

การจำลองและออกแบบอุปกรณ์แฮปติกสององศาอิสระชนิดห้าลิงค์แบบขนานด้วย Simulink®/SimMechanics™

ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์¹ และ สมโพธิ โดบรแดง²

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการนำเสนอการออกแบบอุปกรณ์แฮปติก (อุปกรณ์ที่สามารถรองรับปฏิกิริยาโต้ตอบทางการสัมผัสระหว่างผู้ใช้งานกับการจำลองเสมือนจริง) ซึ่งอุปกรณ์ที่ออกแบบนี้เป็นชนิดกลไกขนานแบบ Five-Bar Linkage Mechanism มีการเคลื่อนที่ในระนาบสองมิติและพื้นที่ทำงานเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 200×200 ตารางมิลลิเมตร โดยแนะนำซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์กลไกทางกลศาสตร์ ในงานวิจัยได้แสดงผลการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของอุปกรณ์ทั้ง Forward Kinematics และ Inverse Kinematics โดยใช้ซอฟต์แวร์ Simulink®/SimMechanics™ ในการจำลองพลศาสตร์ของแบบจำลอง เพื่อความแม่นยำ มีประสิทธิภาพและสามารถวิเคราะห์ระบบได้ด้วยภาพเคลื่อนไหวผ่านการแสดงผลทางจอคอมพิวเตอร์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์แฮปติกที่ออกแบบสามารถทำงานในพื้นที่ที่ออกแบบได้

คำสำคัญ: อุปกรณ์แฮปติก การวิเคราะห์ Forward Kinematics และ Inverse Kinematics กลไก Five-Bar Parallel Mechanism

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

² นิสิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0-2940-5822 Email: taweedej@yahoo.com



Design and Simulation of 2 DOFs Five-Bars Parallel Link Haptic Interface System with Simulink[®]/SimMechanics[™]

Taweedej Sirithanapipat^{1*} and Somphot Tobanleng²

Abstract

This paper presents the design of the haptic device (a device that can give a sense of touch to the user via a computer simulation: virtual object) . The design of this haptic device is a parallel five-bar linkage mechanism. The work space of the device is in plane of a square 200 × 200 square millimeters. An Introduction to Simulink[®]/SimMechanics[™] is briefly discussed. The software is very powerful for mechanism analysis. The kinematic of this mechanism both forward kinematic and inverse kinematic is analyzed by using Simulink[®]/SimMechanics[™] with the visualization for a clearer and more effective analysis. The results obtained from the analysis and simulation show that the design of the parallel five-bar linkage haptic device comply with the initial design.

Keyword: Haptic Interface, Forward Kinematics, Inverse Kinematics, Five-bar Mechanism

^{1*} Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

² Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

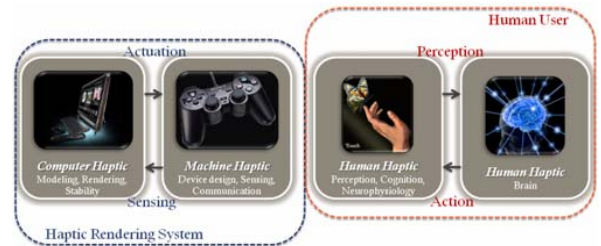
* Corresponding Author Tel.0-2940-5822, Email: taweedej@yahoo.com

1. บทนำ

ปัจจุบันการสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ที่ ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายนั้นมีเพียงสองช่องทางคือการ มองเห็นและการได้ยินผ่าน Graphic Display และ Auditory Display ซึ่งจากประสาทสัมผัสพื้นฐานของมนุษย์ที่ ประกอบด้วยห้าอย่างด้วยกันอันได้แก่ การมองเห็น การได้ ยิน การรับรู้รส การได้กลิ่นและการสัมผัส ดังนั้นหาก พิจารณาจากข้อมูลและช่องทางการสื่อสารที่ผู้ใช้งานและ คอมพิวเตอร์สื่อสารกันนั้นจึงมีข้อจำกัดและดูเหมือนว่า ประสาทสัมผัสถัดไปที่คอมพิวเตอร์ควรจะรองรับปฏิกิริยา ได้ตอบกับมนุษย์ได้คือการสัมผัส เนื่องจากความต้องการ ในการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ทางการสัมผัสมีความจำ เป็นมากขึ้น ดังนั้น อุปกรณ์แฮปติกจึงเข้ามามีบทบาทใน การเพิ่มช่องทางการสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานกับ คอมพิวเตอร์ ปัจจุบันมีการนำเอาสภาพแวดล้อมเสมือน จริง (Virtual Environment) และปฏิกิริยาโต้ตอบระหว่าง มนุษย์กับคอมพิวเตอร์ทางการสัมผัสมาประยุกต์ใช้ใน หลากหลายสายงานด้วยกันและเริ่มเข้ามามีบทบาทกับ ชีวิตประจำวันเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ผ่านอุปกรณ์ที่ถูก เรียกว่า “อุปกรณ์แฮปติก” (Haptic Device/ Haptic Display/ Haptic Interface) โดยเริ่มจากอุปกรณ์ที่มีความ ซับซ้อนไม่มาก และมีราคาที่ไม่สูงนัก เช่น DualShock Analog Controller ของ PlayStation [6] ในแบบใหม่ ๆ ไป จนถึงงานที่ต้องการอุปกรณ์แฮปติกที่มีความละเอียด แม่นยำและความปลอดภัยสูงๆ เช่นการผ่าตัดทางไกลผ่าน เครื่องมือผ่าตัดทางไกล The da Vinci[®] Surgical System [11] ซึ่งก็เป็นอุปกรณ์แฮปติกด้วยเช่นกัน

