลำดับ คำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ( $\omega_0$ )ได้เท่ากับ  $0.9848 \approx 0.98$  เรเดียนต่อวินาที

พฤติกรรมที่ปรากฏในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการ  
 กระจัดเชิงมุม มีผลการวิจัยดังภาพประกอบ 45

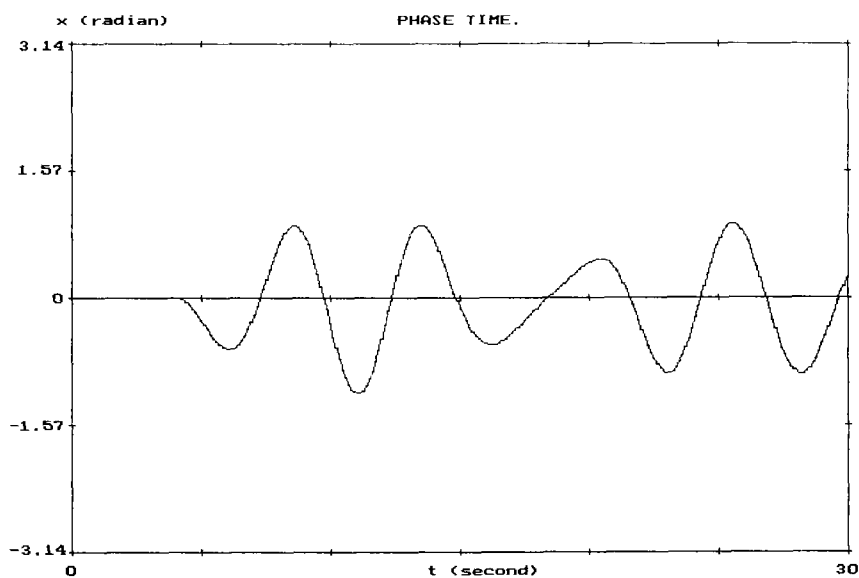


ภาพประกอบ 45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อ  
 ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนจากการ  
 เหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ

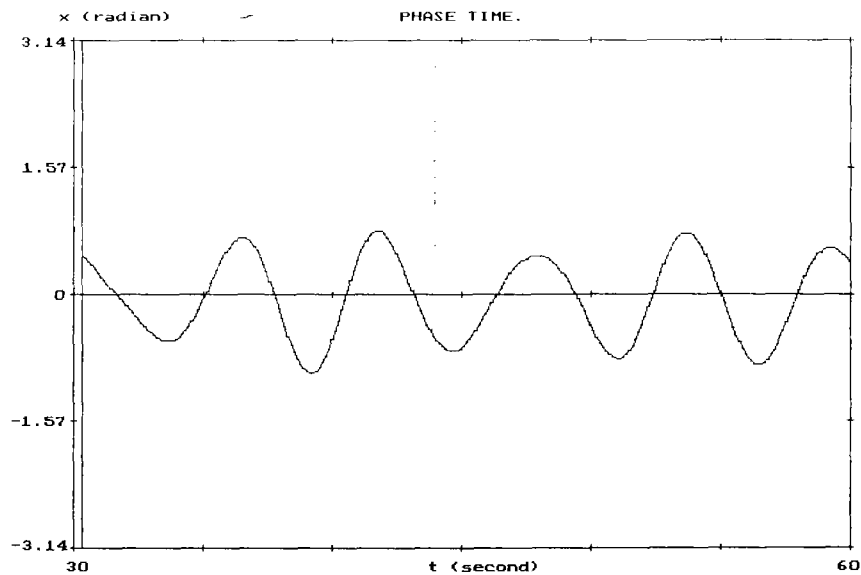
ลักษณะที่ปรากฏในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการ  
 กระจัดเชิงมุม แสดงการวนเป็นเกลียวเข้าหาศูนย์กลางของกราฟ ดังนั้น ณ ตำแหน่งเดียวกัน  
 เมื่อจานหมุนเคลื่อนที่ครบรอบ ความเร็วเชิงมุมมีค่าลดลง

2.5 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ โดยที่งานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

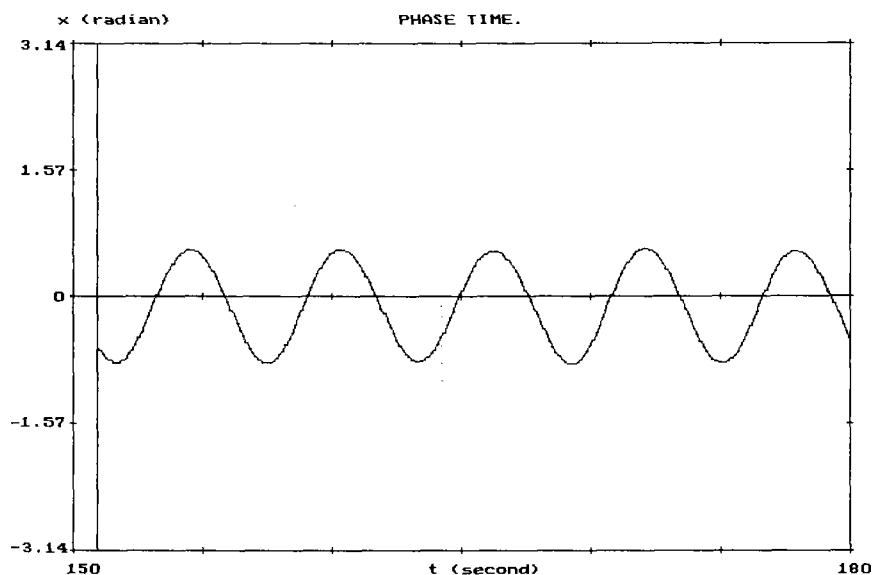
ผลการวิจัยแสดงดังภาพประกอบ 46 47 และ 48



ภาพประกอบ 46 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากกระทำกับระบบ โดยที่งานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ ในช่วงเวลา 0 – 30 วินาที



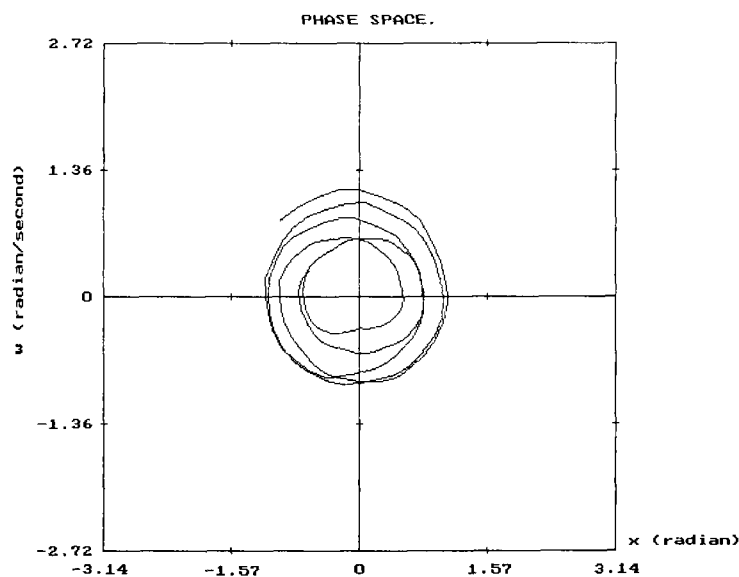
ภาพประกอบ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากกระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ ในช่วงเวลา 30 – 60 วินาที



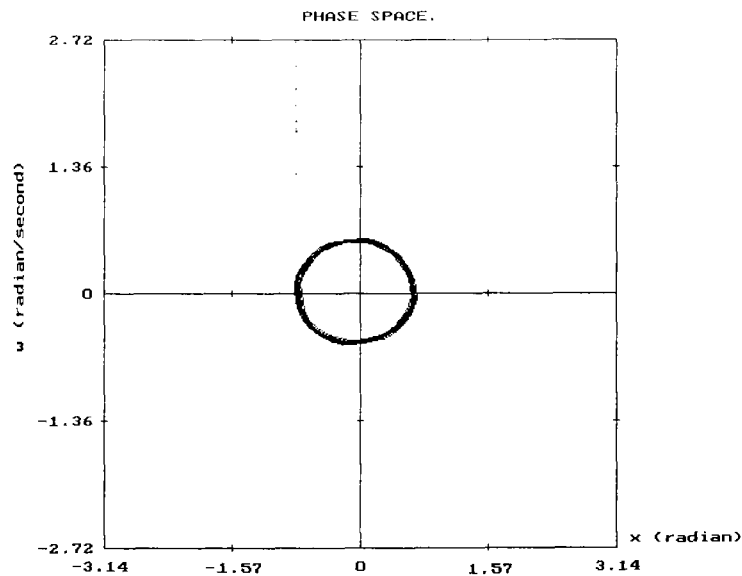
ภาพประกอบ 48 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา เมื่อระบบมีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากกระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ ในช่วงเวลา 150 – 180 วินาที

เมื่อวิเคราะห์จากกราฟพบว่าพฤติกรรมที่ปรากฏในช่วงเริ่มต้นของกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา มีลักษณะเป็นผลรวมของการแกว่งด้วยความถี่ 2 ค่า แต่เมื่อเวลาผ่านไปอยู่ในช่วง 150 – 180 วินาที ลักษณะกราฟต่างจากช่วงเริ่มต้น คือ แสดงลักษณะการแกว่งแบบฮาร์มอนิก คำนวณค่าความถี่ของแรงขับ( $\Omega$ ) ได้เท่ากับ  $1.0681 \approx 1.07$  เรเดียนต่อวินาที

และผลการวิจัยที่เกี่ยวกับกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม สำหรับกรณีนี้ แสดงดังภาพประกอบ 49 และ 50



ภาพประกอบ 49 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากกระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำ ในช่วงเวลา 0 – 60 วินาที



ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม เมื่อระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกซึ่งมีลักษณะเป็นคาบมากระทำกับระบบ โดยที่งานหมุนยัดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กกระทำ ในช่วงเวลา 150 – 180 วินาที

พฤติกรรมที่ปรากฏในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุมก็เช่นเดียวกัน คือในช่วงเริ่มต้นกราฟมีลักษณะไม่เป็นระเบียบ แต่เมื่อเวลาผ่านไปกราฟจะมีลักษณะเป็นวงปิดหมุนวนซ้ำอยู่ตำแหน่งเดิม แสดงว่าในการเคลื่อนที่ที่ครบรอบแต่ละครั้งงานหมุนเคลื่อนที่ซ้ำตำแหน่งเดิม โดยมีความเร็วเชิงมุม ณ ตำแหน่งเดียวกันเท่ากันทุกคาบ และพฤติกรรมนี้ที่เกิดขึ้นจัดเป็นพฤติกรรมแบบพรีออติก

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### สรุปผลการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้เมาส์เป็นเครื่องมือวัดพฤติกรรมการเคลื่อนที่แบบหมุนของระบบเพนดูลัมบิดและดำเนินการวิจัยดังนี้

1. ดัดแปลงเมาส์ชนิดที่มีสายเคเบิลเชื่อมต่อกับพอร์ตแบบอนุกรมของคอมพิวเตอร์ให้เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน จากนั้นจึงจะนำเครื่องมือวัดไปต่อโดยตรงเข้ากับจานหมุนเพื่อวัดการเคลื่อนที่ ผลการวิจัยที่ได้พบว่าการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเมาส์ที่จะนำไปสู่การคำนวณการกระจัดเชิงมุมของจานหมุนเกิดขึ้นน้อยมาก เมื่อพล็อตกราฟพฤติกรรมการเคลื่อนที่ ทำให้สังเกตพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของจานหมุนได้ไม่ชัดเจน ผู้วิจัยจึงใช้สายพานขนาดเล็กคล้องระหว่างวงล้อที่ติดอยู่ตรงกลางของจานหมุนกับแกนวงล้อของเมาส์เพื่อตรึงการเคลื่อนที่ ดังนั้นจำนวนรอบในการหมุนของแกนวงล้อก็จะเพิ่มขึ้น นั่นคือเกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเมาส์มาก ทำให้พฤติกรรมที่ปรากฏในรูปกราฟสังเกตได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

