การวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์แฮปติกส์ในแนวทางการเคลื่อนที่ 1 องศาอิสระ

Design and Analysis of A New 1-DOF Haptic Device

จุฑาทิพ พงศ์พฤกษา[1] ชนิสรา ขจรชัยกุล[1] ธีระชัย ชินวิกรานต์[1] ศรัณย์ ตุลาการวงศ์[1] นันทิดา นิลหุต[1,2] และชลลดาวัลล์ มูลใจตา[1,2*]
[1]ภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
[2]ศูนย์เครือข่ายวิจัยประยุกต์ทางเทคโนโลยีหุ่นยนต์และชีวการแพทย์ (BART LAB) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
25/25 ถ.พุทธมณฑล สาย 4 ศาลายา นครปฐม 73130 โทร 02-889-2138 ต่อ 6446
[*]Corresponding Author อีเมล์ choladawan.moo@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก โดยเข้ามาช่วยในการเพิ่มขีดความสามารถ ช่วยแก้ไขข้อบกพร่องหรือข้อกัดที่มีอยู่ ทั้งนี้รวมถึงการขาดการรับรู้เชิงสัมผัส ซึ่งมีเทคโนโลยีที่แรกว่าแฮปติกส์ เกิดขึ้นเพื่อช่วยลดข้อจำกัดในการรับรู้และรับสัมผัสที่เสมือนจริงได้ บทความชิ้นนี้ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แฮปติกส์ ชนิด 1 องศาอิสระ หรือ Haptic Paddle ซึ่งเป็นอุปกรณ์อย่างง่าย ช่วยแสดงให้เห็นถึงระบบไดนามิกในรูปแบบของแรงตอบสนองได้เป็นอย่างดี และเหมาะอย่างยิ่งในการศึกษาเพื่อเป็นประโยชน์ในการพัฒนาอุปกรณ์แฮปติกส์ต่อไป

อุปกรณ์แฮปติกส์มีหลักการทำงานคือ เมื่อผู้ใช้ออกแรงกระทำกับมือจับของอุปกรณ์ (Handle) ผู้ใช้จะสามารถรับรู้แรงตอบสนองกลับของอุปกรณ์นั้นได้ โดยงานวิจัยที่ออกแบบขึ้นนี้ ได้พัฒนาในส่วนของ Handle ให้มีองศาการหมุนที่มากขึ้น ซึ่งผู้ศึกษาได้ตรวจสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการใช้งานของตัวอุปกรณ์ และเป็นประโยชน์ต่อพัฒนาและนำไปสู่การพัฒนาต่อยอดในอนาคต

คำสำคัญ : Haptics, Haptic Device , Haptic Paddle, Perception

1. บทนำ

การรับรู้ในด้านต่างๆ ของมนุษย์มีพื้นฐานมาจากระบบประสาทสัมผัสทั้ง 5 อันได้แก่ การมองเห็นด้วยตา การได้ยินด้วยหู การได้กลิ่นด้วยจมูก การรับรสด้วยลิ้น และการสัมผัสโดยผิวหนัง โดยส่วนที่ผู้วิจัยให้ความสนใจนี้ จะเกี่ยวข้องโดยตรงกับประสาทการสัมผัสอันเป็นส่วนที่รับความรู้สึกจากผิวหนังทั้งร่างกาย ทำให้สามารถตอบสนองต่อสิ่งรอบตัวได้อย่างเป็นปกติ หากขาดหรือบกพร่องไปก็จะส่งผลให้การรับรู้ลดลง

การรับรู้ความสึกมีความสำคัญต่อมนุษย์มาก โดยเฉพาะในเรื่องของความปลอดภัยเมื่ออยู่ในสภาวะอันตราย เช่น รู้สึกเจ็บปวดเมื่อถูกของแหลมคมบาดหรือทิ่มตำ ความรู้สึกร้อนเย็น การรับรู้ในสภาวะที่จำกัด เช่น เมื่อไม่สามารถรับรู้ได้ด้วยตา ก็อาศัยการคลำหรือสัมผัสด้วยมือ หรือเมื่อไม่สามารถแยกแยะด้วยประสาทสัมผัสอย่างหนึ่งได้ก็อาศัยประสาทสำผัสอย่างอื่นร่วมด้วย