ดังนั้นอุปกรณ์แฮปติกจึงเป็นอุปกรณ์ User Interface ที่ทำการติดต่อระหว่างผู้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ให้เกิดการ สื่อสารทางการสัมผัสระหว่างกันที่สมมาตรและเกิดการ รับส่งข้อมูลระหว่างกันเป็นไปในสองทิศทางเสมอดังรูปที่ 1 และระบบปฏิสัมพันธ์ทางการสัมผัสระหว่างคอมพิวเตอร์ กับผู้ใช้งาน หลัก ๆ จะประกอบไปด้วยในส่วนของ ความรู้สึกสัมผัสของมนุษย์ (Human Haptic) ซึ่งเกี่ยวข้อง กับการรับรู้และการจับต้องของผู้ใช้งานผ่านทางสัมผัส และในส่วนของสองคือใน ส่วน Haptic Machine นั่นก็คือ อุปกรณ์แฮปติกนั่นเอง ในส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับการ ออกแบบ การสร้าง และการใช้งานอุปกรณ์แฮปติก และใน

ส่วนสุดท้ายก็คือคอมพิวเตอร์แฮปติกซึ่งจะเกี่ยวข้องกับ การลำดับขั้นตอน อัลกอริทึม และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง กับการสร้างและการจำลองการสัมผัสและการรับรู้สึกต่อ วัตถุเสมือนจริง[5]



รูปที่ 1: แผนภาพแสดงองค์ประกอบและความสัมพันธ์ ระหว่างส่วนประกอบของแฮปติก

การแยกประเภทของอุปกรณ์แฮปติกนั้นมีหลายวิธี แต่ที่นิยมมี 3 วิธี [7] คือ

1.1 ประเภทที่หนึ่งแบ่งตามโครงสร้างในการกราวด์ทาง กล (Mechanical Grounding Configuration)[13] ซึ่ง สามารถแบ่งอุปกรณ์แฮปติกออกได้ 3 ประเภท โดยที่ ประเภทแรกเป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่กับที่ (Grounded Device) เป็นประเภทหนึ่งที่ตั้งอยู่นิ่ง ๆ บนโต๊ะ พื้นหรือวัตถุที่หนึ่ง อยู่กับที่ โดยทั่วไปโครงสร้างของอุปกรณ์ แฮปติก ประเภทนี้จะเป็นแบบลึงค์กลก็อกกับข้อต่อแบบเลื่อนและ หรือข้อต่อแบบหมุน ดังนั้นอุปกรณ์ประเภทนี้จะมีแอกชูเอ เตอร์หรือเบรกเพื่อคอยกำเนิดแรงบิดหรือแรงระหว่าง ผู้ใช้งานและส่วนที่ติดอยู่กับกราวด์ ตัวอย่างของอุปกรณ์ ประเภทนี้ได้แก่ The PHANTOM[®] Omni[™] Device ของ บริษัท SensAble Technology[8]

1.2 ประเภทที่สองคือ อุปกรณ์แฮปติกซึ่งเป็นระบบ กราวด์ติดอยู่กับที่เคลื่อนที่ได้ (Body Ground System) ซึ่ง อุปกรณ์จะยึดติดกับส่วนของร่างกายของผู้ใช้งานมากกว่า วัตถุที่ไม่เคลื่อนที่ อุปกรณ์ชนิดนี้จะใช้ส่วนที่ติดอยู่กับ ร่างกายหรือส่วนของร่างกายทำหน้าที่เป็นจุดของการจัดใช้ สำหรับเกิดแรงหรือแรงบิดที่เท่ากับและมีทิศทางตรงกัน ข้ามกับอีกส่วนหนึ่งที่สวมใส่ร่างกายหรือส่วนของร่างกาย อยู่ ตัวอย่างของอุปกรณ์แฮปติกประเภทนี้ได้แก่ The CyberGlove[®] II System ซึ่งเป็นของ Immersion Technologies แรงจะกระทำต่อนิ้วมือของผู้ใช้งานซึ่งถูก

กราวด์กับท่อนแขนซึ่งประสาทสัมผัสของนิ้วไวต่อการรับรู้สัมผัสมากกว่าท่อนแขน[9]

1.3 ประเภทที่สามเป็นแบบอุปกรณ์ที่ไม่ติดอยู่กับที่เคลื่อนที่ได้ (Mechanically Ungrounded Device) มักจะใช้โมเมนตัมเชิงมุมหรือโมเมนตัมเชิงเส้นเพื่อที่จะสร้างกราวด์ในตอนเริ่มต้น (Initial Ground) ตัวอย่างของอุปกรณ์ชนิดนี้ที่พบอย่างแพร่หลายได้แก่ ไทรศัพทที่มีมือถือหรือคอนโทรลเลอร์ของวิดีโอเกมสมัยใหม่[10]