2. เขียนโปรแกรมที่ใช้สำหรับเก็บตำแหน่งการกระจัดเชิงมุมหรือมุมของจานหมุน โดยใช้วิธีการอ่านค่าตำแหน่งเมาส์จากโปรแกรมขับเคลื่อนแล้วแปลงเป็นค่ามุมของจานหมุน ผลการวิจัยพบว่ามีผลจากความเร่งของเมาส์เข้ามาเกี่ยวข้องทำให้การเปลี่ยนค่าจากจำนวนพิกเซลเป็นค่ามุมของจานหมุนคลาดเคลื่อนจากค่ามุมของแผ่นสเกลวัดมุมมาก สังเกตได้จากการเลื่อนตำแหน่งของรูปกราฟที่ปรากฏในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ดังนั้นผู้วิจัยจึงเปลี่ยนมาใช้วิธีเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ควบคุมการรับส่งข้อมูลโดยตรงจากเมาส์ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ทำงานแตกต่างจากวิธีแรก โดยโปรแกรมจะเก็บค่าข้อมูลตัวเลขที่ส่งจากเมาส์แล้วแปลงเป็นค่ามุมของจานหมุน ซึ่งผลการวิจัยที่ได้พบว่ามีมุมของจานหมุนที่วัดได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีแรก

3. แสดงผลการวัดพฤติกรรมการเคลื่อนที่แบบหมุนของระบบเพนดูลัมบิด ในงานวิจัยนี้ได้แสดงผลการวัดในรูปกราฟ 2 ลักษณะ คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลาและกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน สำหรับโปรแกรมคำสั่งที่ใช้ประมวลผลและแสดงผลการวัด จะทำหน้าที่คำนวณตำแหน่งของเมาส์แล้วเปลี่ยนเป็นค่าการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน ณ เวลาต่าง ๆ แล้วนำค่าดังกล่าวไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ส่วนกราฟแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม โปรแกรมจะเปลี่ยนตำแหน่งของเมาส์เป็นค่าการกระจัดเชิงมุมของจานหมุนที่เวลาต่าง ๆ จากนั้นจึงนำค่าการกระจัดเชิงมุมไปคำนวณหาค่าความเร็วเชิงมุม แล้วนำค่าความเร็วเชิงมุมและค่าการกระจัดเชิงมุมของจานหมุนไปพล็อตกราฟ ผลการการวิจัยพบว่าในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลาโปรแกรมสามารถแสดงผลการวัดได้ดีและชัดเจน และในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน โปรแกรมแสดงเส้นทางเดินกราฟที่ไม่ราบเรียบซึ่งเกิดจากข้อมูลที่ได้มาเพื่อคำนวณค่าความเร็วเชิงมุมเป็นข้อมูลในช่วงเวลาสั้นมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้แก้ไขโปรแกรมให้ทำการเฉลี่ยค่าความเร็วเชิงมุมในช่วงเวลาที่ยาวขึ้น และเมื่อทำการวัดอีกครั้งพบว่าโปรแกรมสามารถแสดงผลการวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่ได้ชัดเจนขึ้น

4. ทดสอบเครื่องมือวัดและโปรแกรมที่เขียนขึ้นในงานวิจัยนี้ ผลการวิจัยพบว่าเครื่องมือวัดการกระจัดเชิงมุมที่สร้างจากเมาส์สามารถวัดค่าการกระจัดเชิงมุมของจานหมุนได้ใกล้เคียงกับค่ามุมจากแผ่นสเกลวัดมุม โดยผลการวัดที่มุมต่างๆ มีความแตกต่างจากสเกลวัดมุมสูงสุดเท่ากับ 0.6 องศาและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ระหว่าง 0.3 – 0.5 องศา และผลการทดสอบความถูกต้องในการวัดเวลาของโปรแกรมขณะทำการวัดการกระจัดเชิงมุม พบว่าค่าเวลาของโปรแกรมที่วัดได้มีความแตกต่างจากค่าเวลาจากนาฬิกาจับเวลาไม่เกิน 1 วินาที เมื่อนำเครื่องมือวัดและโปรแกรมที่ทดสอบแล้วไปวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่ของระบบเพนดูลัมบิต ผลการวิจัยพบว่าเครื่องมือวัดสามารถแสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ได้ดี โดยแสดงในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ซึ่งแสดงให้เห็นถึงคาบการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงขนาดแอมพลิจูดของการแกว่งอันเป็นผลมาจากแรงต้านการเคลื่อนที่ และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุมแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วเชิงมุมในแต่ละคาบและความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสของความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน

## อภิปรายผลการวิจัย

ในการดัดแปลงเมาส์ให้เป็นเครื่องมือวัดการกระจัดเชิงมุมของจานหมุน ไม่สามารถนำเครื่องมือวัดไปต่อโดยตรงเข้ากับจานหมุนได้ ต้องอาศัยการหดรอบการเคลื่อนที่เพื่อให้เห็นพฤติกรรมเคลื่อนที่ของจานหมุนชัดเจนขึ้น จากการทำวิจัยพบว่าในการใช้สายพานขนาดเล็กคล้องระหว่างวงล้อที่ติดอยู่ตรงกลางของจานหมุนกับแกนวงล้อของเมาส์(เครื่องมือวัด) หากจัดวางตำแหน่งระหว่างเครื่องมือวัดกับวงล้อที่ติดบนจานหมุนไม่เหมาะสม จะทำให้เกิดการไถลของแกนวงล้อในเครื่องมือวัด ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าการกระจัดเชิงมุมของ

งานหมุนได้และนอกจากนี้สภาพของสายพานก็มีผลต่อการวัดด้วย เช่น หากคล้อยสายพานที่เครื่องมือวัดเอาไว้วันนาน ๆ จะทำให้สายพานเสียรูปทรงหรือเกิดการผิดรูปไปจากเดิม(เกิดการโค้งงอที่สายพาน)ดังนั้นเมื่องานหมุนเคลื่อนที่จะเกิดการสะดุดในบริเวณที่เกิดการโค้งงอขึ้น ทำให้ในขณะนั้นแกนวงล้อของเครื่องมือวัดไม่สามารถวัดการกระจัดเชิงมุมของงานหมุนได้ ส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัด และการแสดงผลการวัดในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา คือเมื่องานหมุนหยุดหนึ่งลักษณะเส้นกราฟที่ปรากฏจะเป็นเส้นตรงที่ไม่อยู่กึ่งกลางของกราฟซึ่งจะทำให้โปรแกรมแสดงผลการวัดคลาดเคลื่อน(การแสดงผลที่เป็นจริงคือเมื่องานหมุนหยุดหนึ่งลักษณะเส้นกราฟที่ปรากฏจะเป็นเส้นตรงที่อยู่กึ่งกลางของกราฟ) ดังนั้นในการวิจัยก่อนทำการวัดจะต้องตรวจสอบสภาพของสายพานทุกครั้ง และในการทดสอบการเคลื่อนที่โดยใช้วงล้อติดตรงกลางของงานหมุน หากเปลี่ยนขนาดของวงล้อจะทำให้ความละเอียดของเครื่องมือวัดเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย โดยขนาดวงล้อเพิ่มความละเอียดของเครื่องมือวัดก็จะเพิ่มตามไปด้วย และนอกจากนี้เมื่อเปลี่ยนขนาดวงล้อแล้วจะต้องทำการปรับเปลี่ยนค่าคงที่ที่จะคำนวณค่าการกระจัดเชิงมุมของงานหมุนในโปรแกรมด้วย เพราะค่าคงที่นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของวงล้อ

ส่วนผลของแรงต้านการเคลื่อนที่ที่เครื่องมือวัดแสดงออกมานั้น เนื่องมาจากในระบบเพนดูลัมบิตมีแรงต้านการเคลื่อนที่ที่นอกเหนือจากการใส่แรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก แรงต้านการเคลื่อนที่นี้เกิดจาก

- แรงเสียดทานจากความผิดตรงแกนหมุนในระบบ
- แรงต้านอากาศ
- แรงเสียดทานจากความผิดตรงแกนวงล้อของเครื่องมือวัด

นอกจากนี้งานหมุนในระบบจะสูญเสียพลังงานในการดึงสายพานที่คล้องอยู่กับแกนวงล้อให้เคลื่อนที่ตามเมื่องานหมุนแกว่ง และการจัดวางตำแหน่งระหว่างเครื่องมือวัดกับวงล้อที่ติดบนงานหมุนก็มีผลต่อแรงต้านการเคลื่อนที่ด้วยเพราะหากจัดวางตำแหน่งให้ห่างมากจนเกินไปจะทำให้เกิดความผิดตรงแกนวงล้อของเครื่องมือวัดมากขึ้น แรงต้านการเคลื่อนที่ก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นเมื่อวัดพฤติกรรมของงานหมุนทุกครั้งก็จะมีผลของแรงต้านการเคลื่อนที่นี้เข้ามาเกี่ยวข้องเสมอไม่สามารถกำจัดผลของแรงต้านการเคลื่อนที่นี้ออกไปได้ และการพิจารณาค่าตัวประกอบการหน่วง( $\gamma$ ) ในงานวิจัยนี้แยกออกเป็น 2 กรณี คือกรณีแรกระบบเคลื่อนที่โดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ค่า  $\gamma$  จะขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบการหน่วงที่เกิดจากแรงเสียดทานจากความผิดตรงแกนหมุนในระบบ แรงเสียดทานจากความผิดตรงแกนหมุนของเครื่องมือวัดแรงต้านอากาศ และพลังงานที่งานหมุนในระบบสูญเสียในการดึงสายพานที่คล้องอยู่กับแกนวงล้อ และกรณีที่สองระบบเคลื่อนที่โดยมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ค่า  $\gamma$  จะเป็นผลรวมระหว่างค่าตัวประกอบการหน่วงที่เกิดจากแรง

เสียดทานจากความฝืดตรงแกนหมุนในระบบ แรงเสียดทานจากความฝืดตรงแกนวงล้อของ เครื่องมือวัด แรงต้านอากาศ และพลังงานที่จางหมดในระบบสูญเสียในการดึงสายพานที่คล้อง อยู่กับแกนวงล้อ กับค่าตัวประกอบภาระหน่วงที่เกิดจากแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำ สนามแม่เหล็ก

### ข้อเสนอแนะ

การดัดแปลงเมาส์เป็นเครื่องมือวัดการกระจัดเชิงมุม หากต้องการให้เครื่องมือวัดมี ความละเอียดในการแสดงผลค่าการกระจัดเชิงมุมมากขึ้น ก็สามารถทำได้โดยการเพิ่มขนาด ของวงล้อที่ติดอยู่บนแกนหมุนให้ใหญ่ขึ้น และหากต้องการวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่แบบหมุน ของระบบอื่นๆในรูปของกราฟ เครื่องมือวัดการกระจัดเชิงมุมที่สร้างจากเมาส์นี้มีความเหมาะสม ที่จะนำไปใช้เนื่องจากสามารถแสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ในรูปกราฟได้อย่างชัดเจน และหาก จะนำไปใช้ในระบบอื่นที่เคลื่อนที่แบบหมุน สิ่งที่ต้องระมัดระวังก็คือค่าคงที่ที่จะใช้ในการคำนวณ ค่าการกระจัดเชิงมุมต้องสอดคล้องกับขนาดวงล้อที่ใช้ในการทดสอบ นั่นคือต้องมีการเปรียบเทียบ เครื่องมือทุกครั้งที่มีการเปลี่ยนขนาดวงล้อที่ใช้สำหรับทดสอบ

ในการวิจัยต่อไปอาจนำเครื่องมือวัดไปใช้ศึกษาปรากฏการณ์เคออสของเพนดูลัมบิด ได้ เพราะเครื่องมือสามารถติดตามวัดพฤติกรรมเคลื่อนที่ได้อย่างต่อเนื่อง และนอกจากนี้ผล การทดลองในรูปของกราฟที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมเคลื่อนที่ในงานวิจัยนี้อาจนำไปศึกษา เกี่ยวกับค่า Q factor หรือตัวประกอบคุณภาพ(Quality Factor) ได้ต่อไป

**บรรณานุกรม**

## บรรณานุกรม

- ณสรณ์ ผลโชค, นิรมล ปิตะนีละผลิน และบัญชา ศิลป์สกุลสุข. (2536, 27 พฤษภาคม). รายงานการวิจัยการศึกษาปรากฏการณ์เคออสด้วยคอมพิวเตอร์. กรุงเทพฯ: คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- พี บี กุฟตัน. (2538). *คัมภีร์การใช้งานการสื่อสารอนุกรมบน PC = Mastering Serial Communicatiom*. จีระศักดิ์ เหลืองอุไร แปลและเรียบเรียง. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- นิรมล ปิตะนีละผลิน และคนอื่นๆ. (2536). "พฤติกรรมแบบเคออสของเพนดูลัมบิด," *วิทยาศาสตร์ มศว*. 9(2): 21 – 30.
- Bulur, E., Anilturk, S.O. & Ozer, A.M. (1996). " Computer analysis of pendulum motion: An alternative way of collecting experiment data," *American Journal of Physics*. 64(10): 1333 – 1337.
- Donovan, J. S. (1992). *Building a Better Mouse Trap : A Programmer 's Guide to the Mouse*. California: Osborne McGraw – Hill.
- Fuller, F. & Manning, W. (1997). *Computers and Information Processing*. 2nd ed. United State: Course Technology.
- Goldstein, H. (1980). *Classical Mechanics*. 2nd ed. United State: Addison – Wesley.
- Grant, R. F. & George, L. C. (1990). *Analytical Mechanics*. 6th ed. United State: Saunders College.
- Hacking a Mouse for Encoders*. (Online). (2000,June). Available Telnet: boondog.com.
- Handler, J. T., Ochoa, O. R. & Kolp, N. F. (1996). "A Mouse in Our Laboratory," *The Physics Teacher*. 34: 488 – 490.
- Helfrick, A. D. & Cooper, W. D. (1990). *Modern Electric Instrumentation and Measurement Techniques*. New Jersey: Prentice Hall.
- Mice : How do they work?*. (Online). (2001,May). Available Telnet: 4qd.co.uk.
- Norton, P. (1994). *Peter Norton's Introduction to Computers*. United State: Macmillan /McGraw - Hill.
- Ochoa, O.R. & Kolp, N. F. (1997). "The computer mouse as a data acquisition interface: Application to harmonic oscillators," *American Journal of Physics*. 65(11): 1115 – 1118.

