

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การจำลองและออกแบบอุปกรณ์แฮปติกสององศาอิสระชนิดห้าลิ่งค์แบบขนาน (Design and Simulation of 2 DOFs Five-Bars Parallel Link Haptic Device)

สมโพธิ โตบรรเลง², ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์^{1,*} และ สมโพธิ โตบรรเลง²

^{1, 2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
กรุงเทพมหานคร 10900

* ผู้ติดต่อ: โทรศัพท์: 02 940 5822 โทรสาร: 02 940 5823

E-mail: taweedej.s@ku.ac.th¹, egme_qclass@yahoo.com²

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบอุปกรณ์แฮปติก ซึ่งอุปกรณ์ที่ออกแบบนี้เป็นชนิดกลไกขนานแบบ Five-Bars Parallel Link พื้นที่ทำงานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 20 x 20 ตารางเซนติเมตร สามารถรองรับแรงปฏิกิริยาโต้ตอบกับผู้ใช้งานในระดับ 5-7 นิวตัน ซึ่งในงานวิจัยได้แสดงผลการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของอุปกรณ์ทั้ง Forward Kinematics และ Inverse Kinematics และใช้ซอฟต์แวร์ Simulink®/SimMechanics™ ในการจำลองพลศาสตร์ของอุปกรณ์แฮปติก แสดงผลการทดสอบแบบจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนที่มีความแข็ง (Stiffness) ที่แตกต่างกัน โดยใช้แบบจำลองสปริงที่มีค่าคงที่สปริงแตกต่างกัน โดยที่นำแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์ที่เลือกใช้ในการออกแบบมารวมไว้ใน การจำลองเพื่อหยุดการ simulation เมื่อแรงบิดถึงแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถให้ได้

คำหลัก: การจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนและอุปกรณ์แฮปติก, การวิเคราะห์ Forward and Inverse Kinematics, กลไก Five-Bars Parallel Link

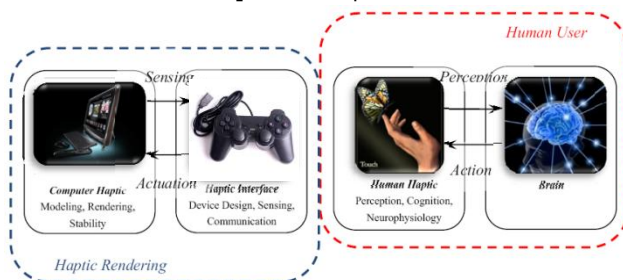
Abstract

This article is to demonstrate the results of a haptic device design and simulation with the virtual environment. The analysis of the five-bars parallel link haptic device both forward kinematics and inverse kinematics is briefly discussed, as well as the kinetics. The haptic device is designed to cover the working area of 20x20 square centimeters with the interaction force about 5-7 N. The Simulink®/SimMechanics™ is used for the verification of the design and simulation of the virtual environments. The different stiffnesses in the virtual environment simulations are tested. The maximum torque provided from the selected motor actuators is included to terminate the simulation when the maximum torque is reached.

Keywords: Haptic Device Simulation with Virtual Environment, Forward and Inverse Kinematics Analysis, Five-Bars Parallel Link

1. บทนำ

อุปกรณ์แฮปติกเป็นอุปกรณ์ User Interface ที่ทำการติดต่อระหว่างผู้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ให้เกิดการสื่อสารทางการสัมผัสระหว่างกันที่สมมาตรและเกิดการรับส่งข้อมูลระหว่างกันเป็นไปในสองทิศทางเสมอ ดังรูปที่ 1 และระบบปฏิสัมพันธ์ทางการสัมผัสระหว่างคอมพิวเตอร์กับผู้ใช้งาน หลัก ๆ จะประกอบไปด้วยในส่วนของความรู้สึกสัมผัสของมนุษย์ (Human Haptic) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการรับรู้และการจับต้องของผู้ใช้งานผ่านทางสัมผัส และในส่วนที่สองคือในส่วน Haptic Machine นั่นก็คืออุปกรณ์แฮปติกนั่นเอง ในส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับการออกแบบ การสร้าง และการใช้งานอุปกรณ์แฮปติก และในส่วนสุดท้ายก็คือคอมพิวเตอร์แฮปติกซึ่งจะเกี่ยวข้องกับการลำดับขั้นตอนอัลกอริทึมและซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและการจำลองการสัมผัสและการรับรู้ที่คล้ายคลึงกับมนุษย์[5]