จากเหตุผลดังกล่าว จึงมีหลากหลายกลุ่มวิจัยที่ได้พัฒนาเทคโนโลยีแฮปติกส์ (Haptics) ขึ้นเพื่อตอบสนองข้อจำกัดในการรับรู้ความสึกเชิงสัมผัส โดยปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ มีหลากหลายลักษณะตามการประยุกต์ใช้ โดยมีหลักการทั่วไปคือ ตัวอุปกรณ์แฮปติกส์ จะสามารถส่งแรงตอบสนองกลับ

ต่อแรงของผู้ใช้ได้ ทำให้ผู้ใช้เกิดความรู้สึกเสมือนได้มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งจำลองเสมือนนั้นจริง

อุปกรณ์แฮปติกส์มีต้นกำเนิดอยู่ในช่วงปี 1980 -1990 โดย Prof. Mark Cutkosky แห่งมหาวิทยาลัย Stanford ได้สร้างเครื่องมือที่ชื่อแฮปติกส์แพดเดิล (Haptic Paddle) ขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษา หลังจากนั้นหลักการของเครื่องมือชนิดนี้ก็ถูกนำไปใช้ในการวิจัยและการเรียนการสอนต่างๆ มากมาย ทำให้มีการพัฒนาและต่อยอดมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน

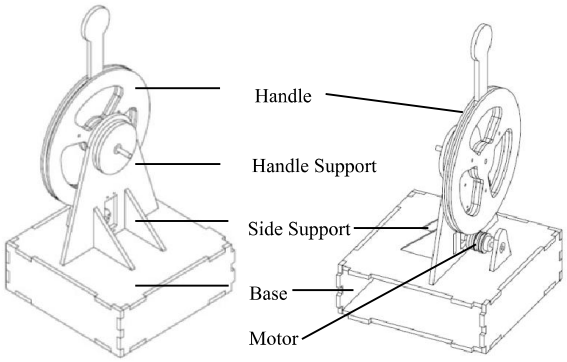
อุปกรณ์แฮปติกส์ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญทางกลศาสตร์ 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนเซนเซอร์ (Sensor) ทำหน้าที่ระบุตำแหน่ง ส่วนต้นกำเนิดกำลัง (Actuator) ทำหน้าที่สร้างแรงตอบสน องกลับกับผู้ใช้ และส่วนต่อประสานกับผู้ใช้ (User Interface) ทำหน้าที่ประสานการทำงานระหว่างผู้ใช้กั บเครื่องมือ โดยในส่วนของการออกแบบแรงตอบสนองกลับนั้น จำเป็นจะต้องคำนึงถึงองศาอิสระ (Degrees of Freedom) ซึ่งจะแปรผันโดยตรงกับจำนวนเซนเซอร์และส่วนต้นกำเนิดกำลัง และเป็นตัวแปรสำคัญตัวแปรหนึ่งในการทำงานของเครื่องกล

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนโครงสร้างของอุปกรณ์แฮปติกส์ โดยมีขอบเขตการศึกษาที่ชนิดหนึ่งองศาอิสระ (1 DOF) และตัวอุปกรณ์แฮปติกส์ต้องมีความสามารถในการเคลื่อนที่ของมือจับมากกว่า 180 องศา ที่เป็นองศาในการหมุนที่มากที่สุดที่พัฒนาขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งผู้ศึกษาได้พัฒนาอุปกรณ์แฮปติกส์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ถึง 300 องศา และจากการศึกษาหลักการ Haptic Paddle ทั้งของมหาวิทยาลัย Vanderbilt [1] และมหาวิทยาลัย Rice [2] ซึ่งเป็นกลุ่มวิจัยที่มีการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ Haptics Paddle ที่โดดเด่น พบว่าการใช้รอกและสายเคเบิลในการเคลื่อนมือจับ (Haptic Handle) มีความเหมาะสมในการเคลื่อนมือจับที่มีองศาในการหมุนมากๆ ทั้งนี้ผู้ศึกษาได้พัฒนาปรับปรุงให้ส่วนโครงสร้างค้ำจุนด้านข้างมีขนาดเล็กลงด้วยเช่นกัน