- Pasahow, E. (1982). *Principles of Integrated Electronics*. California: Breton.
- Rollain, P. J. & Kraus, T.E. (1997). *Exploring Electricity/Electronics*. United State: Delma.
- Tanenbaum, A. S. (1999). *Structured Computer Organization*. 4th ed. Singapore: Prentice Hall Simon & Schuster(Asia).
- Walnam, C. (1993). *Borland C++ Power Programming*. United State: Que.
- White, R. (1994). *How Computers Work*. California: Ziff – Davis Press.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

โปรแกรมคำสั่งในการตรวจวัดการกระจัดเชิงมุมกับเวลา

```
#include <comintpt.h>      // Header File สำหรับสื่อสารข้อมูลกับเมาส์
#include <scrpt.h>         // Header File แสดงหน้าจอกกราฟ
#include <print.h>        // Header File สำหรับการพิมพ์ผลการทดลอง
```

```
ScreenPhaseTime SCPT;
```

```
print PRN;
```

```
long TimeInterval(long time ,long n) //กำหนดช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลตำแหน่งเมาส์
```

```
{
```

```
    long ticks, t;
```

```
    t = time;
```

```
    ticks = time + n;
```

```
    while( t < ticks)
```

```
        { t = biostime(0, 0L); }
```

```
    return t;
```

```
}
```

```
main()
```

```
{
```

```
    clrscr();
```

```
    long time ,n = 1;
```

```
    time = biostime(0 ,0L);
```

```
    int count ,h = 546 ,Frame = 0 ,newh
```

```
        ,NumberPage = 1
```

```
        ,CheckPrint ,y ,x1 ,x2 ,y1 ,y2 ,yinitial;
```

```
    unsigned addposition ,initialtime ,checktime ,deltatime;
```

```
    wheel.OpenPort();
```

```
    wheel.Set_y();
```

```
yinitial = wheel.Get_y();

SCPT.Screen(NumberPage);
getche();

x1 = 50; y1 = yinitial + 240;

TimeInterval(time ,n);
time = TimeInterval(time ,n);
initialtime = time * 18.2;
initialtime = checktime;

while(Frame < 3)
{
    deltatime = checktime - initialtime;
    addposition = ((deltatime) % 30);
    newh = h - addposition;
    SCPT.DrawLine(50 + addposition ,60 ,addposition ,-180 ,15);

    for (count = 0; count < newh; count++)
    {
        TimeInterval(time ,n);
        time = TimeInterval(time ,n);

        x2 = count;
        y = wheel.Get_y();

        y2 = -y * 18/65;

        SCPT.DrawLine(x1 + addposition, y1, x2 + addposition, y2 ,15);

        x1 = (count) + 50;
```

```
        y1 = (y * 18/65) + 240;
    }
    if(CheckPrint == kbhit()) PRN.PrintImage();

    x1 = 50;
    y1 = (y * 18/65) + 240;

    NumberPage++;
    SCPT.Screen(NumberPage);

    Frame = Frame++;
    count = 0;
    h = 546;

    TimeInterval(time ,n);
    time = TimeInterval(time ,n);
    checktime = time * 18.2;
}
wheel.ClosePort();

return 0;
}
```

**ภาคผนวก ข**

**โปรแกรมคำสั่งในการตรวจวัดความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม**

```

#include <comintpv.h>      // Header File สำหรับสื่อสารข้อมูลกับเมาส์
#include <scrnpv.h>        // Header File แสดงหน้าจอกราฟ
#include <print.h>         // Header File สำหรับการพิมพ์ผลการทดลอง

```

```

long TimeInterval(long time ,long n);

```

```

ScreenPhaseSpace SCPV;
print PRN;

```

```

long TimeInterval(long time ,long n) //กำหนดช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลตำแหน่งเมาส์
{
    long ticks ,t;

    t = time;
    ticks = time + n;

    while( t < ticks)
        { t = biostime(0 ,0L); }
    return t;
}

```

```

main()
{
    clrscr();
    long time ,n = 3;
    int Phase[7] ,i ,count ,h = 80 ,Frame = 0 ,CheckPrint;

```

```
int x1 = 320 ,y1 = 240 ,x2 ,y2
    ,smx1 = 320 ,smy1 = 240 ,smx2 ,smy2
    ,ssmx1 = 320 ,ssmy1 = 240 ,ssmx2 ,ssmy2
    ,sssmx1 = 320 ,sssmx1 = 240 ,sssmx2 ,sssmx2;
```

```
time = biostime(0 ,0L);
SCPV.Screen();
```

```
wheel.OpenPort();
wheel.Set_y();
```

```
for(i = 0; i < 7; i++)
{
    TimeInterval(time ,n);
    time = TimeInterval(time ,n);
    Phase[i] = (wheel.Get_y());
}
```

```
while(Frame < 3)
{
    for (count= 0; count < h; count++)
    {
        TimeInterval(time ,n);
        time = TimeInterval(time ,n);

        for(i = 0; i < 6; i++)
        {
            Phase[i]= Phase[i + 1];
        }
        Phase[6]= wheel.Get_y();
    }
}
```

```
x2 = -Phase[3] * 18/65 + 320;
y2 = ((Phase[6] - Phase[0]) * 0.24) + 240;

smx2 = x1 + (x2 - x1)/2;
smy2 = y1 + (y2 - y1)/2;

ssmx2 = smx1 + (smx2 - smx1)/2;
ssmy2 = smy1 + (smy2 - smy1)/2;

sssmx2 = ssmx1 + (ssmx2 - ssmx1)/2;
sssmmy2 = ssmmy1 + (sssmmy2 - ssmmy1)/2;

SCPV.DrawLine(sssmx1 ,sssmmy1 ,sssmx2 ,sssmmy2 ,15);

x1 = x2; y1 = y2;
smx1 = smx2; smy1 = smy2;
ssmx1 = ssmx2; ssmmy1 = ssmmy2;
sssmx1 = sssmx2; sssmmy1 = sssmmy2;
}

if(CheckPrint == kbhit()) PRN.PrintImage();

count = 0; h = 160;
Frame++;
SCPV.Screen();
}
wheel.ClosePort();
return 0;
}
```

## ภาคผนวก ค

โปรแกรมส่วนหัว(Header Files) สำหรับทำงานร่วมกับโปรแกรมจัดการกระจัดเชิงมุม

**COMINTPT.H**

```
#ifndef _COMINTPT_H
#define _COMINTPT_H

#include <dos.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <iostream.h>

#define COMP1 0x3F8
#define valirq 0x0C

class whDrive
{
    public:
        void OpenPort();
        void ClosePort();
        void Set_y();
        int Calculate_y();
        int Get_y();
    private:
        int y;
};

whDrive wheel;

int store[3] ,combytes[3];
int storein = 0 ,inbyte = 0 ,bytenum = 0;
int dy ,tempy;
int miny = -32628 ,maxy = 32627;
```

```
void interrupt (*comported)(...);
```

```
void interrupt Comport(...);
```

```
void interrupt Comport(...)
```

```
{
```

```
    wheel.Calculate_y();
```

```
    outp(0x20 ,0x20);
```

```
}
```

```
void whDrive::OpenPort()
```

```
{
```

```
    outp(COMP1 + 1 ,0);
```

```
    comported = getvect(valirq);
```

```
    setvect(valirq ,Comport);
```

```
    outp(COMP1 + 3 ,0x80);
```

```
    outp(COMP1 + 0 ,0x60);
```

```
    outp(COMP1 + 1 ,0x00);
```

```
    outp(COMP1 + 3 ,0x06);
```

```
    outp(COMP1 + 2 ,0xff);
```

```
    outp(COMP1 + 2 ,0xc1);
```

```
    outp(COMP1 + 4 ,0x0B);
```

```
    outp(0x21 ,(inp(0x21) & 0xEF));
```

```
    outp(COMP1 + 1 ,0x01);
```

```
    outp(0x20 ,0x20);
```

```
}
```

```
void whDrive::ClosePort()
```

```
{
```

```
    outp(COMP1 + 1 ,0);
```

```
    outp(0x21 ,(inp(0x21) | 0x10));
```

```
    setvect(valirq ,comported); }
```

```
void whDrive::Set_y()
```

```
{  
    y = 0;  
}
```

```
int whDrive::Calculate_y()
```

```
{  
    int valx;  
  
    do  
    {  
        valx = inp(COMP1 + 5);  
  
        if(valx & 1)  
        {  
            store[storein] = inp(COMP1);  
  
            if (64 & store[storein])  
            {  
                bytenum = 0;  
            }  
            combytes[bytenum] = store[storein];  
            bytenum++;  
            storein++;  
        }  
        if(bytenum == 3)  
        {  
            dy = ((combytes[0] & 12) << 4) + combytes[2];  
  
            if (dy >= 128) dy = dy - 256;  
  
            tempy = y + dy;  
        }  
    }  
}
```

```
        y = tempy;

        bytenum = 0;
    }

    if(storein == 3)
    {
        storein = 0;
    }

} while(valx & 1);

return y;
}

int whDrive::Get_y()
{
    return y;
}

#endif
```

**COMINTPV.H**

```
#ifndef _COMINTPV_H
#define _COMINTPV_H

#include <dos.h>
#include <bios.h>
#include <conio.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

#define COMP1 0x3F8
#define valirq 0x0C

class whDrive
{
    public:
        void OpenPort();
        void ClosePort();
        void Set_y();
        void SetDel_y();
        int Calculate_y();
        int Get_y();
        int GetDel_y();

    private:
        int y;
        int delta_y;
};
```

```
whDrive wheel;
```

```
int store[3];
```

```
int storein = 0;
```

```
int combytes[3];
```

```
int dy ,delta_y ,inbyte = 0 ,bytenum = 0;
```

```
int tempy ,temp_del;
```

```
int miny = -32628 ,maxy = 32627;
```

```
void interrupt (*comported)(...);
```

```
void interrupt Comport(...);
```

```
void interrupt Comport(...)
```

```
{
```

```
    wheel.Calculate_y();
```

```
    outp(0x20 ,0x20);
```

```
}
```

```
void whDrive::OpenPort()
```

```
{
```

```
    outp(COMP1 + 1 ,0);
```

```
    comported = getvect(valirq);
```

```
    setvect(valirq ,Comport);
```

```
    outp(COMP1 + 3 ,0x80);
```

```
    outp(COMP1 + 0 ,0x60);
```

```
    outp(COMP1 + 1 ,0x00);
```

```
    outp(COMP1 + 3 ,0x06);
```

```
    outp(COMP1 + 2 ,0xff);
```

```
    outp(COMP1 + 2 ,0xc1);
```

```
    outp(COMP1 + 4 ,0x0B);
```

```
    outp(0x21 ,(inp(0x21) & 0xEF));
    outp(COMP1 + 1 ,0x01);
    outp(0x20 ,0x20);
}
```

```
void whDrive::ClosePort()
{
    outp(COMP1 + 1 ,0);
    outp(0x21 ,(inp(0x21) | 0x10));

    setvect(valirq ,comported);
}
```

```
void whDrive::Set_y()
{
    y = 0;
}
```

```
void whDrive::SetDel_y()
{
    delta_y = 0;
}
```

```
int whDrive::Get_y()
{
    return y;
}
```

```
int whDrive::GetDel_y()
{
    return delta_y;
}
```

```
int whDrive::Calculate_y()
{
    int valx;

    do
    {
        valx = inp(COMP1 + 5);

        if(valx & 1)
        {
            store[storein] = inp(COMP1);

            if(64 & store[storein] == 64)
            {
                bytenum = 0;
            }

            combytes[bytenum] = store[storein];
            bytenum++;
            storein++;
        }

        if(bytenum == 3)
        {
            dy = ((combytes[0] & 12) << 4) + combytes[2];

            if(dy >= 128) dy = dy - 256;

            tempy = y + dy;
            temp_del = delta_y + dy;
        }
    }
}
```

```
    y = tempy;
    delta_y = temp_del;
    bytenum = 0;
}

if(storein == 3)
{
    storein = 0;
}
} while(valx & 1);

return y;
}

#endif
```