รูปที่ 1: แผนภาพแสดงองค์ประกอบและความสัมพันธ์ระหว่างส่วนประกอบของแฮปติก

การแยกประเภทของอุปกรณ์แฮปติกนั้นมีหลายวิธี แต่ที่นิยมมี 3 วิธี [7] คือ

1.1 วิธีที่หนึ่งแบ่งตามโครงสร้างในการกราวด์ทางกล (Mechanical Grounding Configuration) [13] ซึ่งสามารถแบ่งอุปกรณ์แฮปติกออกได้ 3 ประเภท โดยที่ประเภทแรกเป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่กับที่ (Grounded Device) เป็นประเภทหนึ่งที่ตั้งอยู่นิ่ง ๆ บนโต๊ะ พื้น หรือวัตถุที่นิ่งอยู่กับที่ โดยทั่วไปโครงสร้างของอุปกรณ์แฮปติกประเภทนี้จะเป็นแบบลิงค์กลกับข้อต่อแบบเลื่อนและหรือข้อต่อแบบหมุน ดังนั้นอุปกรณ์ประเภทนี้จะมีแอกชูเอเตอร์หรือเบรกเพื่อกดดันแรงบิดและหรือแรงระหว่างผู้ใช้งานและส่วนที่ติดอยู่กับกราวด์ ตัวอย่างของอุปกรณ์ประเภทนี้ได้แก่ The

PHANTOM® Omni™ Device ของบริษัท SensAble Technology[8]

1.2 ประเภทที่สองคือ อุปกรณ์แฮปติกซึ่งเป็นระบบกราวด์ติดอยู่กับที่เคลื่อนที่ได้ (Body Ground System) ซึ่งอุปกรณ์จะยึดติดกับส่วนของร่างกายของผู้ใช้งานมากกว่าวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่ อุปกรณ์ชนิดนี้จะใช้ส่วนที่ติดอยู่กับร่างกายหรือส่วนของร่างกายทำหน้าที่เป็นจุดของการวัดใช้สำหรับเกิดแรงหรือแรงบิดที่เท่ากับและมีทิศทางตรงกันข้ามกับอีกส่วนหนึ่งที่สวมใส่ร่างกายหรือส่วนของร่างกายอยู่ ตัวอย่างของอุปกรณ์แฮปติกประเภทนี้ได้แก่ The CyberGlove® II System ซึ่งเป็นของ Immersion Technologies แรงจะกระทำต่อนิ้วมือของผู้ใช้งานซึ่งถูกกราวด์กับท่อนแขนซึ่งประสาทสัมผัสของนิ้วไวต่อการรับรู้สัมผัสมากกว่าท่อนแขน[9]

1.3 และสุดท้าย อุปกรณ์แฮปติกประเภทที่สามเป็นแบบอุปกรณ์แฮปติกที่ไม่ติดอยู่กับที่เคลื่อนที่ได้ (Mechanically Ungrounded Device) มักจะใช้โมเมนตัมเชิงมุมหรือโมเมนตัมเชิงเส้นเพื่อที่จะสร้างกราวด์ในตอนเริ่มต้น (Initial Ground) ตัวอย่างของอุปกรณ์ชนิดนี้ที่พบอย่างแพร่หลาย ได้แก่ ทรอสท์ที่มีมือถือหรือคอนโทรลเลอร์ของวิดีโอเกมสมัยใหม่[10]

ในปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์แฮปติกไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น ในสายงาน Computer Augmented Design (CAD) วิศวกรผู้ออกแบบเครื่องยนต์ สามารถที่จะนำชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ออกแบบมาทดสอบการประกอบเข้ากันก่อนการผลิตจริงได้ อุปกรณ์แฮปติกสามารถนำไปใช้ ในการศึกษาหรือฝึกฝนความเชี่ยวชาญทางการแพทย์ได้ เช่น The da Vinci® Surgical System ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของระบบการผ่าตัดสมัยใหม่จากการพัฒนาโดยบริษัท Intuitive Surgical โดยใช้อุปกรณ์แฮปติกเป็นเครื่องมือในการสร้างหรือถ่ายทอดความรู้สึกสัมผัสกับอวัยวะเสมือนจริงหรือส่วนของร่างกายเสมือนจริง (เช่นเนื้อเยื่อจำลองหรือกล้ามเนื้อจำลอง) ที่ถูกสร้างหรือจำลองขึ้นที่เวลาจริง [11] และอีกตัวอย่างของการ

นำอุปกรณ์แฮปติกที่นำไปใช้ เช่นในระบบที่ใช้ในงานทางทันตกรรม เช่น The SensAble™ Dental Lab™ System ซึ่งเป็นระบบที่อำนวยความสะดวกสำหรับงานทางทันตกรรมในการสแกน ออกแบบ และแสดงข้อมูลที่ได้ออกจากรูปแบบที่เป็น 3 มิติ สำหรับการทำให้โครงเหล็ก ฟันปลอมและที่ยึดฟันปลอม โดยรวมเอาระบบแฮปติกเข้าไว้ด้วยกันกับระบบการจำลองในรูปแบบดิจิทัล 3 มิติโดยใช้ PHANTOM™ Desktop™ Device[12] นอกจากนี้อุปกรณ์แฮปติกยังสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมด้วยมือสำหรับยานพาหนะเสมือนจริง เช่นในการจำลองการบิน (Flight Simulator) มือของผู้ใช้จะรู้สึกถึงแรงที่เกิดจากอากาศพลศาสตร์และการสั่นสะเทือน

ในงานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อออกแบบและจำลองอุปกรณ์แฮปติก โดยที่ผู้ใช้งานใช้นิ้วมือสัมผัสกับปลาย tool tip เพื่อรับปฏิกิริยาโต้ตอบทางการสัมผัสกับอุปกรณ์แฮปติกและเป็นอุปกรณ์แฮปติกชนิดที่อุปกรณ์ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Device) โดยมีข้อจำกัดในการออกแบบดังต่อไปนี้ กำหนดให้มีพื้นที่ทำงานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสซึ่งมีขนาดเท่ากับ 20×20 ตารางเซนติเมตร[3] และสามารถรับแรงสูงสุดได้ 30 นิวตัน

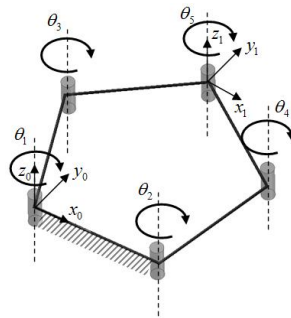
นอกจากนั้นในงานวิจัยยังสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนขึ้นและจำลองปฏิกิริยาโต้ตอบทางการสัมผัสของผู้ใช้งานกับอุปกรณ์เพื่อทดสอบแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติก

2. การออกแบบอุปกรณ์แฮปติก

ในงานวิจัยนี้เลือกออกแบบกลไกของอุปกรณ์แฮปติกให้เป็นลักษณะลิ้งค์ที่ต่อกันแบบขนานเป็น Five-Bar Parallel Link อันประกอบด้วยข้อต่อหมุนทั้งห้าอัน เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีผลตอบสนองต่อแรงที่ดีและมีส่วนที่มีการเคลื่อนที่ (moving mass) ไม่นัก โดยที่ข้อต่อสองข้อต่อ (θ_1 และ θ_2) ที่ติดอยู่กับกราวด์ลิ้งค์จะติดมอเตอร์ขับเคลื่อนไว้ ซึ่งสามารถวัดตำแหน่งของข้อต่อและสามารถสร้างแรงบิดขับเคลื่อนข้อต่อทั้งสอง

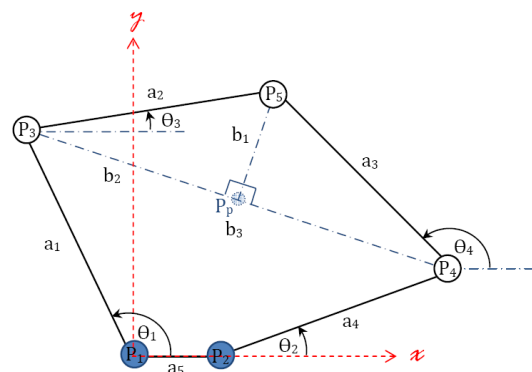
โดยผู้ใช้งานสามารถเคลื่อนปลาย tool tip (ตำแหน่งที่ติดกับ θ_5) ในระนาบสองมิติภายในพื้นที่ทำงาน ในขณะที่เดียวกันผู้ใช้งานยังสามารถใช้แรงที่มีขนาดและทิศทางใดๆ กระทำที่ปลาย tool tip เดียวกันนั้นได้ และการออกแบบทางกลอื่น ๆ ของอุปกรณ์แฮปติกซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์เพื่อหาสมการ Forward Kinematics และ Inverse Kinematics ของกลไกของอุปกรณ์ก่อนและพิสูจน์สมการที่ได้

จากนั้นจึงทำการออกแบบและสร้างข้อต่อเพื่อนำข้อมูลการกระจัดเชิงมุมที่ข้อต่อจริงสามารถวัดได้จริงเฉลี่ยเพื่อไปใช้ในการสร้างแบบจำลองและทำการพิสูจน์เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองเป็นจริงและนำไปใช้ในการหาขอบเขตของพื้นที่ทำงานต่อไป



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงลักษณะทางโครงสร้างที่ออกแบบ

2.1 การวิเคราะห์ Forward Kinematics



รูปที่ 3 แผนภาพแสดงตำแหน่งและมวล

เมื่อทำการวิเคราะห์ Forward Kinematics จะได้ตำแหน่งของ end-effectors (ในแผนภาพเป็น R_3) โดยที่เป็นฟังก์ชันของมุมทั้งสองของข้อต่อที่จะทำการติด actuator ซึ่งจะได้ตำแหน่ง $R_3(x_3, y_3)$

$$x_3 = f(\theta_1, \theta_2, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$$

และ
$$y_3 = f(\theta_1, \theta_2, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$$

