



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “Haptic Interface with Virtual Reality”

โดย สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (ฟีโบ้)

กุมภาพันธ์ 2547

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ “Haptic Interface with Virtual Reality”

คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร. ชิต เหล่าวัฒนา
2. ผศ.ดร. พิชิต ฤกษ์นันท์
3. ดร. สยาม เจริญเสียง
4. ดร. ถวิดา มณีวรรณ
5. นาย สมพงษ์ เลิศผลไพโรจน์
6. นาย วรพัฒน์ นุกุลวุฒิโอภาส
7. นายพนาไพร โตถาวรยืนยง
8. นาย ฐิฏพล ปฐมอารีย์

สังกัด

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ซึ่งได้ให้ทุนการวิจัยแก่คณะผู้วิจัย รวมถึงเจ้าหน้าที่และพนักงานทุกท่านของสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนามและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ได้ให้ความสะดวกในการวิจัยนี้ด้วยดีเสมอมา

Abstract

A haptic interface system is a force reflecting system which allows a user to touch, feel, manipulate, create, and/or edit simulated 3D objects in a virtual environment. While the operator uses the haptic system, he/she will feel as if he/she really interacts with the virtual environment. The haptic interface system consists of a human operator, the haptic device, and the virtual environment simulation. Objectives of this work are creating a realistic force feedback system and improving the system stability.

This research proposed criteria for measuring a haptic system's efficiency and then uses them to analyze an effect of a virtual coupling in haptic interface system. An adaptive virtual coupling is also presented and proved in this work. This method is used to improve the system efficiency and make the system more realistic. The result from this algorithm is better than one from a static virtual coupling. Furthermore, this research applies the haptic interface with a virtual reality (VR) system for transferring skill in an assembly task. The user will obtain the realistic force feedback and the graphic simulation while interacts with the VR system. Thus, this VR-based system with force feedback can make a training system or skill transfer more effective and realistic.

บทคัดย่อ

ระบบแฮปติกส์เป็นระบบซึ่งใช้ในการสร้างแรงป้อนกลับ และการเคลื่อนที่ให้ผู้ใช้งาน โดยแรงและการเคลื่อนที่ที่ผู้ใช้งานได้รับต้องสอดคล้องกับแรงและการเคลื่อนที่ของวัตถุเสมือน ดังนั้นในขณะที่ผู้ใช้งานมีปฏิสัมพันธ์กับอุปกรณ์แฮปติกส์ผู้ใช้งานต้องรู้สึกเสมือนกำลังสัมผัสกับสถานะแวดล้อมเสมือน ระบบแฮปติกส์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญสามส่วนคือ ผู้ใช้งาน (Human Operator) อุปกรณ์แฮปติกส์ (Haptic Device) และแบบจำลองของสถานะแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment Simulation) วัตถุประสงค์หลักของระบบแฮปติกส์ คือระบบต้องสามารถสร้างแรงป้อนกลับที่เหมือนจริง กล่าวคือแรงป้อนกลับดังกล่าวต้องสามารถทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกเสมือนตนเองกำลังมีปฏิสัมพันธ์กับสถานะแวดล้อมที่มีอยู่จริง วัตถุประสงค์อีกข้อคือระบบต้องมีเสถียรภาพในขณะที่ใช้งานด้วย

ทางคณะผู้ทำวิจัยได้หาวิธีการวัดประสิทธิภาพความเหมือนจริงของระบบแฮปติกส์ และใช้วิธีดังกล่าวในการวิเคราะห์ปัจจัยของข้อต่อเสมือน (Virtual Coupling) ที่มีผลต่อความเหมือนจริงของระบบแฮปติกส์ และได้เสนอวิธีการปรับปรุงระบบแฮปติกส์ดังกล่าวโดยการเสนอให้ใช้ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้แทนแบบเดิมซึ่งเป็นข้อต่อเสมือนแบบคงที่ โดยได้เสนอรูปแบบของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ (Adaptive Virtual Coupling) โดยได้พิสูจน์ว่าการใช้ข้อต่อแบบใหม่ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ข้อต่อเสมือนแบบคงที่ และได้นำองค์ความรู้ที่ได้ศึกษานามาสำสร้างระบบความจริงเสมือน (Virtual Reality System) ไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงาน เพื่อให้ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะรู้สึกว่าคุณเองอยู่ในโลกเสมือน และรู้สึกถึงแรงตอบสนองกลับ งานวิจัยในส่วนนี้จึงเป็นต้นแบบของการนำระบบความจริงเสมือนที่มีแรงป้อนกลับไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความสมจริงในการฝึกหัดหรือการถ่ายทอดทักษะ

สารบัญ

หน้า	
กิตติกรรมประกาศ	I
Abstract	II
บทคัดย่อ	III
1 วัตถุประสงค์	1
2 บทนำ	2
3 เสถียรภาพ และการ โมเดลระบบแฮปติกส์	4
3.1 เสถียรภาพของระบบแฮปติกส์	4
3.2 การ โมเดล และเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบแฮปติกส์	5
3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์ High Bandwidth Force Display	7
4 ความเหมือนจริง	9
4.1 ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง (Realistic Performance Boundaries)	10
4.2 ขั้นตอนการทำการทดลอง	11
4.3 ผลการทดลองหาขอบเขตประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริง	13
4.4 วิจัยผลการทดลองหาขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง	16
4.5 บทสรุป	16
5 ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ (Adaptive Virtual Coupling)	17
5.1 โครงสร้างระบบแฮปติกส์ที่ใช้ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้	18
5.2 Adaptation Procedure	18
5.3 Interaction Frequency Estimator	22
5.4 การทดลอง	24
5.5 วิจัยการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้	25
5.6 บทสรุป	25
6 การนำระบบความจริงเสมือนไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงาน	26

6.1 ลักษณะการทำงานของระบบ	26
6.2 การถ่ายทอดทักษะ	36
6.3 การทดลอง	40
6.4 ผลการทดลอง	40
7 สรุป	43
8 แนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้	45
8.1 การนำการมองเห็นแบบ 3 มิติ (Stereo Vision) มาประยุกต์ใช้	46
8.2 การนำระบบความจริงเสริม (Augmented Reality) มาประยุกต์ใช้	46
8.3 ตัวอย่างงานวิจัยของระบบความจริงเสริม (Augmented Reality)	48
8.4 แนวทางการนำระบบความจริงเสริมมาพัฒนาระบบการถ่ายทอดทักษะที่ได้ดำเนินการแล้ว	54
9 เอกสารอ้างอิง	56
10 วารสารตีพิมพ์	
10.1 The effect of static virtual coupling on realistic performance	58
10.2 Realistic and stability performances of haptic system with adaptive virtual coupling	66
10.3 Virtual Environment for Skill Transfer in Assembly Task	72

1. วัตถุประสงค์

1.1 ศึกษาและพัฒนาความรู้พื้นฐานของระบบ Haptic Interface

1.2 จัดสร้างต้นแบบของ Haptic Interface with Virtual Reality ซึ่งสามารถสร้างแรงและการเคลื่อนที่ให้กับผู้ใช้ให้ผู้ใช้รู้สึกเสมือนกระทำอยู่กับสภาวะแวดล้อมเสมือนจริง โดยระบบที่สร้างขึ้นนี้ต้องมีเสถียรภาพ (Stability)

1.2.1 ศึกษาหาวิธีการวัดประสิทธิภาพความเหมือนจริงของระบบแฮปติกส์

1.2.2 ศึกษาปัจจัยของข้อต่อเสมือน (Virtual Coupling) ที่มีผลต่อความเหมือนจริง

1.2.3 ออกแบบข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ (Adaptive Virtual Coupling) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพความเหมือนจริงของระบบแฮปติกส์

1.3 จัดสร้างต้นแบบระบบการถ่ายทอดทักษะของระบบแฮปติกส์

1.3.1 สร้างสภาพแวดล้อมเสมือนจริงแบบมุมมองสามมิติเพื่อเป็นต้นแบบการถ่ายทอดทักษะในการประกอบชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรม

1.3.2 นำระบบแฮปติกส์มาช่วยในการรับรู้ถึงแรงป้อนกลับ และการเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมเสมือนจริง

1.3.3 สร้างระบบการถ่ายทอดทักษะที่มีการนำระบบความจริงเสมือนที่มีแรงป้อนกลับเข้าไปประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มการแสดงผลทางภาพและแรงตอบสนอง ทำให้ผู้ใช้สามารถปฏิบัติงานได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.3.4 เพื่อสร้างองค์ความรู้และงานวิจัยทางด้านความจริงเสมือนและการเชื่อมต่อระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์

1.3.5 เพื่อประยุกต์ใช้ระบบความจริงเสมือนในงานทางด้านวิศวกรรม อุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์และสาขาอื่น ๆ ของประเทศไทย

2. บทนำ

ระบบแฮปติกส์เป็นระบบซึ่งใช้ในการสร้างแรงป้อนกลับ และการเคลื่อนที่ที่ผู้ใช้ โดยแรงและการเคลื่อนที่ที่ผู้ใช้ได้รับต้องสอดคล้องกับแรงและการเคลื่อนที่ของวัตถุเสมือน ดังนั้นในขณะที่ผู้ใช้มีปฏิสัมพันธ์กับอุปกรณ์แฮปติกส์ผู้ใช้ต้องรู้สึกเสมือนกำลังสัมผัสกับสถานะแวดล้อมเสมือน ระบบแฮปติกส์ประกอบด้วยส่วนประกอบที่สำคัญสามส่วนคือ ผู้ใช้ (User) อุปกรณ์แฮ-ปติกส์ (Haptic Device) และ แบบจำลองของสถานะแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment Model) วัตถุประสงค์หลักของระบบแฮปติกส์ ก็คือต้องสามารถสร้างแรงป้อนกลับที่เหมือนจริง กล่าวคือแรงป้อนกลับดังกล่าวต้องสามารถทำให้ผู้ใช้รู้สึกเสมือนตนเองกำลังปฏิสัมพันธ์กับสถานะแวดล้อมที่มีอยู่จริง วัตถุประสงค์อีกข้อคือระบบต้องมีเสถียรภาพในขณะที่ใช้งานด้วย

Colgate และเพื่อนร่วมงาน [1] ได้เสนอระบบร่างแหสองขั้วแบบเชิงเส้น (Linear Two-port Network) ซึ่งให้ชื่อว่าข้อต่อเสมือน (Virtual Coupling) โดยข้อต่อนี้เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์แฮ-ปติกส์ (Haptic device) และ การจำลองสถานะแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment Simulation) เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบแฮปติกส์ โดยใช้หลักการพาสซีวิตี (Passivity Concept) ซึ่งพัฒนาโดย Colgate และ Schenkel [2] ในการหาค่าพารามิเตอร์ของอุปกรณ์แฮปติกส์ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ Hannaford และ Adams [3][4][5][6] ใช้ข้อต่อเสมือนในการรักษาเสถียรภาพของระบบแฮปติกส์เช่นกันโดยทำการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพจากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของอุปกรณ์แฮปติกส์

ระบบแฮปติกส์ที่มีประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงต้องสามารถทำให้ผู้ใช้รู้สึกถึงความสมจริงในการปฏิสัมพันธ์ต่อสถานะแวดล้อมที่จำลองขึ้นในขณะที่ใช้อุปกรณ์ ประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงของระบบแฮปติกส์ คือประสิทธิภาพของระบบในการส่งผ่านแรงและการเคลื่อนที่ ซึ่งนิยามได้ด้วย ทรานสพารเรนซี (Transparency) ซึ่ง Colgate และ Brown [7] ใช้ความกว้างอิมพีแดนซ์ (Z-Width) ในการวัดประสิทธิภาพระบบด้านความเหมือนจริง นอกจากนั้น Lawrence [8] ได้เสนอหลักการไอดีลลิกวิวาเลนต์ (Ideal-equivalent) ซึ่งคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ซึ่งระบบประสาทของมนุษย์สามารถรับรู้ได้เป็นดัชนีกำหนดประสิทธิภาพ อีกท่านหนึ่งคือ Yokokohji และเพื่อนร่วมงาน [9] ใช้หลักการการต่อเชื่อมทั้งภาพและแรงซึ่งเรียกว่า “What You can See Is What You can Feel (WYSIWYF)” โดยผู้ใช้รู้สึกถึงแรงซึ่งตรงกับภาพที่เห็นทำให้ผู้ใช้รู้สึกเสมือนได้เข้าไปอยู่ในโลกเสมือนนั้น

หลักการที่ได้กล่าวมาทั้งหมดพิจารณาความเหมือนจริงกับสถานะแวดล้อมเสมือนสองกรณี คือกรณีที่สถานะแวดล้อมเสมือนเป็นการเคลื่อนที่แบบบังคับ (Constraint Motion) และกรณีที่สถานะแวดล้อมเสมือนเป็นการเคลื่อนที่แบบอิสระ (Free Motion) แต่ในการจำลองสถานะแวดล้อมเสมือนจริงนั้น การเคลื่อนที่ของสถานะแวดล้อมเสมือนมิได้มีเพียงสองกรณีข้างต้น ดังนั้นทางคณะผู้วิจัยได้เสนอวิธีการวัดประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงของสถานะแวดล้อมเสมือนโดยให้

