

การศึกษาเพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุปกรณ์แฮปติกส์ในแนวการเคลื่อนที่ 1 องศาอิสระ

A Study for Design and Development of Control System for A New 1-DOF Haptic Device

ชนาพันธ์ แก้วจงประสิทธิ์¹ แพร่ใหม่ วรรณवास¹ ณัฐชานันท์ พูจินต์พันธ์¹ พงศ์วิศิษฎ์ จงเลิศศรีภักย์¹ ธิทัต สุวรรณโน¹

นันทิดา นิลหุต^{1,2} และชลลดาวัลย์ มุลใจตา^{1,2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

²ศูนย์เครือข่ายวิจัยประยุกต์ทางเทคโนโลยีหุ่นยนต์และชีวการแพทย์ (BART LAB) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถนนพุทธมณฑล สาย 4 ศาลายา พุทธมณฑล นครปฐม 73130 โทร 02-889-2138 ต่อ 6446

*Corresponding Author อีเมล choladawan.moo@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

แฮปติกส์ (Haptics) คือ เทคโนโลยีที่ทำให้รู้สึกถึงการสัมผัสเสมือนจริง โดยใช้หลักการของแรง การสั่น และการเคลื่อนไหวของพื้นผิวสัมผัส เพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานและตอบสนองความต้องการในด้านการใช้งานต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเกมส์ อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ยังมีส่วนสำคัญในการพัฒนาทางการแพทย์ เช่น ระบบฟื้นฟูสมรรถภาพ อุปกรณ์ฝึกฝน การผ่าตัดทางไกล เป็นต้น โดยแฮปติกส์ จะถูกพัฒนาขึ้นในรูปแบบของอุปกรณ์หลากหลายรูปแบบ และพัฒนาระบบควบคุมที่ทำให้ อุปกรณ์สามารถตอบสนองผู้ใช้ใช้งานออกมาเป็นแรงเสมือนสัมผัสกับวัตถุโดยตรงในขณะที่อุปกรณ์ไม่ได้มีการสัมผัสกับวัตถุจริงๆ แต่เป็นการรับข้อมูลการสัมผัสมาจากเซนเซอร์หรือจากโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์แทน

ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการควบคุมการทำงานเกี่ยวกับอุปกรณ์แฮปติกส์ ชนิด 1 องศาอิสระ โดยใช้ระบบที่ใช้ในการตอบสนองของระบบควบคุมอันดับที่หนึ่ง และอันดับที่สอง ในการสร้างสมการและจำลองการเคลื่อนที่เลียนแบบ Invert Pendulum ระบบควบคุมที่ศึกษานี้สามารถรับค่าอินพุต Amplitude เริ่มต้นได้ ซึ่งสามารถต่อขยายเพิ่มเติมโดยการปรับระบบให้มีการตอบสนองต่อแรงที่กระทำระหว่างที่ระบบกำลังเคลื่อนที่อยู่ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบ Haptics ที่ซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น

คำสำคัญ: Haptic Paddle, Haptic Control, Haptic Technology, Invert Pendulum

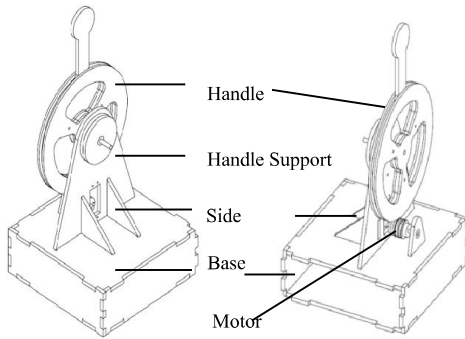
1. บทนำ

ในปัจจุบันการศึกษาทางด้านวิศวกรรม เพื่อเข้าใจลักษณะและการทำงานโดยละเอียดนั้นจำเป็นต้องเรียนรู้ผ่านการอธิบาย การเขียนโปรแกรมผ่านทางคอมพิวเตอร์ และการทดลองต่างๆ เนื่องด้วยการที่ Haptic Paddle นั้นมีราคาสูง และแสดงให้เห็นถึงระบบไดนามิกในรูปแบบของแรงตอบสนองโดยการควบคุมของคอมพิวเตอร์ได้ง่าย [3] จึงเหมาะสมอย่างยิ่งในการนำมาใช้ศึกษา