กำหนดให้จุดกำเนิดอยู่ที่ข้อต่อที่หนึ่งและตำแหน่งของข้อต่อและขนาดของลิงค์ต่าง ๆ เป็นไปตามรูปที่ 3 ที่นี้จะแสดงผลจากการวิเคราะห์ Forward และ Inverse Kinematics จากงานวิจัยโดย ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ และ สมโพธิ โตบรรเลง [1]

$$R_3(x_3, y_3) = [a_1 \cos \theta_1 \quad a_1 \sin \theta_1]^T \quad (1)$$

$$R_4(x_4, y_4) = [a_4 \cos \theta_2 + a_5 \quad a_4 \sin \theta_2]^T \quad (2)$$

$$b_2 = \frac{a_2^2 - a_3^2 + b_3^2}{2b_3} \quad (3)$$

$$b_3 = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} \quad (4)$$

$$b_1 = \sqrt{a_2^2 - b_2^2} \quad (5)$$

$$x_p = x_3 + \frac{b_2}{b_3} |x_4 - x_3| \quad (6)$$

$$y_p = y_3 + \frac{b_2}{b_3} |y_4 - y_3| \quad \text{ถ้า } y_p \geq y_3$$

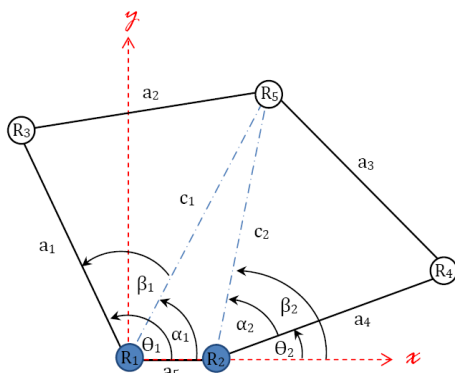
$$y_p = y_3 - \frac{b_2}{b_3} |y_4 - y_3| \quad \text{ถ้า } y_p < y_3 \quad (7)$$

$$x_5 = x_p + \frac{b_1}{b_3} |y_4 - y_3| \quad \text{ถ้า } x_5 \geq x_p$$

$$x_5 = x_p - \frac{b_1}{b_3} |y_4 - y_3| \quad \text{เมื่อ } x_5 < x_p \quad (8)$$

$$y_5 = y_p + \frac{b_1}{b_3} |x_4 - x_3| \quad (9)$$

2.2 การวิเคราะห์ Inverse Kinematics



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงมุมที่ใช้ในการวิเคราะห์

Inverse Kinematic

ทำการวิเคราะห์ Inverse Kinematics เพื่อควบคุมมุมในการหมุนของมอเตอร์ทั้งสอง (มุม θ_1 และ θ_2) โดยสร้างรูปสามเหลี่ยมซึ่งลากเชื่อมต่อระหว่างข้อต่อ

R_1 กับ R_5 และ R_2 กับ R_5 ตามรูปที่ 4 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

$$\theta_1 = \alpha_1 + \beta_1 \quad (10)$$

$$\theta_2 = \beta_2 - \alpha_2 \quad (11)$$

สมมุติฐานในการออกแบบ กำหนดให้ความยาวลิงค์ทั้งห้ามีขนาดเท่ากัน ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ l ดังนั้นจะได้ว่า $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = l$ และให้ a_5 เป็นระยะห่างระหว่างมอเตอร์ทั้งสอง จะได้ว่า

$$\beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{x_5^2 + y_5^2}}{2l} \right) \quad (12)$$

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_3}{x_3} \right) \quad \text{เมื่อ } x_3 > 0$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi}{2} \quad \text{เมื่อ } x_3 = 0$$

$$\alpha_1 = \pi + \tan^{-1} \left(\frac{y_3}{x_3} \right) \quad \text{เมื่อ } x_3 < 0 \quad (13)$$

กำหนดให้มุม α_1 และ β_1 มีค่าเดียว

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{(x_5 - a_5)^2 + y_5^2}}{2l} \right) \quad (14)$$

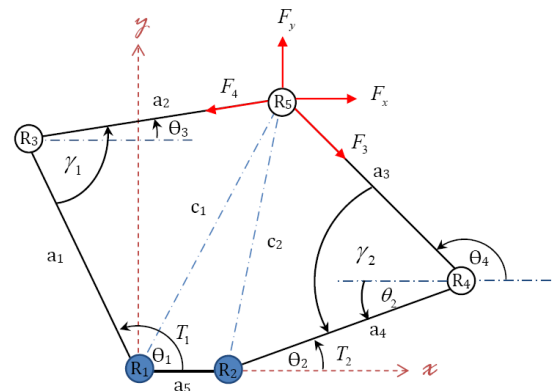
$$\beta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{y_3}{x_3 - a_5} \right) \quad \text{เมื่อ } x_3 > a_5$$

$$\beta_2 = \frac{\pi}{2} \quad \text{เมื่อ } x_3 = a_5$$

$$\beta_2 = \pi + \tan^{-1} \left(\frac{y_3}{x_3 - a_5} \right) \quad \text{เมื่อ } x_3 < a_5 \quad (15)$$