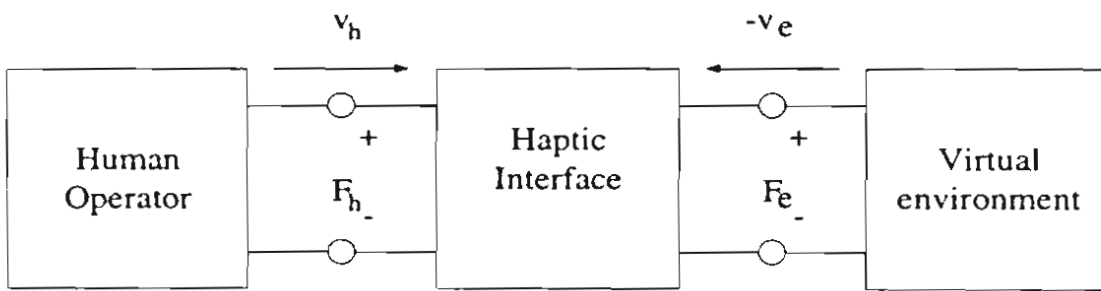
ชื่อว่า ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง (Realistic Performance Boundaries) โดยขอบเขตดังกล่าวสามารถใช้วัดประสิทธิภาพระบบแอปติกส์ ซึ่งสถานะแวดล้อมเสมือนมีการเคลื่อนที่หรืออิมพีแดนซ์อยู่ระหว่างการเคลื่อนที่สองแบบข้างต้น โดยทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับอุปกรณ์ High bandwidth force display [10] เมื่อหาขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริงแล้วพบว่าการใช้ข้อต่อเสมือนในระบบแอปติกส์ทำให้ระบบมีความเหมือนจริงลดลง ซึ่งสังเกตได้จากการที่อิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกอยู่นอกของเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง ดังนั้นได้ทำการวิจัยต่อไปคือการออกแบบข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้โดยที่ค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนต้องปรับค่าตามอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือนซึ่งจะต้องสอดคล้องกับขอบเขตความเหมือนจริงในกรณีที่ยังคงไว้ซึ่งเสถียรภาพของระบบด้วย

คณะผู้ทำวิจัยได้นำระบบแอปติกส์ ซึ่งเป็นพื้นฐานจากการเรียนรู้มาประยุกต์ใช้ในการสร้างต้นแบบการถ่ายทอดทักษะจากผู้เชี่ยวชาญไปสู่ผู้ใช้ โดยในระบบการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานที่สร้างขึ้นจะใช้หุ่นยนต์แขนกล(CRS-robot) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ 5 องศาอิสระ หรือ 5 แกนเป็นตัวขับเคลื่อน โดยสถานะแวดล้อมเสมือนที่สร้างขึ้น เป็นการถ่ายทอดการประกอบชิ้นงานจากตำแหน่งเริ่มต้นไปสู่ตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งผู้รับการถ่ายทอดทักษะจะสามารถเรียนรู้การเคลื่อนที่ได้จากการเคลื่อนที่ตามเส้นทางเดินต้นแบบที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญออกแรงกระทำผ่านระบบการถ่ายทอดทักษะที่ผู้ทำวิจัยได้จัดสร้างขึ้น

3. เสถียรภาพ และการโมเดลระบบแอปติกส์

3.1 เสถียรภาพของระบบแอปติกส์

ระบบแอปติกส์ (Haptic Interface) เป็นระบบที่อยู่ระหว่างระบบพลศาสตร์สองระบบ คือ ระหว่างคนกับสภาวะแวดล้อมเสมือน โดยมีการถ่ายเทพลังงานระหว่างกัน ฉะนั้นการวิเคราะห์ เสถียรภาพจึงใช้วิธีการวิเคราะห์พาสซีวิตี (Passivity Analysis) โดยแทนระบบแอปติกส์ด้วยระบบ ร้างแหล่งขั้ว (Two-port Network) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบร่างแหล่งขั้ว (Two-port Network) ของระบบแอปติกส์

เราสามารถแทนระบบในรูปที่ 1 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ F_e \end{bmatrix} \quad (1)$$

F_h = แรงที่ผู้ใช้กระทำ

F_e = แรงที่ได้จากการจำลองของสภาวะแวดล้อมเสมือน

v_h = ความเร็วของผู้ใช้

v_e = ความเร็วที่ได้จากการจำลองสภาวะแวดล้อมเสมือน

โดยระบบจะมีเสถียรภาพแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconditionally Stable) ตามหลักของ Llewellyn's Stability Criteria [2] ก็คือเมื่อ

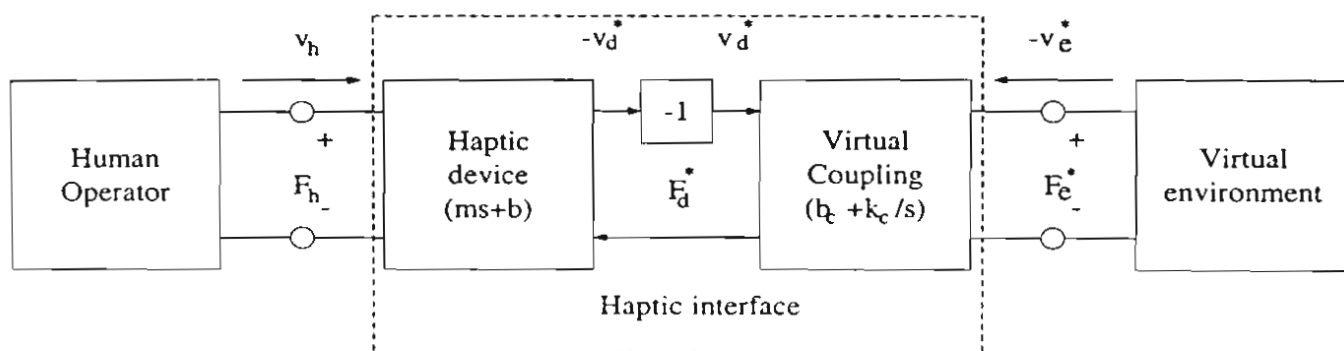
$$\text{Re}(p_{11}) \geq 0, \text{Re}(p_{22}) \geq 0 \quad (2)$$

$$2 \text{Re}(p_{11}) \text{Re}(p_{22}) \geq |p_{12} p_{21}| + \text{Re}(p_{12} p_{21}) \quad (3)$$

ในหัวข้อที่ 4.2 กล่าวถึงการโมเดล และเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบแฮปติกส์ตามสมการ (2) และ (3)

3.2 การโมเดล และเงื่อนไขเสถียรภาพของระบบแฮปติกส์

ในการทดลองนี้ใช้ระบบแฮปติกส์แบบมีข้อต่อเสมือนที่ใช้การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ ระบบแฮปติกส์แบบมีข้อต่อเสมือนที่ใช้การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ มีหลักการทำงานโดยการวัดการเคลื่อนที่แล้วนำข้อมูลดังกล่าวไปคำนวณแรงป้อนกลับเพื่อใช้ควบคุมอุปกรณ์แฮปติกส์ เราใช้ระบบร่างแหสองขั้ว (Two-port Network) ในการโมเดล ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบร่างแหสองขั้ว (Two-port network) ของระบบแฮปติกส์แบบมีข้อต่อเสมือนที่ใช้การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการระบบโดยอ้างอิงของ Hanaford [3] ดังนี้

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d(z) & ZOH(z) \\ -1 & \frac{1}{Z_c(z)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ F_e \end{bmatrix} \quad (4)$$

F_h = แรงที่ผู้ใช้กระทำ

F_e = แรงที่ได้จากการจำลองของสถานะแวดล้อมเสมือน

v_h = ความเร็วของผู้ใช้

v_e = ความเร็วที่ได้จากการจำลองสถานะแวดล้อมเสมือน

$Z_d(z)$ = อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์แฮปติกส์

โดย

$$Z_d(z) = (m_d s + b_d) \Big|_{s \rightarrow \frac{2(z-1)}{T(z+1)}} \quad (5)$$

จากสมการ (5) m_d และ b_d เป็นมวลและค่าคงที่การหน่วงของอุปกรณ์แฮปติกส์ตามลำดับ ส่วนข้อต่อเสมือนสามารถโมเดลดังนี้

$$Z_c(z) = (b_c + \frac{k_c}{s}) \Big|_{s \rightarrow \frac{2(z-1)}{T(z+1)}} \quad (6)$$

โดย b_c และ k_c เป็นค่าคงที่การหน่วงและค่าคงที่สปริงของข้อต่อเสมือนตามลำดับ สถานะแวดล้อมเสมือนสามารถโมเดลโดย

$$Z_e(z) = (b_e + \frac{k_e}{s}) \Big|_{s \rightarrow (2/T)(z-1/z+1)} \quad (7)$$

โดย b_e and k_e เป็นค่าคงที่การหน่วงและค่าคงที่สปริงของสถานะแวดล้อมเสมือน ตามลำดับ ส่วนซีโร่ออเดอร์โฮลด์ (zero-order-hold) สามารถเขียนดังนี้

$$ZOH(z) = \frac{1}{2} \frac{(z+1)}{z} \quad (8)$$

โดยการใช้หลักการ Llewellyn's Stability Criteria ดังสมการที่ 2 และ 3 กับสมการที่ 4 ได้ว่าระบบแฮปติกส์จะมีเสถียรภาพเมื่อ

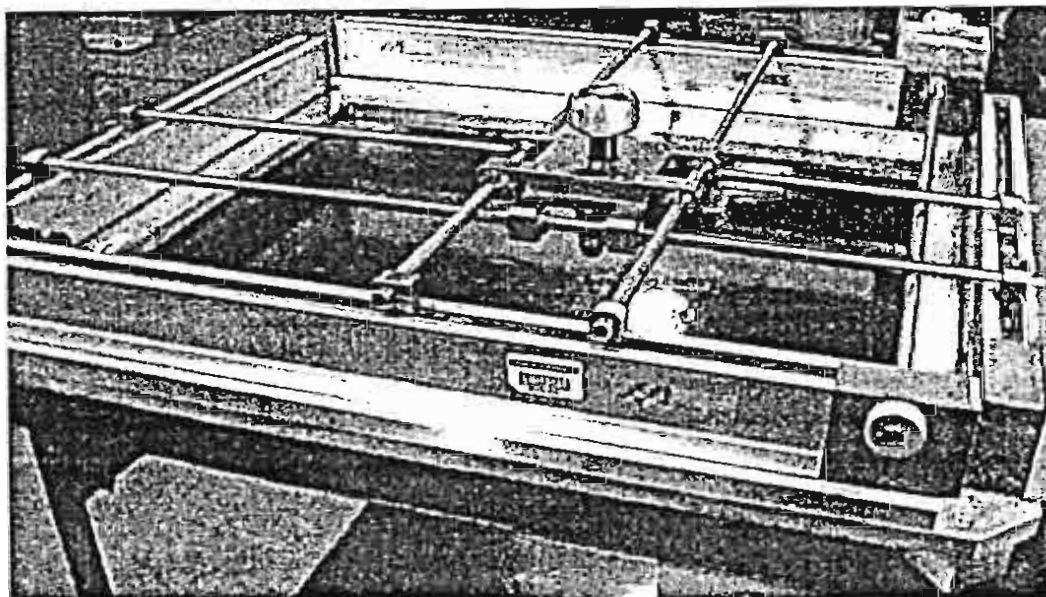
$$\text{Re}(Z_d(z)) \geq 0, \text{Re}(1/Z_c(z)) \geq 0 \quad (9)$$

$$\text{Re}(1/Z_c(z)) \geq \frac{1 - \cos(\angle ZOH(z))}{2 \text{Re}(Z_d(z))} |ZOH(z)| \quad (10)$$

ในหัวข้อ 4.3 กล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์ High bandwidth force display (HBFD) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แฮปติกส์ที่ใช้ในการทดลอง

