



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 ฐิตพล 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 และได้นำองค์ความรู้ที่ได้ศึกษานามาสังสร้างระบบความจริงเสมือน (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

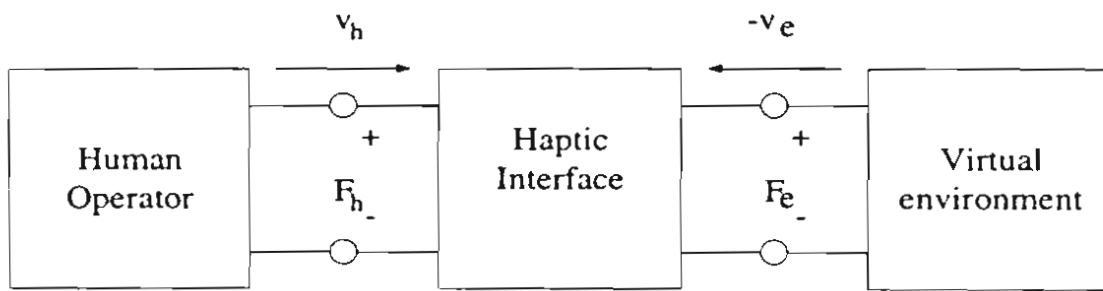
ชื่อว่า ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง (Realistic Performance Boundaries) โดยขอบเขตดังกล่าวสามารถใช้วัดประสิทธิภาพระบบแอปติกส์ ซึ่งสถานะแวดล้อมเสมือนมีการเคลื่อนที่หรืออิมพีแดนซ์อยู่ระหว่างการเคลื่อนที่สองแบบข้างต้น โดยทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับอุปกรณ์ High bandwidth force display [10] เมื่อหาขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริงแล้วพบว่าการใช้ข้อต่อเสมือนในระบบแอปติ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

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

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

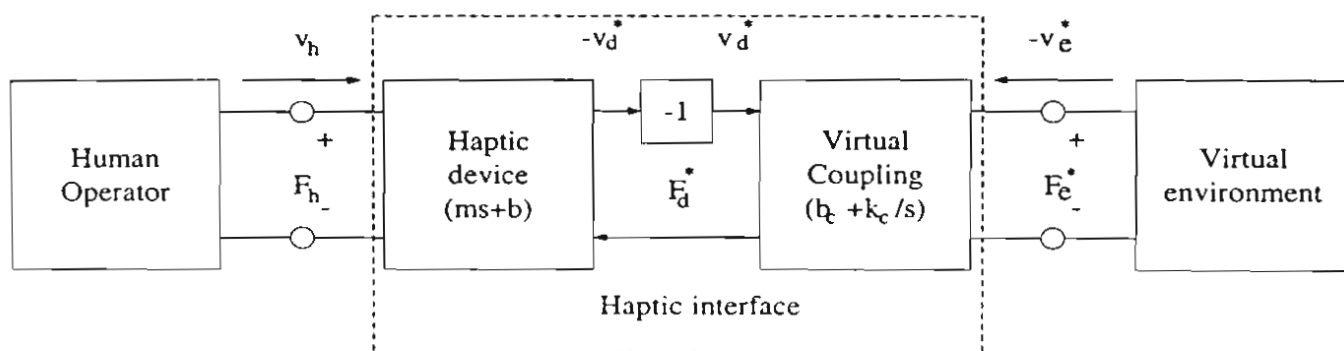
$$\text{Re}(p_{11}) \geq 0, \text{Re}(p_{22}) \geq 0 \quad (2)$$

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

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

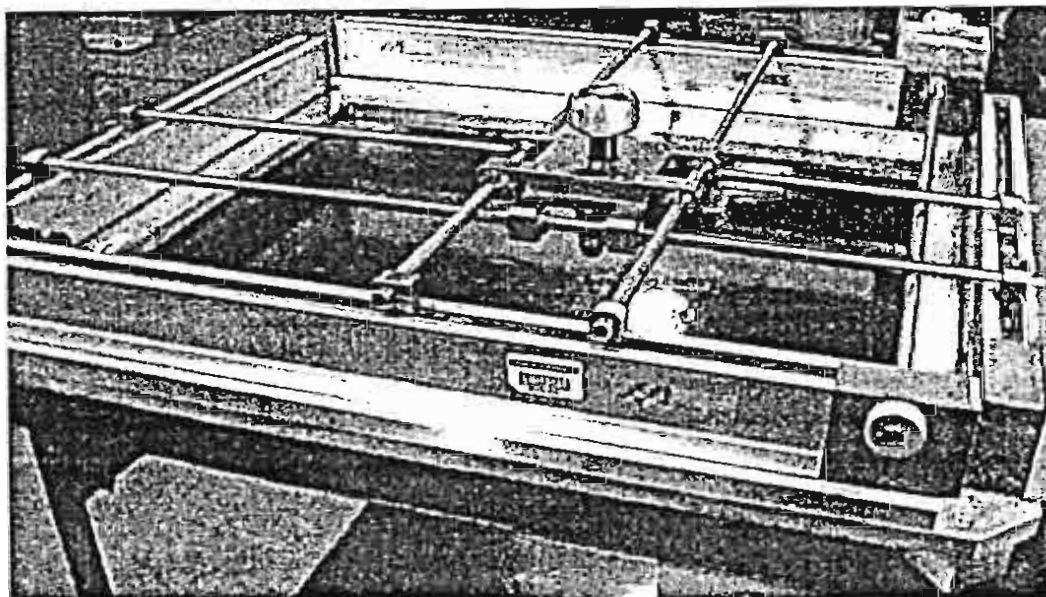
$$\text{Re}(Z_d(z)) \geq 0, \text{Re}(1/Z_c(z)) \geq 0 \quad (9)$$

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

ในหัวข้อ 4.3 กล่าวถึงการวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์ High bandwidth force display (HBFD) ซึ่งเป็นอุปกรณ์แฮปติกส์ที่ใช้ในการทดลอง

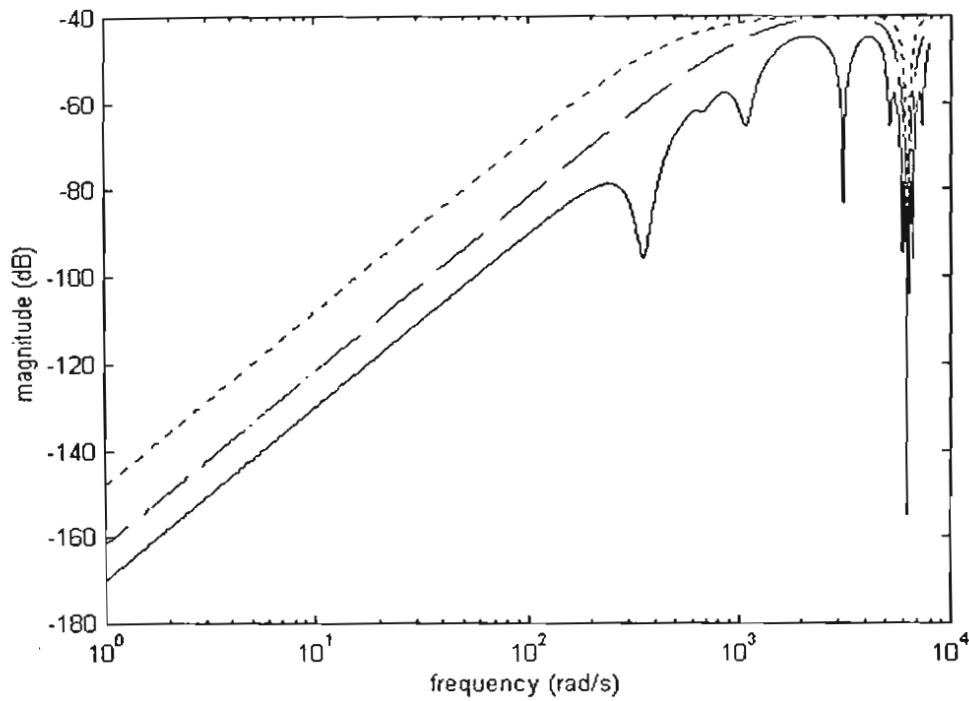
3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของอุปกรณ์ High bandwidth force display

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 ซึ่งเป็นความถี่ที่สูงพอสำหรับการสร้างแรงป้อนกลับให้ผู้ใช้ 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 ความเสียดทานแบบไม่เชิงเส้น เป็นต้น 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

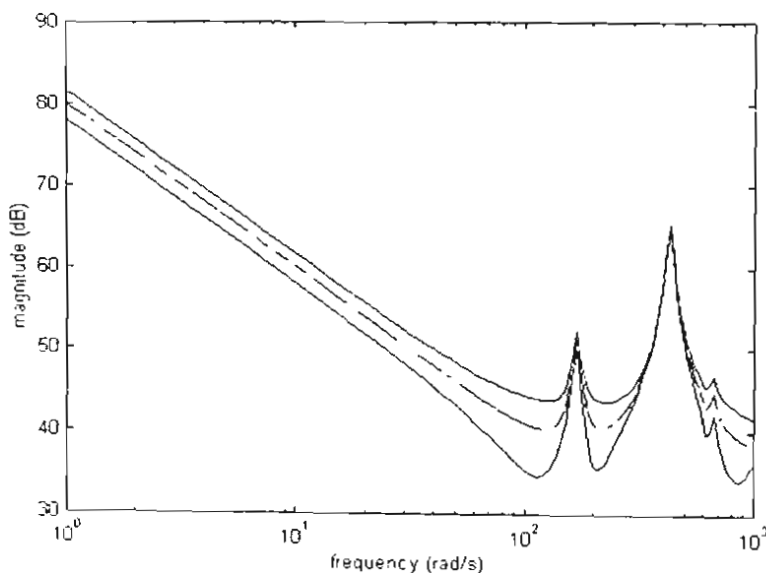
การเคลื่อนที่แบบบังคับ (Constraint Motion)