กำหนดให้มุม α_2 และ β_2 มีค่าเดียว

2.3 การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์



รูปที่ 5 แผนภาพมุมใช้ในการวิเคราะห์ทางจลนพลศาสตร์

ทำการวิเคราะห์แรงเพื่อใช้ในการออกแบบทางกล
ชิ้นส่วนบางชิ้น และใช้ในการประกอบการเลือกขนาด
ของมอเตอร์ จากภาพจะได้ว่า

$$\gamma_1 = \pi - \theta_1 + \theta_3 = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + a_2^2 - c_1^2}{2a_1a_2} \right)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\theta_3 = \theta_1 - \pi = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 + a_2^2 - c_1^2}{2a_1a_2} \right) \quad (16)$$

ในทางกลับกันจะได้ว่า

$$\gamma_2 = \pi - \theta_4 + \theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 + a_4^2 - c_2^2}{2a_3a_4} \right)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\theta_4 = \pi + \theta_5 - \cos^{-1} \left(\frac{a_3^2 + a_4^2 - c_2^2}{2a_3a_4} \right) \quad (17)$$

จากสภาพสมดุลตามกฎของนิวตัน

$$\sum F = 0:$$

$$F_x + F_3 \cos(\pi - \theta_4) = F_2 \cos \theta_3$$

$$F_x - F_3 \cos \theta_4 = F_2 \cos \theta_3 \quad (18)$$

$$F_y = F_3 \sin(\pi - \theta_4) + F_2 \sin \theta_3$$

$$= F_3 \sin \theta_2 + F_2 \sin \theta_3 \quad (19)$$

จากสมการที่ (18)

$$F_2 = \frac{F_x - F_3 \cos \theta_4}{\cos \theta_3} \quad (20)$$

นำสมการที่ (20) ไปแทนลงในสมการที่ (18) จะได้

$$F_y = F_3 \sin \theta_2 + \left[\frac{F_x - F_3 \cos \theta_4}{\cos \theta_3} \right] \sin \theta_3$$

$$= F_3 \sin \theta_2 + (F_x - F_3 \cos \theta_4) \tan \theta_3$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$F_3 = \frac{F_y - F_x \tan \theta_3}{\sin \theta_2 - \cos \theta_4 \tan \theta_3} \quad (21)$$

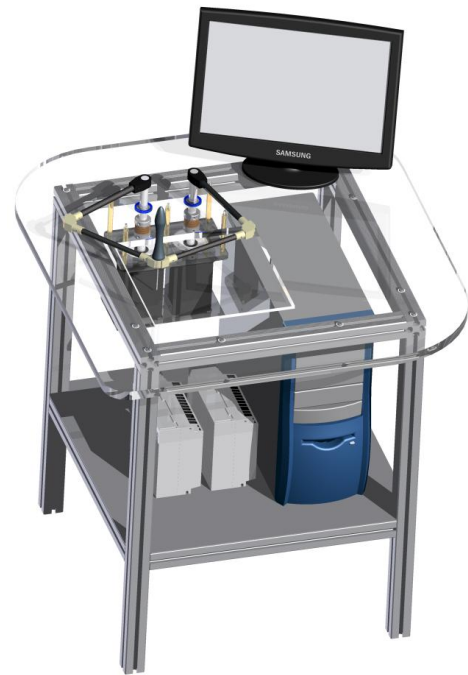
จากรูปที่ 5 จะสามารถหาแรงบิดได้จาก

$$T_1 = F_2 a_1 \sin(\theta_1 - \theta_3) \quad (22)$$

$$T_2 = F_3 a_4 \sin(\theta_4 - \theta_2) \quad (23)$$

3. การจำลองสภาพแวดล้อมเสมือน

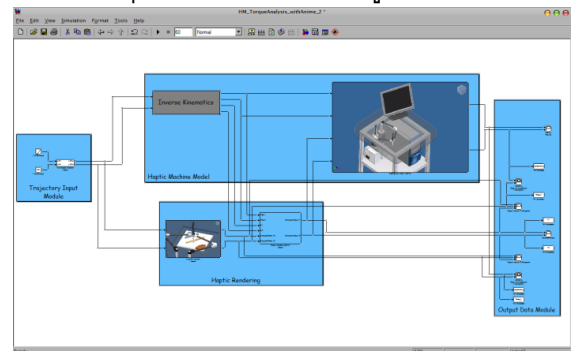
การออกแบบชิ้นต้นอุปกรณ์แอสติกและ
ส่วนประกอบอื่น ๆ ทั้งหมดด้วย CAD จะได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 รูปแสดงอุปกรณ์แอสติกและส่วนประกอบ
ทั้งหมดที่ออกแบบไว้ในชิ้นต้น

3.1 การออกแบบของอุปกรณ์แอสติก

โดยการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์แอสติกด้วย
MATLAB® Simulink®/SimMechanics™ โดยใช้ความ
ยาวลิงค์ทุกลิงค์ตามที่ไดจากการออกแบบไว้เท่ากับ
210 มิลลิเมตรและความยาวลิงค์ a_5 มีค่าเท่ากับ
ระยะห่างของมอเตอร์ทั้งสองซึ่งมีค่าเท่ากับ 100
มิลลิเมตร นอกจากนั้นใช้มุมของข้อต่อที่สามารถกวาด
ได้จริงที่ได้จากการวัดจากข้อต่อจริง ซึ่งมีค่าประมาณ
จากการวัดมุมตั้งแต่ $5^\circ - 173^\circ$ จากนั้นเขียนโปรแกรม
แบบจำลองอุปกรณ์แอสติกได้ตามรูปที่ 8