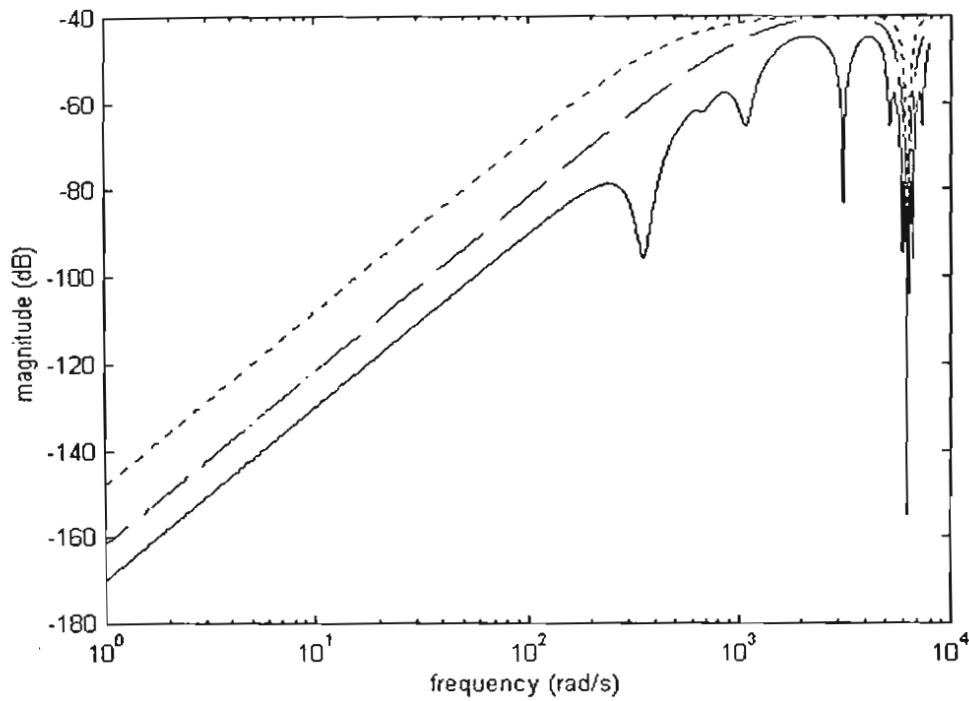
3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์ High bandwidth force display

อุปกรณ์ High bandwidth force display (HBFD) เป็นอุปกรณ์แฮปติกส์แบบสององศาอิสระ (Two Degrees of Freedom: 2-DOF) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อุปกรณ์ High bandwidth force display (HBFD)

อุปกรณ์ดังกล่าวสร้างขึ้นที่มหาวิทยาลัยวอชิงตัน ซีแอตเติล จุดเด่นของอุปกรณ์นี้คือสามารถสร้างแรงป้อนกลับแบบต่อเนื่องได้สูงถึง 100 N และแรงป้อนกลับสูงสุดได้ถึง 400 N นอกจากนั้นยังมีความถี่ในการทำงานสูงถึง 1000 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงพอสำหรับการสร้างแรงป้อนกลับให้ผู้ใช้งาน รายละเอียดอุปกรณ์สามารถหาได้จาก [10] เมื่อทำการหาสมการพลศาสตร์ของอุปกรณ์ตามขั้นตอนใน [4] และนำไปแทนในสมการ (10) เพื่อเขียนกราฟเงื่อนไขเสถียรภาพได้กราฟเส้นทึบในรูปที่ 4



รูปที่ 4 กราฟของเงื่อนไขเสถียรภาพของอุปกรณ์ High bandwidth force display

จากสมการ (10) ค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนซึ่งเพียงพอในการทำให้ระบบมีเสถียรภาพคือ $k_c = 110 \text{ kN/m}$ และ $b_c = 100 \text{ Ns/m}$ ซึ่งได้แสดงด้วยเส้นประยาวในรูปที่ 4 แต่เมื่อนำค่าดังกล่าวไปใช้จริงทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ง่าย ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เราไม่ได้คำนึงถึงองค์ประกอบบางอย่าง เช่น ความเสียดทานแบบไม่เชิงเส้นเป็นต้น ดังนั้นเราจึงปรับค่าพารามิเตอร์โดยละเอียด (Fine Tuning) อีกครั้งจนระบบมีเสถียรภาพซึ่งพบว่าที่ค่า $k_c = 50 \text{ kN/m}$ และ $b_c = 100 \text{ Ns/m}$ เป็นค่าที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพและได้แสดงด้วยเส้นประสั้นในรูปที่ 4

4. ความเหมือนจริง

ประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงของระบบแอปติกส์ สามารถบ่งบอกได้ด้วยทราเนสพาเรนซี (Transparency) ทราเนสพาเรนซีเป็นดัชนีที่บ่งบอกความสามารถของระบบแอปติกส์ในการส่งผ่านแรงและการเคลื่อนที่ โดยเราสามารถหาทราเนสพาเรนซีผ่านทางค่าอิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึก (human perceived impedance) ในการวิเคราะห์ผลกระทบด้านความเหมือนจริงของระบบแอปติกส์ที่มีข้อต่อเสมือน เราพิจารณาอิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกในสองกรณี คืออิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกในกรณีกระทำกับอุปกรณ์แอปติกส์ที่มีข้อต่อเสมือน ($Z_{h_vc}(z)$) ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Z_{h_vc}(z) = Z_d(z) + ZOH(z)Z_e(z)\left(\frac{v_e}{v_h}\right) \quad (11)$$

โดย $\frac{v_e}{v_h}$ หาได้จากสมการที่ (6) และ (7) ดังนี้

$$\frac{v_e}{v_h} = \left(\frac{b_c s + k_c}{m_e s^2 + (b_e + b_c)s + (k_e + k_c)} \right) \Bigg|_{s \rightarrow \frac{2(z-1)}{T(z+1)}} \quad (12)$$

และอิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกในกรณีกระทำกับอุปกรณ์แอปติกส์ที่ไม่มีข้อต่อเสมือน ($Z_h(z)$) คือ

$$Z_h(z) = Z_d(z) + ZOH(z)Z_e(z) \quad (13)$$

ระบบแอปติกส์ที่มีประสิทธิภาพต้องสามารถสร้างแรงและการเคลื่อนที่ให้ผู้รู้สึกได้เท่ากับแรงและการเคลื่อนที่ของสถานะแวดล้อมเสมือน Lawrence [8] เสนอหลักการความเหมือนจริงแบบไอดีลอิควิวาเลนต์ (Ideal-equivalent) ซึ่งอาศัยขอบเขตซึ่งกำหนดขึ้นจากขีดจำกัดของการรับรู้ทางระบบสัมผัสของมนุษย์ โดยนิยามความเหมือนจริงโดยพิจารณาการเคลื่อนที่สองรูปแบบ คือ การเคลื่อนที่แบบอิสระ (Free Motion) และการเคลื่อนที่แบบจำกัด (Constraint Motion) ดังนี้

การเคลื่อนที่แบบอิสระ (Free motion)

ขณะที่ผู้ใช้ปฏิสัมพันธ์กับอุปกรณ์แอปติกส์ที่จำลองการเคลื่อนที่แบบอิสระนั้น ระบบแอปติกส์จะมีความเหมือนจริงแบบไอดีลอิควิวาเลนต์ ก็ต่อเมื่อแรงที่ผู้ใช้รู้สึกต้องน้อยกว่าแรงน้อยสุดที่ระบบประสาทของผู้ใช้นั้นสามารถรับรู้ได้

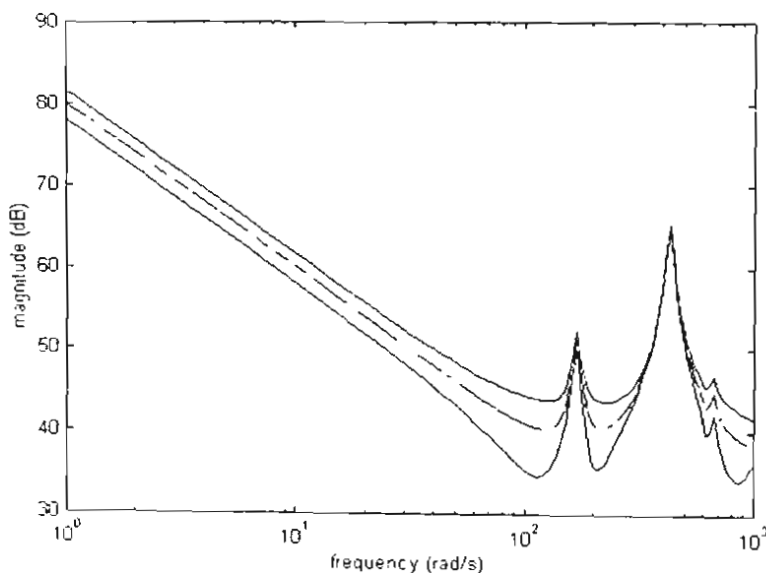
การเคลื่อนที่แบบบังคับ (Constraint Motion)

ระบบแฮปติกส์ที่จำลองการเคลื่อนที่แบบบังคับจะเหมือนจริง ก็ต่อเมื่อขณะที่ผู้ใช้ ปฏิสัมพันธ์กับระบบแฮปติกส์ที่จำลองการเคลื่อนที่แบบบังคับ แล้วผู้ใช้มีการเคลื่อนที่น้อยกว่าการ เคลื่อนที่น้อยสุดที่ผู้ใช้รับรู้ได้

อย่างไรก็ตาม ความเหมือนจริงแบบไฮเดอลอิกวิวาเลนซ์ นิยามเฉพาะการเคลื่อนที่สอง แบบที่กล่าวมาข้างต้นเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงสถานะแวดล้อมเสมือนมีลักษณะการเคลื่อนที่หรือ อิมพีแดนซ์หลากหลายขึ้นกับอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเสนอ วิธีการวัดประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงของระบบแฮปติกส์แบบใหม่ โดยให้ชื่อว่า ขอบเขต ประสิทธิภาพความเหมือนจริง (Realistic Performance Boundaries) ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีวัด ความเหมือนจริงของสถานะแวดล้อมที่มีอิมพีแดนซ์ใดๆ

4.1 ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง (Realistic Performance Boundaries)

ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง คือขอบเขตค่าอิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกได้ถึง ความเหมือนจริงในการปฏิสัมพันธ์ ในกรณีที่กระทำกับอุปกรณ์แฮปติกส์แบบไม่มีข้อต่อเสมือน $Z_h(z)$ โดยขอบเขตนี้หาได้จากการทดลองโดยให้ผู้ใช้ปรับค่าพารามิเตอร์ของสถานะแวดล้อมเสมือน จนกว่ารู้สึกเหมือนกระทำกับสถานะแวดล้อมอ้างอิง เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์จากการทดลองหลายๆ ครั้งแล้ว เราใช้ทฤษฎีช่วงความมั่นใจ (Confidence Interval) ในการหาค่าพารามิเตอร์ซึ่งผู้ใช้ส่วนใหญ่รู้สึกเหมือนจริง ซึ่งจะได้ค่าขอบเขตบน และขอบเขตล่างของพารามิเตอร์ หลังจากนั้นแทนค่า ขอบเขตนี้ในสมการ (13) ซึ่งจะได้เส้นทึบในรูปที่ 5 คือของเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง



รูปที่ 5 ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง

จากรูปที่ 5 เส้นประคืออิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกเมื่อกระทำกับสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิง ส่วนเส้นทึบที่อยู่ด้านบน และล่างของเส้นประคือขอบเขตบน และขอบเขตล่างของอิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึก โดยถ้าอิมพีแดนซ์ที่อุปกรณ์แอปติกส์สร้างอยู่ในขอบเขตดังกล่าว เราสามารถสรุปได้ว่าผู้ใช้รู้สึกเหมือนกำลังปฏิสัมพันธ์กับสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิง

4.2 ขั้นตอนการทำการทดลอง ทำการทดลองตามขั้นตอนดังนี้

- ขั้นที่1: กำหนดอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิงซึ่งเราต้องการหาขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง
- ขั้นที่2: จำลองสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิงด้วยอุปกรณ์แอปติกส์ที่ไม่มีข้อต่อเสมือน และใช้ปฏิสัมพันธ์กับสถานะแวดล้อมเสมือนนี้เป็นปฏิสัมพันธ์อ้างอิง
- ขั้นที่3: ใช้อุปกรณ์แอปติกส์เดียวกันในการจำลองสถานะแวดล้อมเสมือนซึ่งปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของสถานะแวดล้อมได้โดยเรียกสถานะแวดล้อมเสมือนนี้ว่า สถานะแวดล้อมที่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ (Adjustable Virtual Environment) และให้ผู้ใช้ปรับค่าพารามิเตอร์ของสถานะแวดล้อม ซึ่งในที่นี้คือค่าคงที่สปริง และค่าคงที่การหน่วงจนรู้สึกเหมือนกระทำกับสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิง หลังจากนั้นเก็บค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวมาวิเคราะห์ต่อในขั้นที่ 4
- ขั้นที่4: ใช้ทฤษฎีช่วงความมั่นใจคำนวณค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของ k_{e_adj} และ b_{e_adj} ดังนี้

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x}{n}, SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{X})^2}{V}}, V = n - 1 \quad (14)$$

และสามารถหาค่าขอบเขตบน (x_{UCI}) และค่าขอบเขตล่าง (x_{LCI}) ของข้อมูล (x) ดังนี้

$$x_{LCI} \leq x_{\text{confidence}} \leq x_{UCI}$$

$$\bar{X} - t_{\alpha/2, V} \left(\frac{SD}{\sqrt{n}} \right) \leq x_{\text{confidence}} \leq \bar{X} + t_{\alpha/2, V} \left(\frac{SD}{\sqrt{n}} \right) \quad (15)$$

โดย n คือจำนวนตัวอย่างในการทดลอง $x_{\text{confidence}}$ คือช่วงความมั่นใจ, $t_{\alpha/2, V}$ คือค่าการกระจายแบบ t-distribution ซึ่งมีค่าความมั่นใจ CI เปอร์เซนต์ โดย $\alpha = 1 - (0.01 \times CI)$