**SCRNPT.H**

```

#ifndef _SCRNPT_H
#define _SCRNPT_H

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

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

ScreenPhaseTime SCREENPT;

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

    setbkcolor(BLACK);
    setcolor (WHITE);
    rectangle(50 ,60 ,596 ,420); // วาดกรอบ
    line(50,240, 596, 240);      // วาดเส้นตรงกลางของกรอบในแนวนอน

    outtextxy(280,40,"PHASE TIME.");
}

```

```

        outtextxy(40, 40,"X (degrees)");
        outtextxy(515, 430,"t (seconds)");
    }

void ScreenPhaseTime::ScalePlus() // แบ่งเสกกลในแกนบวก
{
    line(48, 150, 52, 150); line(48, 240, 52, 240);
    line(48, 420, 52, 420); line(594, 150, 598, 150);
    line(594, 240, 598, 240); line(594, 420, 598, 420);

    outtextxy(21,58,"180");
    outtextxy(21, 147, " 90");
}

void ScreenPhaseTime::ScaleMinus() // แบ่งเสกกลในแกนลบ
{
    line(48,60, 52, 60); line(48,330, 52, 330);
    line(594,60, 598, 60); line(594,330, 598, 330);

    outtextxy(14,415,"-180");
    outtextxy(14, 327, " -90");
}

void ScreenPhaseTime::ScaleTime() /// แบ่งเสกกลในแกนเวลา
{
    line(50 ,58 ,50 ,62); line(141 ,58 ,141 ,62);
    line(232 ,58 ,232 ,62);      line(323 ,58 ,323 ,62);
    line(414 ,58 ,414 ,62);      line(505 ,58 ,505 ,62);
    line(596 ,58 ,596 ,62);      line(50, 238, 50, 242);

    line(141, 238, 141, 242); line(232, 238, 232, 242);
    line(323, 238, 323, 242); line(414, 238, 414, 242);
    line(505, 238, 505, 242); line(596 ,238 ,596 ,242);
}

```

```

line(50, 418, 50, 422);    line(141, 418, 141, 422);
line(232, 418, 232, 422);line(323, 418, 323, 422);
line(414, 418, 414, 422); line(505, 418, 505, 422);
line(596 ,418 ,596 ,422);
}

void ScreenPhaseTime::DrawLine(int x1 ,int y1 ,int x2 ,int y2 ,int colorline)
{
    setcolor(colorline); line(x1 ,y1 ,x2 + 50 ,-(y2) + 240);
}

void ScreenPhaseTime::RunPageScreen(int Frame)
{
    switch(Frame)
    {
        case 1: outtextxy(37 ,237 ,"0");  outtextxy(603 ,237 ,"30"); break;
        case 2: outtextxy(31 ,237 ,"31");  outtextxy(603 ,237 ,"60"); break;

        case 3: outtextxy(31 ,237 ,"61");  outtextxy(603 ,237 ,"90"); break;
        case 4: outtextxy(31 ,237 ,"91");  outtextxy(603 ,237 ,"120"); break;

        case 5: outtextxy(23 ,237 ,"121"); outtextxy(603 ,237 ,"150"); break;
        case 6: outtextxy(23 ,237 ,"151"); outtextxy(603 ,237 ,"180"); break;

        case 7: outtextxy(23 ,237 ,"181"); outtextxy(603 ,237 ,"210"); break;
        case 8: outtextxy(23 ,237 ,"211"); outtextxy(603 ,237 ,"240"); break;

        case 9: outtextxy(23 ,237 ,"241"); outtextxy(603 ,237 ,"270"); break;
        case 10: outtextxy(23 ,237 ,"271"); outtextxy(603 ,237 ,"300"); break;

        case 11: outtextxy(23 ,237 ,"301"); outtextxy(603 ,237 ,"330"); break;
        case 12: outtextxy(23 ,237 ,"331"); outtextxy(603 ,237 ,"360"); break;
    }
}

```

```
case 13:outtextxy(23 ,237 ,"361"); outtextxy(603 ,237 ,"390"); break;
case 14:outtextxy(23 ,237 ,"391"); outtextxy(603 ,237 ,"420"); break;

case 15:outtextxy(23 ,237 ,"421"); outtextxy(603 ,237 ,"450"); break;
case 16:outtextxy(23 ,237 ,"451"); outtextxy(603 ,237 ,"480"); break;

case 17:outtextxy(23 ,237 ,"481"); outtextxy(603 ,237 ,"510"); break;
case 18:outtextxy(23 ,237 ,"511"); outtextxy(603 ,237 ,"540"); break;

case 19:outtextxy(23 ,237 ,"541"); outtextxy(603 ,237 ,"570"); break;
case 20:outtextxy(23 ,237 ,"571"); outtextxy(603 ,237 ,"600"); break;
}
}

void ScreenPhaseTime::Screen(int Frame)
{
    SCREENPT.Frame();
    SCREENPT.ScaleTime();
    SCREENPT.ScaleMinus();
    SCREENPT.ScalePlus();
    SCREENPT.RunPageScreen(Frame);
    Setcolor(BLUE);
    outtextxy(50 ,450 "Press any key to print graph.(except PrintScreen button).")
}
#endif
```

**SCRNPV.H**

```

#ifndef _SCRNPV_H
#define _SCRNPV_H

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

class ScreenPhaseSpace
{
public :
    void Frame();
    void ScalePosition();
    void ScaleVelocity();
    void DrawLine(int x1 ,int y1 ,int x2 ,int y2 ,int color);
    void Screen();
};

ScreenPhaseSpace SCREENPV;

void ScreenPhaseSpace::Frame()
{
    int gd = DETECT, gm;
    initgraph(&gd, &gm,"c:\\tc\\bgi");
    setcolor (WHITE);
    rectangle(140 ,60 ,500 ,420); // วาดกรอบ
    line(320, 60, 320, 420); // วาดเส้นตรงกลางของกรอบในแนวตั้ง
    line(140, 240, 500, 240); // วาดเส้นตรงกลางของกรอบในแนวนอน
    outtextxy(280,40,"PHASE SPACE.");
    outtextxy(510, 410,"x ( degrees )"); outtextxy(112 ,57 ,"156");
    outtextxy(118 ,147 ,"78"); outtextxy(128 ,237 ,"0");
    outtextxy(110 ,327 ,"-78"); outtextxy(103 ,417 ,"-156");
    outtextxy(490 ,430 ,"180"); outtextxy(404 ,430 ,"90");
}

```

```

    outtextxy(490 ,430 ,"180"); outtextxy(404 ,430 ,"90");
    outtextxy(317 ,430 ,"0"); outtextxy(218 ,430 ,"-90");
    outtextxy(122 ,430 ,"-180");
    settextstyle(0 ,1 ,0); outtextxy(85, 170,"w ( degrees / second )");
}

void ScreenPhaseSpace::ScalePosition()
{
    line(138 ,150 ,142 ,150); line(138 ,330 ,142 ,330);
    line(318 ,150 ,322 ,150); line(318 ,330 ,322 ,330);
    line(498 ,150 ,502 ,150); line(498 ,330 ,502 ,330);
}

void ScreenPhaseSpace::ScaleVelocity()
{
    line(230 ,58 ,230 ,62); line(410 ,58 ,410 ,62);
    line(230 ,238 ,230 ,242); line(410 ,238 ,410 ,242);
    line(230 ,418 ,230 ,422); line(410 ,418 ,410 ,422);
}

void ScreenPhaseSpace::DrawLine(int x1 ,int y1 ,int x2 ,int y2 ,int color)
{
    setcolor(color); line(x1 ,y1 ,x2 ,y2);
}

void ScreenPhaseSpace::Screen()
{
    SCREENPV.Frame();
    SCREENPV.ScalePosition();
    SCREENPV.ScaleVelocity();
    setcolor(RED);
    outtextxy(50 ,450 "Press any key to print graph.(except PrintScreen button).") }
#endif

```

**PRINT.H**

```
#ifndef _PRINT_H
#define _PRINT_H

#include <bios.h>

class print
{
    public :
        void GetDataPixel(int line);
        void PrintImage();
};

print PRNT;

void print::GetDataPixel(int row)
{
    int Pin[8] = {128 ,64 ,32 ,16 ,8 ,4 ,2 ,1} ,X = 640 ,Quit = 0
        ,PinNumber ,CheckPixel
        ,GetPixel ,N1 ,N2;

    do
    {
        CheckPixel = 0; X = X--;
        for(PinNumber = 0; PinNumber <= 7; PinNumber++)
        {
            if(getpixel(X ,row + PinNumber) != getbkcolor())
                CheckPixel = CheckPixel + Pin[PinNumber];
        }
    }
}
```

```
Quit = CheckPixel;
if(X == 0) Quit = 1;
}
while(Quit == 0);

if(CheckPixel != 0);
{
    X = X++;

    N1 = X % 256;
    N2 = X / 256;

    biosprint(0 ,27 ,0); biosprint(0 ,51 ,0); biosprint(0 ,24 ,0);
    biosprint(0 ,27 ,0); biosprint(0 ,42 ,0); biosprint(0 ,0 ,0);
    biosprint(0 ,N1 ,0); biosprint(0 ,N2 ,0);

    for(GetPixel = 0; GetPixel <= 640; GetPixel++)
    {
        CheckPixel = 0;
        for(PinNumber = 0; PinNumber <= 7; PinNumber++)
        {
            if(getpixel(GetPixel ,row + PinNumber) != getbkcolor())
                CheckPixel = CheckPixel + Pin[PinNumber];
        }
        biosprint(0 ,CheckPixel ,0);
    }
}
}
```

```
void print::PrintImage()
{
    int i ,row = 0;

    biosprint(0 ,27 ,0); biosprint(0 ,108 ,0); biosprint(0 ,1 ,0);

    do

    {
        for(i = 0; i <= 2; i++)
        {
            biosprint(0 ,13 ,0);
            PRNT.GetDataPixel(row);
        }
        row = row + 8;
        biosprint(0 ,10 ,0);
    }
    while(row < 480);
    biosprint(0 ,27 ,0); biosprint(0 ,2 ,0);
}

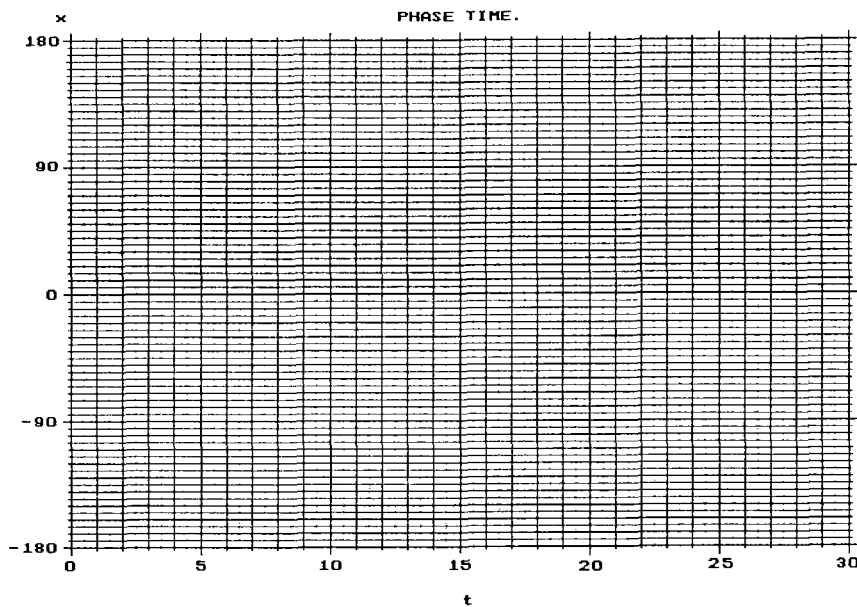
#endif
```

ภาคผนวก ง

การหาค่าความถี่เชิงมุมจากกราฟผลการทดลอง

การหาความถี่เชิงมุมของการแกว่งจากกราฟ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