ระบบแฮปติกส์ที่จำลองการเคลื่อนที่แบบบังคับจะเหมือนจริง ก็ต่อเมื่อขณะที่ผู้ใช้ ปฏิสัมพันธ์กับระบบแฮปติกส์ที่จำลองการเคลื่อนที่แบบบังคับ แล้วผู้ใช้มีการเคลื่อนที่น้อยกว่าการ เคลื่อนที่น้อยสุดที่ผู้ใช้รับรู้ได้

อย่างไรก็ตาม ความเหมือนจริงแบบไฮเดอลอิกวิวาเลนซ์ นิยามเฉพาะการเคลื่อนที่สอง แบบที่กล่าวมาข้างต้นเท่านั้น แต่ในความเป็นจริงสถานะแวดล้อมเสมือนมีลักษณะการเคลื่อนที่หรือ อิมพีแดนซ์หลากหลายขึ้นกับอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือน ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงเสนอ วิธีการวัดประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงของระบบแฮปติกส์แบบใหม่ โดยให้ชื่อว่า ขอบเขต ประสิทธิภาพความเหมือนจริง (Realistic Performance Boundaries) ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัด 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 เส้นประคืออิมพีแดนซ์ที่ผู้รู้สึกเมื่อกระทำกับสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิง ส่วนเส้นทึบที่อยู่ด้านบน และล่างของเส้นประคือขอบเขตบน และขอบเขตล่างของอิมพีแดนซ์ที่ผู้รู้สึก โดยถ้าอิมพีแดนซ์ที่อุปกรณ์แอปติกส์สร้างอยู่ในขอบเขตดังกล่าว เราสามารถสรุปได้ว่าผู้รู้สึกเหมือนกำลังปฏิสัมพันธ์กับสถานะแวดล้อมเสมือนอ้างอิง

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

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

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

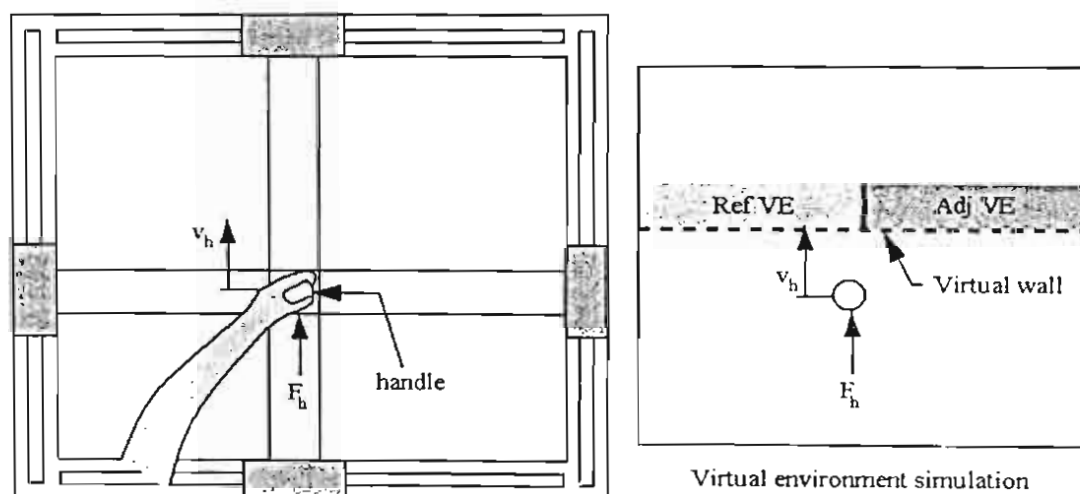
ขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริงสามารถหาได้จากสมการ (13) โดยแทนค่าอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือนด้วยสมการ (16) และ (17)

4.3 ผลการทดลองหาขอบเขตประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริง

ในการทดลองโดยให้ผู้ใช้นิ้วทำท่าการทดลองกับอุปกรณ์ 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



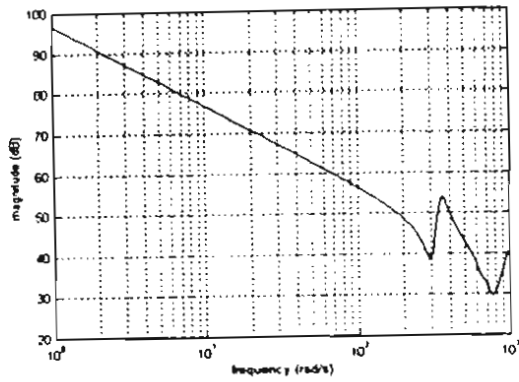
รูปที่ 6 การจำลองสภาวะแวดล้อมเสมือนแบบกำแพงเสมือนโดย Ref VE และ Adj VE คือสภาวะแวดล้อมอ้างอิงและสภาวะแวดล้อมเสมือนที่ปรับค่าได้ตามลำดับ

เมื่อทำการทดลองตามขั้นตอนที่กล่าวในหัวข้อ 3.2 และนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ได้ผลออกมาดังแสดงในตารางที่ 1

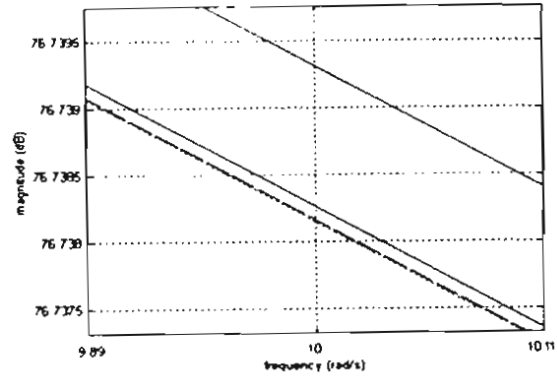
VE	Parameter s	Ref VE	LCI	UCI
VE 1	k_e	10	10.808	19.02
	b_e	0.1	0.0356	1.3335
VE 2	k_e	1000	944.85	1017.2
	b_e	1	1.2404	1.5316
VE 3	k_e	10000	8979.9	9954.1
	b_e	10	8.188	13.146
VE 4	k_e	25000	23316	24968
	b_e	25	21.447	27.549
VE 5	k_e	50000	39498	47829
	b_e	50	79.933	112.34

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

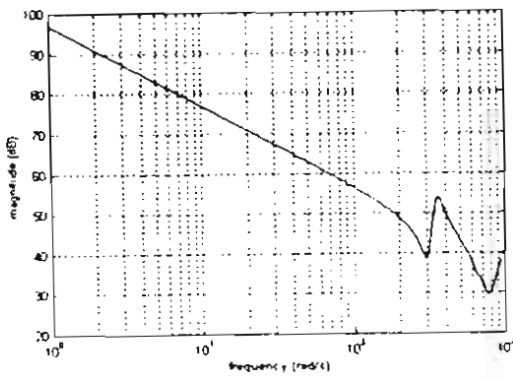
จากตารางที่ 1 สามารถแสดงกราฟขอบเขตประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงของสภาวะแวดล้อมเสมือนสามสภาวะแวดล้อมเสมือนซึ่งมีความแตกต่างกันชัดเจนได้ดังรูปที่ 7



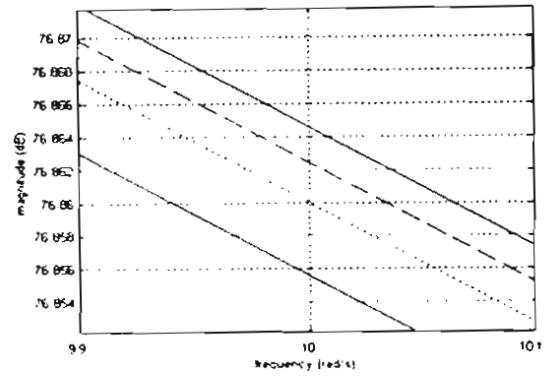
(a)



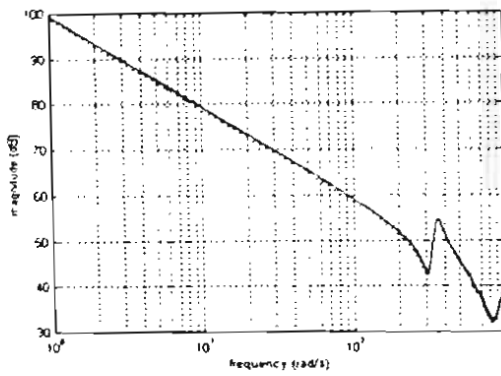
(b)