- ขั้นที่5: แทนค่าขอบเขตบนและล่างในสมการโมเดลของสถานะแวดล้อมเสมือนดังนี้

$$Z_{LCI}(z) = (b_{e_LCI} + \frac{k_{e_LCI}}{s}) \Big|_{s \rightarrow \frac{2(z-1)}{T(z+1)}} \quad (16)$$

$$Z_{UCI}(z) = (b_{e_UCI} + \frac{k_{e_UCI}}{s}) \Big|_{s \rightarrow \frac{2(z-1)}{T(z+1)}} \quad (17)$$

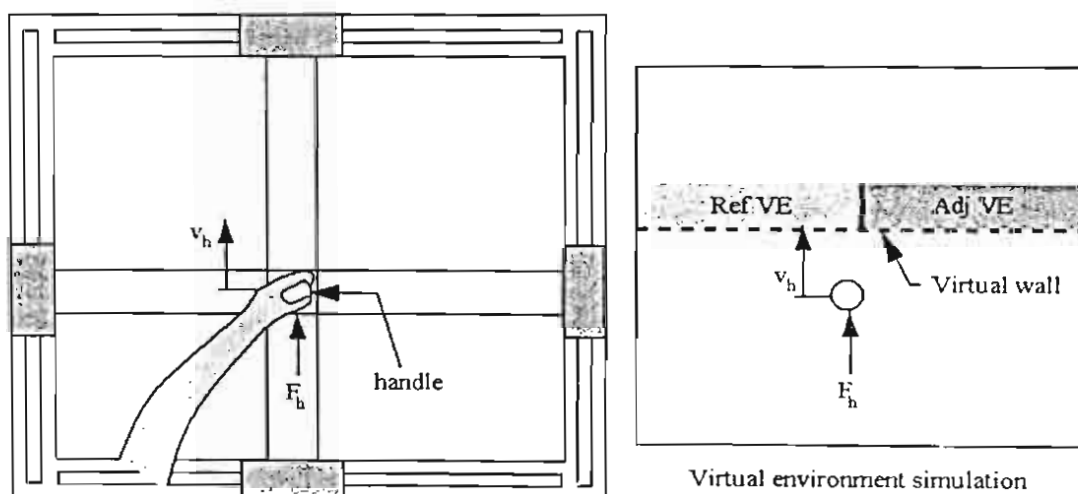
ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริงสามารถหาได้จากสมการ (13) โดยแทนค่าอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือนด้วยสมการ (16) และ (17)

4.3 ผลการทดลองหาขอบเขตประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริง

ในการทดลองโดยให้ผู้ใช้นิ้วทำท่าทางการทดลองกับอุปกรณ์ High bandwidth force display โดยใช้สภาวะแวดล้อมเสมือนแบบหนึ่งองศาอิสระ (1-DOF) ซึ่งมีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกัน 5 กรณีดังนี้

อิมพีแดนซ์ต่ำมาก	ซึ่งมีค่า $b_e = 0.1 \text{ N.s/m}$ และ $k_e = 10 \text{ N/m}$
อิมพีแดนซ์ต่ำ	ซึ่งมีค่า $b_e = 1 \text{ N.s/m}$ และ $k_e = 1000 \text{ N/m}$
อิมพีแดนซ์ปานกลาง	ซึ่งมีค่า $b_e = 10 \text{ N.s/m}$ และ $k_e = 10000 \text{ N/m}$
อิมพีแดนซ์สูง	ซึ่งมีค่า $b_e = 25 \text{ N.s/m}$ และ $k_e = 25000 \text{ N/m}$
อิมพีแดนซ์สูงมาก	ซึ่งมีค่า $b_e = 50 \text{ N.s/m}$ และ $k_e = 50000 \text{ N/m}$

สภาวะแวดล้อมเสมือนที่จำลองอยู่ในลักษณะกำแพงเสมือน (Virtual Wall) ดังรูปที่ 6



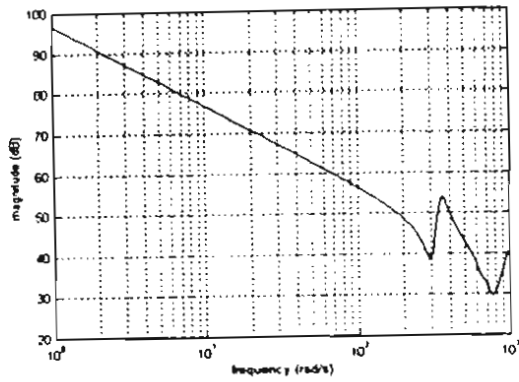
รูปที่ 6 การจำลองสภาวะแวดล้อมเสมือนแบบกำแพงเสมือนโดย Ref VE และ Adj VE คือสภาวะแวดล้อมอ้างอิงและสภาวะแวดล้อมเสมือนที่ปรับค่าได้ตามลำดับ

เมื่อทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวในหัวข้อ 3.2 และนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ได้ผล
ออกมาดังแสดงในตารางที่ 1

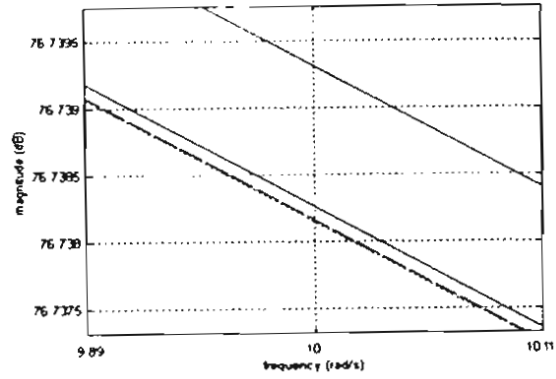
VE	Parameter s	Ref VE	LCI	UCI
VE 1	k_e	10	10.808	19.02
	b_e	0.1	0.0356	1.3335
VE 2	k_e	1000	944.85	1017.2
	b_e	1	1.2404	1.5316
VE 3	k_e	10000	8979.9	9954.1
	b_e	10	8.188	13.146
VE 4	k_e	25000	23316	24968
	b_e	25	21.447	27.549
VE 5	k_e	50000	39498	47829
	b_e	50	79.933	112.34

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ผลการทดลอง (หมายเหตุ VE คือสภาวะแวดล้อมเสมือน ค่าคงที่สปริงมี
หน่วย N/m และค่าคงที่การหน่วงมีหน่วย N.s/m)

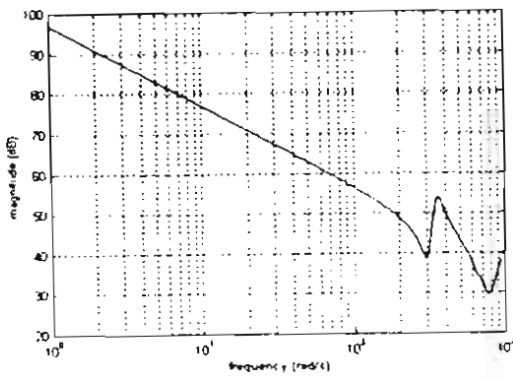
จากตารางที่ 1 สามารถแสดงกราฟขอบเขตประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงของสภาวะ
แวดล้อมเสมือนสามสภาวะแวดล้อมเสมือนซึ่งมีความแตกต่างกันชัดเจนได้ดังรูปที่ 7



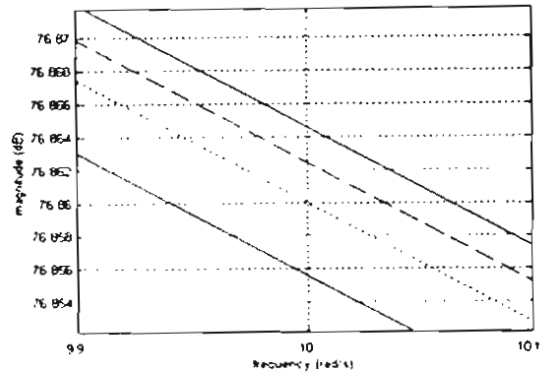
(a)



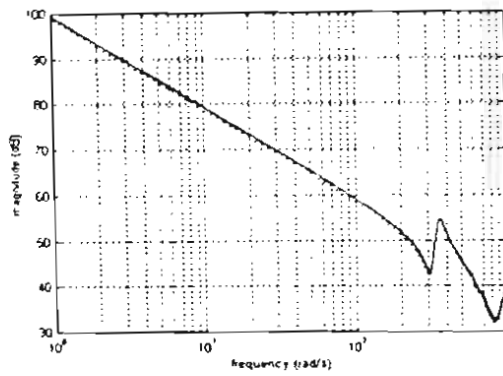
(b)



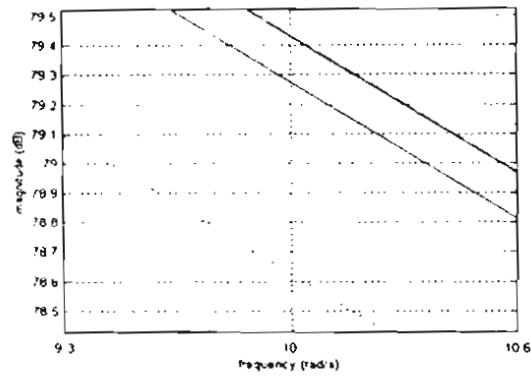
(c)



(d)



(e)



(f)

รูปที่ 7 กราฟแสดงขอบเขตประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริง (เส้นทึบ), $Z_h(z)$ (เส้นประยาว) และ $Z_{h_vc}(z)$ (เส้นประสั้น) เมื่อสภาวะแวดล้อมเสมือนมีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ (a) $b_c = 0.1$ N.s/m, $k_c = 10$ N/m, (b) รูปขยายของรูปที่ 7a, (c) $b_c = 1$ N.s/m, $k_c = 1000$, (d) รูปขยายของรูปที่ 7c, (e) $b_c = 25$ N.s/m, $k_c = 25000$ N/m, (f) รูปขยายของรูปที่ 7c

4.4 วิเคราะห์ผลการทดลองหาขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง

จากรูป 7b พบว่าเส้นกราฟที่แสดง $Z_h(z)$ เกือบเป็นเส้นเดียวกับ $Z_{h_vc}(z)$ และทั้งสองเส้นอยู่ต่ำกว่าขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง ซึ่งสรุปได้ว่าในกรณีที่สถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิงมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ผลกระทบของข้อต่อเสมือนที่มีต่อความเหมือนจริงมีน้อยมาก และยังสามารถได้อีกว่า การที่ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริงอยู่สูงกว่าเส้นกราฟทั้งสอง แสดงว่าขอบเขตดังกล่าวคือค่าอิมพีแดนซ์ต่ำสุดซึ่งทำให้ผู้ใช้รู้สึกเหมือนจริงในกรณีการเคลื่อนที่แบบอิสระ

จากรูป 7d แสดงให้เห็นว่าทั้ง $Z_h(z)$ และ $Z_{h_vc}(z)$ อยู่ในขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง แต่ $Z_{h_vc}(z)$ อยู่ต่ำกว่า $Z_h(z)$ ซึ่งแสดงว่าความเหมือนจริงลดลงเนื่องจากข้อต่อเสมือน

ในรูป 7f $Z_{h_vc}(z)$ อยู่ต่ำกว่าขอบเขตประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริง ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าผู้ใช้รู้สึกไม่เหมือนจริง

จากรูป 7b, 7d และ 7f จะเห็นว่าแถบของขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง ซึ่งเป็นค่าความแตกต่างของช่วงขอบเขตบนและขอบเขตล่าง มีความสัมพันธ์กับค่าอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิง คือแถบจะกว้างเมื่อสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิงมีค่าอิมพีแดนซ์สูง และแถบจะแคบเมื่อสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิงมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ

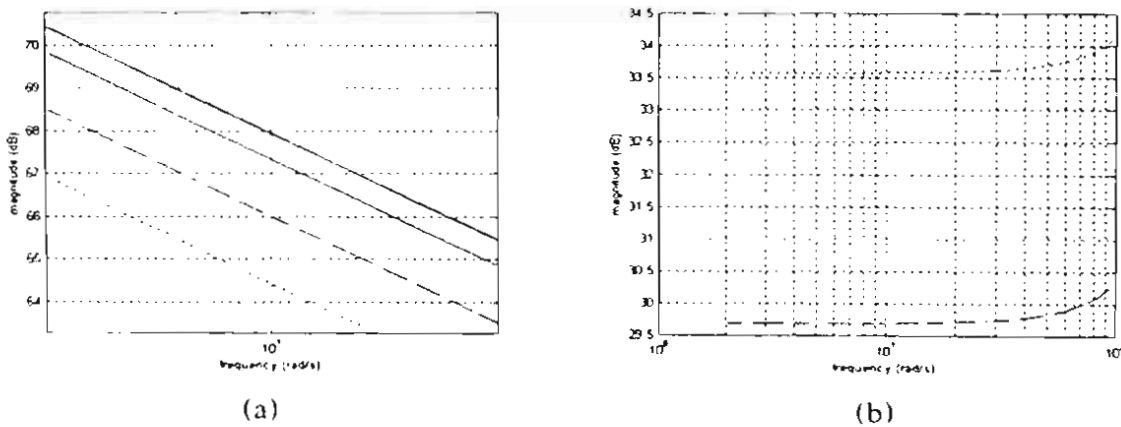
เราสามารถสรุปได้ว่า $Z_{h_vc}(z)$ ของระบบแฮปติกส์ที่ควบคุมแบบอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำกว่า $Z_h(z)$ เสมอซึ่งพบว่าในบางกรณีมีผลต่อความเหมือนจริง ข้อต่อเสมือนที่ออกแบบตามหลักการด้านเสถียรภาพ เหมาะสมกับสถานะแวดล้อมเสมือนที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงเท่านั้น แต่ไม่เหมาะสมกับสถานะแวดล้อมเสมือนอื่น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงข้อต่อเสมือนให้สามารถปรับค่าตัวเองให้สอดคล้องกับสถานะแวดล้อมเสมือน