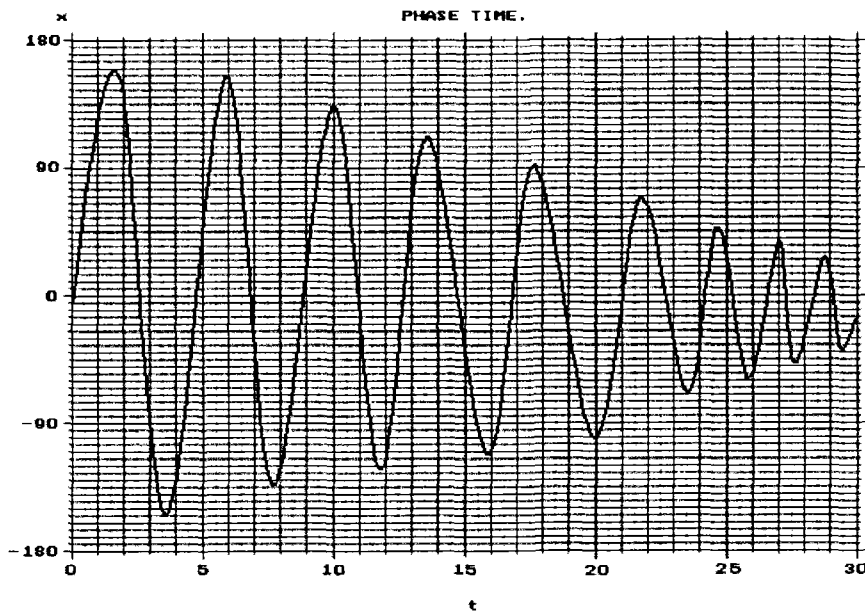
1. สร้างแผ่นสเกลสำหรับอ่านค่าแอมพลิจูดการสั่น ณ เวลาต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 51



ภาพประกอบ 51 สเกลสำหรับอ่านค่าแอมพลิจูดที่เวลาต่างๆ

แผ่นสเกลสำหรับอ่านค่าแอมพลิจูด มีความละเอียดในแนวแกนตั้งเท่ากับ 5 องศา และความละเอียดในแนวแกนนอนเท่ากับ 0.5 วินาที

2. นำแผ่นสเกลไปวัดแอมพลิจูด ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ดังภาพประกอบ 52



ภาพประกอบ 52 การนำแผ่นสเกลไปอ่านค่าแอมพลิจูด ในกราฟแสดงความสัมพันธ์  
ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา

3. อ่านค่าเวลาในการเคลื่อนที่ครบรอบ แล้วคำนวณค่าความถี่เชิงมุม( $\omega_0$ ) จาก  
สมการ(22)

$$\omega_D = \frac{\text{จำนวนรอบ} \times 2\pi \text{ (เรเดียน)}}{\text{เวลาในการเคลื่อนที่ครบรอบ (วินาที)}} \dots\dots\dots (22)$$

ผลการคำนวณหาค่าความถี่เชิงมุมจากกราฟ แสดงดังตาราง 5

ตาราง 5 ค่าความถี่เชิงมุม ที่คำนวณได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีต่างๆ

กรณี	ค่าความถี่เชิงมุม ( $\omega_0$ ) (เรเดียนต่อวินาที)
1	1.56
2	1.55
3	0.95
4	0.97
5	1.07

โดยที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 แทนกรณี ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1 แทน กรณีที่ 1 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิกโดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น

2 แทน กรณีที่ 2 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

3 แทน กรณีที่ 3 ระบบที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน แต่ไม่มีสปริง และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ

4 แทน กรณีที่ 4 ระบบที่ไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

5 แทน กรณีที่ 5 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

## ภาคผนวก จ

การปรับเส้นโค้ง(Curve Fitting) เพื่อหาค่าตัวประกอบการหมุน

การหาค่าตัวประกอบการหน่วง โดยใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. สร้างแผ่นสเกลสำหรับอ่านค่าแอมพลิจูด โดยสเกลที่ใช้เป็นสเกลเดียวกับสเกลในข้อ 1 ของภาคผนวก ง.
2. นำแผ่นสเกล ไปวัดค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และบันทึกผลเป็นคู่อันดับระหว่างเวลากับขนาดของแอมพลิจูด
3. นำข้อมูลในข้อ 2 ไปพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา
4. ใช้วิธีการปรับเส้นโค้งเพื่อหาค่าตัวประกอบการหน่วง( $\gamma$ ) โดยเทียบกับฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล ( $y = A e^{-\gamma t}$ )

การหาค่าตัวประกอบการหน่วงโดยใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิกโดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น ผลการอ่านค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ แสดงดังตาราง 6

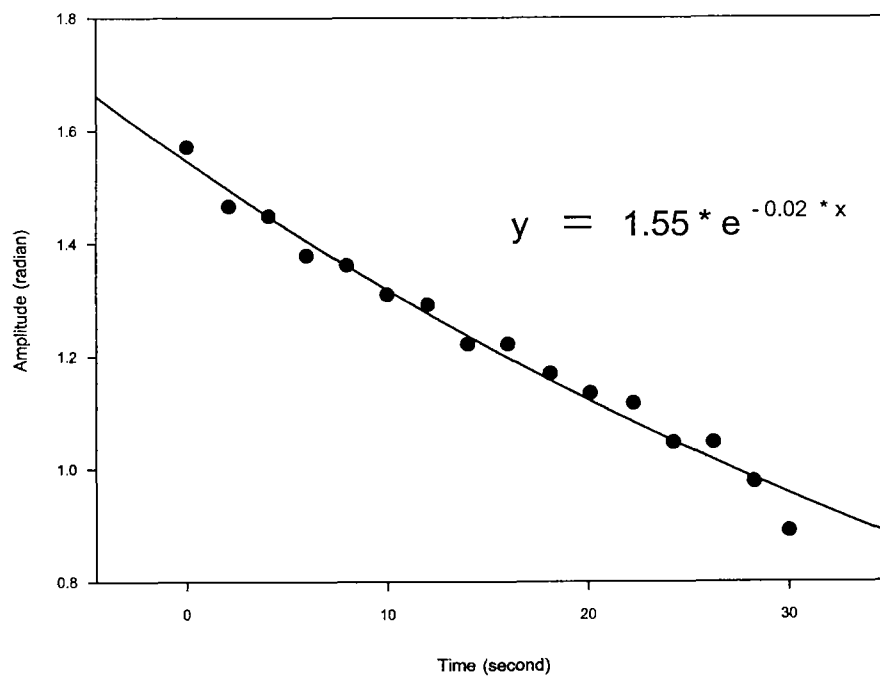
ตาราง 6 ค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีที่ 1

เวลา (วินาที)	แอมพลิจูด (องศา)	แอมพลิจูด (เรเดียน)
0.00	$9.0 \times 10^1$	1.57
2.10	$8.4 \times 10^1$	1.47
4.10	$8.3 \times 10$	1.45
6.00	$7.9 \times 10^1$	1.38
8.00	$7.8 \times 10^1$	1.36
10.00	$7.5 \times 10^1$	1.31
12.00	$7.4 \times 10^1$	1.29
14.00	$7.0 \times 10^1$	1.22
16.00	$7.0 \times 10^1$	1.22

ตาราง 6 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	แอมพลิจูด (องศา)	แอมพลิจูด (เรเดียน)
18.10	$6.7 \times 10^1$	1.17
20.10	$6.5 \times 10^1$	1.13
22.25	$6.4 \times 10^1$	1.12
24.25	$6.0 \times 10^1$	1.05
26.25	$6.0 \times 10^1$	1.05
28.25	$5.6 \times 10^1$	0.98
30.00	$5.1 \times 10^1$	0.89

ผลการนำข้อมูลจาก ตาราง 6 ไปพล็อตกราฟ แสดงดังภาพประกอบ 53



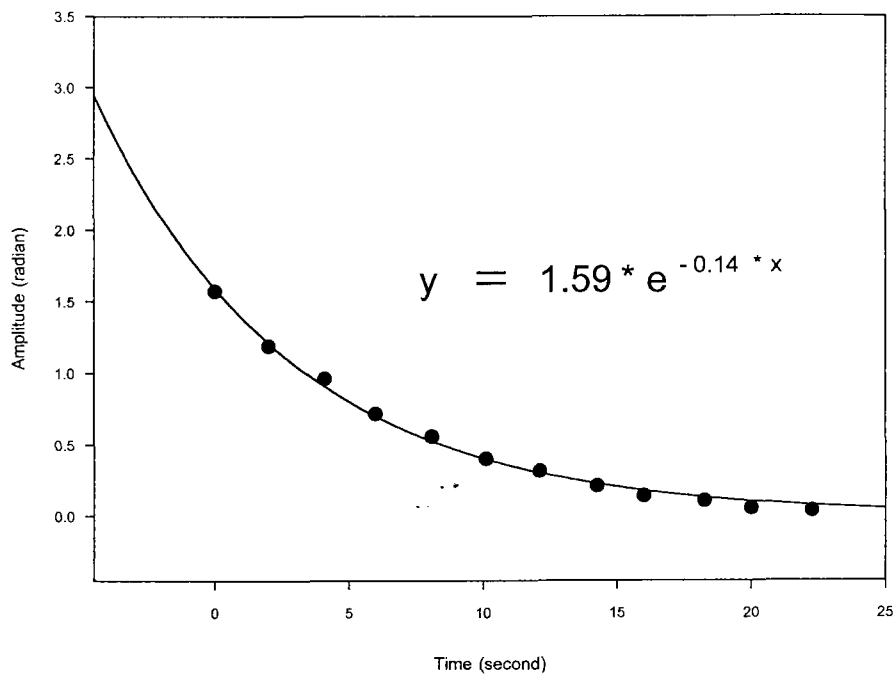
ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ในกรณีที่ 1

กรณีที่ 2 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่บนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ผลการอ่านค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ แสดงดังตาราง 7

ตาราง 7 ค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีที่ 2

เวลา (วินาที)	แอมพลิจูด (องศา)	แอมพลิจูด (เรเดียน)
0.00	$9.0 \times 10^1$	1.57
2.00	$6.8 \times 10^1$	1.19
4.10	$5.5 \times 10^1$	0.96
6.00	$4.1 \times 10^1$	0.72
8.10	$3.2 \times 10^1$	0.56
10.10	$2.3 \times 10^1$	0.40
12.10	$1.8 \times 10^1$	0.31
14.25	$1.2 \times 10^1$	0.21
16.00	$0.8 \times 10^1$	0.14
18.25	$0.6 \times 10^1$	0.10
20.00	$0.3 \times 10^1$	0.05
22.25	$0.2 \times 10^1$	0.03

ผลการนำข้อมูลจาก ตาราง 7 ไปพล็อตกราฟ แสดงดังภาพประกอบ 54



ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ในกรณีที่ 2

กรณีที่ 3 ระบบที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน แต่ไม่มีสปริง และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำ ผลการอ่านค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ แสดงดังตาราง 8

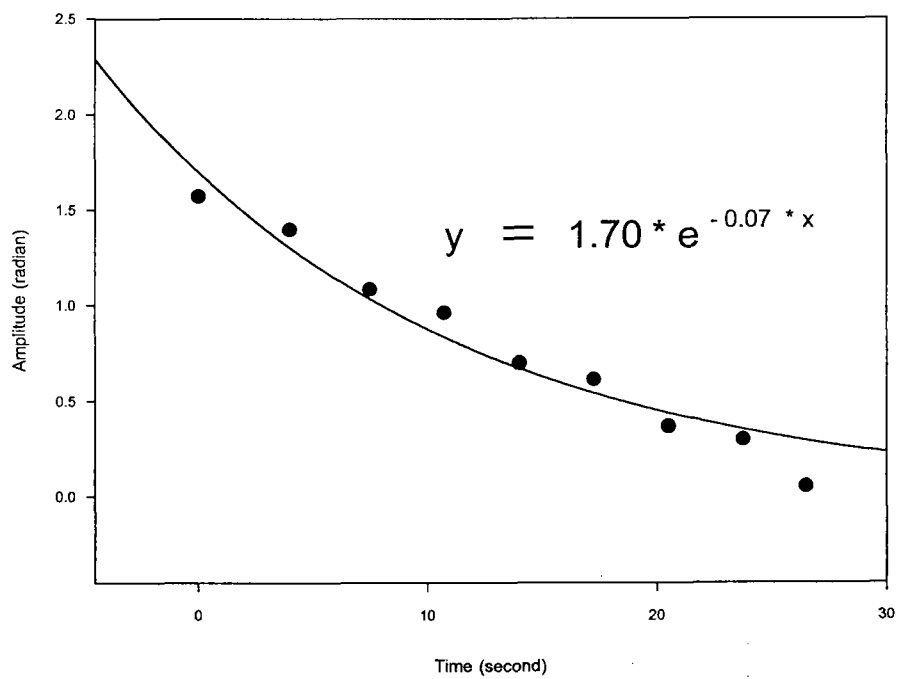
ตาราง 8 ค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีที่ 3