ในปัจจุบันมีการนำอุปกรณ์แฮปติกไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น ในสายงาน Computer Augmented Design (CAD) นักออกแบบเครื่องยนต์ สามารถที่จะนำชิ้นส่วนเครื่องยนต์ที่ออกแบบมาทดสอบการประกอบเข้ากันก่อนการผลิตจริงได้ อุปกรณ์แฮปติกสามารถนำไปใช้ในการศึกษาหรือฝึกฝนความเชี่ยวชาญทางการแพทย์ได้ เช่น The da Vinci[®] Surgical System ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของระบบการผ่าตัดสมัยใหม่จากการพัฒนาโดยบริษัท Intuitive Surgical โดยใช้อุปกรณ์แฮปติกเป็นเครื่องมือในการสร้างหรือถ่ายทอดความรู้สึกสัมผัสกับอวัยวะเสมือนจริงหรือส่วนของร่างกายเสมือนจริง (เช่นเนื้อเยื่อจำลองหรือกล้ามเนื้อจำลอง) ที่ถูกสร้างหรือจำลองขึ้นที่เวลาจริง โดยการรับรองจาก US Food and Drug Administration (FDA)[11] และอีกตัวอย่างของการนำอุปกรณ์แฮปติกที่นำไปใช้ เช่นในระบบที่ใช้ในงานทางทันตกรรม เช่น The SensAble[™] Dental Lab[™] System ซึ่งเป็นระบบที่อำนวยความสะดวกสำหรับงานทางทันตกรรมในการสแกนออกแบบ และแสดงข้อมูลที่ได้ออกจคอมพิวเตอร์ที่เป็น 3 มิติ สำหรับการทำให้โครงเหล็ก ฟันปลอมและที่ยึดฟันปลอมโดยรวมเอาระบบแฮปติกเข้าไว้ด้วยกันกับระบบการจำลองในรูปแบบดิจิทัล 3 มิติ โดยใช้ PHANTOM[™] Desktop[™] Device[12] นอกจากนี้อุปกรณ์แฮปติกยังสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมด้วยมือสำหรับยานพาหนะเสมือนจริง เช่นในการจำลองการบิน (Flight Simulator) มือของผู้ใช้จะรู้สึกถึงแรงที่เกิดจากอากาศพลศาสตร์และการสั่นสะเทือน

ในงานวิจัยมีจุดประสงค์เพื่อทำแบบจำลอง (Model) และทำการจำลอง (Simulation) ระบบทางกลของอุปกรณ์แฮปติกที่ทำการออกแบบด้วย MATLAB Simulink[®] และ Simulink[®]/SimMechanic[™] เพื่อศึกษาพฤติกรรมทาง

กายภาพของอุปกรณ์ (Physical Behaviors) เช่นเพื่อตรวจสอบ Forward Kinematic, Inverse Kinematic และเพื่อตรวจสอบ Singularity ของกลไกและเพื่อตรวจสอบข้อผิดพลาดต่าง ๆ ซึ่งช่วยลดปัญหาในการสร้างและควบคุมอุปกรณ์ต้นแบบรวมถึงช่วยในการออกแบบและพัฒนาแบบของอุปกรณ์ ช่วยลดต้นทุนในการพัฒนาอุปกรณ์รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่ทำการออกแบบและนำไปปรับแก้แบบก่อนสร้างเป็นอุปกรณ์แฮปติกต้นแบบขึ้นจริง

โดยออกแบบให้อุปกรณ์แฮปติกที่สามารถรองรับให้ผู้ใช้งานโดยใช้นิ้วมือสัมผัสผ่าน Stylus ของอุปกรณ์เพื่อรับปฏิกริยาโต้ตอบทางการสัมผัสกับอุปกรณ์แฮปติก โดยออกแบบให้เป็นอุปกรณ์แฮปติกชนิดที่ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Device) มีพื้นที่ทำงานในระนาบสองมิติรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาดเท่ากับ 200×200 ตารางมิลลิเมตร และสามารถรองรับแรงปฏิกริยาโต้ตอบที่ 7 N และสูงที่สุดอยู่ที่ 30 N โดยอุปกรณ์มีชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ให้มีมวลความเฉื่อยและความเสียดทานน้อยที่สุด [3]

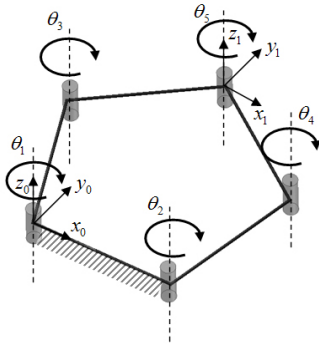
2. การออกแบบอุปกรณ์แฮปติก

ในงานวิจัยนี้เลือกออกแบบกลไกของอุปกรณ์แฮปติกให้เป็นลักษณะลิงค์ที่ต่อกันแบบขนานเป็น Five-Bar Parallel Link อันประกอบด้วยข้อต่อหมุนทั้งห้าอันเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่มีผลตอบสนองต่อแรงที่ดีและมีชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ (Moving Mass) ไม่มากนัก โดยที่ข้อต่อสองข้อต่อ (θ_1 และ θ_2) ที่ติดอยู่กับกราวด์ลิงค์จะติดมอเตอร์ขับไว้ ซึ่งสามารถวัดตำแหน่งของข้อต่อและสามารถสร้างแรงบิดขับเคลื่อนข้อต่อทั้งสองนี้ได้