4.5 สรุป

ในส่วนของการหาขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง ขอบเขตนี้เป็นดัชนีตัวหนึ่งซึ่งใช้บ่งบอกประสิทธิภาพความเหมือนจริงของระบบแฮปติกส์ในสถานะแวดล้อมอิมพีแดนซ์ใดๆ โดยขอบเขตนี้สามารถหาได้จากการทดลองโดยตรง ระบบแฮปติกส์ใดที่สามารถแสดงอิมพีแดนซ์ได้ในขอบเขตดังกล่าวถือว่ามีความเหมือนจริง และเรายังสังเกตเห็นได้จากการทดลองระบบที่ประกอบด้วยข้อต่อเสมือนเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีข้อต่อเสมือนในขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริงดังรูปที่ 7b 7d และ 7f ระบบที่มีข้อต่อเสมือนแบบคงที่จะมีประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงลดลงเมื่อค่าอิมพีแดนซ์ของสภาพแวดล้อมเสมือนเพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าลดลงจนออกนอกขอบเขตนี้ก็จำเป็นต้องปรับปรุงให้เข้าสู่ในขอบเขต โดยได้เสนอให้ใช้ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้แทน

5. ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ (Adaptive Virtual Coupling)

จากหัวข้อที่ 5 ทำให้ทราบว่า การใช้ข้อต่อเสมือนแบบที่มีพารามิเตอร์ (b_c, k_c) คงที่ (ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากเงื่อนไขเสถียรภาพ) แม้จะสามารถทำให้ระบบมีเสถียรภาพ แต่ก็ทำให้ความเหมือนจริงของระบบแอสปติกส์เสียไป ดังนั้นจึงได้เสนอให้นำข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้มาใช้แทน โดยพบว่าเรายังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริง (Realistic Performance) ให้ระบบได้ และในขณะเดียวกันระบบก็ยังคงมีเสถียรภาพด้วย เพราะค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนแบบคงที่คำนวณเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพเมื่ออุปกรณ์แอสปติกส์และสภาวะแวดล้อมเสมือนเป็นระบบที่แพสซีฟ (Passive) โดยไม่คำนึงถึงอิมพีแดนซ์ของสภาวะแวดล้อมเสมือน แต่ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้ที่เสนอนี้คำนึงถึงอิมพีแดนซ์ของสภาวะแวดล้อมเสมือนด้วย ซึ่งทำให้สามารถถ่วงดุลระหว่างประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงและเสถียรภาพของระบบ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 8

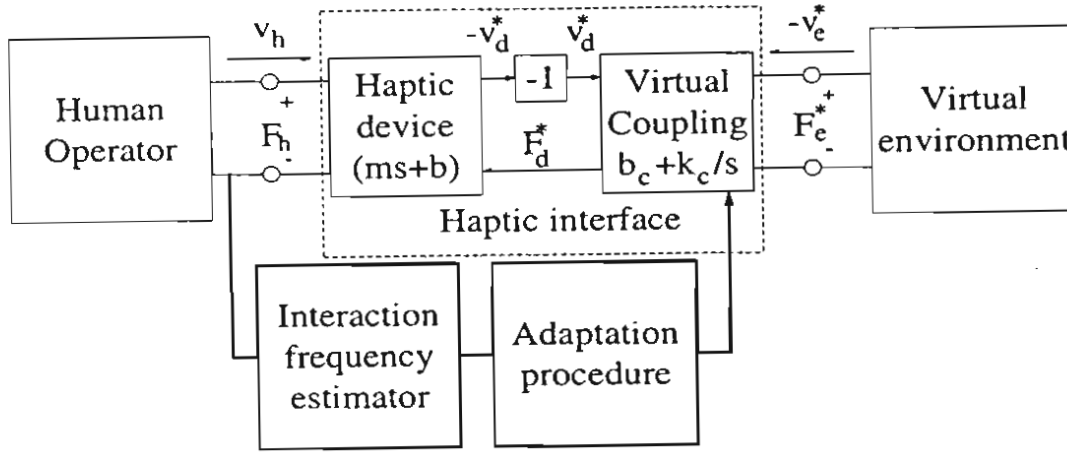


รูปที่ 8 (a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกเปรียบเทียบกันระหว่าง กรณีกระทำกับอุปกรณ์แอสปติกส์ที่มีข้อต่อเสมือนแบบคงที่ ($|Z_{h_vc}(z)|$): เส้นประสั้น และกรณีกระทำกับอุปกรณ์แอสปติกส์ที่มีข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ ($|Z_{h_avc}(z)|$): เส้นประยาว (b) แสดง กราฟแสดง $\text{Re}(Z_{h_vc}(z))$ เปรียบเทียบกันระหว่าง กรณีกระทำกับอุปกรณ์แอสปติกส์ที่มีข้อต่อเสมือนแบบคงที่ ($Z_{h_vc}(z)$): เส้นประสั้น และกรณีกระทำกับอุปกรณ์แอสปติกส์ที่มีข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ ($Z_{h_avc}(z)$): เส้นประยาว

จากรูปที่ 8 เห็นว่าเมื่อมีการปรับค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนทำให้อิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกเข้าใกล้ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริงมากขึ้น และในขณะเดียวกันจากรูป 8b แสดงให้เห็นว่าระบบยังคงรักษาเสถียรภาพได้ ช่วงต่อไปกล่าวถึงส่วนประกอบของระบบแอสปติกส์ที่ใช้ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้

5.1 โครงสร้างระบบแอปติกส์ที่ใช้ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้

ระบบแอปติกส์ที่ใช้ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้มีส่วนประกอบที่เพิ่มขึ้นจากระบบเดิมสองส่วนคือ Adaptation Procedure และ Interaction Frequency Estimator ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ระบบแอปติกส์ที่มีข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้

- 5.1.1 Adaptation procedure ทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนซึ่งขึ้นกับสถานะแวดล้อมเสมือนและความถี่ของปฏิสัมพันธ์
- 5.1.2 Interaction frequency estimator มีหน้าที่หาความถี่ของปฏิสัมพันธ์ซึ่งใช้ในการหาพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้

5.2 Adaptation procedure

เป้าหมายของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้คือ ต้องทำให้อิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือนที่มีข้อต่อเสมือนมีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือน ต้องสามารถรักษาเสถียรภาพ และอิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกต้องอยู่ในขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริงด้วย จากข้อความดังกล่าวสามารถเขียนในรูปการทำ Minimization ดังนี้

$$\text{Minimize: } \text{ObjF}(b_c, k_c) = (|Z_c| - |Z_{ec}|)^2 \quad (18)$$

$$\text{Subject to: Con1: } \text{Re}\{Z_d + \text{ZOH}(Z_{ec})\} \geq 0 \quad (19)$$

$$\text{Con2: } |Z_{h_avc}| - |Z_{h_LCI}| \geq 0 \quad (20)$$

$$\text{Con3: } |Z_{h_UCI}| - |Z_{h_avc}| \geq 0 \quad (21)$$

โดย
$$Z_{ec} = \frac{Z_e Z_{avc}}{Z_e + Z_{avc}} \quad (22)$$

$$Z_{h_avc} = Z_d + ZOH(Z_{ec}) \quad (23)$$

$$Z_{h_LCI} = Z_d + ZOH(Z_{LCI}) \quad (24)$$

$$Z_{h_UCI} = Z_d + ZOH(Z_{UCI}) \quad (25)$$

$$Z_{avc}(z) = (b_{avc} + \frac{k_{avc}}{s}) \mid \xrightarrow{s} \frac{2(z-1)}{T(z+1)} \quad (26)$$

เมื่อพิจารณาสมการ (18) ถึง (21) พบว่ามีความซับซ้อนของสมการสูงมาก ดังนั้นจึงลดความซับซ้อนของสมการโดยพิจารณาเทอม $\text{Re}(Z_{ec})$ และ $\text{Im}(Z_{ec})$ แทน b_c และ k_c ซึ่งทำให้ได้สมการ Minimization ดังนี้

$$\text{Minimize: } \text{ObjF}(\text{Re}(Z_{ec}), \text{Im}(Z_{ec})) = (|Z_e| - |Z_{ec}|)^2 \quad (27)$$

$$\text{Subject to: Con1: } \text{Re}\{Z_d + ZOH(Z_{ec})\} \geq 0 \quad (28)$$

$$\text{Con2: } |Z_{ec}| - |Z_{LCI}| \geq 0 \quad (29)$$

$$\text{Con3: } |Z_{UCI}| - |Z_{ec}| \geq 0 \quad (30)$$

ทำการ Minimize สมการ (27) ด้วยวิธี Penalty-Newton method ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1: กำหนดค่าเริ่มต้น (Initial condition): $X_0 = \begin{bmatrix} \text{Re}(Z_{ec}) \\ \text{Im}(Z_{ec}) \end{bmatrix}$

ขั้นที่ 2: ตรวจสอบเงื่อนไขบังคับจากสมการเงื่อนไขบังคับ (Constraint equations) จนครบทุกเงื่อนไข ถ้าเงื่อนไขใดไม่เป็นจริงต้องนำสมการเงื่อนไขบังคับนั้นรวมเข้ากับสมการ Objective function (ObjF) โดย u คือ weight ของเงื่อนไขบังคับดังนี้

$$F = \text{ObjF} + u(\text{Con}^2 + \dots) \quad (31)$$

ขั้นที่ 3: หา Gradient function $g(X_i)$ และ Hessian matrix $J(X_i)$

ขั้นที่ 4: หาค่า X ใหม่

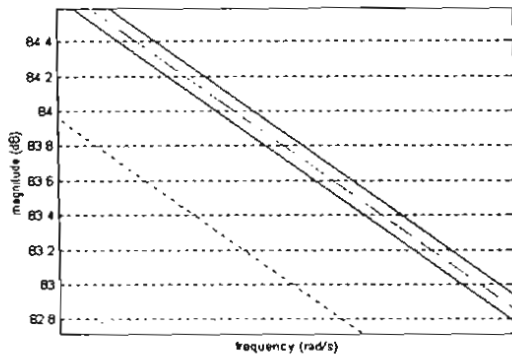
$$X_{i+1} = X_i - J(X_i)^{-1} g(X_i) \quad (32)$$

ขั้นที่ 5: ตรวจสอบเงื่อนไขบังคับจากสมการเงื่อนไขบังคับ (Constraint equations) จนครบทุกเงื่อนไข และทำเช่นเดียวกับ ขั้นที่ 2

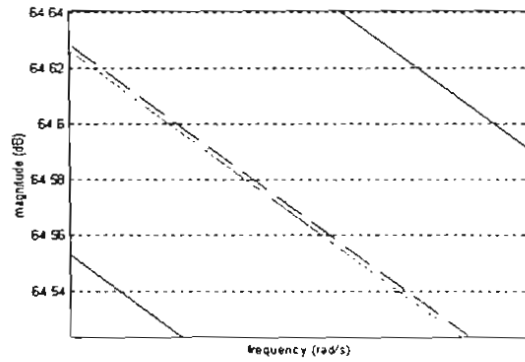
ขั้นที่ 6: หาความผิดพลาด (error) $\text{Err} = \text{Max}|g(X_{i+1})| \quad (33)$

ขั้นที่ 7: ถ้า $E_{\pi} \geq \varepsilon$ (ความผิดพลาดที่ยอมรับได้) ให้จบการทำงานและได้ $X_{\min} = X_{i+1}$
 ถ้า $E_{\pi} < \varepsilon$ ให้กลับไปทำ ขั้นที่ 3

ผลจากการ Minimization เมื่อสถานะแวดล้อมเสมือนมีค่าพารามิเตอร์ $b_e = 25 \text{ N.s/m}$, $k_e = 25000 \text{ N/m}$ ได้ผลดังรูปที่ 10