2. การออกแบบและการติดตั้ง

2.1 ส่วนโครงสร้าง

เนื่องจากอุปกรณ์แฮปติกส์ชนิด 1 องศาอิสระนั้นไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากนัก ผู้ศึกษาจึงเลือกใช้วัสดุประเภท Acrylic ในการเป็นโครงสร้างของตัวอุปกรณ์แฮปติกส์ ทั้งนี้ Acrylic เป็นวัสดุที่สวยงาม นอกจากนี้ยังมีความแข็งแรง ทนทาน และใช้งานง่ายอีกด้วย โดยได้ออกแบบและพัฒนาผ่านโปรแกรม SolidWorks ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วนดังแสดงในรูปที่ 1 นี้



รูปที่ 1 แสดงชิ้นงานที่ผ่านการออกแบบด้วยโปรแกรม Solid Work โดยแสดงให้เห็น ส่วนประกอบทั้ง 4 ส่วน คือ Handle, Handle Support, Side Support และ Base

1. Handle เป็นส่วนมือจับ มีความยาวเส้นรอบวง 15 cm. ซึ่งผู้ใช้งานจะออกแรงกระทำผ่านส่วนนี้ไปยัง มอเตอร์ และ Hall Effect Sensor ที่ใช้วัดมุมซึ่งอยู่ด้านล่าง
2. Handle Support เป็นส่วนที่ใช้รับน้ำหนักมือจับ โดยยึดจุดหมุนของมือจับไว้ นอกจากนั้นด้านล่างจะมีส่วนทำงานของมอเตอร์ที่จะยื่นผ่าน Handle Support ออกมาทำหน้าที่หมุน Handle
3. Side Support ทำหน้าที่ยึด และ รับน้ำหนัก Handle Support

4. Base เป็นส่วนฐานที่รับน้ำหนักทั้งหมดของ Haptic Paddle และเป็นพื้นที่ใส่วงจร Arduino ของส่วน Control

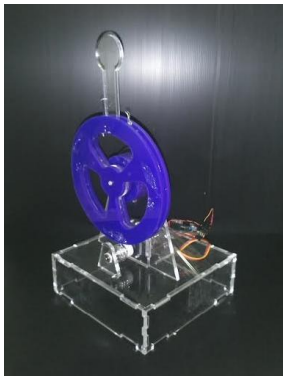
2.2 ส่วนอุปกรณ์จับยึด

อุปกรณ์ในส่วนที่ช่วยในการเชื่อมต่อส่วนประกอบอื่นๆ เข้าด้วยกัน มีดังนี้

1. Spacer ทำหน้าที่ลดความต้านทาน ระหว่าง Handle และ Handle support
2. Shaft ขนาด 3 mm ใช้เป็นเพลาของ Handle
3. Lock Washer หรือแหวนกันคลาย ทำหน้าที่ลดแรงต้านทาน และช่วยป้องกันไม่ให้น็อตและสกรูขยับออกจากกันเมื่อถูกหมุน
4. แหวนทำหน้าที่ลดแรงกดบนชิ้นงานกับตัวน็อต
5. กาวเซรามิกทำหน้าที่เชื่อมส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนที่
6. สกรู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm ยาว 3 cm 4 ตัว ในการยึดมอเตอร์
7. สกรู เส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ยาว 2 cm 4 ตัว ในการยึดบอร์ด Arduino
8. ลูกรอก (Pulley) ใช้ทำแกนของส่วนมอเตอร์ และ หน้าที่ในการเก็บ และ คลายสาย Cable ซึ่งทำให้สามารถส่งแรงขับไปที่ Handle ได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวรอก 17 mm ใช้กับเพลาขนาด 3 mm
9. กาว Epoxy ในการยึดสาย Cable เข้ากับลูกรอก