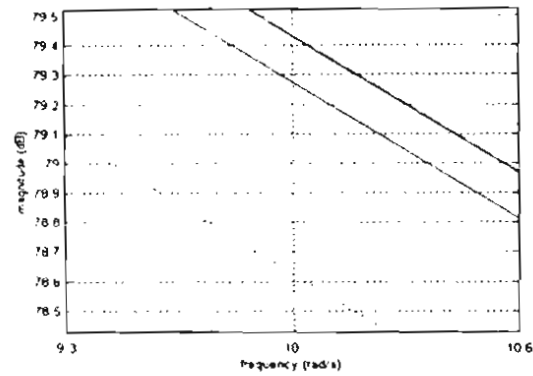
(c)



(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 วิจัยผลการทดลองหาขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง

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

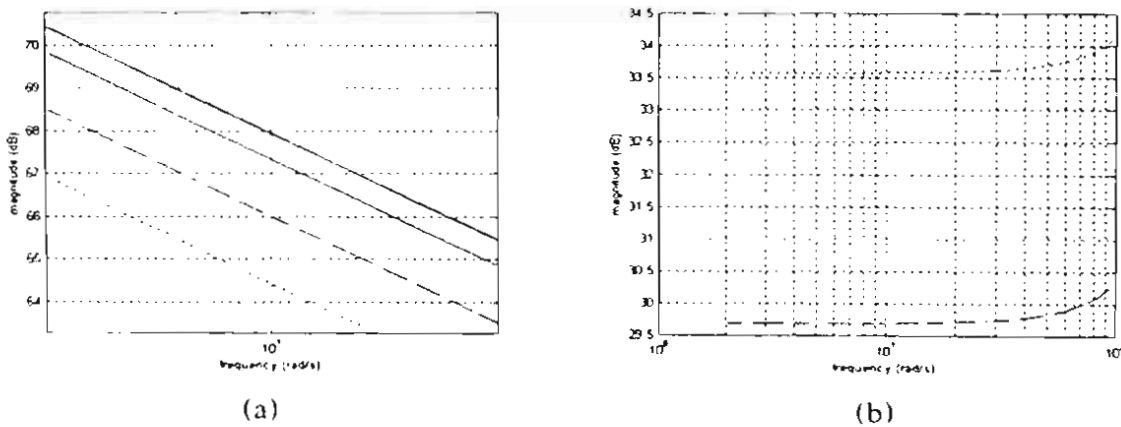
เราสามารถสรุปได้ว่า $Z_{h_vc}(z)$ ของระบบแฮปติกส์ที่ควบคุมแบบอิมพีแดนซ์จะมีค่าต่ำกว่า $Z_h(z)$ เสมอซึ่งพบว่าในบางกรณีมีผลต่อความเหมือนจริง ข้อต่อเสมือนที่ออกแบบตามหลักการด้านเสถียรภาพ เหมาะสมกับสถานะแวดล้อมเสมือนที่มีค่าอิมพีแดนซ์สูงเท่านั้น แต่ไม่เหมาะสมกับสถานะแวดล้อมเสมือนอื่น ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงข้อต่อเสมือนให้สามารถปรับค่าตัวเองให้สอดคล้องกับสถานะแวด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

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 เพราะค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนแบบคงที่คำนวณเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพเมื่ออุปกรณ์แอสปติกส์และสถานะแวดล้อมเสมือนเป็นระบบที่แพสซีฟ (Passive) โดยไม่คำนึงถึงอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือน แต่ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าพารามิเตอร์ได้ที่เสนอนี้คำนึงถึงอิมพีแดนซ์ของสถานะแวดล้อมเสมือนด้วย ซึ่งทำให้สามารถถ่วงดุลระหว่างประสิทธิภาพด้านความเหมือนจริงและเสถียรภาพของระบบ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 8

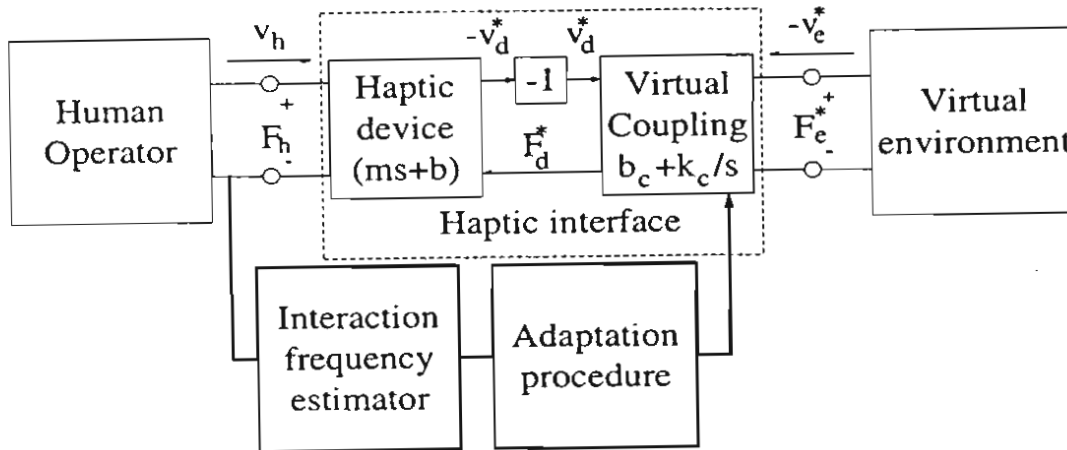


รูปที่ 8 (a) กราฟแสดงอิมพีแดนซ์ที่ผู้ใช้รู้สึกเปรียบเทียบกันระหว่าง กรณีกระทำกับอุปกรณ์แอสปติกส์ที่มีข้อต่อเสมือนแบบคงที่ ($|Z_{h_vc}(z)|$): เส้นประสั้น และกรณีกระทำกับอุปกรณ์แอสปติกส์ที่มีข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ ($|Z_{h_avc}(z)|$): เส้นประยาว (b) แสดง กราฟแสดง $\text{Re}(Z_{h_vc}(z))$ เปรียบเทียบกันระหว่าง 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
$$Z_{ec} = \frac{Z_e Z_{avc}}{Z_e + Z_{avc}} \quad (22)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

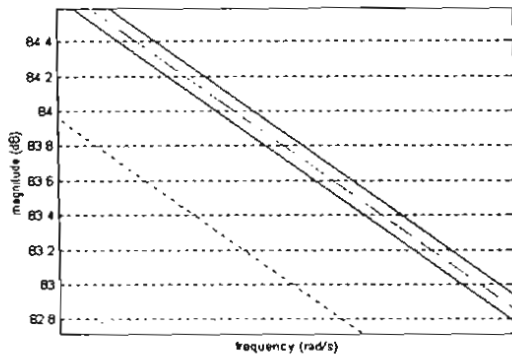
$$X_{i+1} = X_i - J(X_i)^{-1} g(X_i) \quad (32)$$

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

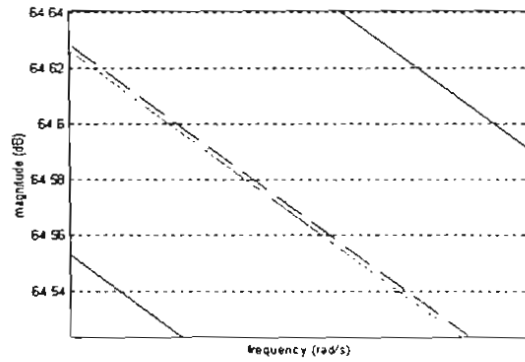
ขั้นที่ 6: หาความผิดพลาด (error) $\text{Err} = \text{Max}|g(X_{i+1})| \quad (33)$

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

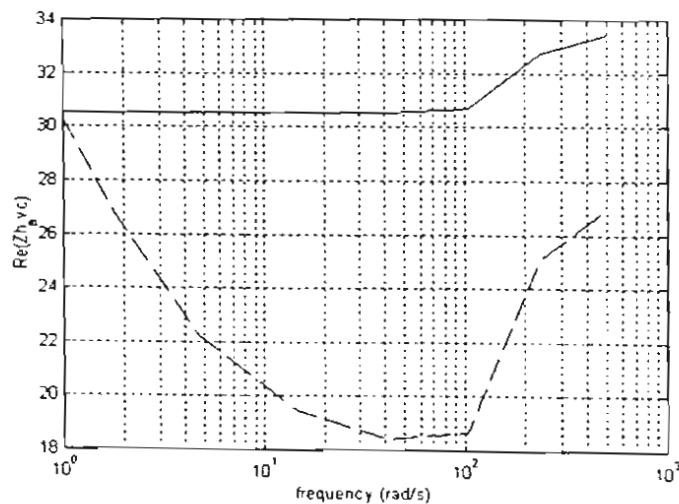


(a)

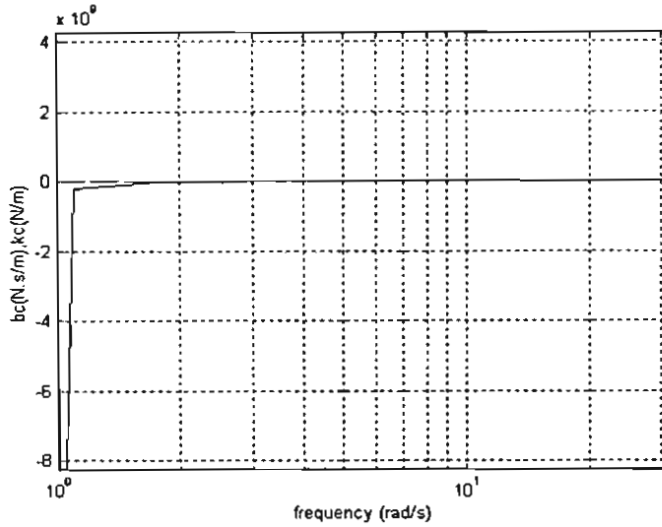


(b)