โดยผู้ใช้สามารถเคลื่อนปลาย Manipulator (ตำแหน่งที่ติดกับ θ_5) ในระนาบสองมิติภายในพื้นที่ทำงาน ในขณะที่เดียวกันผู้ใช้อย่างสามารถใช้แรงที่มีขนาดและทิศทางใดๆ ที่กระทำที่ปลาย Manipulator เดียวกันนั้นได้ และการออกแบบทางกลอื่นๆ ของอุปกรณ์แฮปติกซึ่งจำเป็นต้องวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์เพื่อหาสมการ Forward Kinematics และ Inverse Kinematics ของกลไกของอุปกรณ์ก่อนและพิสูจน์สมการที่ได้

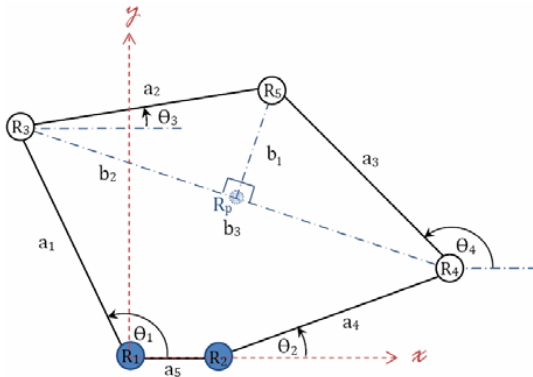
จากนั้นจึงทำการออกแบบและสร้างข้อต่อเพื่อนำข้อมูลการกระจัดเชิงมุมที่ข้อต่อจริงสามารถกวาดได้จริงเฉลี่ย

เพื่อไปใช้ในการสร้างแบบจำลองและทำการพิสูจน์เพื่อยืนยันว่าแบบจำลองเป็นจริงและนำไปใช้ในการหาขอบเขตของพื้นที่ทำงานต่อไป



รูปที่ 2: แผนภาพแสดงลักษณะทางโครงสร้างที่ออกแบบ

2.1 การวิเคราะห์ Forward Kinematics



รูปที่ 3: แผนภาพแสดงตำแหน่งและมุม

เมื่อทำการวิเคราะห์ Forward Kinematics จะได้ตำแหน่งของปลาย Manipulator (ในแผนภาพเป็น R_3) โดยที่เป็นฟังก์ชันของมุมทั้งสองของข้อต่อที่จะทำการติดแอกซูเอเตอร์ซึ่งจะได้ตำแหน่ง $R_3(x_3, y_3)$

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

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

จากการกำหนดให้จุดกำเนิดอยู่ที่ข้อต่อที่หนึ่งและตำแหน่งของข้อต่อและขนาดของลิงค์ต่างๆ เป็นไปตามรูปที่ 3 และ สร้างรูปสามเหลี่ยมมุมฉากจากการฉายตำแหน่ง R_5 (ในแผนภาพเป็น b_1) ลงบนเส้นที่ลาก

เชื่อมต่อระหว่าง R_3 และ R_4 (ตามรูปที่ 3 คือ b_3) จากแผนภาพจะได้

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

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

หา b_2 จาก $\Delta R_3R_5R_p$ และ $\Delta R_4R_5R_p$ จะได้ความสัมพันธ์

$$a_2^2 = b_1^2 + b_2^2 \quad \text{และ} \quad a_3^2 = b_1^2 + (b_3 - b_2)^2$$

จะได้

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

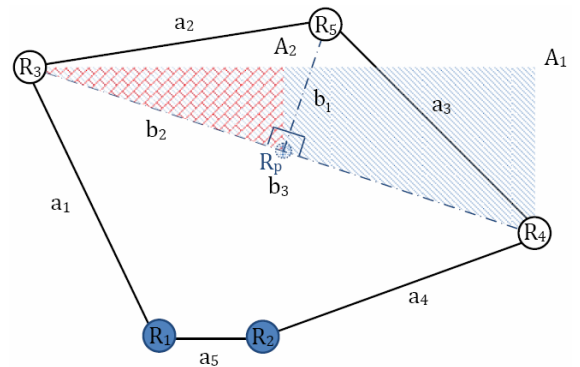
ซึ่งขนาดของ b_3 มีค่าเท่ากับ

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

และหาค่า b_1

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

หา $R_p(x_p, y_p)$ จากสามเหลี่ยมคล้าย $\Delta R_3A_2R_p$ กับ $\Delta R_3A_1R_4$ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4: แผนภาพแสดงสามเหลี่ยมคล้าย $\Delta R_3A_2R_5$ กับ $\Delta R_3A_1R_4$