คำว่าแฮปติกส์ (Haptics) มีความหมายเกี่ยวกับการรับรู้ผ่านการสัมผัส และมีแนวคิดคือการแสดงผลแรงกิริยา และแรงปฏิกิริยา โดยมีตัวแสดงผลเป็นคอมพิวเตอร์ และมีแรงตอบสนองกลับไปยังผู้ใช้ คล้ายคลึงกับการแสดงผลเป็นรูปภาพ แรงตอบสนองของแฮปติกส์เป็นแรงที่ประกอบไปด้วยข้อมูลต่างๆ เกี่ยวกับ แม่เหล็กและทิศทางของแรง ซึ่งถูกเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ ปรากฏการณ์บางอย่างสามารถใช้อธิบายแรงตอบสนองได้เป็นอย่างดี รวมไปถึงเส้นโค้ง พื้นผิวแรงโน้มถ่วง สนามแม่เหล็ก และผลของกฎการควบคุม [1]

การประยุกต์ใช้แฮปติกส์ขึ้นอยู่กับการใช้งาน อาทิ เช่น การใช้งานทางการแพทย์ การใช้เป็นฟังก์ชันต่างๆ ในโทรศัพท์เป็นต้น สำหรับการประยุกต์ทางด้านการแพทย์ เทคโนโลยีทางด้านแฮปติกส์ถูกนำไปใช้ช่วยในการผ่าตัด โดยทำให้แพทย์รับรู้ถึงลักษณะเนื้อเยื่อ

รวมถึงความตื้นลึกในขณะที่ทำการแทงเข็มลงไป
เนื้อเยื่อ ดังนั้นแฮปติกส์จึงเป็นสิ่งที่ช่วยให้การ
ผ่าตัดมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [7]



รูปที่ 1 แสดง Haptic Paddle เพื่อในการพัฒนาระบบควบคุม
ซึ่งพัฒนาขึ้นมาโดย BART LAB และภาควิชาวิศวกรรมชีว
การแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

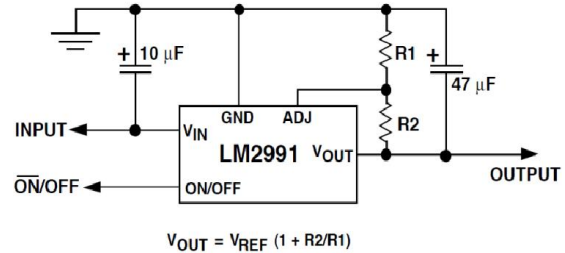
ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเทคโนโลยี
ทางด้านแฮปติกส์ในระบบ 1 องศาอิสระหรือเรียกว่า
Haptic Paddle ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งง่ายต่อการ
ออกแบบ และเชื่อมต่อไปยังคอมพิวเตอร์ โดยใช้กฎ
ของไดนามิก มีหลักการทำงานโดยเมื่อผู้ใช้จับที่จับ
(Handle) และเคลื่อนย้ายจากฝั่งหนึ่งไปอีกฝั่ง การ
เคลื่อนย้ายจะถูกรับรู้ถึงทิศทางและความเร็วของที่จับ
แรงต่างๆ จึงถูกส่งกลับไปยังผู้ใช้ [1] ซึ่งในการศึกษานี้
จะต้องเรียนรู้การสร้างระบบควบคุมอันดับ 1 และ
อันดับ 2 ในการสร้างสมการและตัวแปรต่างๆ ซึ่งหาได้
จากการบ่งชี้ แรงเฉื่อย ตัวหน่วงเป็นต้น [2]

Invert Pendulum เป็นที่นิยมนำมาจำลองสิ่งต่างๆ
เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยทฤษฎีของระบบควบคุมและ
หุ่นยนต์ ซึ่งในการศึกษานี้ ผู้ศึกษาเลือกใช้ Invert
Pendulum ในการจำลองการทำงานของ Haptic Paddle
ซึ่งช่วยทำให้ผู้ศึกษาเข้าใจลักษณะการทำงานของแรง
ปฏิกริยามากยิ่งขึ้น [6]

Arduino เป็นคอนโทรลเลอร์ที่ง่ายต่อการศึกษา
เรียนรู้การควบคุม การเขียนโปรแกรมการทำงาน
ร่วมกันของซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ โดย Arduino รับรู้
การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของ Haptic Paddle จาก Hall
Effect Sensor และส่งข้อมูลเพื่อตอบสนองออกมาเป็น
แรงผ่านทางมอเตอร์ ผ่านกระบวนการควบคุมต่างๆ ซึ่ง

เกิดขึ้นที่บอร์ด Arduino โดยการสั่งการของระบบ
คอมพิวเตอร์ [5]

เนื่องจากมอเตอร์ต้องการค่าความต่างศักย์ 6 โวลต์
ในขณะที่ Arduino ต้องการความต่างศักย์ 5 โวลต์ จึง
จำเป็นต้องมีวงจร Regulator หรือวงจรแปลงสัญญาณ
ในรูปที่ 2 ในการปรับค่าความต่างศักย์จาก 6 โวลต์ให้
เป็น 5 โวลต์เพื่อให้ใช้แหล่งจ่ายจากที่เดียวกันได้



รูปที่ 2 แสดงวงจรแปลงสัญญาณ อ้างอิงมาจาก FIGURE 24.
Chester Simpson. Linear and Switching Voltage Regulator
Fundamentals PartI. National Semiconductor.