เวลา (วินาที)	แอมพลิจูด (องศา)	แอมพลิจูด (เรเดียน)
0.00	$9.0 \times 10^1$	1.57
4.00	$8.0 \times 10^1$	1.40
7.50	$6.2 \times 10^1$	1.08
10.75	$5.5 \times 10^1$	0.96
14.00	$4.0 \times 10^1$	0.70
17.25	$3.5 \times 10^1$	0.61

ตาราง 8 (ต่อ)

เวลา (วินาที)	แอมพลิจูด (องศา)	แอมพลิจูด (เรเดียน)
20.50	$21 \times 10^1$	0.37
23.75	$17 \times 10^1$	0.30
26.50	$0.3 \times 10^1$	0.05

ผลการนำข้อมูลจาก ตาราง 8 ไปพล็อตกราฟ แสดงดังภาพประกอบ 55



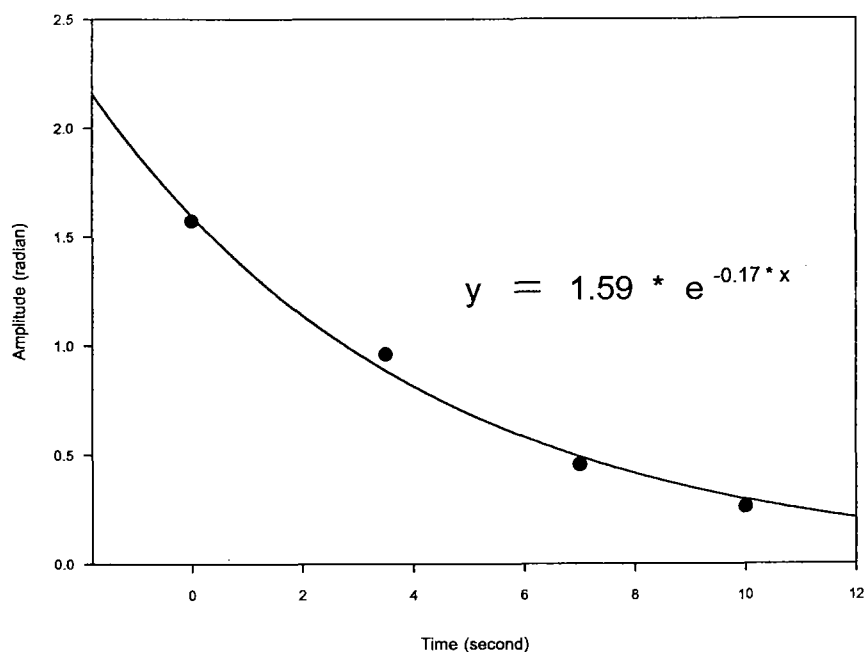
ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ในกรณีที่ 3

กรณีนี้ 4 ระบบที่ไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก ผลการอ่านค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ณ เวลาต่างๆ แสดงดังตาราง 9

ตาราง 9 ค่าแอมพลิจูดที่ลดลง ในกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา ในกรณีนี้ 4

เวลา (วินาที)	แอมพลิจูด (องศา)	แอมพลิจูด (เรเดียน)
0.00	$9.0 \times 10^1$	1.57
3.50	$5.5 \times 10^1$	0.96
7.00	$2.6 \times 10^1$	0.45
10.00	$1.5 \times 10^1$	0.26

ผลการนำข้อมูลจาก ตาราง 9 ไปพล็อตกราฟ แสดงดังภาพประกอบ 56



ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแอมพลิจูดกับเวลา ในกรณีนี้ 4

## ผลการหาค่าตัวประกอบการหน่วงโดยใช้วิธีการปรับเส้นโค้ง แสดงดังตาราง 10

ตาราง 10 ค่าตัวประกอบการหน่วง จากการใช้วิธีปรับเส้นโค้ง

กรณี	ค่าตัวประกอบการหน่วง ( $\gamma$ ) (เรเดียนต่อวินาที)
1	0.02
2	0.14
3	0.07
4	0.17
5	—

โดยที่ 1 ,2 ,3 ,4 และ5 แทนกรณี ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1 แทน กรณีที่ 1 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิกโดยไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก และมีเพียงสปริงติดกับจานหมุนเท่านั้น

2 แทน กรณีที่ 2 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

3 แทน กรณีที่ 3 ระบบที่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน แต่ไม่มีสปริง และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำ

4 แทน กรณีที่ 4 ระบบที่ไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

5 แทน กรณีที่ 5 ระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีแรงภายนอกลักษณะเป็นคาบกระทำกับระบบ โดยที่จานหมุนยึดติดกับสปริง แต่ไม่มีมวลถ่วงติดอยู่ และไม่มีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก

**ภาคผนวก จ**

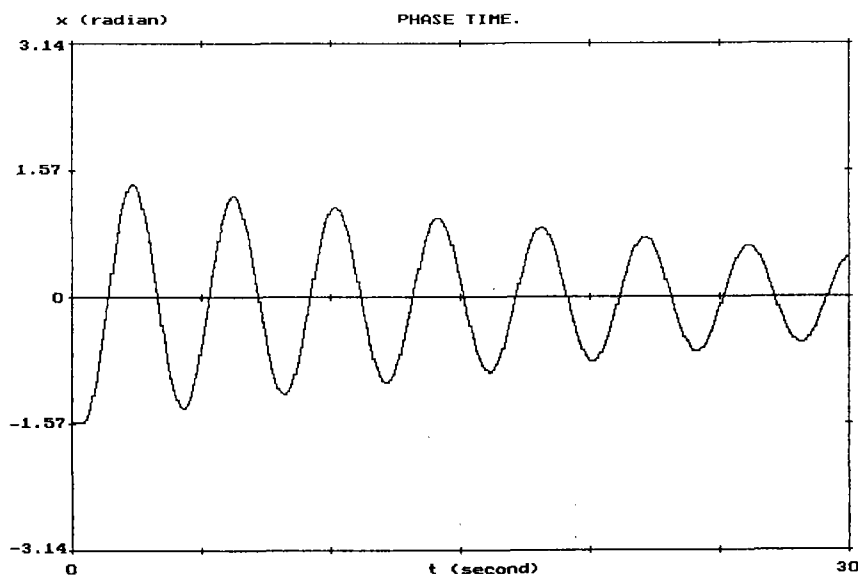
**การทดลองเปลี่ยนค่าแรงต้านการเคลื่อนที่ ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก**

การทดลองเปลี่ยนค่าแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก แบ่ง  
ศึกษาออกเป็น 2 ตอน คือ

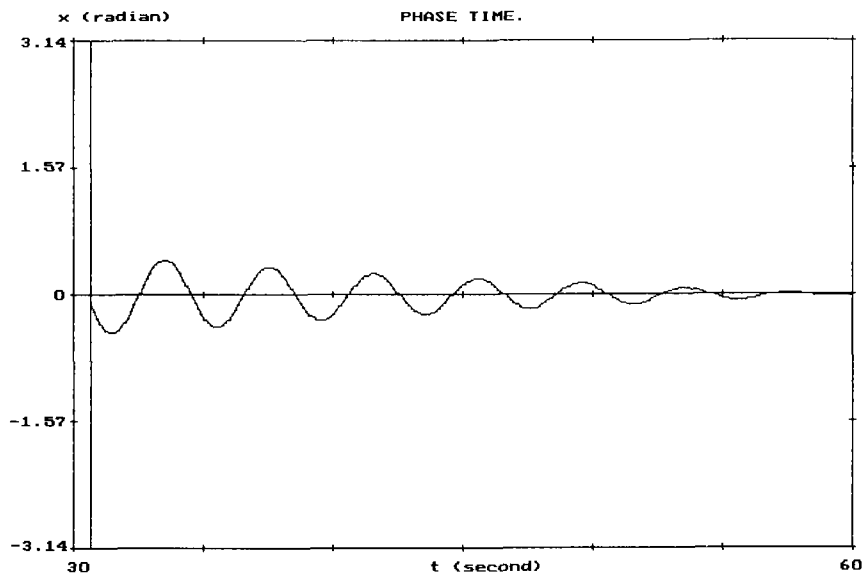
1. กรณีระบบที่มีการแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้าน  
การเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (กรณีที่ 2 ในภาคผนวก ง)

เมื่อเพิ่มความต่างศักย์(V) เป็น 3 ,5 ,7 และ9 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก  
ผลของการเคลื่อนที่ที่กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดง  
ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม ตามลำดับ

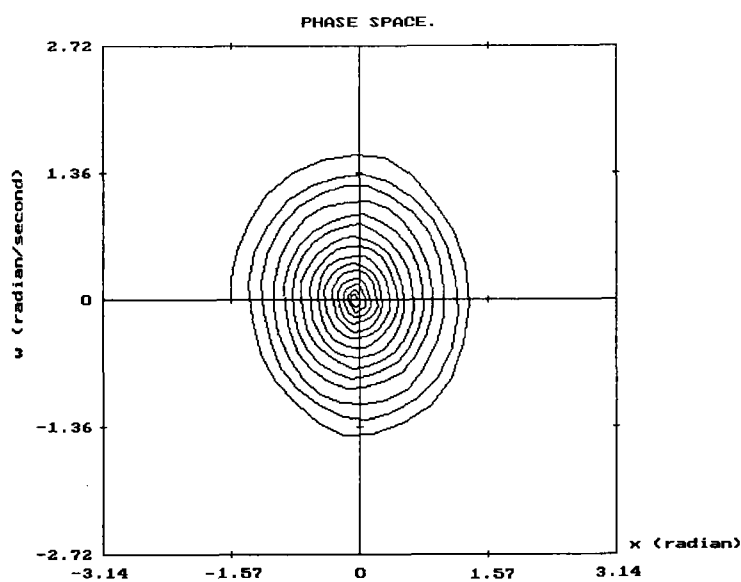
เพิ่มความต่างศักย์ 3 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กราฟแสดงความ  
สัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม  
กับการกระจัดเชิงมุม แสดงดังภาพประกอบ 57 58 และ 59 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบ  
แกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุนและมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำ  
สนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ(เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 3 โวลต์) ในช่วงเวลา  
0 – 30 วินาที

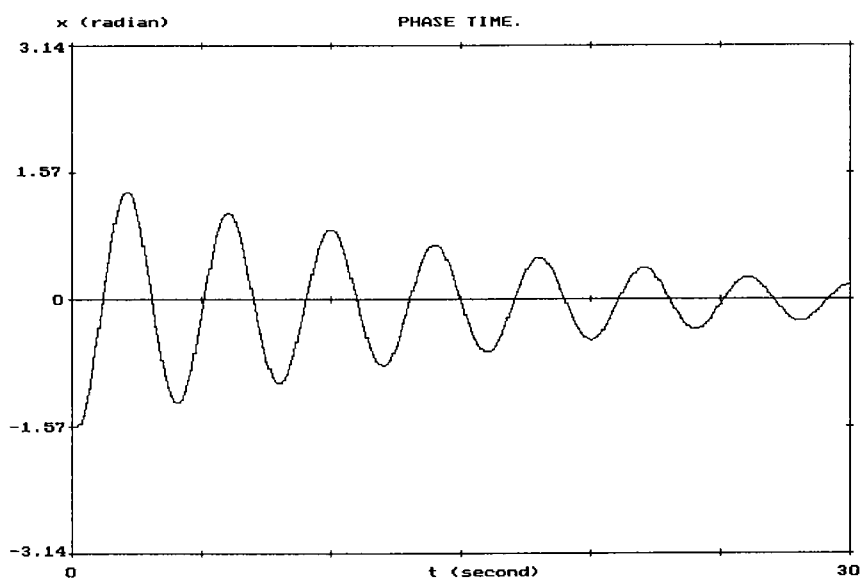


ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ(เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 3 โวลต์) ในช่วงเวลา 30 – 60 วินาที