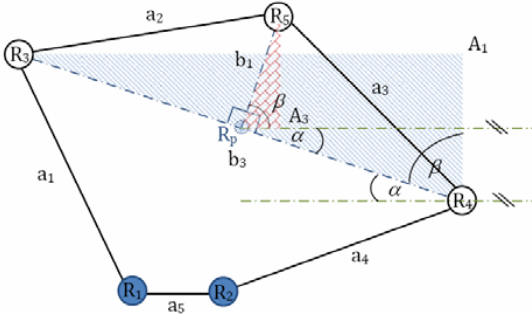
จากสัดส่วนด้านตามเรขาคณิตจะได้ความสัมพันธ์เป็น

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

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

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

หา $R_5(x_5, y_5)$ จากสามเหลี่ยมคล้าย $\Delta R_5A_3R_p$ กับ $\Delta R_3A_1R_4$ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5: แผนภาพแสดงสามเหลี่ยมคล้าย $\Delta R_5A_2R_p$ กับ $\Delta R_3A_1R_4$

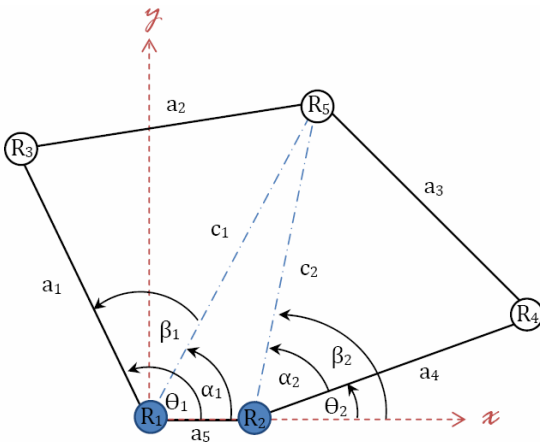
จากสัดส่วนด้านตามเรขาคณิตจะได้ความสัมพันธ์เป็น

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

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

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

2.2 การวิเคราะห์ Inverse Kinematics



รูปที่ 6: 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 6 จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างมุมต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

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

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

สมมุติฐานในการออกแบบ กำหนดให้ความยาวลิ้งค์ทั้งห้ามีขนาดเท่ากัน ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ l ดังนั้นจะได้ว่า $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = l$ และให้ a_5 เป็นระยะห่างระหว่างมอเตอร์ทั้งสอง ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จึงสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

หา β_1 จาก Cosine's Law

$$a_2^2 = a_1^2 + c_1^2 - 2a_1c_1 \cos \beta_1$$

จะได้ว่า

$$\beta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{a_1^2 - a_2^2 + c_1^2}{2a_1c_1} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{c_1}{2l} \right) \quad (12)$$

$$c_1 = \sqrt{x_5^2 + y_5^2}$$

แทนค่า c_1 ในสมการที่ (12) จะได้

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

หา α_1 จาก

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

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

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

กำหนดให้มุม α_1 และ β_1 มีค่าเดียว

หา α_2 จาก Cosine's Law

$$a_3^2 = a_4^2 + c_2^2 - 2a_4c_2 \cos \alpha_2$$

จะได้ว่า

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{a_4^2 - a_3^2 + c_2^2}{2a_4c_2} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{c_2}{2l} \right) \quad (14)$$

$$c_2 = \sqrt{(x_5 - a_5)^2 + y_5^2}$$

แทนค่า c_2 ในสมการที่ (14) จะได้

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

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

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

กำหนดให้มุม α_1 และ β_1 มีค่าเดียว

3. การจำลองอุปกรณ์แฮปติก

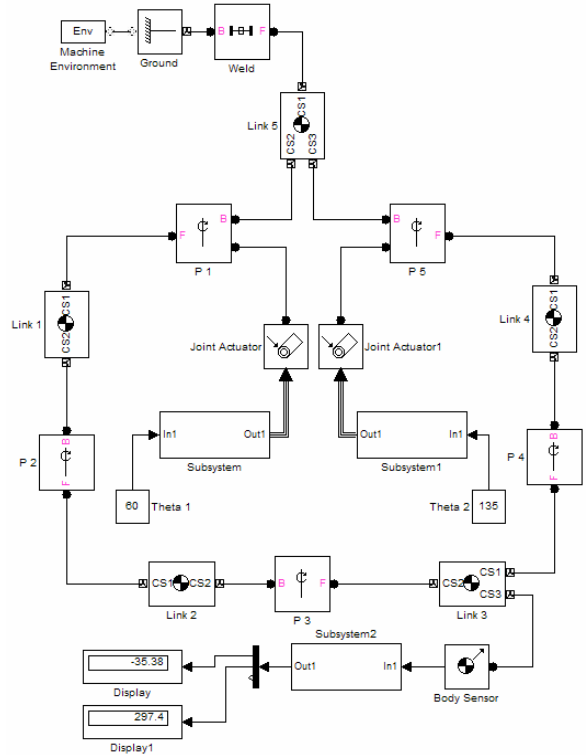
การจำลองระบบทางกลของอุปกรณ์แฮปติกในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบข้อผิดพลาดเพื่อลดปัญหาในการสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ และช่วยในการออกแบบและพัฒนาแบบของอุปกรณ์เพื่อลดต้นทุนในการพัฒนาอุปกรณ์รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ โดยในงานวิจัยเลือกใช้ซอฟต์แวร์ Simulink®/SimMechanics™ เนื่องจากมีความสามารถทั้งในการจำลองระบบทางกล จำลองการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์และวิเคราะห์ผลที่ได้โดยตรงโดยไม่ต้องหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุปกรณ์ที่ทำการจำลอง