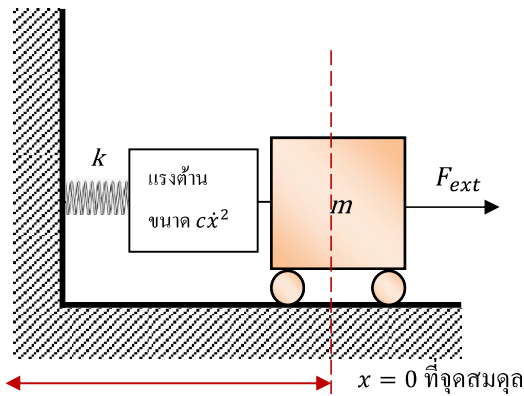
สำหรับ Haptic Paddle ผู้ศึกษาใช้ LabVIEW ใน
การควบคุมคำสั่งไปยังเซนเซอร์ และ Actuator ผ่าน
ทาง Knob และ Switch ใน Front Panel เพื่อเป็น
การศึกษากการทำงานเบื้องต้นของเซนเซอร์ และ
Actuator [4] ในการศึกษานี้ใช้ Hall Effect Sensor เป็น
เซนเซอร์ และมีเซอร์โวเป็น Actuator จากนั้นจะ
แสดงผลออกมาทาง LabVIEW เพื่อให้ผู้ศึกษาได้
นำไปใช้ในการวิเคราะห์การทำงานของ Haptic Paddle
ต่อไป

ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำการศึกษาครั้งนี้คือ ผู้
ศึกษาได้รับความรู้ในการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
ต่างๆ เช่น เซอร์โวมอเตอร์, Hall Effect Sensor รวมถึง
วงจรอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานที่ใช้ในการทำงานกับ
อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น วงจรแปลงกระแส
และได้รับความรู้ในการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์
ผ่านทางคอนโทรลเลอร์โดยใช้ Arduino Duemilanove
with Atmega328 เป็นคอนโทรลเลอร์ โดยใช้โปรแกรม
LabVIEW สำหรับรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์
และคอนโทรลเลอร์ผ่านทาง Serial Port ซึ่งความรู้ที่
ได้รับนี้เป็นพื้นฐานในการประยุกต์การทำงานของ

ซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์เข้าด้วยกัน เพื่อใช้เป็นรากฐานในการพัฒนาต่อยอดทางการศึกษาในอนาคต

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

Haptic Paddle คืออุปกรณ์ที่เปรียบเสมือน Joystick ที่สามารถให้แรงต้านกลับยังผู้ใช้ได้ โดยใช้จำลองการเคลื่อนที่ใน 1 องศาอิสระในรูปแบบการหมุนของที่จับ โดยจะมี Actuator และเซนเซอร์แตกต่างกันไป ในบทความนี้จะใช้ Haptic Paddle ในการจำลองรูปแบบการเคลื่อนที่ของระบบที่มีมวลติดสปริง แรงต้านการเคลื่อนที่ และแรงภายนอกขนาดที่กระทำ โดยมีโมเดลดังรูปที่ 3 ซึ่ง Haptic Paddle ที่ใช้จำลองจะมีเซอร์โวมอเตอร์เป็น Actuator และมีเซนเซอร์คือ Hall Effect Sensor



รูปที่ 3 แสดงโมเดลจำลองการเคลื่อนที่

สมการการเคลื่อนที่ของระบบในรูปที่ 3 คือ

$$m\ddot{x} + c\dot{x}^2 + kx = F_{ext}, v(x) \geq 0 \quad (1.1)$$

$$m\ddot{x} - c\dot{x}^2 + kx = F_{ext}, v(x) < 0 \quad (1.2)$$

โดยที่

m คือ มวลของวัตถุ

k คือ ค่าคงที่สปริง

c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน

F_{ext} คือ แรงคงที่ที่กระทำกับระบบ

\ddot{x} คือ ความเร่งของมวล

\dot{x} คือ ความเร็วของมวล

x คือ ระยะของวัตถุจากจุดสมดุล

เมื่อ $v = \dot{x}$

จาก $\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dx}$

เมื่อนำมาแทนในสมการที่ 1.1 และ 1.2 จะได้

$$mv \frac{dv}{dx} + cv^2 + kx = F_{ext} \quad (2)$$

โดยสมการที่ 2 มีผลเฉลยคือ

$$v(x) = \sqrt{\frac{km}{2c^2} + \frac{F_{ext}}{c} - \frac{kx}{c} + \alpha e^{\frac{-2cx}{m}}}, v(x) \geq 0 \quad (3.1)$$

$$v(x) = -\sqrt{\frac{km}{2c^2} - \frac{F_{ext}}{c} + \frac{kx}{c} + \alpha e^{\frac{2cx}{m}}}, v(x) < 0 \quad (3.2)$$