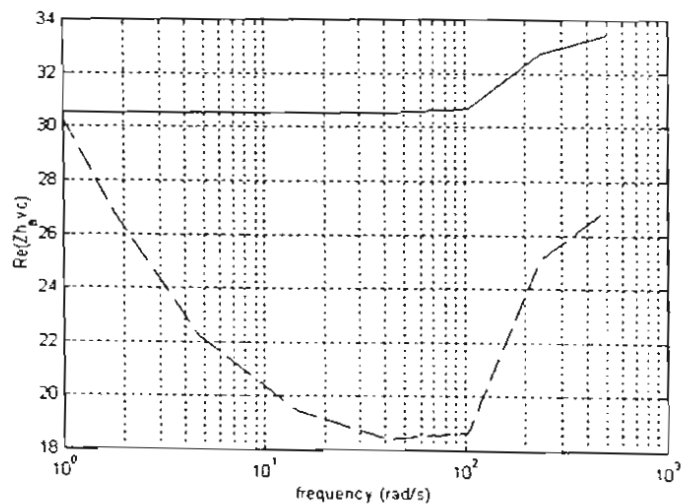


(a)

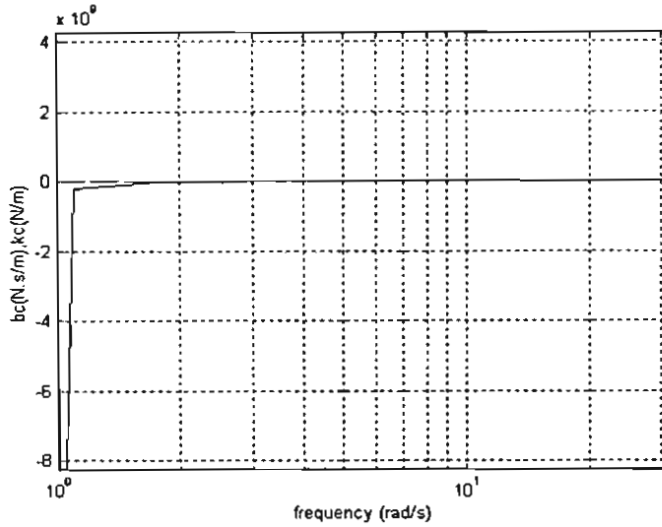


(b)

รูปที่ 10. (a) กราฟแสดงขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง (เส้นทึบ), $|Z_{h_avc}(z)|$:เส้นประยาว และ $|Z_{h_vc}(z)|$:เส้นประสั้น เมื่อสถานะแวดล้อมเสมือนมีค่าพารามิเตอร์ $b_e = 25 \text{ N.s/m}$ และ $k_e = 25000 \text{ N/m}$, (b) คือรูปขยายของรูปที่ 10a โดย $|Z_{h_avc}(z)|$:เส้นประยาว และ $|Z_{h_e}(z)|$ (อิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกกรณีไม่มีข้อต่อเสมือน):เส้นประสั้น



รูปที่ 11. กราฟแสดงค่า $\text{Re}(Z_{h_vc})$:เส้นทึบ, $\text{Re}(Z_{h_avc})$:เส้นประ



รูปที่ 12. กราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ b_c : เส้นทึบ และ k_c : เส้นประ

จากรูปที่ 10 สังเกตได้ว่าระบบที่ใช้ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้มีประสิทธิภาพความเหมือนจริงดีกว่าแบบที่ใช้ข้อต่อเสมือนแบบคงที่เนื่องจาก กราฟของ $|Z_{h_avc}(z)|$ อยู่ในขอบเขตประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริง และอยู่ใกล้กับ $|Z_{h_e}(z)|$ มากกว่า $|Z_{h_vc}(z)|$ และในขณะเดียวกัน รูปที่ 11 แสดงให้เห็นว่าระบบยังคงสามารถรักษาเสถียรภาพได้เนื่องจาก $\text{Re}(Z_{h_avc}) \geq 0$ แต่จากรูปที่ 12 เห็นว่าค่า b_c และ k_c มีค่าสูงมากซึ่งไม่สามารถใช้งานได้จริง โดยส่วนนี้จำเป็นต้องมีการปรับปรุงอย่างใดอย่างหนึ่งตามวิธีต่อไปนี้

วิธีที่ 1: เปลี่ยน ObjF เป็น

$$\text{ObjF}(\text{Re}(Z_{ec}), \text{Im}(Z_{ec})) = (\text{Re}(Z_e) - \text{Re}(Z_{ec}))^2 + (\text{Im}(Z_e) - \text{Im}(Z_{ec}))^2 \quad (34)$$

วิธีที่ 2: เพิ่ม Constraint equation ดังนี้

$$0 \leq b_c \leq \text{Maximum_}b_c \quad (35)$$

$$0 \leq k_c \leq \text{Maximum_}k_c \quad (36)$$

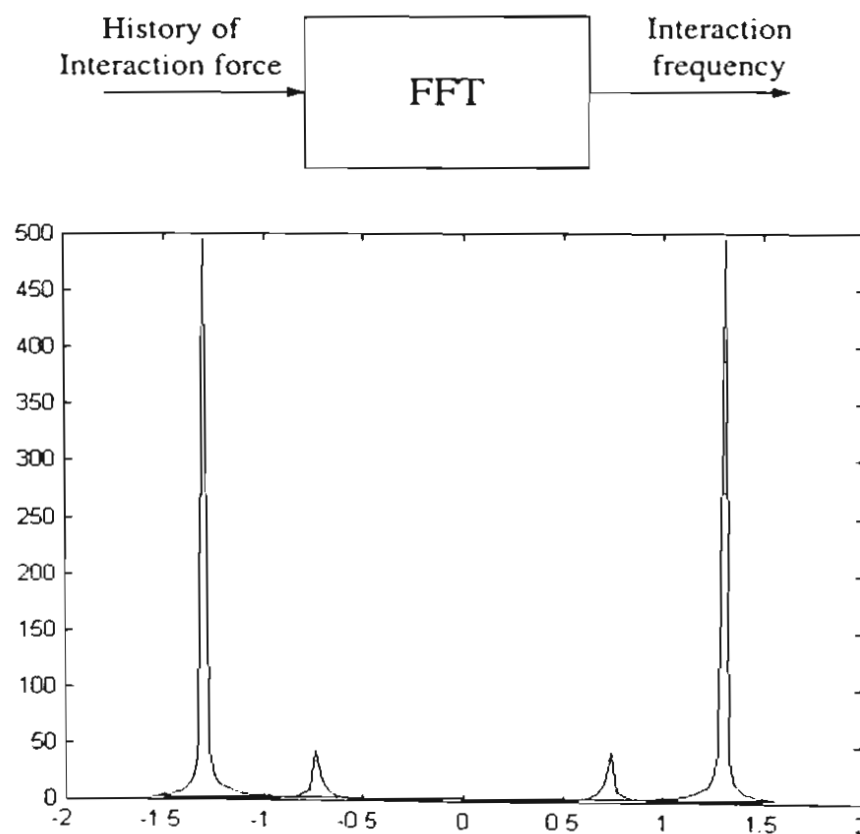
โดย Maximum_ b_c และ Maximum_ k_c คือค่าสูงสุดของค่าความหน่วงและค่าคงที่สปริง ที่อุปกรณ์แฮปติกส์สามารถทำได้ โดยขณะนี้ยังอยู่ในระหว่างการปรับปรุง ในหัวข้อต่อไปกล่าวถึง Interaction Frequency Estimator

5.3 Interaction Frequency Estimator

จากหัวข้อ 6.2 เราได้ค่าพารามิเตอร์ (b_c และ k_c) ขึ้นกับความถี่ (ω) ดังนั้นในการนำค่าเหล่านี้ไปใช้งาน เราจำเป็นต้องทราบ Interaction frequency ก่อน ในการหาค่า ω มีแนวทางสองวิธีคือ

5.3.1 ใช้ Fast Fourier Transform (FFT)

หลักการ คือใช้อุปกรณ์วัดแรงซึ่งติดอยู่ที่ปลายอุปกรณ์แฮปติกส์ในการวัดแรงที่ผู้ใช้กระทำ แล้วนำสัญญาณไปเป็น Input ของโมดูลของ Fast Fourier Transform (FFT) ซึ่งจะได้กราฟในลักษณะดังรูปที่ 13

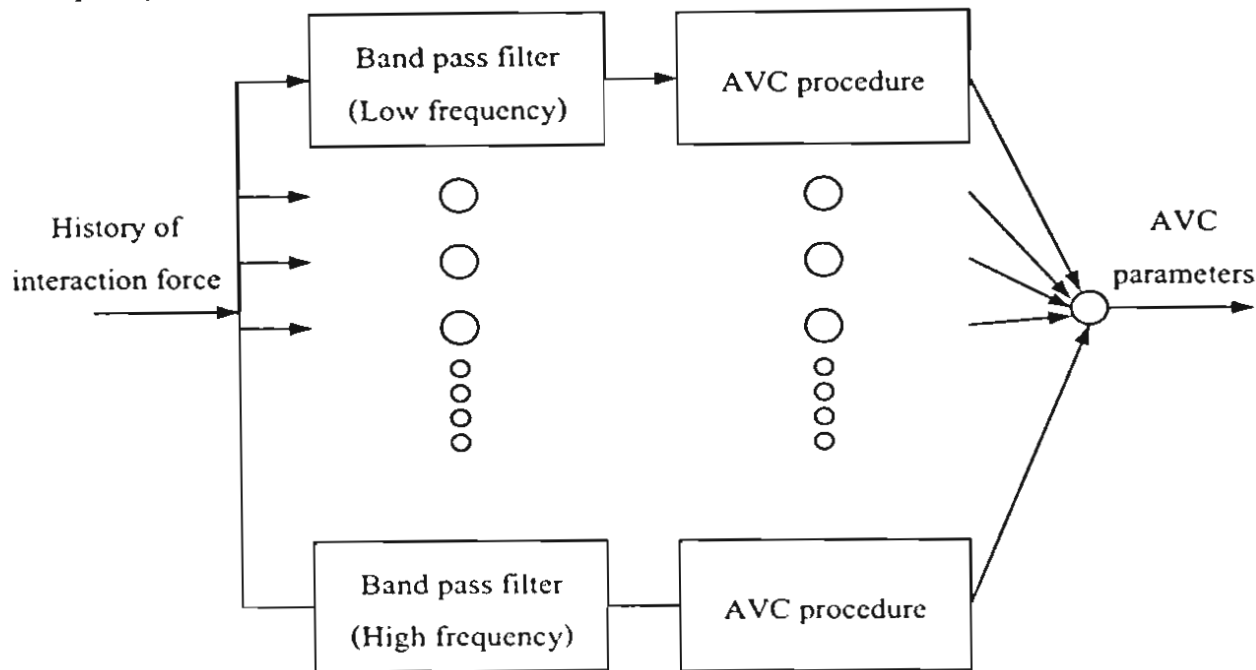


รูปที่ 13. แสดงตัวอย่างกราฟที่ได้จาก Fast Fourier Transform

ข้อดีของการใช้ Fast Fourier Transform คือสามารถหา Interaction Frequency ที่แท้จริงได้โดยดูจาก peak สูงสุด แต่ข้อเสียคือต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากในการประมวลผลซึ่งทำให้ใช้เวลานาน ทำให้ทำ Real Time ยาก

5.3.2 ใช้ Band Pass Filter

หลักการคือใช้ Band Pass Filter ในการกรองดูช่วงสัญญาณที่เป็น Interaction Frequency ซึ่งจะได้เป็นช่วงของ Interaction Frequency ดังแสดงในรูป 14



รูปที่ 14. แสดงลักษณะของการใช้ Band Pass Filter ในการหา interaction frequency

ข้อดีของการใช้ Band Pass Filter คือใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าการใช้ FFT แต่ข้อเสียคือความถี่ที่ได้จะไม่ได้เป็นความถี่แท้จริงแต่เป็นช่วงความถี่

5.4 การทดลอง

การทดลองมีจุดประสงค์ให้เห็นว่าข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้สามารถทำให้ระบบแฮปติกส์มีประสิทธิภาพความเหมือนจริงดีกว่าระบบแฮปติกส์ที่ใช้ข้อต่อเสมือนแบบคงที่ การทดลองทำโดยจำลองกำแพงเสมือนแบบหนึ่งองศาอิสระขึ้นมาสองชุด ชุดหนึ่งมีหกกำแพงวางเรียงกัน โดยกำแพงแต่ละอันมี Stiffness และ Damping ต่างกัน โดยชุดแรกเป็นกำแพงซึ่งไม่มีข้อต่อเสมือนซึ่งเอาไว้ใช้อ้างอิง ส่วนอีกชุดเป็นกำแพงที่ให้ผู้ใช้จับคู่กับกำแพงชุดแรกโดยกำแพงชุดที่สองนี้แบ่งเป็นสองประเภท คือ

- แบบมีข้อต่อเสมือนแบบคงที่
- แบบมีข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้