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

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

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

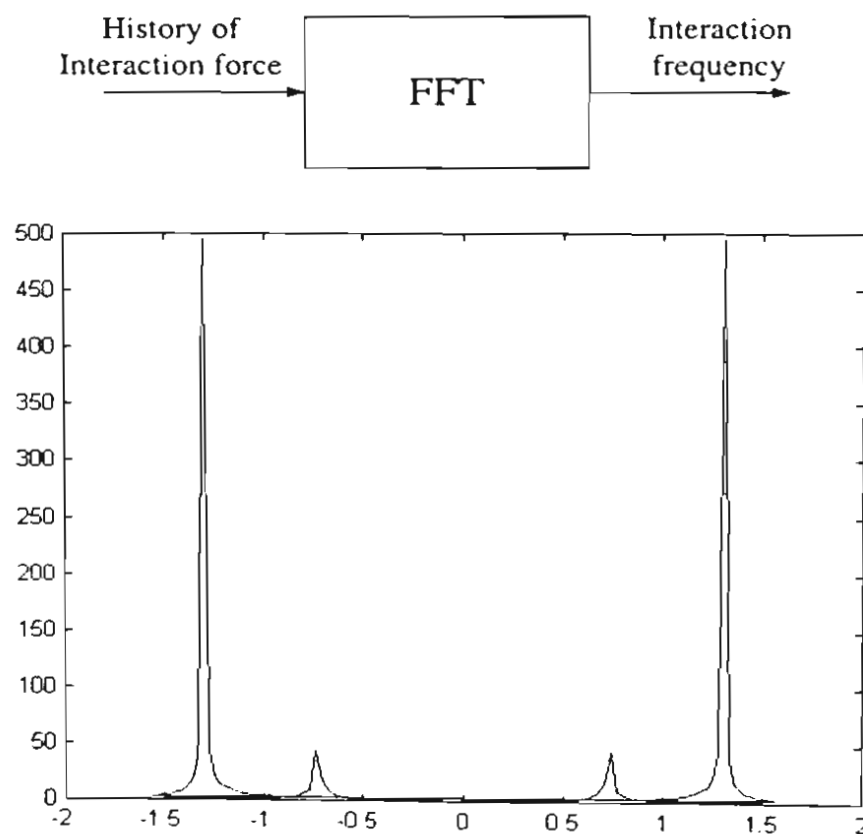
โดย Maximum_ b_c และ Maximum_ k_c คือค่าสูงสุดของค่าความหน่วงและค่าคงที่สปริง ที่อุปกรณ์แฮปติกส์สามารถทำได้ โดยขณะนี้ยังอยู่ในระหว่างการปรับปรุง ในหัวข้อต่อไปกล่าวถึง Interaction Frequency Estimator

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

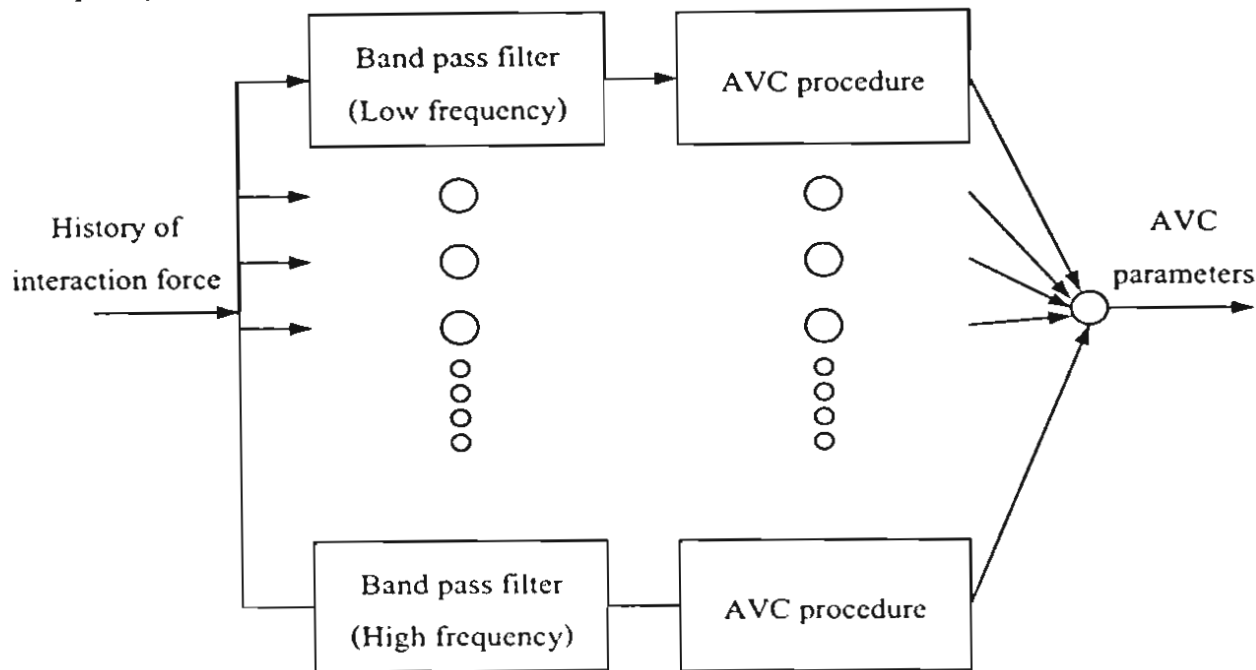


รูปที่ 13. แสดงตัวอย่างกราฟที่ได้จาก Fast Fourier Transform

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

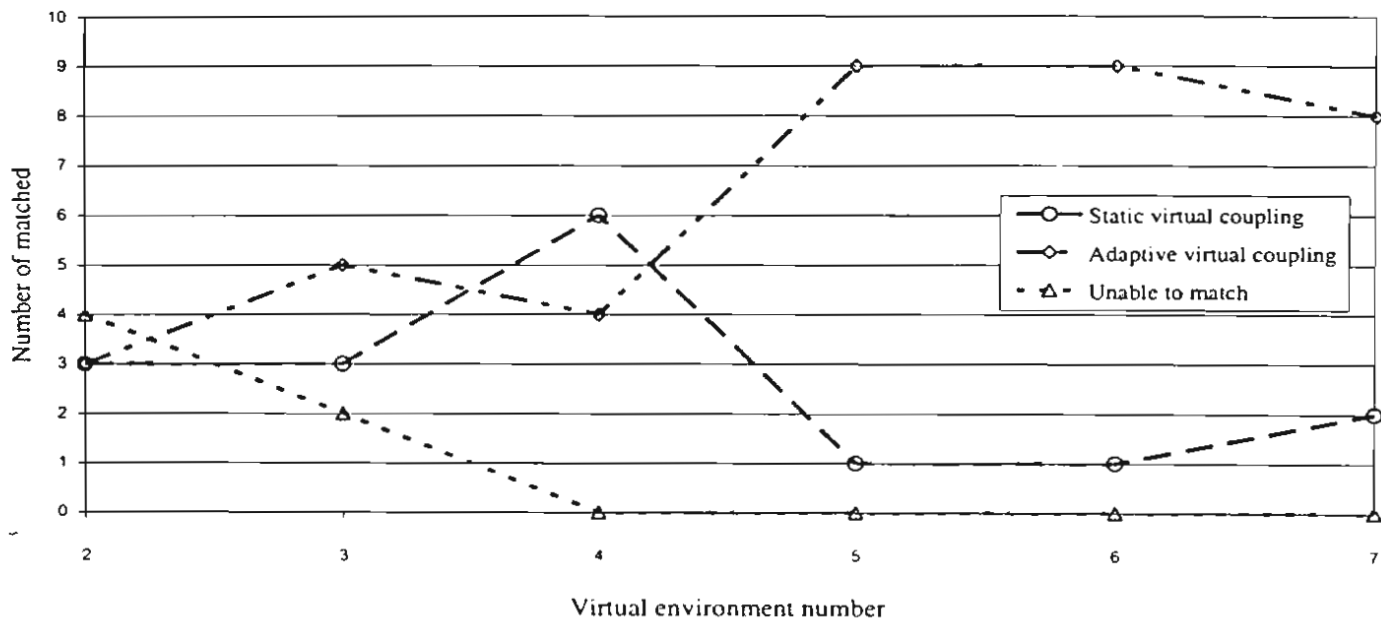
การวัดผลทำโดยการนับคะแนน และเวลาในการจับคู่ (Completion time) ดังตารางที่ 2 แสดงผลการนับคะแนนจับคู่ของกำแพง

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 แสดงค่าความเหมือนจริงของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้เทียบกับข้อต่อเสมือนแบบคงที่

5.5 วิจัยผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้

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

5.6 สรุป

ส่วนดีข้อต่อเสมือนคือช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบแอปติกส์ แต่ข้อเสียคือทำให้ความเหมือนจริงลดลง เมื่อสภาพแวดล้อมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้นเป้าหมายของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้คือ ต้องทำให้อิมพีแดนซ์ของสภาวะแวดล้อมเสมือนที่มีข้อต่อเสมือนมีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสภาวะแวดล้อมเสมือน และระบบต้องสามารถรักษาเสถียรภาพ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ช่วยปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพของความเหมือนจริง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแอปติกส์