รูปที่ 8 รูปแสดงแบบจำลองอุปกรณ์แอสติก

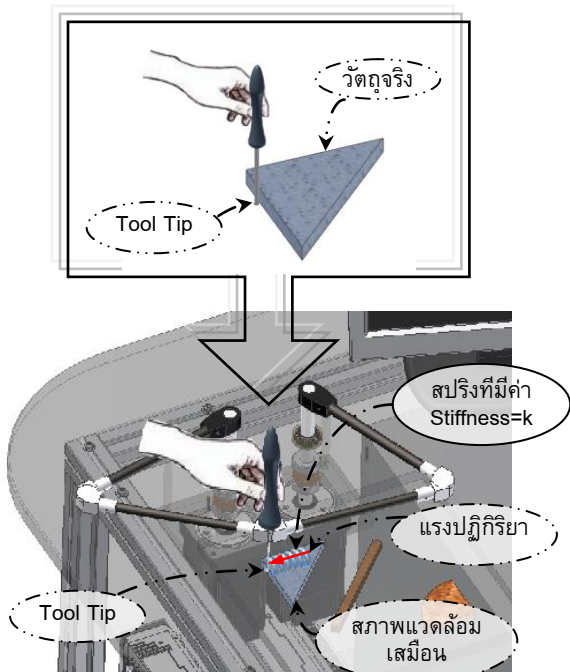
3.2 สภาพแวดล้อมเสมือน

การสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนขึ้นในแบบจำลอง
อุปกรณ์แอสติกเพื่อ เมื่อผู้ใช้งานใช้อุปกรณ์แอสติก

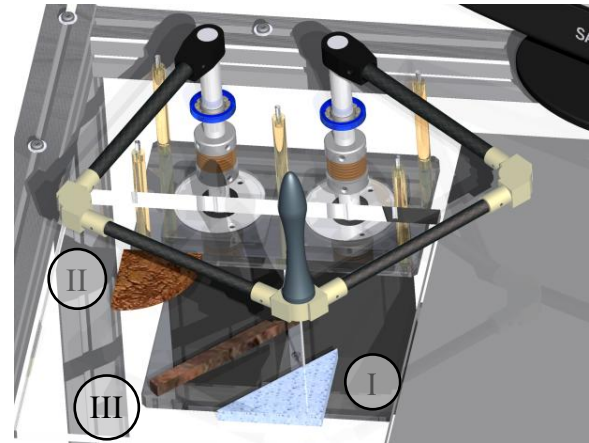
อุปกรณ์สามารถที่จะเกิดปฏิกิริยาโต้ตอบทางการสัมผัสขึ้นราวกับผู้ใช้งานสัมผัสกับสิ่งของนั้นจริง ๆ

โดยในงานวิจัยทำการจำลองการสัมผัสเฉพาะในส่วนของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุเสมือนจริงเท่านั้นตามรูปที่ 9

การจำลองสภาพแวดล้อมเสมือนได้ใช้หลักการของแบบจำลอง mass-spring model ในการจำลองการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัตถุเสมือน (ระยะกระจัดที่เปลี่ยนแปลง) เพื่อหาแรงที่ปฏิกิริยาโต้ตอบซึ่งสปริงเป็นสปริงเชิงเส้นมีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's Law; $\vec{F} = -k\vec{x}$)



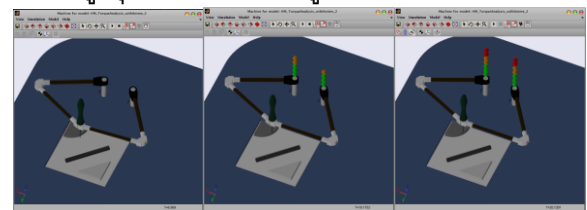
รูปที่ 9 ลักษณะการจำลองสภาพแวดล้อมเสมือน โดยทำการสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนใน 3 ลักษณะคือ และสภาพแวดล้อมเสมือนแรกมีค่า stiffness น้อย ๆ (จำลองให้วัตถุเสมือนมีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยม; บริเวณ I) และมีค่ามาก (จำลองให้วัตถุเสมือนมีรูปร่างเป็นหนึ่งในสี่ของวงกลม; บริเวณ II) และสุดท้ายสภาพแวดล้อมเสมือนที่มีค่า stiffness สูงมาก ๆ จุดประสงค์เพื่อจำลองเป็นกำแพงเสมือน (Virtual Wall) (จำลองให้กำแพงเสมือน มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า; บริเวณ III) โดยตำแหน่งของสภาพแวดล้อมเสมือนทั้งสามอยู่ในพื้นที่ทำงานของอุปกรณ์แอปติกในตำแหน่งตามรูปที่ 10