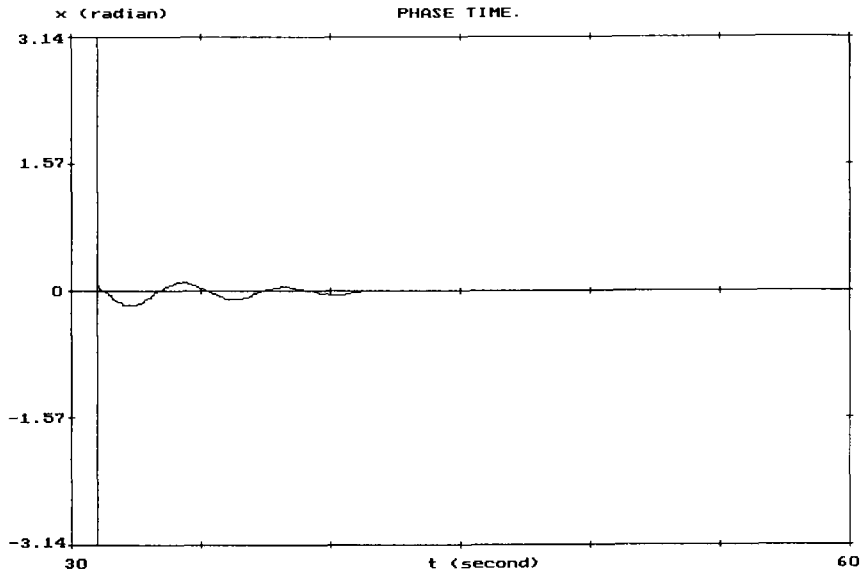


ภาพประกอบ 59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ(เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 3 โวลต์)

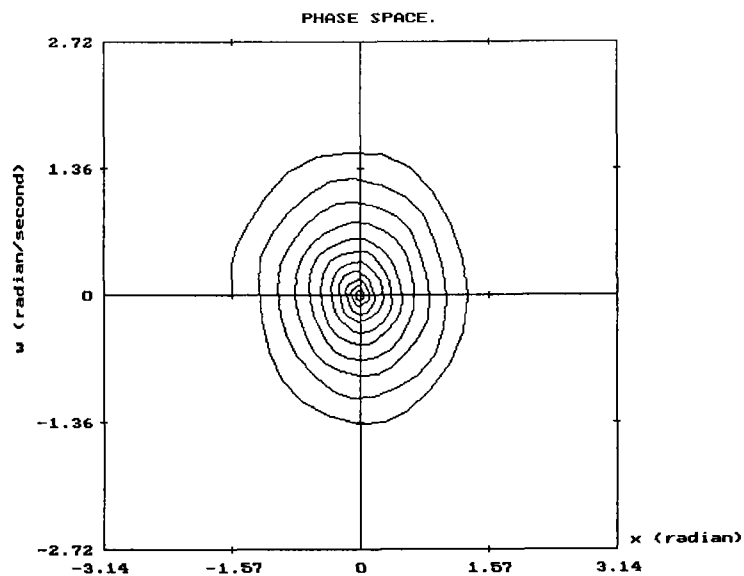
1.1 เพิ่มความต่างศักย์ 5 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระตุ้นเชิงมุม แสดงดังภาพประกอบ 60 61 และ 62 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 60 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุนและมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์) ในช่วงเวลา 0 – 30 วินาที

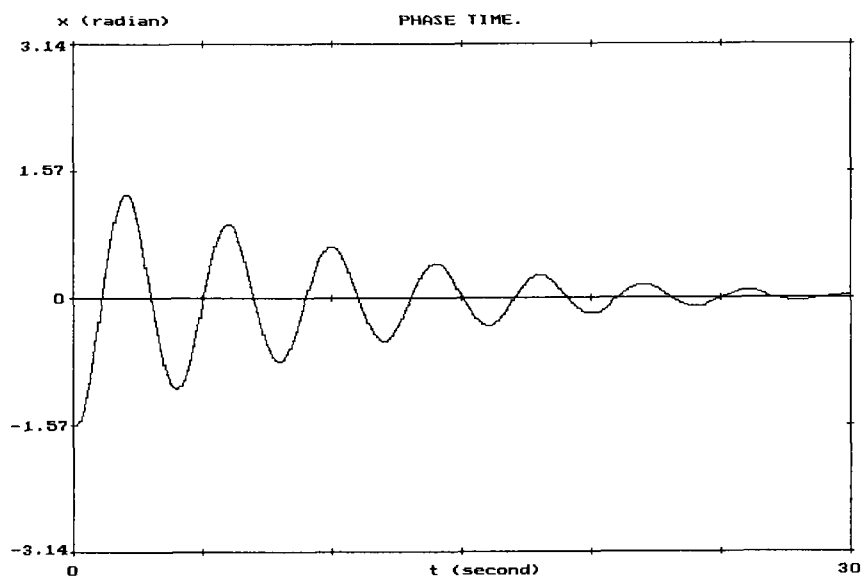


ภาพประกอบ 61 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ(เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์) ในช่วงเวลา 30 – 60 วินาที

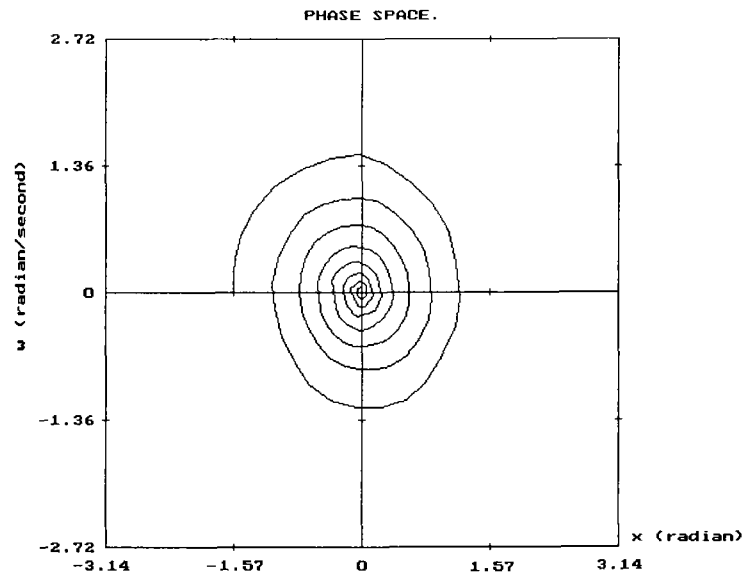


ภาพประกอบ 62 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์)

1.2 เพิ่มความต่างศักย์ 7 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระตุ้นเชิงมุม แสดงดังภาพประกอบ 63 และ 64 ตามลำดับ

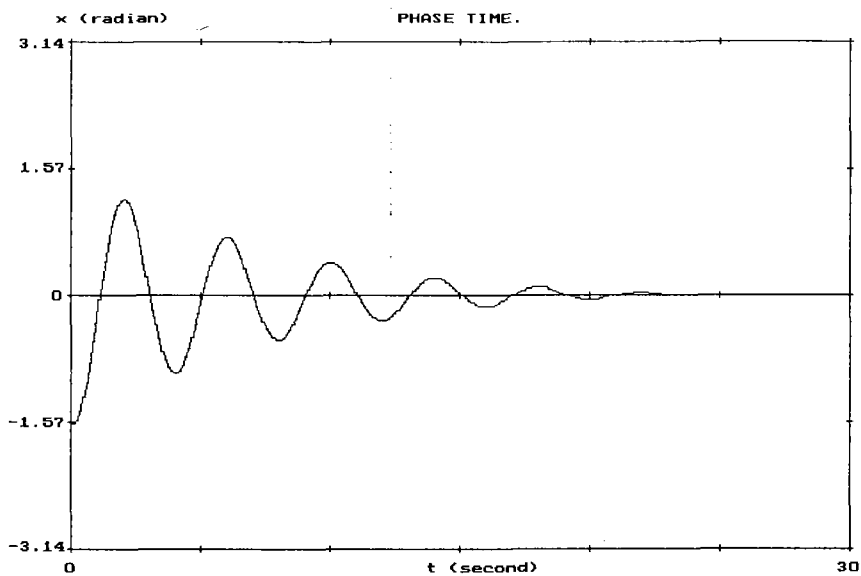


ภาพประกอบ 63 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 7 โวลต์)

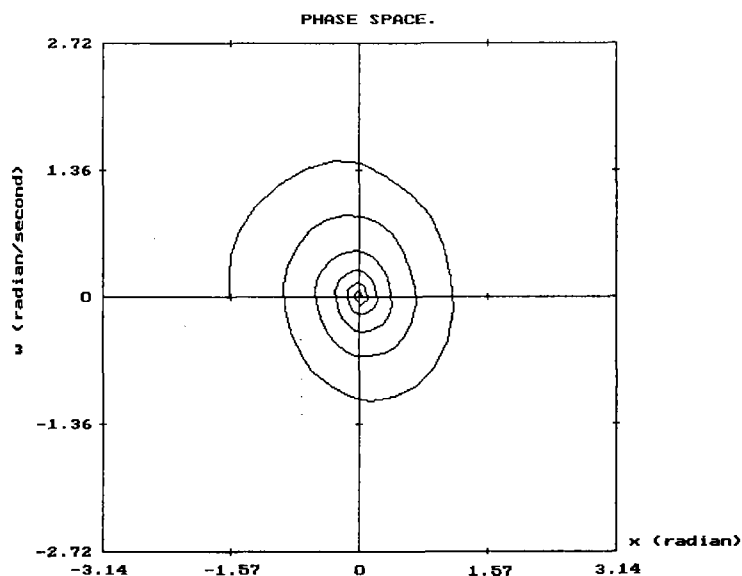


ภาพประกอบ 64 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 7 โวลต์)

1.3 เพิ่มความต่างศักย์ 9 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม แสดงดังภาพประกอบ 65 และ 66 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 65 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 9 โวลต์)



ภาพประกอบ 66 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบแกว่งแบบฮาร์มอนิก มีสปริงติดอยู่กับจานหมุนและมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากกระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 9 โวลต์)

ผลการหาค่าความถี่เชิงมุมจากกราฟ( $\omega_D$ )แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลาของจานหมุน และค่าตัวประกอบการหน่วง( $\gamma$ ) แสดงดังตาราง 11

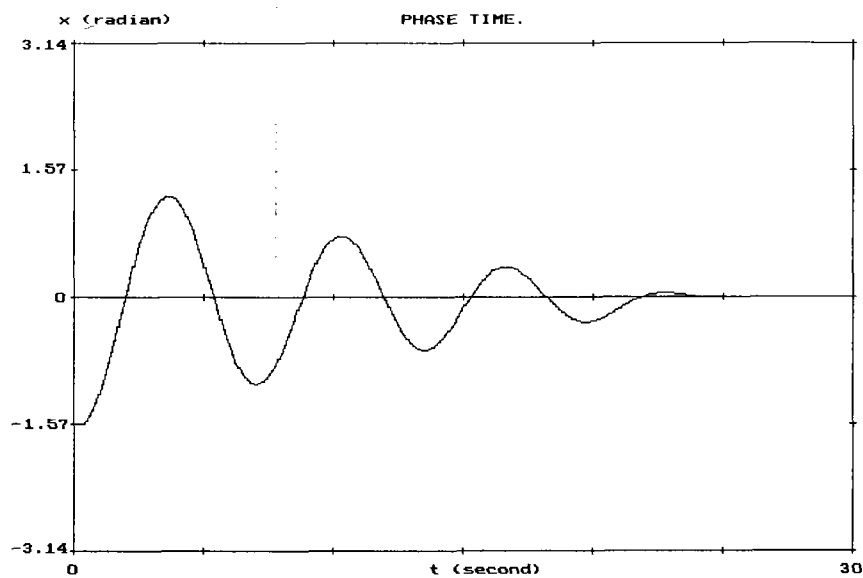
ตาราง 11 ค่าความถี่เชิงมุมจากกราฟและค่าตัวประกอบการหน่วงเมื่อเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ (กรณีที่ 2 ในภาคผนวก ง)

ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)	ค่าความถี่เชิงมุม จากกราฟ ( $\omega_D$ ) (เรเดียนต่อวินาที)	ค่าตัวประกอบ การหน่วง( $\gamma$ ) (เรเดียนต่อวินาที)	ค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_0$ ) (เรเดียนต่อวินาที)
3	1.59	0.03	1.59
5	1.57	0.06	1.57
7	1.56	0.10	1.56
9	1.55	0.14	1.56

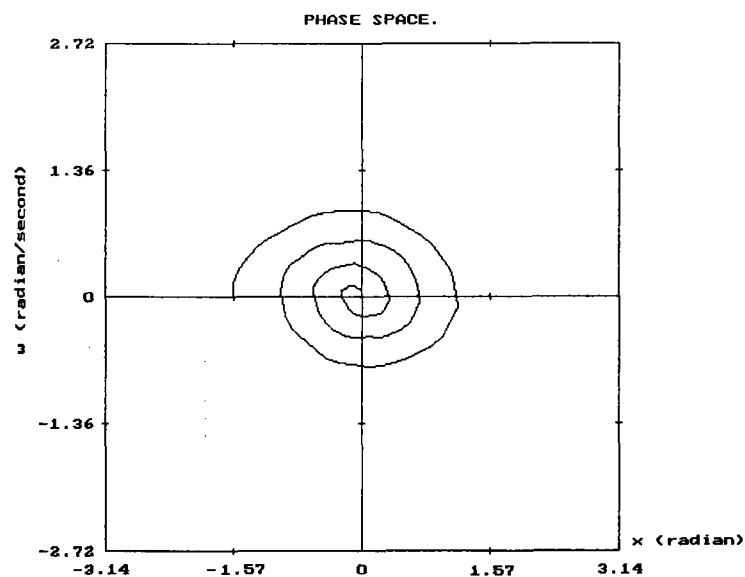
2. ระบบที่ไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็ก (กรณีที่ 4 ในภาคผนวก ง)