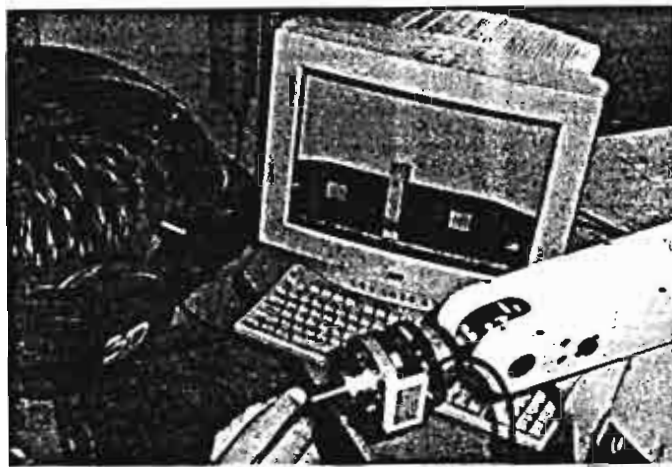
6. การนำระบบความจริงเสมือนไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงาน

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

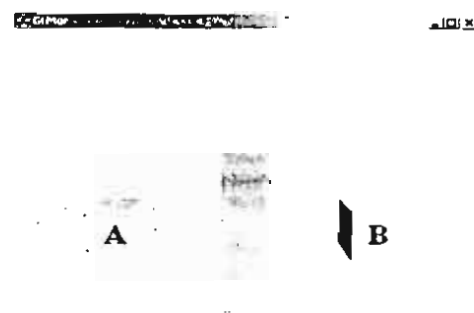


รูปที่ 16 รูปแสดงระบบที่พัฒนา

จากรูปที่ 16 จะได้ว่า ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือนที่ต้องการนำไปประกอบผ่านการเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำของผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะ จะถูกส่งไปอัพเดทยังส่วนแสดงผล 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

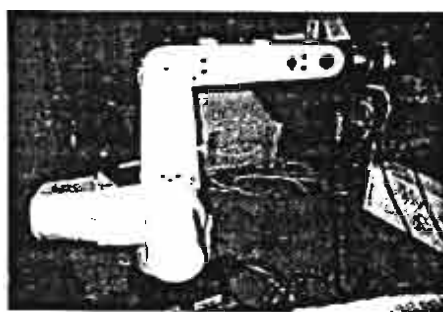
1. Equation of Box Model เป็นการกำหนดรูปทรง ความกว้าง ความยาว และความสูงของกล่องที่ต้องการจำลอง เพื่อให้กล่องจำลองมีคุณสมบัติเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ทะลุผ่านได้
2. Equation of Floor and Wall Constraint เป็นการกำหนดรูปทรง ความกว้าง ความยาว และความสูงของพื้นและกำแพงที่ต้องการจำลอง 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

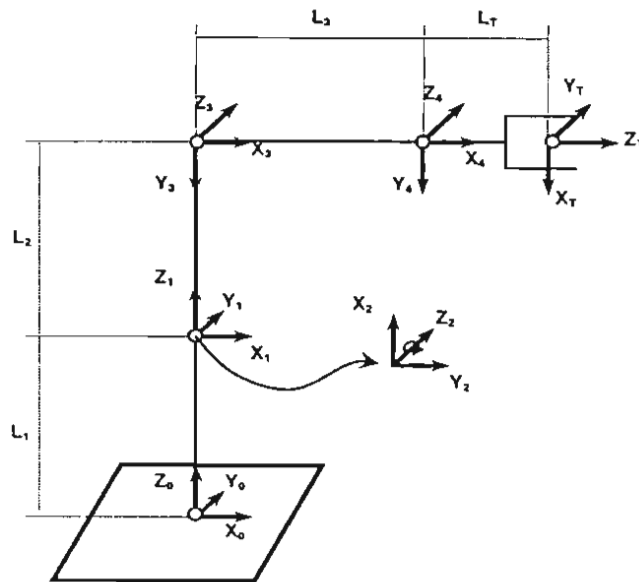


รูปที่ 19 รูปแสดงหุ่นยนต์ CRS ที่ใช้ในงานวิจัย

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)

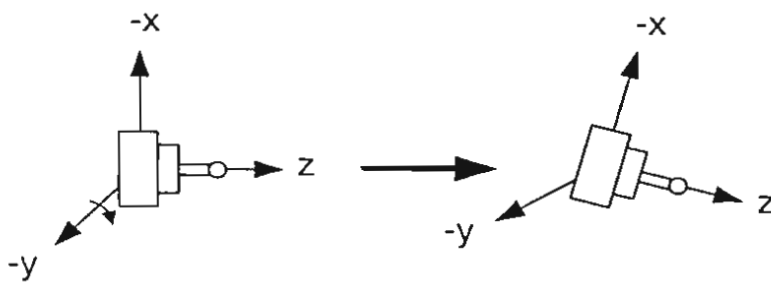
เป็นการแปลงความสัมพันธ์จากระบบแกนระนาบ xyz ไปสู่ระบบแกนของหุ่นยนต์ ซึ่งก็คือ ส่วนกลับของสมการฟอร์เวิร์ดไคเนเมติกส์ โดยสมการอินเวอร์ดไคเนเมติกส์จะใช้ในการควบคุม หุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการในระนาบแกน xyz ได้อย่างถูกต้อง สมการอินเวอร์ด ไคเนเมติกส์ของหุ่นยนต์ CRS สามารถแสดงได้ดังสมการที่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

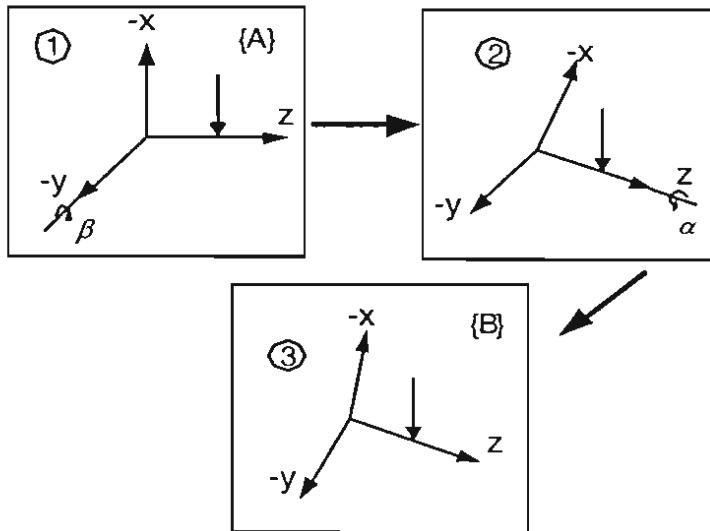
อุปกรณ์วัดแรงและแรงบิด 6 ทิศทาง(ATI-FT sensor) เริ่มต้นก่อนใช้งานต้องทำการตั้งค่าเริ่มต้นให้เท่ากับศูนย์ และเมื่อทำการเคลื่อนที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของเซ็นเซอร์ดังรูปที่ 21 ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดของค่าที่วัดได้จากการวัดแรงและแรงบิดขึ้น อันเนื่องมาจากน้ำหนักของตัวเซ็นเซอร์เองหรือจากเครื่องมือที่นำมาติดกับเซ็นเซอร์ 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

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

จากนั้นทำการหาแรงที่กระทำกับเซ็นเซอร์เทียบกับเฟรม B ได้ดังสมการที่ 43

$$\begin{aligned}
 {}^B F &= {}^A R^T {}^A F = {}^B R^A F \\
 &= \begin{bmatrix} c\beta c\alpha & s\alpha & -s\beta c\alpha \\ -c\beta s\alpha & c\alpha & s\beta s\alpha \\ s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} Fc\beta c\alpha \\ -Fc\beta s\alpha \\ Fs\beta \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{43}$$

เมื่อพิจารณาการตั้งค่าเริ่มต้นให้เท่ากับศูนย์ในคอนเริ่มต้น เป็นการชดเชยแรงเนื่องจากน้ำหนักจากตัวเซ็นเซอร์และจากเครื่องมือให้ค่าเป็นศูนย์ในทิศทางแกน x แกนเดียว ดังนั้นสมการเมตริกซ์ที่ 3 เขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ 44

$${}^B F = \begin{bmatrix} Fc\beta c\alpha - F \\ -Fc\beta s\alpha \\ Fs\beta \end{bmatrix} \tag{44}$$

จากสมการที่ 44 นำมาหาสมการชดเชยแรงบิดในทิศแกน x y และ z โดยการคูณทางเวกเตอร์ของระยะที่แรงกระทำห่างจากตำแหน่งของเซ็นเซอร์ ซึ่งระยะที่ได้จะอยู่ในแนวแกน z ดังสมการที่ 45

$${}^B r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{bmatrix} \tag{45}$$

สมการที่ 46 เป็นสมการแรงบิดชดเชยที่เกิดขึ้น

$${}^B r \times {}^B F = \begin{bmatrix} rFc\beta s\alpha \\ rFc\beta c\alpha - rF \\ 0 \end{bmatrix} \tag{46}$$

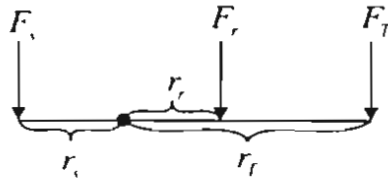
ดังนั้นสมการที่ 44 และ 45 เป็นเมตริกซ์ชดเชยที่อยู่ในรูปของสมการของแรง และแรงบิดตามลำดับ