รูปที่ 10 รูปแสดงชนิด รูปร่างและตำแหน่งของสภาพแวดล้อมเสมือนที่จำลองขึ้นทั้งสาม

4. ผลการจำลอง

การจำลอง trajectory ผ่านสภาพแวดล้อมเสมือนทั้งสามและแสดงผลของแรงปฏิกิริยาโต้ตอบที่ปลาย tool tip ซึ่งในขณะที่ทำการจำลอง แบบจำลองสามารถแสดงช่วงของแรงบิดแบบ real-time และแบบจำลองจะหยุด simulation หากแรงบิดเกิน 7.14 ซึ่งเป็นค่าแรงบิดสูงสุดที่ตั้งแสดงไว้ตามรูปที่ 11



(ก)

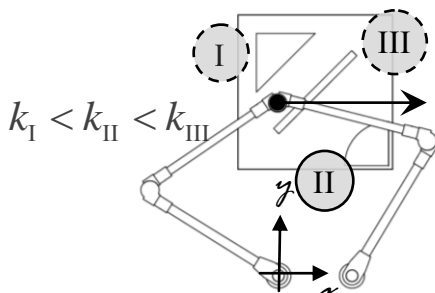
(ข)

(ค)

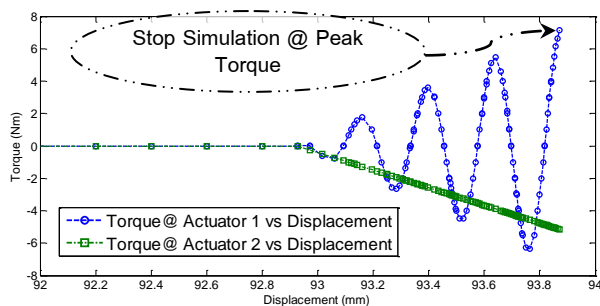
รูปที่ 11 แสดงค่าของแรงบิดแบบ real-time โดยรูป (ก) ยังไม่สัมผัสสภาพแวดล้อมเสมือนและรูป (ค) แสดงแรงบิดที่สูงที่สุดที่มอเตอร์สามารถให้ได้ก่อนหยุด simulation

4.1 ผลการตรวจสอบความเป็นจริงของแรงปฏิกิริยาต่อกำแพงเสมือนจริง (Virtual Wall)

ทดสอบกำหนด trajectory เคลื่อนที่ผ่านวัตถุเสมือนที่เป็นกำแพงเสมือน (Virtual Wall) โดยได้กำหนดค่า k ไว้ที่ 50,000 N/m ได้ผลตามภาพ โดย trajectory เป็นเส้นตรงขนานกับแกน x ที่ y = 300 ตามรูปที่ 12 ซึ่งปลาย tool tip สามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปภายในกำแพงเสมือน ได้ประมาณ 0.94 มิลลิเมตร ก่อนที่แรงบิดที่สูงที่สุดที่มอเตอร์สามารถให้ได้และหยุด simulation ได้ผลของแรงบิดดังรูปที่ 13



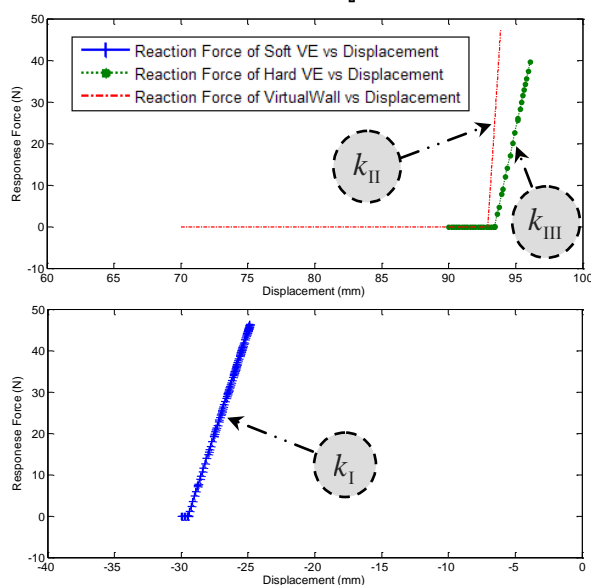
รูปที่ 12 แผนภาพแสดง trajectory ของปลาย tool tip
เมื่อเคลื่อนที่ผ่าน virtual wall



รูปที่ 13 กราฟแสดงแรงบิดเมื่อเคลื่อนที่ tool tip
เมื่อเคลื่อนที่ผ่านแวลลุ่มเสมือน

4.2 เปรียบเทียบค่า stiffness ของแวลลุ่มเสมือน ทั้งสาม

นำแรงปฏิกิริยาที่ได้จากการจำลองผ่าน
สภาพแวลลุ่มเสมือนทั้งสามมาพลอตเทียบกับระยะ
กระจัดเพื่อเปรียบเทียบค่า stiffness ของ
สภาพแวลลุ่มเสมือนทั้งสามกล่าวคือความชันที่ได้จะ
เป็นค่าของ stiffness ได้ผลตามรูปที่ 14