2.3 ส่วนอุปกรณ์เซ็นเซอร์

ผู้ศึกษาได้เลือกใช้ Hall Effect Sensor เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นระบบตรวจสอบพิกัดเพื่อควบคุมมอเตอร์ เนื่องจากเป็นเซนเซอร์ที่มีขนาดเล็ก จึงทำให้มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานกับ Haptic Paddle โดยลักษณะทั่วไปของ Hall Effect Sensor ประกอบด้วย ขาไฟเลี้ยงบวก ไฟเลี้ยงลบ และ ขาสัญญาณเอาท์พุท



รูปที่ 2 อุปกรณ์แฮปติกส์ 1 องศาอิสระที่ออกแบบโดย BART LAB และภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.มหิดล

Hall Effect Sensor ทำงานโดยวัดค่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กเมื่อแม่เหล็กเกิดการเคลื่อนที่ จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ที่ออกมาเปลี่ยนแปลงไป โดยแม่เหล็กจะถูกติดไว้ที่ส่วนแกนของมอเตอร์ เพื่อใช้วัดองศาการหมุนของมอเตอร์ และนำค่าที่วัดได้นี้ไปใช้สำหรับคำนวณเป็นองศาในการทดรอบของ Handle ต่อไป โดยตัวอุปกรณ์แฮปติกส์ 1 องศาอิสระ ที่ออกแบบโดย BART LAB และภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ ม.มหิดล ดังแสดงในรูปที่ 2

เมื่อทดลองวัดสัญญาณ output ของ Hall Effect Sensor โดยนำแม่เหล็กมาวางข้างหน้าเซนเซอร์ และหมุนแม่เหล็ก โดยสังเกต output ของสัญญาณ เมื่อแม่เหล็กอยู่ที่มุมต่างๆ ได้ผลการทดลองดังนี้

1. เมื่อแม่เหล็กตั้งฉากกับ Hall Effect Sensor สัญญาณ output จะมีค่าลดลงเข้าใกล้ 0 แต่เมื่อแม่เหล็กเริ่มขยับออก output จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนกระทั่งแม่เหล็กวางตัวขนานกับเซนเซอร์
2. Voltage output จะมีค่ามากที่สุดประมาณ 4.8 ถึง 5 V จากคุณสมบัตินี้ทำให้เราสามารถวัดองศาของการหมุนหรือรอบของการหมุนได้ โดยมี output เป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยตรง

2.4 มอเตอร์

มอเตอร์มีหน้าที่ขับเคลื่อนการทำงานของเครื่องมือ เพื่อสร้างแรงตอบสนองกลับให้กับผู้ใช้ โดยในการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แฮปติกส์นี้ ผู้ศึกษาได้เลือกใช้มอเตอร์รุ่น SG-5010 Servo เนื่องจากเป็นมอเตอร์ขนาดเล็กที่สามารถหาได้ทั่วไป มีลักษณะการควบคุมที่ง่าย เมื่อจ่ายไฟมอเตอร์ 4.8 โวลต์ มอเตอร์จะสามารถให้ทอล์กสูงสุดได้ที่ 5.5 kg·cm. จะสามารถให้แรงต้านได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} \tau_{motor} &= \tau_{handle} \\ \tau_{motor} &= R_{handle} \times F_{handle} \\ 5.5 &= 7.5 \times F_{handle} \\ F_{handle} &= 0.733\ Kg. \end{aligned}$$

เมื่อ τ คือ โมเมนต์ของแรง

F คือ แรงในแนวตั้งฉากซึ่งมือสัมผัสได้

R คือ รัศมีของ Handle

นั่นหมายความว่าตัวอุปกรณ์ที่ได้พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถให้แรงต้านกลับได้ประมาณ 0.733 กิโลกรัม หรือประมาณ 7.188 นิวตัน

2.5 การคำนวณความยาวสาย Cable

ความยาวของสาย Cable ที่ใช้ทำรอกในการศึกษานี้จะเกิดจากการรวมกันของความยาว Cable ที่พันรอบ Handle และ ความยาว Cable ที่พันรอบแกนมอเตอร์ โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