3.1 ออกแบบความยาวและวัสดุของก้านอุปกรณ์แฮปติก

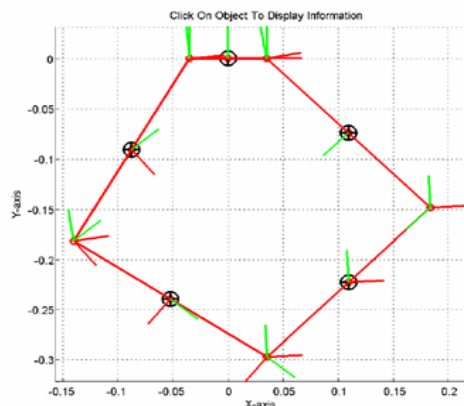
หลังการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์แล้ว ต่อไปจึงทำการออกแบบความยาวของลิงค์ทั้งสี่ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Simulink®/SimMechanics™ จำลองแขน ข้อต่อและกลไกการเคลื่อนที่อื่นๆ เพื่อให้อุปกรณ์แฮปติกสามารถเคลื่อนที่ได้ครอบคลุมพื้นที่ทำงานตามข้อกำหนดในการออกแบบ ซึ่งมีพื้นที่ทำงานสี่เหลี่ยมจัตุรัสเท่ากับ 200×200 ตารางมิลลิเมตรและหลังจากการจำลองสามารถออกแบบให้ลิงค์มีความยาวเท่ากับ 210 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถทำให้ใช้งานได้ครอบคลุมพื้นที่ทำงานตามข้อกำหนดในการออกแบบและเหมาะสมกับขนาดของอุปกรณ์ โดยแบบจำลองที่ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 7 พร้อมด้วยแผนภาพแสดงตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของข้อต่อและก้านของกลไกดังรูปที่ 8

จากนั้นเลือกวัสดุเพื่อใช้เป็นลิงค์ของอุปกรณ์แฮปติก เนื่องจากลิงค์เป็นชิ้นส่วนหนึ่งที่อยู่ในส่วนที่มีการเคลื่อนที่ (Moving Mass) ดังนั้นจึงควรออกแบบให้มีมวลน้อยที่สุดเพื่อลดความเฉื่อยและโมเมนต์ความเฉื่อย โดยเลือกใช้แกนเป็นรูปทรงกระบอกที่เป็นคาร์บอน

แกรไฟต์มาทำเป็นแขนของอุปกรณ์ เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและสามารถรับความเค้นได้ดี



รูปที่ 7: แบบจำลอง Five-Bars Parallel Link ที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการออกแบบความยาวลิงค์



รูปที่ 8: แผนภาพแสดงตำแหน่งและการเคลื่อนที่ของข้อต่อและก้านของกลไกของแบบจำลอง

3.2 ออกแบบและสร้างข้อต่อของอุปกรณ์

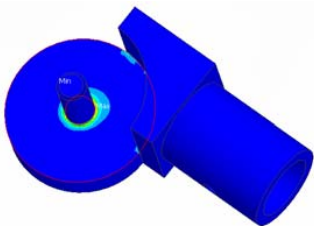
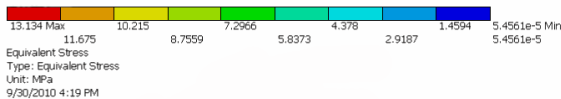
แฮปติก

ก่อนทำการสร้างแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติก ในการจำลองพลศาสตร์ของแบบจำลองในสามมิติ เราจำเป็นต้องหาข้อจำกัดที่ใช้ในการจำลองเพื่อให้แบบจำลองเสมือนจริงมากที่สุดซึ่งหนึ่งในข้อจำกัดที่สำคัญคือความสามารถในการเคลื่อนที่เชิงมุมของข้อต่อจริง ดังนั้นเราจึงทำการออกแบบและสร้างข้อต่อจริงขึ้น

ในการออกแบบข้อต่อนั้นเราทำการออกแบบข้อต่อโดยใช้ซอฟต์แวร์ CAD ทั่วไปโดยวัสดุที่ใช้เป็น Polyethylene ซึ่งเป็นพลาสติกซึ่งเป็นวัสดุที่เบาและมีสมบัติทางกลที่ดี สมบัติที่ความเสียหายระหว่างกันต่ำ ง่ายแก่การขึ้นรูปซึ่งเหมาะสำหรับนำมาขึ้นรูปเป็นข้อต่อ ซึ่งแบบของข้อต่อหลังการออกแบบแสดงไว้ตามรูปที่ 10 จากนั้นทำการวิเคราะห์ความเค้นด้วยวิธี Finite Element Analysis ด้วยโปรแกรม ANSYS ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 1 และรูปที่ 9 ซึ่งจะพบว่า Maximum Stress ที่เกิดขึ้นประมาณ 13.13 MPa แต่ Yield Tensile Strength ของ Polyethylene มีค่าสูงถึง 770 MPa ดังนั้นแสดงว่าวัสดุสามารถรับ Maximum Stress ที่เกิดขึ้นได้