จากสมการเมตริกซ์ชดเชย ทำการคำนวณหาแรงจากน้ำหนักโดยรวมที่กระทำกับเซ็นเซอร์ และคำนวณหาระยะทางที่แรงกระทำเทียบกับตำแหน่งของเซ็นเซอร์ โดยน้ำหนักกับระยะทางของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์เครื่องมือมีค่าดังตารางที่ 4

	น้ำหนัก (นิวตัน)	ระยะทางแนวแกน z (มิลลิเมตร)
เซ็นเซอร์วัดแรง	1	-10
เครื่องมือที่นำมาติด	1.9522	13

ตารางที่ 4 แสดงน้ำหนัก ระยะทางของเซ็นเซอร์และอุปกรณ์เครื่องมือ

จากตารางสามารถหาแรงรวมที่กระทำกับเซ็นเซอร์ และระยะทางที่แรงรวมกระทำได้จากหลักการทางสถิตยศาสตร์ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 แสดงการหาแรงและระยะทาง

- เมื่อ F_s คือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของเซ็นเซอร์
 F_T คือ แรงที่เกิดจากน้ำหนักของเครื่องมือที่นำมาติด
 F_r คือ แรงรวมที่ได้จากการคำนวณทางสถิตยศาสตร์
 r_s คือ ระยะทางจากแรง F_s ไปยังตำแหน่งเซ็นเซอร์
 r_T คือ ระยะทางจากแรง F_T ไปยังตำแหน่งเซ็นเซอร์
 r_r คือ ระยะทางจากแรง F_r ไปยังตำแหน่งเซ็นเซอร์

จากการคำนวณทางสถิตยศาสตร์ได้ว่า

F_r มีค่า 2.9522 นิวตัน

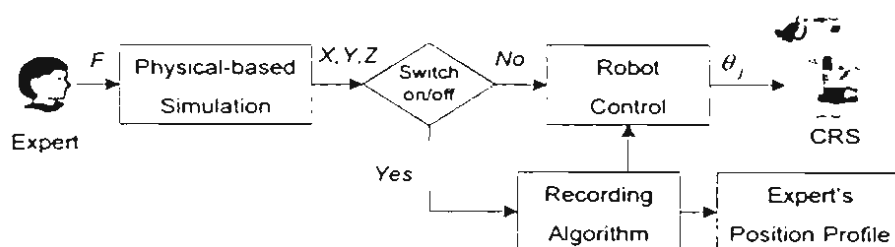
r_r มีค่า 5.20919 มิลลิเมตร

6.2 การถ่ายทอดทักษะ

เป็นส่วนที่ใช้ในการทำให้ผู้ที่ได้รับการถ่ายทอดทักษะมีทักษะความชำนาญในการทำงานเพิ่มขึ้น และรู้สึกเหมือนกับกำลังยกกล่องมาวางเรียงกันยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยผู้รับการฝึกฝนจะรู้สึกถึงแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้วย ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือ

6.2.1 ส่วนการจำลองเส้นทางเดินจากผู้ชำนาญทักษะ (Expert's Path Profile)

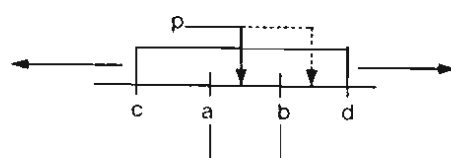
เป็นส่วนที่จำลองเส้นทางเดินของตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Position Profile) จากผู้ชำนาญทักษะ จะให้ผู้ชำนาญทักษะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือนผ่านการออกแรงกระทำผ่านอุปกรณ์วัดแรงและแรงบิด (Force sensor) ที่ติดตั้งบริเวณปลายแขนหุ่นยนต์ นำแรงที่ได้ไปคำนวณผ่านการจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำการหาตำแหน่งและทำการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ โดยค่าเส้นทางเดินที่เกิดขึ้นจะถูกเก็บค่าไว้ ซึ่งค่าที่เก็บได้จะถูกนำไปใช้สร้างเป็นเส้นทางต้นแบบของผู้เชี่ยวชาญ ที่ผู้รับการฝึกต้องเคลื่อนที่ตาม กระบวนการเก็บเส้นทางต้นแบบจากผู้ชำนาญสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 24



รูปที่ 24 กระบวนการเก็บเส้นทางต้นแบบจากผู้ชำนาญ

6.2.2 ส่วนการเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Position Comparison)

เป็นส่วนแสดงผลความถูกต้องของตำแหน่งที่ผู้ได้รับการถ่ายทอดทักษะเคลื่อนที่ ใช้เป็นเกณฑ์แสดงผลของผู้รับการฝึกฝนกลุ่มที่ 2 เพื่อแสดงผลให้ผู้ฝึกทักษะทราบว่า ขณะทำการฝึกทักษะผู้รับการฝึกได้ทำการเคลื่อนที่ถูกต้องหรือไม่ ด้วยการกำหนดขอบเขตช่วงของการแสดงผลดังรูปที่ 25



รูปที่ 25 แสดงช่วงของการแสดงผลต่อผู้ฝึกภาค

เมื่อ p คือ ค่าตำแหน่งขณะทำการฝึกทักษะ

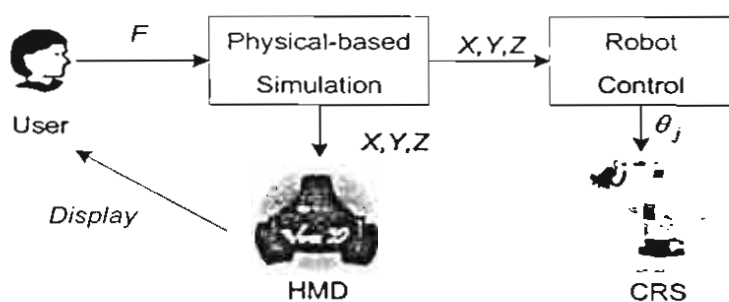
a b c และ d คือ ค่าขอบเขตที่กำหนด

โดยในการแสดงผลสามารถพิจารณาเป็น 3 ระดับ คือ

1. ระดับที่ยอมรับไม่ได้ อยู่ในช่วง $p < c$ และ $p > d$ เส้นทางเดินคันแบบที่ได้จากผู้ชำนาญจะเปลี่ยนเป็นสีแดง
2. ระดับที่ยอมรับได้แต่ไม่ถูกต้อง อยู่ในช่วง $c \leq p < a$ และ $b < p \leq d$ เส้นทางเดินคันแบบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน
3. ระดับที่ต้องอยู่ในช่วง $a \leq p \leq b$ เส้นทางเดินคันแบบจะมีสีเขียว

6.2.3 ส่วนการถ่ายทอดทักษะกลุ่มที่ 1

เป็นการถ่ายทอดทักษะ ที่ผู้เข้ารับการฝึกฝนจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือน ผ่านการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ โดยไม่มีการแสดงเส้นทางเดินคันแบบที่ได้จากผู้ชำนาญและไม่มีแรงดึงกลับเข้าหาเส้นทางเดินคันแบบของผู้ชำนาญ โดยจะเริ่มจากผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะออกแรงกระทำผ่านอุปกรณ์วัดแรงและแรงบิด (Force sensor) ที่ติดอยู่บริเวณปลายแขนหุ่นยนต์ แรงที่ผู้เข้ารับการถ่ายทอดกระทำจะถูกนำไปคำนวณผ่านการจำลองทางด้านฟิสิกส์ ซึ่งรวมถึงผลที่เกิดจากการตรวจจับการชนกันของวัตถุ ความเร็ว ความเร่ง และผลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกด้วย เพื่อหาคำแนะนำการเคลื่อนที่ของวัตถุ ทำให้การเคลื่อนที่เป็นไปตามกฎธรรมชาติหรือมีความสมจริงมากที่สุด โดยคำแนะนำการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และส่งไปยังส่วนแสดงผลทางด้านกราฟิก เพื่อให้ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะเกิดความคล้อยตามและทราบถึงผลการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากแรงกระทำของตนเอง ดังกระบวนการในรูปที่ 26

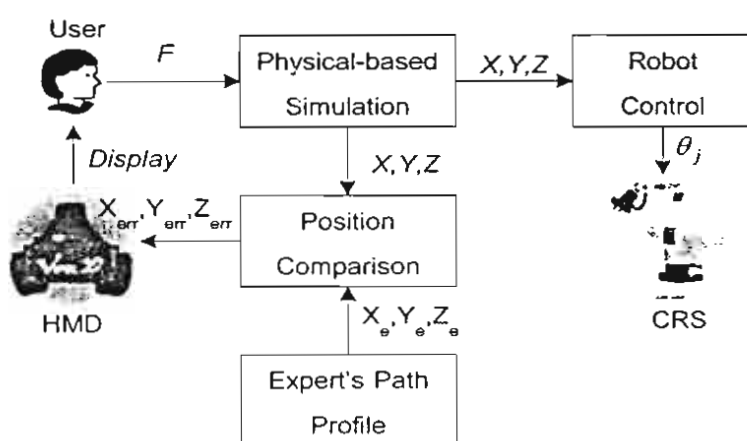


รูปที่ 26 การถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานของกลุ่มที่ 1