เนื่องจาก Handle มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm. สามารถเคลื่อนที่ได้ 300 องศา ทำให้ Cable มีความยาวรอบ Handle เท่ากับ

$$\begin{aligned} L_{Handle} &= 2 \times \pi \times R_{Handle} \times \frac{300}{360} \\ &= 2 \times \pi \times 7.5 \text{ cm.} \\ &= 39.27 \text{ cm.} \end{aligned} \quad (1)$$

และแกนมอเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.7 cm. โดยจะม้วนสาย Cable โดยรอบประมาณ 3 รอบ

$$\begin{aligned} L_{Nut} &= 2 \times \pi \times R_{Nut} \times 3 \\ &= 2 \times \pi \times 0.85 \text{ cm.} \times 3 \\ &= 16.02 \text{ cm.} \end{aligned} \quad (2)$$

ดังนั้นจำเป็นต้องใช้ Cable ยาวทั้งสิ้น (1) + (2) เท่ากับ 55.29 cm. ซึ่งในการใช้งานจริง จะต้องเผื่อความยาวเพิ่มในกรณีที่ต้องมีการปรับความตึงของลวด และเหลือส่วนปลายลวดไว้ในการติดกาว Epoxy ซึ่งทำให้มีความยาวประมาณ 60 cm.

3. การทดสอบความถูกต้อง แม่นยำของอุปกรณ์

เนื่องจากรัศมีของ Handle และรัศมีของแกนมอเตอร์มีขนาดไม่เท่ากัน และทำให้องศาในการหมุนของแกนมอเตอร์และ Handle ไม่เท่ากันตามไปด้วย จึงต้องมีการทดรอบขึ้นในระบบ ซึ่งเป็นระบบการส่งกำลังด้วยอัตราทดชั้นเดียว ทำให้สามารถคำนวณการทดรอบที่เกิดขึ้นระหว่างแกนของมอเตอร์และแกนของ Handle ดังนี้

$$i = \frac{d_2}{d_1} = \frac{15}{1.7} = 8.82 \quad (3)$$

โดยที่ i คือ อัตราการขับ

d_1 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนมอเตอร์

d_2 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Handle

และความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและอัตราการทดรอบเป็นดังนี้

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{150}{17} = 8.82{:}1 \quad (4)$$

โดยที่ n_1 คือ ความเร็วของแกนมอเตอร์ (รอบต่อนาที)

n_2 คือ ความเร็วของ Handle (รอบต่อนาที)

เพราะฉะนั้น หากหมุนแกนมอเตอร์ไป 8.82 รอบ จะทำให้ Handle หมุนไป 1 รอบ หรือ คิดเป็น 300 องศา หากลองหมุนแกนมอเตอร์ไป 1 รอบ จะทำให้ Handle หมุนไป 0.113 รอบ หรือคิดเป็นประมาณ 34 องศา ซึ่งเป็นค่าการคำนวณในทางทฤษฎี ซึ่งผู้ศึกษาได้ทำการทดสอบระบบโดยการหมุนแกนมอเตอร์ เทียบกับองศาที่เปลี่ยนไปของ Handle โดยได้ค่าผลการทดลองดังแสดงในตารางผลการทดลองที่ 1 ต่อไปนี้

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลการทดลองหมุนแกนมอเตอร์เทียบกับองศาที่เปลี่ยนไปของ Handle

ลักษณะการหมุนแกนมอเตอร์	องศาที่ได้จากการทดลอง	องศาที่ได้จากการคำนวณ	ค่าความคลาดเคลื่อน (%)
หมุนไปทางขวาครึ่งรอบ	24	17	41.18
หมุนไปทางขวาหนึ่งรอบ	46	34	35.30
หมุนไปทางซ้ายครึ่งรอบ	23	17	35.30
หมุนไปทางซ้ายหนึ่งรอบ	47	34	38.24