ทำเช่นเดียวกับในข้อ 1 คือ เพิ่มความต่างศักย์เป็น 3 ,5 ,7 และ9 โวลต์ แล้วแสดงผลในรูปกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระตุ้นเชิงมุม ตามลำดับ

2.1 เพิ่มความต่างศักย์ 3 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระตุ้นเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระตุ้นเชิงมุม แสดงดังภาพประกอบ 67 และ 68 ตามลำดับ

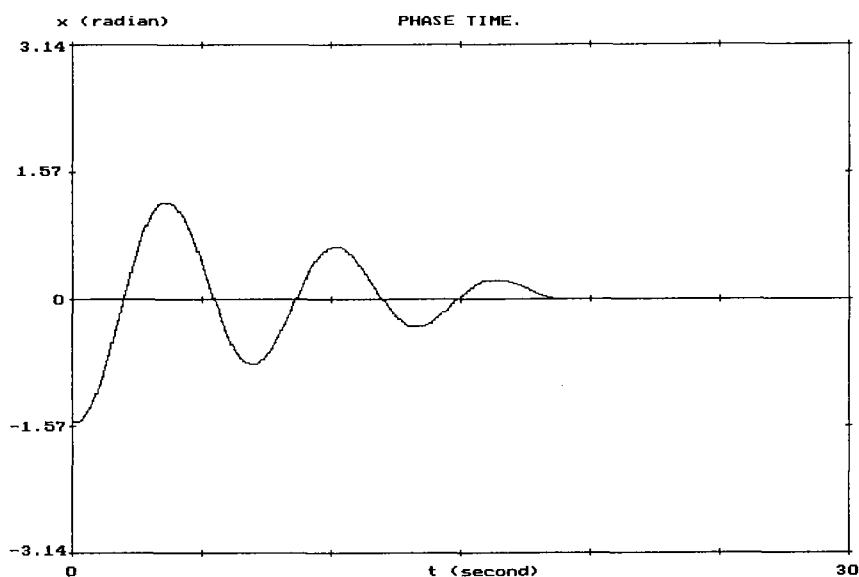


ภาพประกอบ 67 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุนและมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 3 โวลต์)

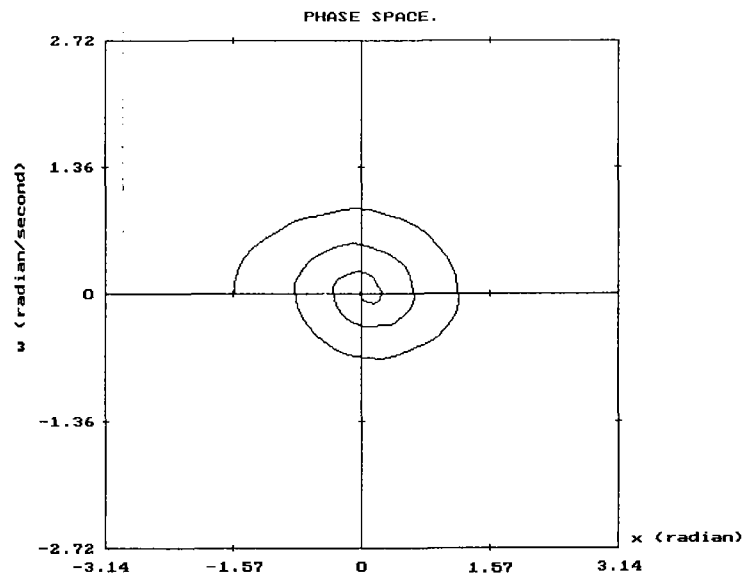


ภาพประกอบ 68 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 3 โวลต์)

2.2 เพิ่มความต่างศักย์ 5 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม แสดงดังภาพประกอบ 69 และ 70 ตามลำดับ

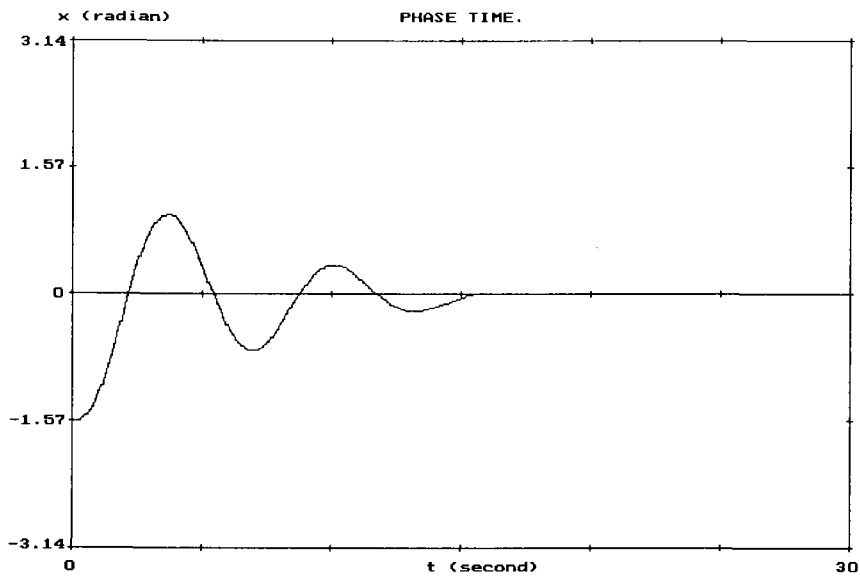


ภาพประกอบ 69 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์)

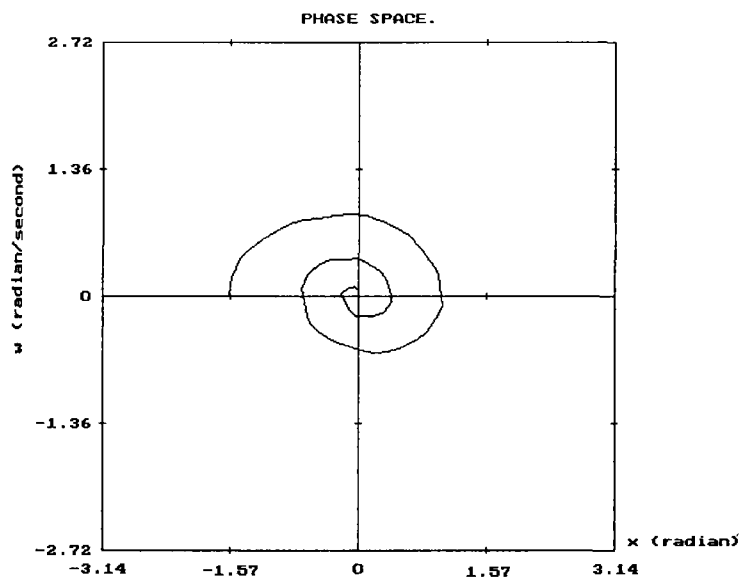


ภาพประกอบ 70 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 5 โวลต์)

2.3 เพิ่มความต่างศักย์ 7 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม แสดงดังภาพประกอบ 71 และ 72 ตามลำดับ

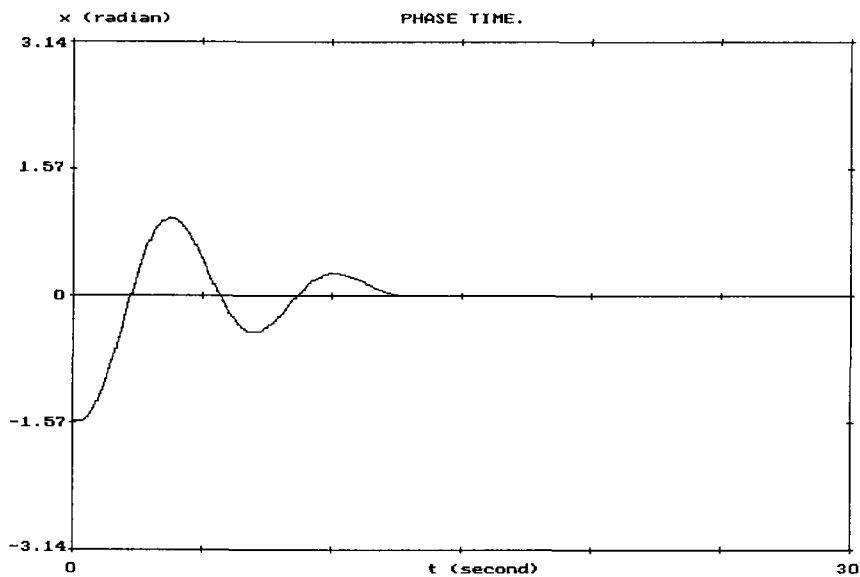


ภาพประกอบ 71 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 7 โวลต์)

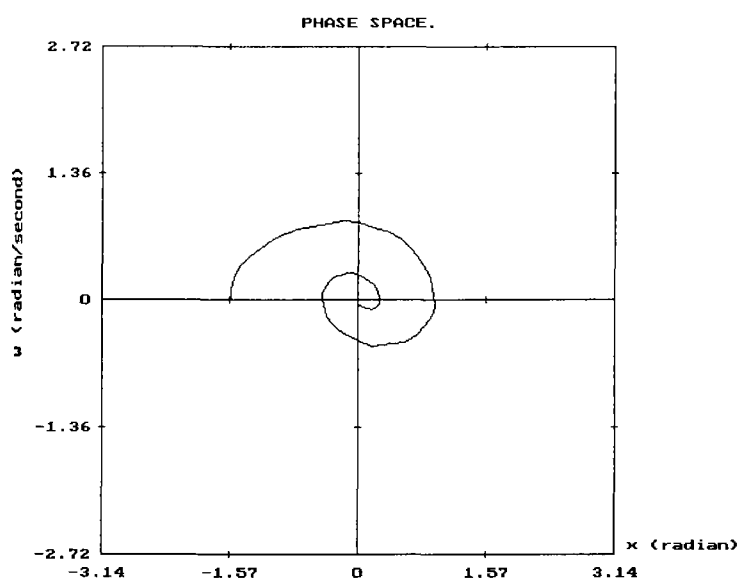


ภาพประกอบ 72 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 7 โวลต์)

2.4 เพิ่มความต่างศักย์ 9 โวลต์ ให้กับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม แสดงดังภาพประกอบ 73 และ 74 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 73 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลา กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 9 โวลต์)



ภาพประกอบ 74 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับการกระจัดเชิงมุม กรณีที่ระบบไม่มีสปริง แต่มีมวลถ่วงติดบนจานหมุน และมีเพียงแรงต้านการเคลื่อนที่จากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กมากระทำกับระบบ (เมื่อเพิ่มความต่างศักย์เท่ากับ 9 โวลต์)

ผลการหาค่าความถี่เชิงมุมจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดเชิงมุมกับเวลาของจานหมุน และค่าตัวประกอบการหน่วง แสดงดังตาราง 12

ตาราง 12 ค่าความถี่เชิงมุมจากกราฟและค่าตัวประกอบการหน่วงเมื่อเปลี่ยนค่าความต่างศักย์ (กรณีที่ 4 ในภาคผนวก ง)

ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)	ค่าความถี่เชิงมุม จากกราฟ ( $\omega_D$ ) (เรเดียนต่อวินาที)	ค่าตัวประกอบ การหน่วง( $\gamma$ ) (เรเดียนต่อวินาที)	ค่าความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_0$ ) (เรเดียนต่อวินาที)
3	0.99	0.08	0.99
5	0.99	0.10	1.00
7	0.95	0.13	0.96
9	0.97	0.17	0.98

ประวัติย่อผู้วิจัย

## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ	นายวิสูตร	ชื่อสกุล	ตุลยสุข
เกิดวันที่	12 เดือน	เมษายน	พุทธศักราช 2520
สถานที่เกิด		อำเภอห้วยยอด	จังหวัดตรัง
สถานที่อยู่ปัจจุบัน		9 ถ.เพชรเกษม ม.1 ต.เขากอบ อ.ห้วยยอด จ.ตรัง	92130
ประวัติการศึกษา			
	พ.ศ. 2538	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนห้วยยอด จังหวัดตรัง	
	พ.ศ. 2542	กศ.บ. วิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยทักษิณ	
	พ.ศ. 2545	กศ.ม. (ฟิสิกส์) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	