โดยมี α เป็นค่าคงที่

เมื่อพิจารณาเงื่อนไขที่จุดเริ่มต้นความเร็วเป็น 0 จะได้

$v(x(0)) = 0$ นำมาแทนในสมการที่ 3.1 และ 3.2 จะได้

$$\alpha = \frac{\frac{km}{2c^2} + \frac{F_{ext}}{c} + \frac{kx(0)}{c}}{e^{\frac{-2cx(0)}{m}}}, v(x) \geq 0 \quad (4.1)$$

$$\alpha = \frac{\frac{km}{2c^2} + \frac{F_{ext}}{c} - \frac{kx(0)}{c}}{e^{\frac{2cx(0)}{m}}}, v(x) < 0 \quad (4.2)$$

เมื่อพิจารณาโมเดลจำลองการเคลื่อนที่ในรูปที่ 3 จะได้แรงลัพธ์ (F_{net}) ที่กระทำกับมวล m มีค่าเท่ากับ

$$F_{net} = -cv^2 - kx + F_{ext}, v(x) \geq 0 \quad (5.1)$$

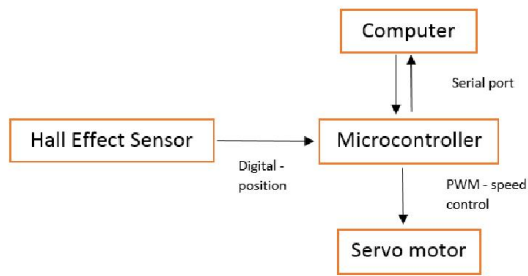
$$F_{net} = cv^2 - kx + F_{ext}, v(x) < 0 \quad (5.2)$$

เมื่อนำค่า v จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 มาแทนค่าในสมการที่ 5.1 และ 5.2 จะได้ฟังก์ชันของ F_{net} ที่ตำแหน่ง x ใดๆ

3. การออกแบบระบบควบคุม

3.1 โครงสร้างของระบบควบคุม

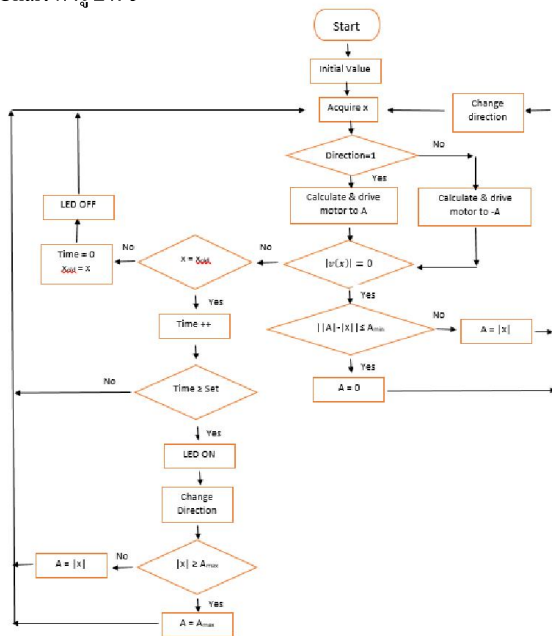
โครงสร้างของระบบควบคุมจะมี Flow Chart ดังรูปที่ 4 ซึ่งประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ ใช้แสดงผลผ่านทางโปรแกรม LabVIEW และมีการรับส่งข้อมูลกับคอนโทรลเลอร์ผ่านทาง Serial Port โดยคอนโทรลเลอร์ที่ใช้คือ Arduino Duemilanove with Atmega328 เป็นอุปกรณ์ประมวลผลซึ่งจะควบคุมทอร์คของเซอร์โวมอเตอร์โดยใช้ Pulse-Width Modulation ในการควบคุม โดยคอนโทรลเลอร์จะรับค่า feed back จาก Hall Effect Sensor เพื่อนำมาประมวลผลเป็นตำแหน่งปัจจุบันและนำมาคำนวณหาตำแหน่งและความเร็วที่ต้องใช้ในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์