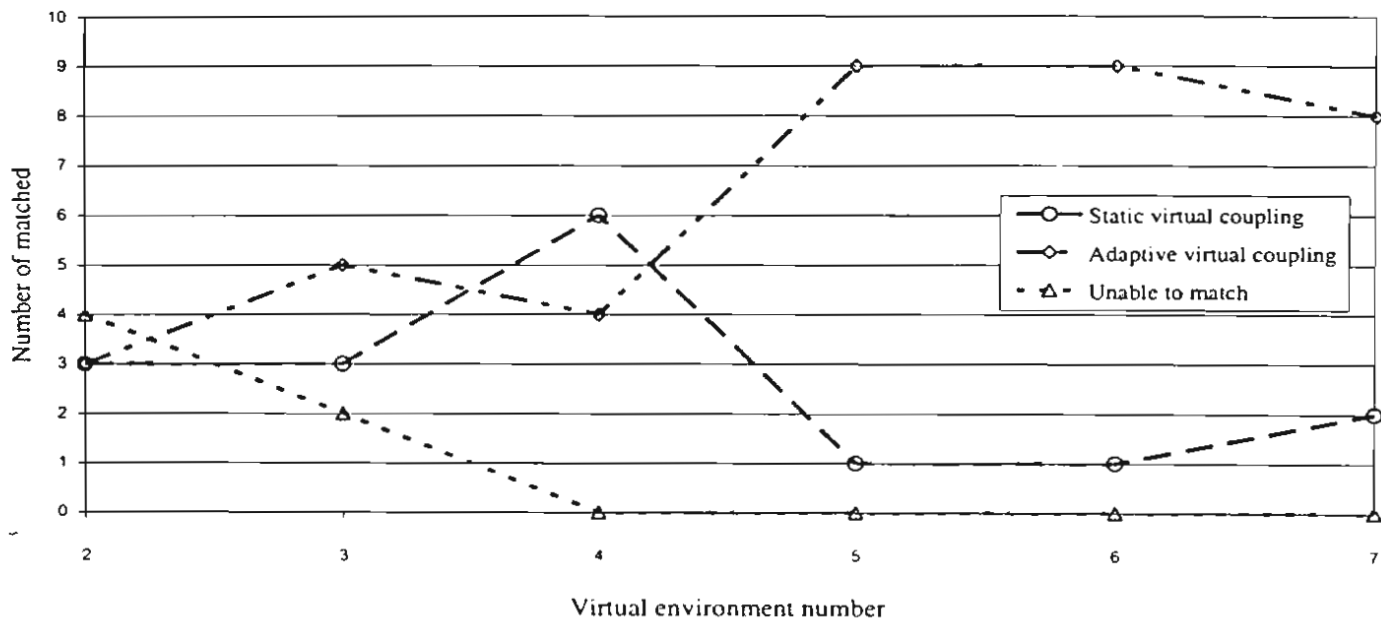
การวัดผลทำโดยการนับคะแนน และเวลาในการจับคู่ (Completion time) ดังตารางที่ 2 แสดงผลการนับคะแนนจับคู่ของกำแพง

VEs	No VC	Static virtual coupling		Adaptive virtual coupling		Unable to match
	Stability	Stability	Realistic performance	Stability	Realistic performance	
	Stable	Stable	Matched with VE	Stable	Matched with VE	
VE 2	10	10	3	10	3	4
VE 3	10	10	3	10	5	2
VE 4	10	10	6	10	4	0
VE 5	4	10	1	10	9	0
VE 6	0	10	1	10	9	0
VE 7	0	10	2	10	8	0

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองการจับคู่ของกำแพงเสมือน

เมื่อนำผลจากตารางที่ 2 มาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ความเหมือนจริงของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้เทียบกับข้อต่อเสมือนคงที่จะได้ดังรูปที่ 15

Evaluation on realistic performance of haptic interface with adaptive virtual coupling



รูปที่ 15 แสดงค่าความจริงของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้เทียบกับข้อต่อเสมือนแบบคงที่

5.5 วิจัยผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้

จากตารางที่ 2 และกราฟรูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่าผลจากความรู้สึกเหมือนจริงของผู้ใช้เมื่อใช้ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้สามารถจับคู่ได้มากกว่าหรือมีความเหมือนจริงมากกว่าผลจากการใช้ข้อต่อเสมือนแบบคงที่ โดยเฉพาะสภาพแวดล้อมที่มีค่าความความแข็งเพิ่มขึ้น (Stiffness) ข้อต่อเสมือนแบบคงค่าความจริงจะลดลง แต่ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้จะพยายามปรับค่าพารามิเตอร์ให้มีความเหมือนจริงมากที่สุด โดยยังคงความมีเสถียรภาพไว้ในการใช้งาน

5.6 สรุป

ส่วนดีข้อต่อเสมือนคือช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบแอปติกส์ แต่ข้อเสียคือทำให้ความเหมือนจริงลดลง เมื่อสภาพแวดล้อมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้นเป้าหมายของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้คือ ต้องทำให้อิมพีแดนซ์ของสภาวะแวดล้อมเสมือนที่มีข้อต่อเสมือนมีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสภาวะแวดล้อมเสมือน และระบบต้องสามารถรักษาเสถียรภาพ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ช่วยปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพของความเหมือนจริง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแอปติกส์

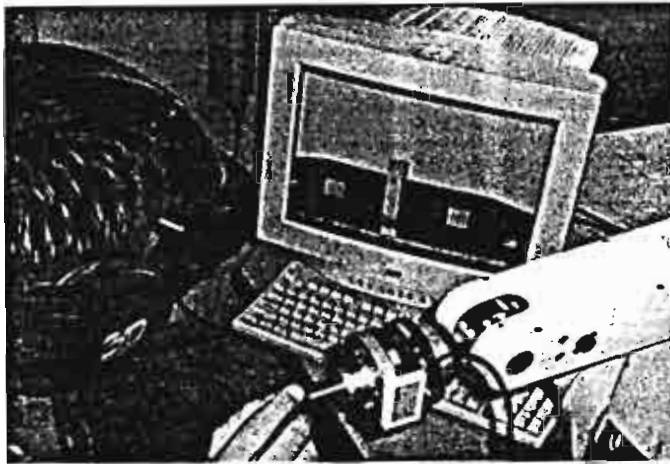
6. การนำระบบความจริงเสมือนไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงาน

ในการถ่ายทอดทักษะโดยตรงจากผู้เชี่ยวชาญไปสู่ตัวผู้ฝึกหัด เช่น การผ่าตัด การเล่นกีฬา เป็นต้น นั้นมีความยากลำบากในการที่จะถ่ายทอดให้ได้อย่างถูกต้อง เพราะทักษะเหล่านี้ประกอบไปด้วยสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้เช่น ขนาดและทิศทางของแรง เป็นต้น จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาระบบซึ่งสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการถ่ายทอดทักษะ พร้อมทั้งสามารถถ่ายทอดทั้งแรง ทิศทาง และภาพที่สอดคล้องกัน เพิ่มความสามารถในการถ่ายทอดทักษะ เช่น ทักษะการประกอบชิ้นงาน เป็นต้น

ระบบความจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) เป็นระบบซึ่งสามารถสร้างภาพเสมือนที่ทำให้ผู้ใช้รู้สึกว่าคุณอยู่ในโลกเสมือน แต่ผู้ใช้ระบบ VR ก็ยังไม่สามารถรู้สึกถึงแรงตอบสนองกลับขณะที่มีการปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมเสมือนนั้น โดยในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานในระบบความจริงเสมือนประเภทที่ใช้หุ่นยนต์เป็นตัวขับเคลื่อนการเคลื่อนที่ จะประกอบด้วยส่วนสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้กับอุปกรณ์ถ่ายทอดทักษะ ส่วนการจำลองทางด้านฟิสิกส์ในการเคลื่อนที่ และส่วนการควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามการคำนวณทางด้านฟิสิกส์ จึงจะทำให้ผู้ใช้มีความรู้สึกที่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมเสมือนที่ต้องการ แต่ปัญหาที่พบก็คือ ระบบไม่สามารถถ่ายทอดทิศทางที่ควรเคลื่อนที่ไป ทำให้ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะไม่ทราบถึงเส้นทางเดินที่ควรเคลื่อนที่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำกราฟฟิกเส้นทางค้นแบบ รวมถึงแรงเสมือนที่ดึงเข้าสู่เส้นทางค้นแบบ มาช่วยในการถ่ายทอดทักษะ เพื่อให้ผู้ที่ได้รับการถ่ายทอดทักษะมีพัฒนาการที่ถูกต้องและทำงานได้รวดเร็วขึ้น

6.1 ลักษณะการทำงานของระบบ

งานวิจัยนี้เป็นการนำระบบความจริงเสมือนแบบมีแรงป้อนกลับ มาช่วยในการพัฒนาการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงาน เพื่อให้ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดสามารถรับรู้ได้ทั้งแรงตอบสนอง ภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุเสมือน และกราฟฟิกเส้นทางค้นแบบการเคลื่อนที่ โดยลักษณะของระบบที่พัฒนาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 16

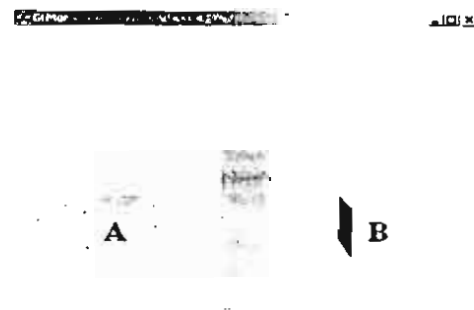


รูปที่ 16 รูปแสดงระบบที่พัฒนา

จากรูปที่ 16 จะได้ว่า ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือนที่ต้องการนำไปประกอบผ่านการเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำของผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะ จะถูกส่งไปอัปเดตยังส่วนแสดงผล เพื่อให้กราฟิกของสภาพแวดล้อมที่จำลองขึ้นเกิดการเคลื่อนที่สอดคล้องกับการกระทำ โดยการแสดงผลจะแสดงผลผ่านจอภาพแบบสวมหัว เพิ่มความสมจริงให้กับผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะ ซึ่งในระบบการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานที่สร้างขึ้นจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ คือ

6.1.1 ส่วนสภาพแวดล้อมเสมือนและการจำลองทางด้านฟิสิกส์

ส่วนสภาพแวดล้อมเสมือน เป็นส่วนที่ใช้ในการแสดงผลให้กับผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะ โดยกราฟิก 3 มิติที่จำลองขึ้น จะใช้ชุดคำสั่ง OpenGL ที่ใช้ Visual C++ ในการพัฒนา ซึ่งในงานวิจัยนี้วัตถุเสมือนจะถูกจำลองเป็นกล่อง และสภาพแวดล้อมเสมือนจะถูกจำลองเป็นพื้นและผนัง



รูปที่ 17 แสดงภาพเริ่มต้น



รูปที่ 18 แสดงภาพขั้นตอนสุดท้าย

จากรูปที่ 17 และรูปที่ 18 แสดงกราฟิกของระบบการประกอบชิ้นงานที่จำลองขึ้น โดยตำแหน่งของกล่อง A จะเป็นตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ และตำแหน่งของกล่อง B จะเป็นตำแหน่งของจุดที่ต้องการนำกล่อง A ไปวางซ้อนทับ

นอกจากนั้นส่วนสภาพแวดล้อมเสมือนที่จำลองขึ้น ยังเป็นส่วนที่ใช้ในการแสดงผลทางด้านกราฟิกให้ผู้ใช้รู้สึกคล้ายตามกับงานที่กำลังกระทำด้วย เนื่องจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ของภาพกราฟิกที่เกิดขึ้น เป็นตำแหน่งที่ได้จากการนำแรงที่ผู้ใช้กระทำผ่านปลายแขนหุ่นยนต์เข้าไปคำนวณผ่านการจำลองทางด้านฟิสิกส์ เพื่อให้การเคลื่อนที่เป็นไปตามกฎของธรรมชาติหรือมีความเหมือนจริงมากที่สุด เช่น การที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้เมื่อเกิดการชนกันระหว่างสองวัตถุ การดกอย่างอิสระของวัตถุ หรือการเคลื่อนที่ของวัตถุเมื่อมีแรงกระทำ เป็นต้น จึงทำให้ภาพที่มองเห็นกับการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์ที่สมจริง โดยการประยุกต์ใช้การจำลองทางด้านฟิสิกส์ที่ใช้ในงานวิจัย มีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

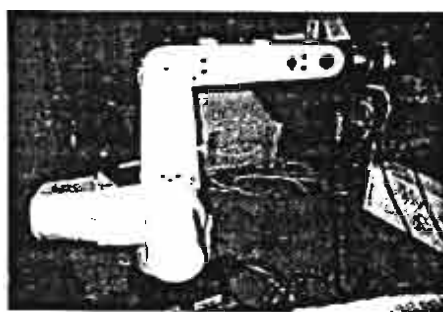
1. Equation of Box Model เป็นการกำหนดรูปทรง ความกว้าง ความยาว และความสูงของกล่องที่ต้องการจำลอง เพื่อให้กล่องจำลองมีคุณสมบัติเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ทะลุผ่านได้
2. Equation of Floor and Wall Constraint เป็นการกำหนดรูปทรง ความกว้าง ความยาว และความสูงของพื้นและกำแพงที่ต้องการจำลอง เพื่อกำหนดขอบเขตบริเวณที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านได้ (เวลาแตะพื้นและผนัง)
3. Collision Detection ใช้ในการตรวจสอบการสภาวะการชนและตำแหน่งการชนกันระหว่างวัตถุ เพื่อกำหนดพฤติกรรมของวัตถุที่จะเกิดขึ้น
4. Equation of Motion Constraint เป็นการจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัตถุทางด้านพลศาสตร์ เช่น ผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทาน และความยืดหยุ่นของวัตถุ