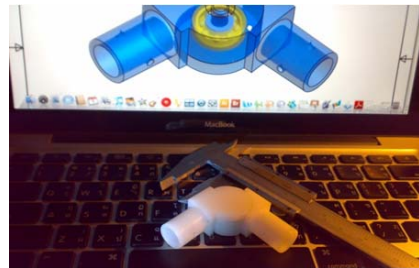
ตารางที่ 1: ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความเค้น

| Name | Minimum | Maximum |
|-------------------|----------------|-----------|
| Equivalent Stress | 5.456e-005 MPa | 13.13 MPa |
| Deformation | 0.0 mm | 0.3904 mm |
| Safety Factor | 1.523 | N/A |

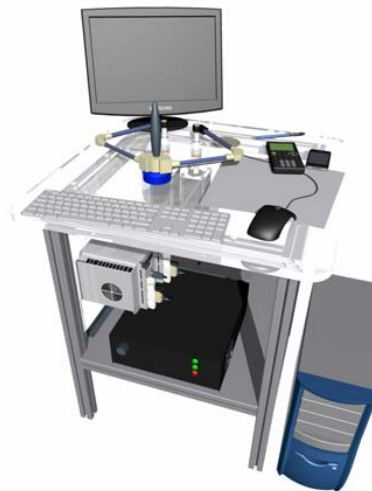


รูปที่ 9: ภาพแบบจำลองความเค้นของข้อต่อด้วยวิธี Finite Element Analysis

หลังจากที่ทำการออกแบบและวิเคราะห์ Stress Analysis แล้วก็ทำการกลึงขึ้นรูปข้อต่อต้นแบบ ซึ่งใส่ตลับลูกปืน Deep Groove Ball Bearing ของ SKFTM รุ่น 625-2Z ได้ข้อต่อจริงต้นแบบที่สามารถกวาดท่ามุม 175 องศาตั้งรูปที่ 10 และทำการออกแบบชิ้นส่วนประกอบอื่นๆ ได้แบบของอุปกรณ์ตามรูปที่ 11 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าแบบสมบูรณ์ที่ทำการออกแบบนั้นประกอบไปด้วย Haptic Machine ที่มีแขนทั้งสิ้น ข้อต่อที่ทำการออกแบบ Stylus สำหรับผู้ใช้งาน มอเตอร์และชุดขับ 2 ชุดและคอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะสำหรับควบคุมอุปกรณ์และทำ Computer Haptic



รูปที่ 10: ภาพแสดงแบบข้อต่อและข้อต่อต้นแบบที่ได้

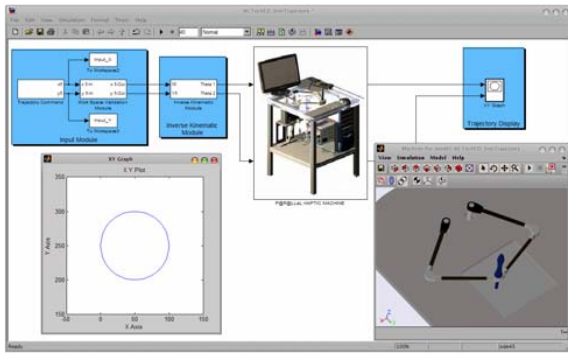


รูปที่ 11: ภาพอุปกรณ์และส่วนประกอบทั้งหมด

3.3 สร้างแบบจำลองของอุปกรณ์แฮปติก

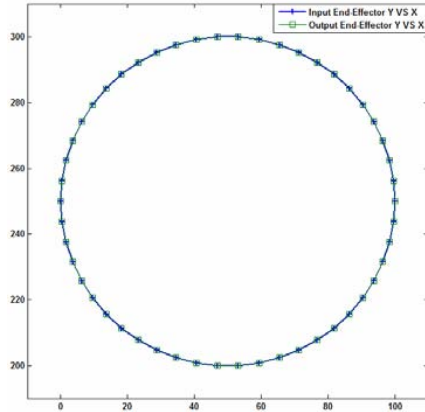
สร้างแบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกใน Block Environment ของ Simulink[®]/SimMechanicsTM นอกจากนี้เรานำข้อจำกัดของอุปกรณ์ที่ได้มาจำลองลงในแบบจำลองอุปกรณ์ด้วย Simulink[®]/SimMechanicsTM

โดยใช้ความยาวลิ้งค์ทุกลิ้งค์ตามที่ได้จากการออกแบบไว้เท่ากับ 210 มิลลิเมตรและความยาวลิ้งค์ a_5 มีค่าเท่ากับระยะห่างของมอเตอร์ทั้งสองซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิเมตร นอกจากนี้ใช้มุมของข้อต่อที่สามารถกวาดได้จริงที่ได้จากการวัดจากข้อต่อจริง ซึ่งมีค่าประมาณจากการวัดมุมตั้งแต่ $5^\circ - 173^\circ$ รวมถึงเขียนสมการ Inverse Kinematics ที่ได้จากการวิเคราะห์ลงในแบบจำลองด้วย