รูปที่ 4 แสดง Flow Chart โครงสร้างของระบบควบคุม

3.2 โปรแกรมสำหรับคอนโทรลเลอร์

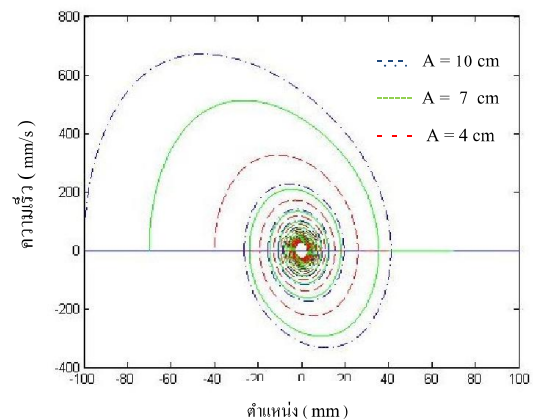
โปรแกรมที่ใช้กับคอนโทรลเลอร์เพื่อรับค่าจากเซนเซอร์และควบคุมมอเตอร์ให้มีการเคลื่อนที่เป็นไปตามรูปแบบการเคลื่อนที่ดังโมเดลในรูปที่ 3 มี Flow Chart ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดง Flow Chart ของโปรแกรมที่ใช้กับ Arduino

การทำงานของโปรแกรมนั้นจะเริ่มจากกำหนดค่าเริ่มต้นให้แก่ระบบได้แก่ค่า มวล (m) ค่าคงที่สปริง (k) ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน (c) แรงภายนอก (F_{ext}) ตำแหน่งเริ่มต้นของระบบซึ่งจะถูกตั้งไว้ที่ตำแหน่งที่ $x = 0$ ซึ่งก็คือตำแหน่งสมดุลของระบบ และค่าผลต่าง Amplitude น้อยสุดระหว่างคาบการเคลื่อนที่ เมื่อกำหนดค่าเริ่มต้นเสร็จสิ้นแล้ว ระบบจะรับค่าอินพุตของ Amplitude เริ่มต้นในการเคลื่อนที่ โดยการที่ผู้ใช้จะต้องขยับที่จับให้มีขนาด Amplitude

ตามที่ต้องการและรอกจนกว่าไฟ LED จะติดซึ่งแสดงว่าระบบได้ทำการรับค่า Amplitude เริ่มต้นเสร็จเรียบร้อยแล้ว และเมื่อปล่อยที่จับระบบจะทำการเคลื่อนที่เป็นไปตามโมเดลในรูปที่ 3 โดยจะทำการคำนวณหาค่า ω จากสมการที่ 4.1 และ 4.2 แล้วนำมาคำนวณหาความเร็วและที่ใช้ควบคุมมอเตอร์จากตำแหน่งของที่จับที่ได้มาจาก Hall Effect Sensor โดยใช้สมการที่ 3.1 และ 3.2 และคำนวณหาค่าแรงที่มอเตอร์ต้องกระทำจากสมการที่ 5.1 และ 5.2 โดยระบบจะเคลื่อนที่ไปเรื่อยๆ จนกว่าค่า Amplitude ในรอบที่ติดกันมีขนาดต่างกันน้อยกว่าค่าที่ผลต่าง Amplitude น้อยสุดที่กำหนดไว้แล้วระบบจึงจะหยุดเคลื่อนที่ หรือมีการเซต Amplitude เริ่มต้นใหม่ทำได้โดยขยับที่จับไปที่ Amplitude ตามที่ต้องการและรอกจนกว่าสัญญาณไฟ LED จะติด



รูปที่ 6 แสดงกราฟระหว่างความเร็วกับตำแหน่งสำหรับค่า Amplitude 10,7 และ 4 cm

4. การทดสอบและผลการทดสอบระบบควบคุม

ในหัวข้อนี้ผู้ศึกษาขอใช้สัญลักษณ์แทนค่าตัวแปรในระบบดังนี้

- A = ค่า Amplitude หน่วยเป็น mm
- A_{max} = ค่า Amplitude สูงสุดที่ระบบรองรับ หน่วยเป็น mm
- τ = ทอร์คของมอเตอร์ หน่วยเป็น $kg \cdot cm$
- v = ความเร็ว หน่วยเป็น cm/s
- v_{max} = ความเร็วสูงสุดที่ระบบรองรับ หน่วยเป็น cm/s
- F_{ext} = แรงภายนอกที่กระทำต่อระบบ หน่วยเป็น N
- F_{net} = แรงสุทธิ หน่วยเป็น N
- F_{max} = แรงสูงสุดที่ระบบจ่ายได้ หน่วยเป็น N
- k = ค่าคงที่ของสปริง หน่วยเป็น N/m
- m = มวล หน่วยเป็น g
- c = สัมประสิทธิ์ของแรงต้าน หน่วยเป็น g/mm