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะกระจัดกับแรง
ตอบสนองต่อแวลลุ่มเสมือน

จากกราฟตามรูปที่ 14 ที่ได้จะพบว่าค่าความชัน
ของกราฟของความสัมพันธ์ในแต่ละสภาพแวลลุ่ม
เสมือนจริงสอดคล้องกับค่า stiffness ที่ทำการจำลอง
ไว้ในแต่ละสภาพแวลลุ่มเสมือนโดยสรุปในตารางที่ 1
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบสภาพแวลลุ่มเสมือนทั้งสาม

บริเวณ		ระยะกระจัด (mm.)
I	$k_1 = 10000 \text{ N/m}$	5.14
II	$k_2 = 20000 \text{ N/m}$	2.66
III	$k_3 = 50000 \text{ N/m}$	0.94

5. สรุปและวิจารณ์

ในงานวิจัยทำการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกชนิดที่
อุปกรณ์ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Device) เป็น
แบบกลไกแบบขนาน Five-Bar Mechanism โดย
สามารถเคลื่อนที่ได้สององศาอิสระในระนาบมีพื้นที่
ทำงานเท่ากับ 20×20 ตารางเซนติเมตร โดยใน
งานวิจัยทำการวิเคราะห์ Forward Kinematics,
Inverse Kinematics และ สร้างแบบจำลอง
จลนพลศาสตร์ของอุปกรณ์แฮปติก โดยที่นำแรงบิด
สูงสุดที่มอเตอร์ที่เลือกใช้ในการออกแบบมารวมไว้ใน
การจำลองเพื่อหยุดการ simulation เมื่อแรงบิดถึง
แรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถให้ได้

แสดงผลการทดสอบแบบจำลองสภาพแวลลุ่ม
เสมือนที่มีความแข็ง (Stiffness) ที่แตกต่างกัน โดยใช้
แบบจำลองสปริงที่มีค่าคงที่สปริงแตกต่างกัน 3 ค่าคือ
10000 N/m, 20000 N/m และ 50000 N/m ซึ่งผลของ
แรงปฏิกิริยาโต้ตอบที่ปลาย tool tip ที่ได้ และการ
เปลี่ยนแปลงรูปร่างของของสภาพแวลลุ่มเสมือน
(ระยะกระจัด) เป็นไปอย่างสอดคล้องกัน โดยในการ
วิจัยอุปกรณ์แฮปติกงานต่อไปจะนำผลการออกแบบ
และจำลองสภาพแวลลุ่มเสมือนและอุปกรณ์ไปสร้าง
ขึ้นงานจริง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์และสมโพธิ โทบรณเฑาะ. (2010). การจำลองและออกแบบอุปกรณ์แปดทิศทางองศาอิสระชนิดห้าลิงค์แบบขนาน, การประชุมวิชาการวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีระดับชาติครั้งที่ 3, 25-26 สิงหาคม 2553, หน้า 200 – 207.
- [2] Emrah Deniz, (2006), “*Design of Haptic Device for Micro Parts Handling*”
- [3] Ralph Hollis, (2004) “*Haptics*”, Berkshire Encyclopedia of Human-Computer Interaction
- [4] Smith C., (January, 2001) , “*Human Factors in Haptic Interfaces,*” *ACM Crossroads Student Magazine*
- [5] Mandayam A Srinivasan, *What is Haptics?*, URL: <http://touchlab.mit.edu/>
- [6] Wikimedia Foundation, Inc., URL:<http://en.wikipedia.org/wiki/DualShock>
- [7] Seungmoon Choi, (2007), “*Introduction to Haptics Spring*”, Department of Computer Science and Engineering POSTECH
- [8] V. Hayward, O. R. Astley, M. Cruz-Hernandez, D. Grant, and G. Robles-De-La-Torre, 2004, Haptic interfaces and devices. *Sensor Review*, 24(1);, pages16–29
- [9] R. L. Klatzky and S. J. Lederman. Touch. In A. F. Healy and R. W. Proctor, (2003), *Handbook of Psychology*, volume 4: Experimental Psychology, chapter 6, pages 147–176. John Wiley and Sons
- [10] V. Hayward and K. E. MacLean., (2007), Do it yourself haptics: Part I. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pages 88–104
- [11] Intuitive Surgical, Inc. URL:<http://www.intuitivesurgical.com/products/faq/index.aspx> , access on 30/06/2010.
- [12] SensAble Technologies, Inc. URL:<http://www.sensable.com/documents/documents/SensAbleDentalLabFlyer.pdf> ,access on 30/06/2010.
- [13] S. James Biggs and Srinivasan, M A (2002), *Haptic Interfaces, Virtual Environment Handbook*, Ed: KM Stanney, Lawrence Erlbaum Associates, Ch. 5, pp. 93-116