รูปที่ 12: แบบจำลองอุปกรณ์แอสติกขณะจำลอง

ทำการพลอตเส้นทางที่อุปกรณ์เคลื่อนที่ได้จริงเทียบกับคำสั่งที่อินพุตเข้าไปได้ผลตามรูปที่ 13 ซึ่งเส้นที่มีเครื่องหมายขีดเป็นเส้นทางการเดินที่อินพุตเข้าไปและเส้นที่มีเครื่องหมายสี่เหลี่ยมจัตุรัสเป็นเส้นทางที่อุปกรณ์เคลื่อนที่ได้จริงซึ่งทับกันสนิทพอดี

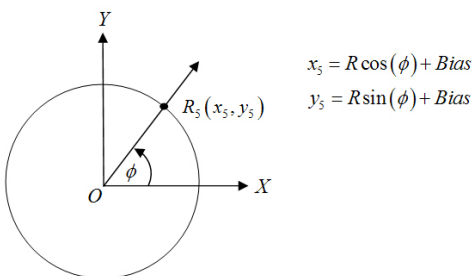


รูปที่ 14: ภาพแสดงกราฟเส้นทางของปลาย manipulator เมื่อเทียบกับเส้นทางที่โปรแกรม

4. ผลการจำลอง

4.1 ผลการตรวจสอบความเป็นจริงของตำแหน่งของแบบจำลอง (Model Verification)

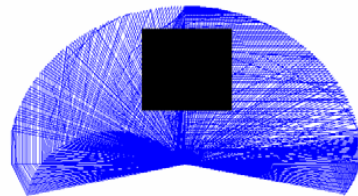
ทำการตรวจสอบความเป็นจริงของแบบจำลองของอุปกรณ์แอสติกโดยโปรแกรมให้ปลาย manipulator ของแบบจำลองอุปกรณ์ $R_5(x_5, y_5)$ เดินทางเป็นวงกลมรัศมีขนาด 50 เซนติเมตรโดย bias เพื่อให้จุดศูนย์กลางวงกลมไปอยู่ในตำแหน่ง (50,250) เพื่อหลีกเลี่ยงเส้นทางที่จะออกนอกพื้นที่ทำงาน ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13: ภาพแสดงทางเดินของวงกลมรัศมี 50 เซนติเมตร

4.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแบบจำลองเพื่อตรวจสอบ Workspace Limitation

ใช้แบบจำลองทำการจำลองเส้นทางการเคลื่อนที่ของแบบจำลองที่มากที่สุดที่สามารถเคลื่อนที่ไปถึงได้เพื่อใช้ในการหาพื้นที่ Workspace Limitation ของอุปกรณ์ แอสติกที่ทำการออกแบบ ได้ดังรูปที่ 14 ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ทำงานที่เป็นข้อกำหนดในการออกแบบได้



รูปที่ 15: ภาพแสดง Workspace Limitation และพื้นที่ใช้งานจริงที่ได้จากการจำลอง

5. สรุปและวิจารณ์

ในงานวิจัยทำการออกแบบอุปกรณ์แฮปติกชนิดที่อุปกรณ์ติดอยู่กับกราวด์ (Grounded Device) เป็นแบบกลไกแบบขนาน Five-Bar Mechanism โดยสามารถเคลื่อนที่ได้สององศาอิสระในระนาบมีพื้นที่ทำงานเท่ากับ 200×200 ตารางมิลลิเมตร โดยในงานวิจัยทำการวิเคราะห์ Forward Kinematics, Inverse Kinematics และสร้างแบบจำลองจลนพลศาสตร์ของอุปกรณ์ โดยใช้ polyethylene เป็นวัสดุในการออกแบบข้อต่อและใช้คาร์บอนแกรไฟต์เป็นวัสดุในการออกแบบแกนของอุปกรณ์แฮปติก เนื่องจากมีน้ำหนักเบาและมีคุณสมบัติทางกลที่ดี แบบจำลองอุปกรณ์แฮปติกสามารถทำงานในพื้นที่ที่ออกแบบได้จริงและมีความถูกต้องแม่นยำตาม Kinematic ที่ออกแบบ เพื่อนำแนวความคิดของการออกแบบไปสร้างชิ้นงานจริง สำหรับการวิจัย Haptic Interface ต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ และ สมโพธิ โทบรณง. (2010). การจำลองและออกแบบอุปกรณ์แฮปติกสององศาอิสระชนิดห้าลิ้งค์แบบขนาน, *การประชุมวิชาการครุศาสตร์อุตสาหกรรมระดับชาติครั้งที่ 3*, 25-26 สิงหาคม 2553, หน้า 200 – 207.
- [2] ผศ.ดร.ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ และ สมโพธิ โทบรณง. (2010). การจำลองและออกแบบอุปกรณ์แฮปติกสององศาอิสระชนิดห้าลิ้งค์แบบขนาน, *เตรียมนำเสนอในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกล ครั้งที่ 24*, 20-22 ตุลาคม 2553.
- [3] Ralph H., (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., 24(1);, pages16–29
- [9] R. L. Klatzky and S. J. Lederman., (2003), *Handbook of Psychology*, volume 4, 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/SensAble_DentalLabFlyer.pdf, access on 30/06/2010.
- [13] S. James Biggs and Srinivasan, M A (2002), *Haptic Interfaces*, Ch. 5, pp. 93-116
- [14] Emrah Deniz, (2006), "Design of Haptic Device for Micro Parts Handling"