4. อภิปรายและสรุปผลการทดลอง

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการที่ปริเวณที่ยึดปลาดเส้นของ สาย Cable มีการใช้กาว Epoxy ซึ่งทำให้เกิดรอบนูนบริเวณที่เก็บรอก หรือ เป็นการเพิ่มรัศมีของส่วนที่ใช้เก็บรอบของแกนมอเตอร์ ซึ่งทำให้อัตราการขับลดลง และ ความเร็ว Handle มากขึ้น จึงทำให้ Handle เคลื่อนที่ได้องศามากขึ้น เมื่อเทียบกับแกนมอเตอร์ที่เคลื่อนที่เท่าเดิม ซึ่งจากปัญหาที่เกิดขึ้นข้างต้น ผู้ศึกษาจึงได้ลองปรับเปลี่ยนวิธีการ จากหลักการใช้รอกในการเคลื่อนที่ของ Handle เป็นหลักการใช้ยางแทน ซึ่งทำให้พบข้องจำกัดของทั้งสองวิธีการเช่นเดียวกันโดยจะขอกล่าวถึงในหัวข้อ ข้อเสนอแนะต่อไป

5. ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองประกอบชิ้นงานอุปกรณ์ทั้งแบบที่ใช้หลักการของรอก และหลักการของยาง ทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของทั้ง 2 วิธี ดังนี้

1. แบบรอก ควรใช้ตัวเก็บรอกที่มีขนาดใหญ่สามารถเก็บรอกเข้าไปได้สนิท และ มีเส้นรอบวงที่เก็บสาย Cable ได้ใหญ่ประมาณหนึ่ง หากเล็กเกินไปจะไม่สามารถเก็บเส้น Cable ได้ ซึ่ง อุปกรณ์ที่ไม่ควรใช้ เช่น นอตที่มีขนาดเล็ก หรืออุปกรณ์ที่มีการใช้ลูกปืนบนรูที่สวมแกน เนื่องจากรอกจะไม่หมุนตามแกนของมอเตอร์ทำให้ไม่สามารถนำมาทำเป็นแกนได้

2. แบบยาง ต้องวัดเส้นรอบวงของวัสดุที่จะใช้ในการประกบเพื่อสร้างแรงเสียดทานให้ดี เนื่องจากถ้าหากใช้วัสดุที่มีขนาดไม่พอดี จะทำให้แกนหมุนทั้งสองหมุนไม่คงที่ และอาจทำให้เกิดการไถลได้ ข้อบกพร่องดังกล่าวอาจแก้ด้วยการทำ Handle ให้ปรับขึ้นลงได้เพื่อทำให้ไม่เกิดการไถลโดยวัสดุที่จะนำมาสวมแกนมอเตอร์ซึ่งสัมผัสกับ Handle ต้องมีลักษณะกลม และมีพื้นผิวที่ไม่ขรุขระ มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการขัดกันระหว่างหมุนหรือเกิดไถลได้

3. จากการยึดสาย Cable กับ ลูกรอกโดยใช้กาว Epoxy ทำให้พื้นผิวของบริเวณที่ยึดไม่เรียบ และ เป็นการเพิ่มรัศมีของส่วนที่เก็บรอกซึ่งทำห้เกิดความคลาดเคลื่อนขององศาที่หมุนได้จริงกับค่าที่คำนวณ ซึ่งมีวิธีที่แก้ไขได้โดยการใช้วิธียึดรอกด้วยวิธีอื่นที่ไม่ใช้กาว หรือหาลูกรอกที่สามารถเก็บสาย Cable ได้ในตัว

6. การนำไปใช้และการต่อยอด

จากการทำการค้นคว้าอุปกรณ์แฮปติกส์หนึ่งองศาอิสระในเชิงกลศาสตร์ พบว่า อุปกรณ์ในการวิจัยมีคุณสมบัติในการตอบสนองแรงกลับ เมื่อผู้ใช้ออกแรงให้กับอุปกรณ์ ผู้ใช้จะสามารถรับรู้แรงเสมือนจริงได้จาก