6.2.4 ส่วนการถ่ายทอดทักษะกลุ่มที่ 2

เป็นการถ่ายทอดทักษะที่ผู้เข้ารับการฝึกฝนจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือน ผ่านการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ โดยมีการแสดงเส้นทางเดินคันแบบที่ได้จากผู้ชำนาญ และสีของทางเดินที่เตือน เมื่อผู้เข้ารับการฝึกเคลื่อนที่ออกนอกเส้นทางเดินคันแบบของผู้ชำนาญ โดยการถ่ายทอดทักษะจะเริ่มจาก ผู้

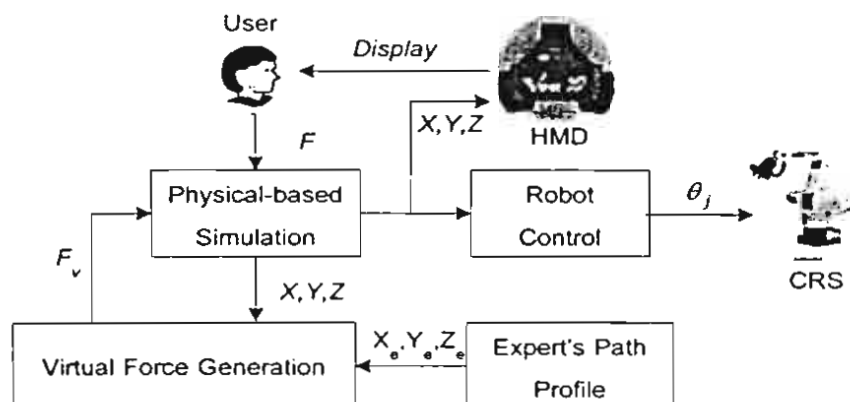
เข้ารับการฝึกจะออกแรงกระทำผ่านอุปกรณ์วัดแรงและแรงบิด ซึ่งคิดไว้ที่ปลายแขนหุ่นยนต์ เพื่อนำแรงที่ตรวจวัดได้ไปคำนวณผ่านการจำลองทางด้านฟิสิกส์ หาคำแนะนำการเคลื่อนที่ของวัตถุ เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์และส่งไปยังส่วนแสดงผลทางด้านกราฟิก เช่นเดียวกับกลุ่มที่ 1 แต่แตกต่างกันตรงที่ในระหว่างขั้นตอนการถ่ายทอดทักษะ จะมีการแสดงเส้นทางเดินแบบของผู้ชำนาญที่ได้เก็บค่าไว้ เพื่อให้ผู้ที่เข้ารับการฝึกทำการเคลื่อนที่ตาม นอกจากนี้ในระหว่างที่ผู้ที่เข้ารับการฝึกออกแรงเคลื่อนที่วัตถุเสมือน เส้นทางเดินที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับเส้นทางเดินแบบแล้วแสดงผ่านการเปลี่ยนแปลงสีของเส้นทางเดินแบบ เพื่อให้ทราบถึงความถูกต้องที่เกิดขึ้น ดังกระบวนการในรูปที่ 27



รูปที่ 27 การถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานของกลุ่มที่ 2

6.2.5 ส่วนการถ่ายทอดทักษะกลุ่มที่ 3

เป็นการถ่ายทอดทักษะที่ผู้เข้ารับการฝึกฝนจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือน ผ่านการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ โดยมีแรงดึงกลับเข้าหาเส้นทางเดินของผู้ชำนาญ ขณะที่ผู้เข้ารับการฝึกทักษะออกแรงกระทำกับระบบ โดยการถ่ายทอดทักษะจะเริ่มจาก ผู้เข้ารับการฝึกจะออกแรงกระทำผ่านอุปกรณ์วัดแรงและแรงบิด ซึ่งคิดไว้ที่ปลายแขนหุ่นยนต์ เพื่อนำแรงที่ตรวจวัดได้ไปคำนวณผ่านการจำลองทางด้านฟิสิกส์ หาคำแนะนำการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยคำแนะนำการเคลื่อนที่ที่คำนวณได้ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับคำแนะนำการเคลื่อนที่ต้นแบบที่ได้จากผู้ชำนาญ ซึ่งค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะถูกนำไปใช้หาแรงเสมือนที่ประกอบด้วยโมเดลของกลองติดสปริงและแดมเปอร์ เพื่อดึงมือของผู้ใช้เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางเดินต้นแบบของผู้ชำนาญได้อย่างถูกต้อง ดังกระบวนการในรูปที่ 28



รูปที่ 28 การถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานของกลุ่มที่ 3

6.2.6 การประเมินค่าการถ่ายทอดทักษะ

เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างสามกลุ่ม หลังจากได้รับการถ่ายทอดทักษะแล้ว ทำการทดสอบจริงในแต่ละครั้งจนครบ 4 ครั้ง โดยในการหาประสิทธิภาพการถ่ายทอดทักษะในแต่ละวิธีนั้นจะพิจารณาจาก

1. ค่าเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้าย
2. ค่าความผิดพลาดระหว่างเส้นทางเดินที่เกิดขึ้นกับเส้นทางเดินต้นแบบ

จากนั้นจะนำค่าเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่และค่าความผิดพลาดระหว่างเส้นทางเดินที่เกิดขึ้นกับเส้นทางเดินต้นแบบ ที่เก็บได้ในแต่ละครั้งของแต่ละกลุ่มการทดลองไปหาค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานดังสมการที่ (47) และสมการที่ (48) ตามลำดับ

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (47)$$

$$\sigma = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2 \right)^{1/2} \quad (48)$$

6.3 การทดลอง

ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานนั้น ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะจะต้องทำการยกกล่องใบหนึ่งไปวางซ้อนทับกล่องอีกใบหนึ่ง โดยในการเคลื่อนที่วัตถุเมื่อนั้นจะทำการถ่ายทอดการเคลื่อนที่ผ่านการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งกราฟิกของระบบการประกอบชิ้นงานที่จำลองขึ้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 17 และรูปที่ 18 โดยหลังจากเสร็จสิ้นการถ่ายทอดทักษะตามวิธีการของกลุ่มที่กำหนดไว้ในแต่ละครั้ง จะให้ผู้เข้ารับการฝึกทักษะในแต่ละกลุ่มทำการทดสอบจริง โดยปราศจากเส้นทางชี้แนะและแรงดึงดูดกลับเข้าหาเส้นทางเดิน โดยจะให้แต่ละกลุ่มได้รับการถ่ายทอดทักษะทั้งหมด 4 ครั้ง พร้อมทั้งเก็บค่าเวลาในการทำงาน และความผิดพลาดของเส้นทางเดินเมื่อเทียบกับทางเดินของผู้เชี่ยวชาญ

6.4 ผลการทดลอง

ครั้งที่			1	2	3	4	sum	avg
เวลาที่ใช้ (วินาที)	ค่าเฉลี่ย	S1	20.029	15.750	17.300	18.313	71.391	17.848
		S2	26.463	22.050	19.225	17.500	85.238	21.309
		S3	20.543	18.380	16.029	13.386	68.337	17.084
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	S1	5.939	5.319	4.971	5.774	22.002	5.501
		S2	6.475	8.986	4.619	5.704	25.784	6.446
		S3	7.226	6.470	3.779	3.405	20.879	5.220
ค่าความผิดพลาดจากทางเดินต้นแบบ	ค่าเฉลี่ย	S1	27.557	20.527	17.924	20.281	86.289	21.572
		S2	25.941	22.977	20.905	21.196	91.018	22.755
		S3	22.357	22.874	22.272	24.815	92.319	23.080
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	S1	9.694	7.778	4.046	5.557	27.075	6.769
		S2	8.137	4.850	3.649	4.832	21.468	5.367
		S3	6.726	4.309	3.885	5.347	20.266	5.067

6.5 บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบการถ่ายทอดทักษะประเภทที่ใช้หุ่นยนต์เป็นตัวขับเคลื่อน เน้นการสร้างทักษะให้กับผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอด จากการทดลองจะพบว่าผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะจากทั้ง 3 กลุ่มจะมีพัฒนาการของทักษะการประกอบชิ้นงานที่ดีขึ้น โดยรายละเอียดของแต่ละกลุ่มสามารถแสดงได้ดังนี้ คือ

กลุ่มที่ 1 ไม่มีการแสดงเส้นทางเดินที่ได้จากผู้ชำนาญและไม่มีแรงดึงกลับเข้าหาเส้นทางเดินของผู้ชำนาญ จะเป็นการลองผิดลองถูกของผู้ทำการฝึกฝนเอง ความสำเร็จที่เกิดขึ้นจึงต้องเกิดจากการฝึกฝนหลายๆครั้งโดยจะมีความสำเร็จ 87.5% ซึ่งเป็นระดับปานกลางเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 และจะพบว่าวิธีนี้จะมีการกระจายข้อมูลของค่าความผิดพลาดมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับวิธีที่ 2 และ วิธีที่ 3 จึงทำให้เห็นว่าจำนวนครั้งการฝึกฝน ไม่ได้บ่งบอกถึงความถูกต้องที่เกิดขึ้นเนื่องจากผู้ฝึกฝนไม่ทราบถึงแนวทางที่ถูกต้อง