5. Gravity Modeling เป็นการจำลองผลที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกกระทำกับวัตถุ เพื่อให้วัตถุเคลื่อนที่ตกลงมาด้วยความเร่งที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก
6. Inertia Modeling เป็นการจำลองผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวัตถุอันเนื่องมาจากน้ำหนัก เช่นการเคลื่อนที่ของวัตถุจากสภาวะหยุดนิ่ง และการเคลื่อนที่อิสระของวัตถุหลังจากนำแรงที่กระทำกับวัตถุออก

โดยในการถ่ายทอดทักษะให้กับผู้ที่เข้ารับการฝึกฝนกลุ่มที่มีแรงดึงกลับเข้าหาเส้นทางเดินของผู้ชำนาญ ขณะออกแรงกระทำกับระบบ จะมีการสร้างแรงเสมือนให้กับผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะ โดยแรงเสมือนที่สร้างขึ้น คำนวณมาจากการหาระยะที่สั้นที่สุดระหว่างตำแหน่งขณะนั้นของผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดกับเส้นทางต้นแบบที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญ แล้วนำเข้าไปคำนวณหาแรงจากแบบจำลองของสปริงและแดมเปอร์ เพื่อดึงมือผู้ที่เข้ารับการฝึกฝนให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามเส้นทางของผู้เชี่ยวชาญ

6.1.2 ส่วนหุ่นยนต์

เป็นส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามการคำนวณทางด้านฟิสิกส์ เพื่อใช้เป็นตัวขับเคลื่อนวัตถุเสมือนที่ต้องการนำไปประกอบ โดยแขนกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ แขนกล CRS A255 [11] ที่มี 5 องศาอิสระ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 19

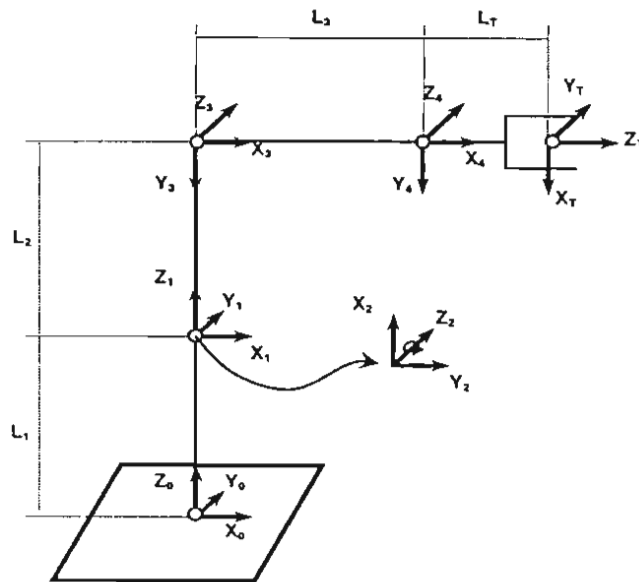


รูปที่ 19 รูปแสดงหุ่นยนต์ CRS ที่ใช้ในงานวิจัย

โดยในการควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณทางด้านฟิสิกส์นั้น จะใช้สมการไคเนเมติกส์ (Kinematics) [14][15] ซึ่งเป็นการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบแกนของหุ่นยนต์กับระบบแกนในระนาบ xyz เพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

6.1.2.1 สมการฟอร์เวิร์ดไคเนเมติกส์ (Forward Kinematics)

เป็นสมการที่แปลงความสัมพันธ์จากระบบแกนของหุ่นยนต์ไปสู่ระบบแกนในระนาบ xyz สำหรับการหาสมการฟอร์เวิร์ดไคเนเมติกส์ นั้น จะใช้นิยามของ Denavit-Hartenberg โดยการตั้งแกนในตำแหน่งต่างๆ ของข้อต่อหุ่นยนต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 แสดงการตั้งแกนของหุ่นยนต์ CRS

จากหลักการของ Denavit-Hartenberg สามารถสร้างตารางแสดงความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 3

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	L_1	θ_1
2	-90°	0	0	θ_2
3	0	L_2	0	θ_3
4	0	L_3	0	θ_4
T	90°	L_T	0	θ_5

ตารางที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อต่าง

จากตารางที่ 3 สามารถหาสมการฟอร์เวิร์ดไคเนเมติกส์ ในทิศทางแกน x y และ z ได้ดังสมการที่ 37

$$\begin{aligned}
Px &= \cos \theta_1 (\cos \theta_2 L_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3) L_3 + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) L_T) \\
Py &= \sin \theta_1 (\cos \theta_2 L_2 + \cos(\theta_2 + \theta_3) L_3 + \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) L_T) \\
Pz &= L_1 - \sin \theta_2 L_2 - \sin(\theta_2 + \theta_3) L_3 - \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) L_T
\end{aligned} \tag{37}$$

และ Rotation Matrix จากปลายแขนหุ่นยนต์เปรียบเทียบกับฐานของหุ่นยนต์ได้ดังสมการที่ 38

$${}^0R_T = \begin{bmatrix} c_1 c_{234} c_5 - s_1 s_5 & -c_5 s_1 - c_1 c_{234} s_5 & c_1 s_{234} \\ c_{234} c_5 s_1 + c_1 s_5 & c_1 c_5 - c_{234} s_1 s_5 & s_1 s_{234} \\ -c_5 s_{234} & s_{234} s_5 & c_{234} \end{bmatrix} \tag{38}$$

ให้

$$\begin{aligned}
c_n &= \cos(\theta_n) \\
C_{123\dots n} &= \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \dots + \theta_n)
\end{aligned}$$

จากสมการที่ 37 และ 38 สามารถเขียนในรูปของทราานฟอร์มเมชันเมตริกซ์

(Transformation Matrix) ได้ดังสมการที่ 39

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} c_1 c_{234} c_5 - s_1 s_5 & -c_5 s_1 - c_1 c_{234} s_5 & c_1 s_{234} & c_1 (c_2 L_2 + c_{23} L_3 + c_{234} L_T) \\ c_{234} c_5 s_1 + c_1 s_5 & c_1 c_5 - c_{234} s_1 s_5 & s_1 s_{234} & s_1 (c_2 L_2 + c_{23} L_3 + c_{234} L_T) \\ -c_5 s_{234} & s_{234} s_5 & c_{234} & L_1 - s_2 L_2 - s_{23} L_3 - s_{234} L_T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{39}$$

6.1.2.2 สมการอินเวอร์ดไคเนเมติกส์ (Inverse Kinematics)

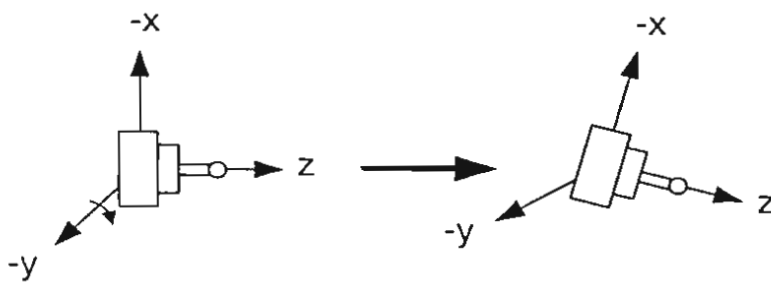
เป็นการแปลงความสัมพันธ์จากระบบแกนระนาบ xyz ไปสู่ระบบแกนของหุ่นยนต์ ซึ่งก็คือ ส่วนกลับของสมการฟอร์เวิร์ดไคเนเมติกส์ โดยสมการอินเวอร์ดไคเนเมติกส์จะใช้ในการควบคุม หุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการในระนาบแกน xyz ได้อย่างถูกต้อง สมการอินเวอร์ด ไคเนเมติกส์ของหุ่นยนต์ CRS สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 40

$$\begin{aligned}
q_1 &= a \tan 2(Py, Px) \\
q_{234} &= a \tan 2({}_5^1a_X, {}_5^1a_Z) \\
q_5 &= a \tan 2({}_5^1n_Y, {}_5^1o_Y) \\
q_2 &= a \tan 2(s_2, c_2) \\
(i_2 + j_2)s_2^2 - 2kjs_2 + (k_2 - i_2) &= 0 \\
(i_2 + j_2)c_2^2 - 2kic_2 + (k_2 - j_2) &= 0 \\
i &= {}_5^1Px - c_{234}L_T, \quad j = -s_{234}L_T - {}_5^1Pz, \quad k = \frac{L_2^2 + i_2 + j_2 - L_3^2}{2L_2} \\
q_{34} &= q_{234} - q_2 \\
q_3 &= a \tan 2\left(\frac{-s_2 {}_5^1Px - c_2 {}_5^1Pz - s_{34}L_T}{L_3}, \frac{c_2 {}_5^1Px - s_2 {}_5^1Pz - c_{34}L_T - L_2}{L_3}\right) \\
q_4 &= q_{234} - q_2 - q_3
\end{aligned} \tag{40}$$

โดย q_n เป็นมุมการหมุนของข้อต่อที่ n

6.1.3 การชดเชยค่าแรงจากอุปกรณ์วัดแรงและแรงบิด (Compensation Force Sensor)

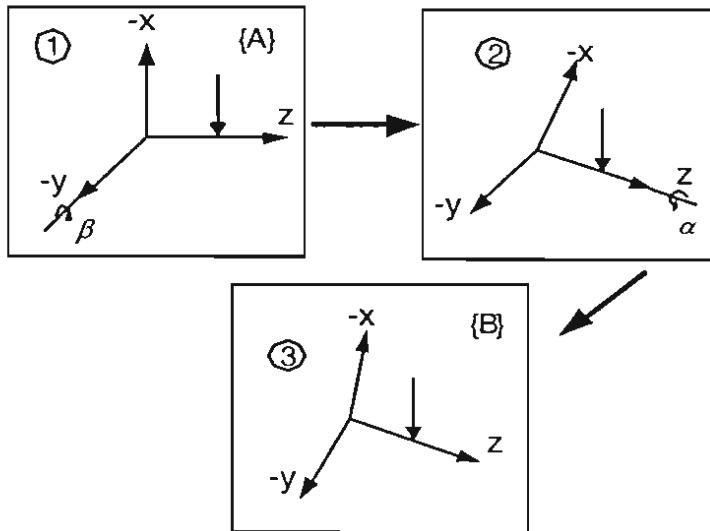
อุปกรณ์วัดแรงและแรงบิด 6 ทิศทาง(ATI-FT sensor) เริ่มต้นก่อนใช้งานต้องทำการตั้งค่าเริ่มต้นให้เท่ากับศูนย์ และเมื่อทำการเคลื่อนที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 21 ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของค่าที่วัดได้จากการวัดแรงและแรงบิดขึ้น อันเนื่องมาจากน้ำหนักของตัวเซ็นเซอร์เองหรือจากเครื่องมือที่นำมาติดกับเซ็นเซอร์ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาเมตริกซ์ชดเชย (Compensation matrix) เพื่อใช้ในการคำนวณการชดเชยแก้ค่าแรงและแรงบิดที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์วัดแรงในการเคลื่อนที่ ณ ตำแหน่งต่างๆ



รูปที่ 21 แสดงการเปลี่ยนทิศทางของอุปกรณ์วัดแรง

เมตริกซ์ชดเชยสามารถคำนวณได้จากแรงที่กระทำกับเซ็นเซอร์วัดแรงและแรงบิด และระยะทางระหว่างตำแหน่งที่แรงกระทำเทียบกับตำแหน่งของเซ็นเซอร์ ซึ่งมีด้วยกัน 2 แรงคือ แรงจากน้ำหนักของตัวเซ็นเซอร์ และแรงจากน้ำหนักของอุปกรณ์เครื่องมือที่นำมาติด ในการทดลองทำ

การติดเซ็นเซอร์วัดแรงที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ โดยมีทิศทางของเฟรมดังแสดงในรูปที่ 22 ภาพที่ 1 ถึงภาพที่ 3 เป็นการเปลี่ยนแปลงทิศทางที่เกิดขึ้น โดยภาพที่ 1 เป็นการหมุนรอบแกน y และภาพที่ 2 เป็นการหมุนรอบแกน z ของเซ็นเซอร์วัดแรงและแรงบิด ซึ่งสามารถหาเมตริกซ์การหมุนของแกนได้จากหลักการของออยเลอร์ ดังสมการที่ 41



รูปที่ 22 แสดงการหมุนของแกนเซ็นเซอร์วัดแรง

$$\begin{aligned}
 R_{y'z'} = {}^A R &= \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\alpha & -s\alpha & 0 \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c\beta c\alpha & -c\beta s\alpha & s\beta \\ s\alpha & c\alpha & 0 \\ -s\beta c\alpha & s\beta s\alpha & c\beta \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{41}$$

แรงที่กระทำกับเซ็นเซอร์วัดแรงและแรงบิดเทียบกับเฟรม A เขียนได้ในรูปเมตริกซ์ ในสมการที่ 42

$${}^A F = \begin{bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{42}$$