การสัมผัส ดังนั้นอุปกรณ์แฮปติกส์ จึงถูกนำมาพัฒนาใช้งานในด้านทางการแพทย์ การให้องศาอิสระที่มากขึ้นจะทำให้สามารถรับรู้แรงได้ในหลายทิศทาง ซึ่งสามารถนำหลักการดังกล่าวไปพัฒนาเครื่องมือจำลองการผ่าตัดต่อไปได้ โดยจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการฝึกฝนแพทย์ให้มีความชำนาญมากยิ่งขึ้น

จากประโยชน์ที่กล่าวมาข้างต้น จึงทำให้มีผู้สนใจพัฒนาในด้านอุปกรณ์แฮปติกส์ เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ อย่างต่อเนื่อง แนวโน้มการต่อยอดในอนาคตจึงเริ่มมีทิศทางไปในทางที่ดี จุดประสงค์ที่สำคัญในการต่อยอดอย่างหนึ่ง คือการนำอุปกรณ์แฮปติกส์มาใช้งานนอกขอบเขตของกลศาสตร์และจลศาสตร์ เพื่อนำมาใช้ในการทดลองต่างๆ ที่เป็นประโยชน์สืบไป

7. บทสรุป

จากการทดลองอุปกรณ์แฮปติกส์ที่พัฒนาขึ้นในแง่ของการที่สามารถใช้งานได้ในมุมที่กว้างขึ้นนั้น สามารถใช้งานได้จริง แต่อาจจะเกิดข้อผิดพลาดขึ้นได้ขณะประกอบชิ้นงานเนื่องจากการใช้มุมที่มากขึ้นนั่นเอง ดังนั้น การใช้มุมที่พอดีกับจุดประสงค์จึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกส์นี้

8. กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาเรื่อง การวิเคราะห์และออกแบบอุปกรณ์แฮปติกส์ในแนวทางการเคลื่อนที่ 1 องศาอิสระนี้ ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยมหิดล ภายใต้โครงการ “การแพทย์อัจฉริยะบูรณาการคอมพิวเตอร์วินิจฉัย ศัลยกรรมและฟื้นฟู” ซึ่งทำให้ผู้ศึกษาได้รับองค์ความรู้มากมาย ทั้งทักษะการแก้ปัญหา การคิดวิเคราะห์ การวางแผนการทำงาน ตลอดจนการทำงานร่วมกับผู้อื่น

ทั้งนี้คณะผู้ศึกษาขอขอบพระคุณ อาจารย์ชลลดาวัลย์ มูลใจตา ที่ได้ชี้แนะแนวทาง ให้คำปรึกษาตลอดจนการให้การสนับสนุนตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษา ขอขอบคุณ นางสาวนันทิดา นิลหุต ที่ได้ให้คำแนะนำด้วยดีตลอดมา รวมถึงขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.จักรกฤษณ์ ศุทธากรณ์ หัวหน้าศูนย์เครือข่ายวิจัยประยุกต์ทางเทคโนโลยีหุ่นยนต์และชีวการแพทย์ (BART LAB) และภาควิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์ และให้การเอื้อเฟื้อในอุปกรณ์ และสถานที่ จนทำให้การศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

9. บรรณานุกรม

[1] Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Rice University, **“***The Haptic Paddle Kit***”,** http://mahilab.rice.edu/content/hands-haptics-haptic-paddle

[2] Medical & Electromechanical Design Lab, Vanderbilt University, **“***The Vanderbilt Haptic Paddle Assembly Guide and Parts List***”,** http://research.vuse.vanderbilt.edu/MEDLab/haptic_paddle.html

[3] R. Gassert, J.-C. Metzger, K. Leuenberger, W.L. Popp, M.R. Tucker, B. Vigaru, R. Zimmermann and O. Lambercy, **“***Physical Student-Robot Interaction with the ETHZ Haptic Paddle***”,** Accepted for publication in the IEEE Transactions on Education, August 2, 2012

[4] J.L. Gorlewicz**, “***The efficacy of surface haptics and force feedback in education***”**, Dissertation Submitted to the Faculty of the Graduate School, Vanderbilt University

[5] M. Bordegoni, G. Colombo, L. Formentini, **“***Haptic technologies for the conceptual and validation phases of product design***”**, Computers & Graphics, 30 (2006), 377–390