ในการทดสอบระบบควบคุมผู้ศึกษาใช้

Haptic Paddle ที่ใช้เซอร์โวมอเตอร์รุ่น TowerPro SG-5010 ซึ่งมีค่า $\tau = 11.00 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ และค่าอัตราเร็วสูงสุดของมอเตอร์ = $0.14 \text{ sec}/60^\circ$ ที่ความต่างศักย์ 6 โวลต์ซึ่งทำให้ได้ข้อจำกัดของ Haptic Paddle ที่ใช้คือ

$$A_{max} = 20.0 \text{ cm}$$

$$F_{max} = 14.5 \text{ N}$$

$$v_{max} = 56.6 \text{ cm/s}$$

4.1 การทดสอบผลของ Amplitude เริ่มต้นต่อการเคลื่อนที่

สำหรับระบบที่มีค่า

$$k = 50 \text{ N/m}$$

$$m = 500 \text{ g}$$

$$c = 5 \text{ g/mm}$$

$$F_{ext} = 0 \text{ N}$$

โดยทดลองใช้ค่า Amplitude เริ่มต้น 3 ค่าคือ 10 , 7 และ 4 cm จะทำให้ได้กราฟระหว่างความเร็วกับตำแหน่งดังรูปที่ 6

4.2 การทดสอบผลของค่าคงที่สปริงต่อการเคลื่อนที่ สำหรับระบบที่มีค่า

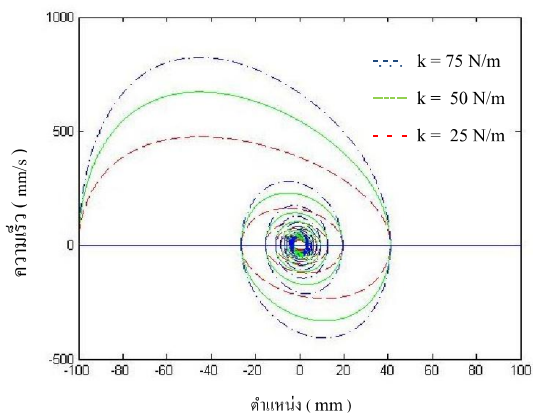
$$A = 100 \text{ mm}$$

$$m = 500 \text{ g}$$

$$c = 5 \text{ g/mm}$$

$$F_{ext} = 0 \text{ N}$$

โดยทดลองใช้ค่าคงที่สปริง 3 ค่าคือ 75, 50 และ 25 N/m จะทำให้ได้กราฟระหว่างความเร็วกับตำแหน่งดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงกราฟระหว่างความเร็วกับตำแหน่ง

สำหรับค่าคงที่สปริง 75,50 และ 25 N/m

4.3 การทดสอบผลของมวลต่อการเคลื่อนที่

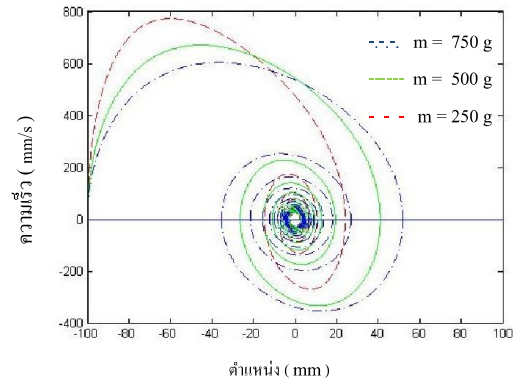
สำหรับระบบที่มีค่า

$$A = 100 \text{ mm}$$

$$k = 50 \text{ N/m}$$

$$c = 5 \text{ g/mm}$$

$$F_{ext} = 0 \text{ N}$$



รูป 8 แสดงกราฟระหว่างความเร็วกับตำแหน่ง

สำหรับค่ามวล 750,500 และ 250 g

โดยทดลองใช้มวล 3 ค่าคือ 750, 500 และ 250 g จะทำให้ได้กราฟระหว่างความเร็วกับตำแหน่งดังรูปที่ 8

4.4 การทดสอบผลของค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้านต่อการเคลื่อนที่

สำหรับระบบที่มีค่า

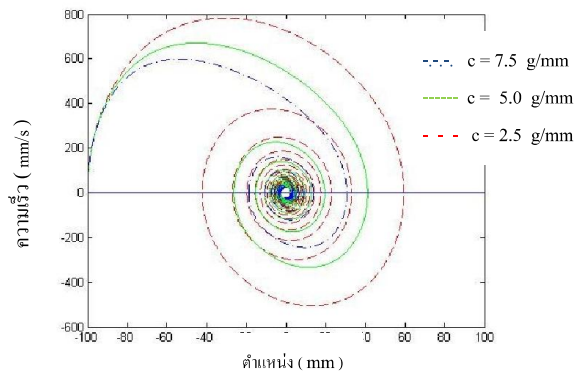
$$A = 100 \text{ mm}$$

$$m = 500 \text{ g}$$

$$k = 50 \text{ N/m}$$

$$F_{ext} = 0 \text{ N}$$

โดยทดลองใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน 3 ค่าคือ 7.5, 5 และ 2.5 g/mm จะทำให้ได้กราฟระหว่างความเร็วกับตำแหน่งดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงกราฟระหว่างความเร็วกับตำแหน่งสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ของแรง

ต้าน 7.5, 5 และ 2.5 g/mm

5. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการเคลื่อนที่ของระบบโดยเปลี่ยนค่าตัวแปรทีละตัวจะทำให้ได้กราฟดังรูปที่ 6 - 9 ข้างต้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า

1. Amplitude เริ่มต้นส่งผลต่อค่าความเร็วสูงสุด โดยเมื่อ Amplitude ยิ่งมากค่าความเร็วสูงสุดก็ยิ่งมากตามไปด้วย แต่การลดลงของ Amplitude ในแต่ละรอบยังคงมีอัตราส่วนใกล้เคียงกัน

2. ค่าคงที่สปริงส่งผลต่อค่าความเร็วสูงสุด คล้ายกับค่า Amplitude เริ่มต้น โดยยังมีค่าคงที่สปริงมาก ค่าความเร็วสูงสุดก็จะมากตามไปด้วย แต่จะไม่ทำให้ค่า Amplitude ของแต่ละกราฟเปลี่ยนซึ่งสังเกตได้จากจุดตัดแกน x ของทั้ง 3 กราฟจะยังคงเป็นจุดเดียวกัน

3. มวลของวัตถุจะส่งผลต่อค่าความเร็วสูงสุด และค่า Amplitude ที่ลดลงแต่ละรอบ โดยมวลมาก ค่าความเร็วสูงสุดจะน้อย แต่ค่า Amplitude ที่ลดลงแต่ละรอบก็จะลดลงน้อยด้วยเช่นกัน

4. ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้านจะส่งผลต่อค่าความเร็วสูงสุด และค่า Amplitude ที่ลดลงแต่ละรอบ โดยยิ่งค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้านมากขึ้น ความเร็วสูงสุดก็จะน้อยลง และ Amplitude ในแต่ละรอบก็จะลดลงมากขึ้น

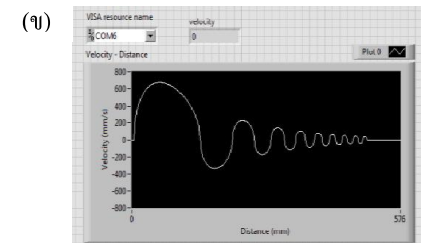
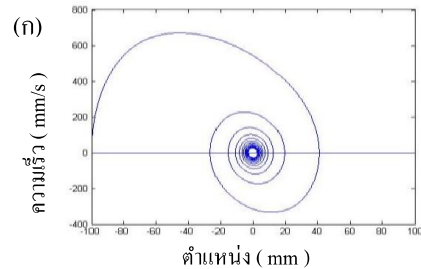
เมื่อทำการทดสอบผลของ Haptic Paddle ในการจำลองระบบซึ่งมีโมเดลและสมการการเคลื่อนที่ตามรูปที่ 3 และสมการที่ 1.1 และ 1.2 ข้างต้น โดยในการศึกษานี้เลือกใช้ค่าตัวแปรของระบบที่ให้รูปแบบกราฟที่ง่ายต่อการศึกษา โดยค่าของตัวแปรที่เลือกใช้คือ

$$\begin{aligned} A &= 100 \text{ mm} \\ k &= 50 \text{ N/m} \\ m &= 0.5 \text{ kg} \\ c &= 5 \text{ g/mm} \\ F_{ext} &= 0 \text{ N} \end{aligned}$$

จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับ

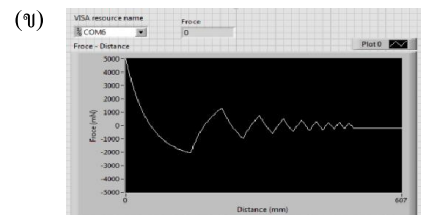
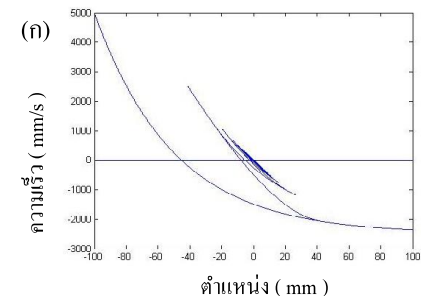
ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณ ได้ดังรูปที่ 10 (ก) และกราฟแรงลัพท์กับระยะที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ในรูปที่ 11 (ก) นอกจากนี้เพื่อให้ผู้ใช้สามารถใช้งานและเข้าใจได้ง่ายยิ่งขึ้นผู้ศึกษาได้พัฒนา GUI ผ่านโปรแกรม LabVIEW เพื่อแสดงผล

กราฟที่ทำให้สามารถทำความเข้าใจได้ง่ายขึ้นดังแสดงในรูปที่ 10 (ข) และ 11 (ข) โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ในการรับค่าตำแหน่ง อัตราเร็ว และแรงลัพท์จากคอนโทรลเลอร์ผ่านทาง Serial Port



รูปที่ 10 แสดงกราฟระหว่างความเร็วกับตำแหน่ง,

(ก) ใช้โปรแกรม MATLAB, (ข) ใช้โปรแกรม LabVIEW



รูปที่ 11 แสดงกราฟระหว่างแรงลัพท์กับตำแหน่ง,

(ก) ใช้โปรแกรม MATLAB, (ข) ใช้โปรแกรม

จะเห็นว่ากราฟที่ได้จากโปรแกรม MATLAB และ LabVIEW นั้นมีลักษณะใกล้เคียงกันแตกต่างกันที่กราฟจากโปรแกรม MATLAB จะใช้แกน x เป็นตำแหน่งทำให้มีลักษณะการวนไปกลับ แต่ในส่วนของ

กราฟจาก LabVIEW นั้นใช้แกน x เป็นระยะกระจัดทำให้กราฟมีลักษณะเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่อง

6. การพัฒนาต่อยอดในอนาคต

ระบบควบคุมที่ศึกษานี้สามารถรับค่าอินพุต Amplitude เริ่มต้นได้ซึ่งสามารถต่อยอดเพิ่มเติมโดยการปรับระบบให้มีการตอบสนองต่อแรงที่กระทำระหว่างที่ระบบกำลังเคลื่อนที่อยู่เพื่อให้ระบบมีการทำงานเสมือนจริงมากยิ่งขึ้น และเพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบ Haptics ที่ซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น และอาจปรับรูปแบบของโมเดลการเคลื่อนที่หรือเพิ่มข้อจำกัดของ Haptic Paddle เพื่อให้สอดคล้องกับอุปกรณ์ที่ใช้ในชีวิตจริงมากยิ่งขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาหัวข้อ “การศึกษาเพื่อออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมอุปกรณ์แอสติกส์ในแนวการเคลื่อนที่ 1 องศาอิสระ” ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยมหิดล ซึ่งอยู่ภายใต้โครงการวิจัยเรื่อง “การแพทย์อัจฉริยะบูรณาการคอมพิวเตอร์ วินิจฉัย ศัลยกรรมและฟื้นฟู”

ทั้งนี้คณะผู้ศึกษาขอขอบพระคุณอาจารย์ ชลลดาวัลย์ มูลใจตา ที่ได้ให้คำสอน คำปรึกษา และคำแนะนำ ตลอดจนการให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาที่ทำการศึกษา ขอขอบคุณนางสาวนันทิดา นิลหุต ที่ช่วยให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆ มาโดยตลอด รวมถึงได้รับความกรุณาจาก ผศ.ดร.จักรกฤษณ์ ศุทธากรณ์ หัวหน้าศูนย์เครื่องข่ายวิจัยประยุกต์ทางเทคโนโลยีหุ่นยนต์และชีวการแพทย์ (BART LAB) และภาควิชาชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในการเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และสถานที่ในการทำการทดลอง จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

8. บรรณานุกรม

- [1] A.M. Okamura, C. Richard and M.R. Cutkosky, “Using a Force-Feedback Joystick to Teach Dynamic,” Journal of Engineering Education, 345-349.
- [2] A.M. Okamura, D. Grow and L.N. Verner, “Educational Haptics,” Department of Mechanical Engineering. The Johns Hopkins University.
- [3] J.L. Gorlewicz, R. James, “A Formal Assessment of the Haptic Paddle Laboratories in Teaching System Dynamics,” Department of Engineering. Vanderbilt University.
- [4] K. Bowen, M.K. O’Malley, “Adaptation of Haptic Interfaces for a LabVIEW-based System Dynamics Course,” Mechanical Engineering and Materials Science. Rice University.
- [5] N.P. Rentsch, M.S. Campagna, O. Celik and S. Dusheyko. (2013), “A Low-Cost Dynamic Plant and Data Acquisition System for Laboratory Courses on Control Systems and Mechatronics,” Department of Engineering. San Francisco State University.
- [6] O. Boubaker, “The inverted Pendulum: A fundamental Benchmark in Control Theory and Robotics,” National Institute of Applied Sciences and Technology.
- [7] S.J. Biggs, M.A. Srinivasan, “Haptic Interfaces,” Laboratory for human and machine haptics. Massachusetts Institute of Technology Cambridge.