กลุ่มที่ 2 มีการแสดงเส้นทางเดินที่ได้จากผู้ชำนาญ ให้ผู้ที่เข้ารับการฝึกทักษะเคลื่อนที่ตามและมีการแสดงสีของทางเดินที่เตือน ผู้เข้ารับการฝึกฝนจะทราบถึงแนวทางเดินที่ถูกต้อง อีกทั้งการแสดงให้เห็นทางสายตา สามารถที่จะจดจำให้เกิดทักษะได้ดี ผลที่ได้จึงทำให้เกิดความสำเร็จที่สูงตั้งแต่ครั้งแรก ดังผลความสำเร็จที่ได้สูงถึง 93.75% แต่เนื่องจากการที่ต้องเคลื่อนที่ให้ถูกต้องตามเส้นทางเดินที่ให้จดจำไว้ ทำให้ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะเกิดความกังวล จึงทำให้ผู้ฝึกใช้เวลามากในการเคลื่อนที่ที่ทำให้เกิดความสำเร็จ แต่ก็ทำให้ค่าเฉลี่ยและค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดระหว่างเส้นทางเดินที่เกิดขึ้นจริงกับเส้นทางต้นแบบมีค่าน้อยตามไปด้วยเช่นกัน

กลุ่มที่ 3 มีแรงดึงกลับเข้าหาเส้นทางเดินของผู้ชำนาญ ขณะที่ผู้เข้ารับการฝึกทักษะออกแรงกระทำกับระบบ การจดจำทางด้านความรู้สึกในครั้งแรกเป็นสิ่งที่ยาก จึงทำให้ผู้ที่เข้ารับการฝึกฝนเกิดความสำเร็จได้ยากในการทำงานจริงครั้งแรก อีกทั้งเกิดความกังวลในการที่จะออกแรงกระทำจึงไม่กล้าจะลองผิดลองถูก ทำให้ความสำเร็จในการถ่ายทอดทักษะมีน้อยที่สุด คือได้เพียง 81.25% แต่เมื่อเทียบถึงพัฒนาการทางด้านเวลา จะพบว่าการกระจายของข้อมูลทางเวลาจะแคบลงอย่างต่อเนื่องเมื่อจำนวนครั้งการฝึกฝนมากขึ้น ทำให้ทราบถึงพัฒนาการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งถือได้ว่ามีความแม่นยำกว่าการเห็นทางสายตาดังกลุ่มที่ 2 อีกทั้งความผิดพลาดเฉลี่ยทางด้านเส้นทางเดินเคลื่อนที่ก็ไม่แตกต่างจากกลุ่มที่ 2 มากนัก

ดังนั้นจะพบว่าการถ่ายทอดทักษะแต่ละแบบมีความสามารถที่แตกต่างกัน คือ ในระบบการถ่ายทอดทักษะของกลุ่มที่ 1 จะไม่มีการพัฒนาที่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความสามารถของแต่ละบุคคลในการทำงาน ส่วนในกลุ่มที่ 2 นั้น มีความสำเร็จสูงในการทำงานจริง แต่จะใช้เวลานานในการทำงานให้สำเร็จ ซึ่งถือเป็นการพัฒนาการเรียนรู้ที่ดีถ้าไม่คำนึงถึงเวลา ส่วนระบบการถ่ายทอดทักษะใน

กลุ่มสุดท้าย คือ กลุ่มที่ 3 จะทำให้เกิดพัฒนาการเรียนรู้เร็วที่สุด ทักษะที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกัน แต่ก็มีเสียงต่อการทำงานไม่สำเร็จในการทำงานจริง

นอกจากนี้ จากแบบสอบถามที่ได้ให้ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะแสดงความคิดเห็นและให้คะแนน จะพบว่า ทางด้านการแสดงผลทางด้านความรู้สึกถึงแรงป้อนกลับ ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะมีความรู้สึกสมจริงถึง 74.17% ส่วนทางด้านการแสดงผลด้วยภาพนั้น ผู้เข้ารับการฝึกมีความรู้สึกถึงความต่อเนื่องของการแสดงผลกราฟิก 78.33% แต่มีความรู้สึกสอดคล้องระหว่างภาพกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เพียง 68.33% เนื่องจากมุมมองไม่สอดคล้องกับมุมมองจริงของผู้เข้าฝึกทักษะ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้อุปกรณ์แสดงภาพแบบสวมหัว (Head Mounted Display, HMD) ในการแสดงภาพในมุมมองของผู้ที่เข้าฝึกฝน นอกจากนี้ทางด้านความรู้สึกสะดวกในการใช้งานและความสมเหตุสมผลในการนำไปใช้งานจะพบว่า 71.67% ของผู้รับการถ่ายทอดทักษะมีความเห็นว่าระบบที่จำลองมีความสมจริงกับลักษณะการใช้งาน แต่ทางด้านความรู้สึกสะดวกในการใช้งานและเห็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานจริงนั้น ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะมีความพอใจมากถึง 82.5% และ 80.83% ตามลำดับ

7. สรุป

สำหรับในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้ทำวิจัยได้แบ่งการทำวิจัยออกเป็น 3 ส่วนด้วยกัน โดยได้มีการสรุปแยกเป็นแต่ละส่วน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหัวให้ได้ดังนี้คือ

7.1 การหาขอบเขตประสิทธิภาพความเหมือนจริง

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

7.2 ข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ (Adaptive virtual coupling)

ส่วนดีข้อต่อเสมือนคือช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบแฮปติกส์ แต่ข้อเสียคือทำให้ความเหมือนจริงลดลง เมื่อสภาพแวดล้อมมีค่าความแข็งเพิ่มขึ้น ดังนั้นเป้าหมายของข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้คือ ต้องทำให้อิมพีแดนซ์ของสภาวะแวดล้อมเสมือนที่มีข้อต่อเสมือนมีค่าใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์ของสภาวะแวดล้อมเสมือน และระบบต้องสามารถรักษาเสถียรภาพ จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าข้อต่อเสมือนแบบปรับค่าได้ช่วยปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพของความเหมือนจริง และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบแฮปติกส์

7.3 การนำระบบความจริงเสมือนไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงาน

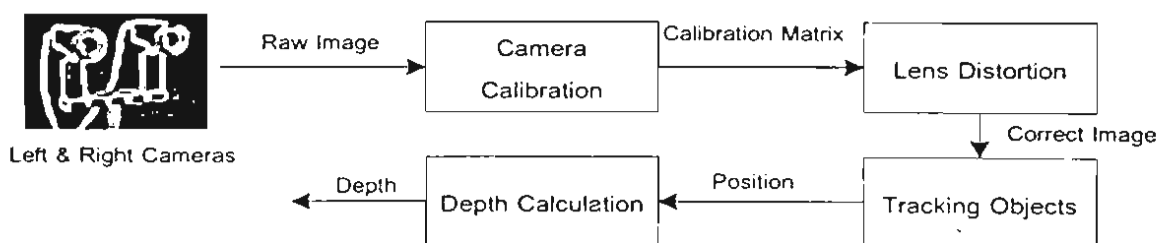
งานวิจัยนี้นำเสนอระบบการถ่ายทอดทักษะประเภทที่ใช้หุ่นยนต์เป็นตัวขับเคลื่อน เน้นการสร้างทักษะให้กับผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอด จากการทดลองจะพบว่าผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะจากทั้ง 3 กลุ่มจะมีพัฒนาการของทักษะการประกอบชิ้นงานที่ดีขึ้น โดยการถ่ายทอดทักษะแต่ละแบบมีความสามารถที่แตกต่างกัน คือ ในระบบการถ่ายทอดทักษะของกลุ่มที่ 1 จะไม่มีการพัฒนาที่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความสามารถของแต่ละบุคคลในการทำงาน ส่วนในกลุ่มที่ 2 นั้น มีความสำเร็จสูงในการทำงานจริง แต่จะใช้เวลาในการทำงานให้สำเร็จ ซึ่งถือเป็นการพัฒนาการเรียนรู้ที่ดีถ้าไม่คำนึงถึงเวลา ส่วนระบบการถ่ายทอดทักษะในกลุ่มสุดท้าย คือ กลุ่มที่ 3 จะทำให้เกิดพัฒนาการเรียนรู้เร็วที่สุด ทักษะที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกัน แต่ก็มีเสียงต่อ

การทำงานไม่สำเร็จในการทำงานจริง นอกจากนี้ จากแบบสอบถามที่ได้ให้ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะแสดงความคิดเห็นและให้คะแนน จะพบว่า ทางด้านการแสดงผลทางด้านความรู้สึกถึงแรงป้อนกลับ ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะมีความรู้สึกสมจริงถึง 74.17% ส่วนทางด้านการแสดงผลด้วยภาพนั้น ผู้เข้ารับการฝึกมีความรู้สึกถึงความต่อเนื่องของการแสดงผลกราฟิก 78.33% แต่มีความรู้สึกสอดคล้องระหว่างภาพกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เพียง 68.33% เนื่องจากมุมมองไม่สอดคล้องกับมุมมองจริงของผู้เข้าฝึกทักษะ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้อุปกรณ์แสดงภาพแบบสวมหัว (Head Mounted Display, HMD) ในการแสดงภาพในมุมมองของผู้ที่เข้าฝึกฝน ในส่วนทางด้านความรู้สึกสะดวกในการใช้งานและความสมเหตุสมผลในการนำไปใช้งานจะพบว่า 71.67% ของผู้รับการถ่ายทอดทักษะมีความเห็นว่าระบบที่จำลองมีความสมจริงกับลักษณะการใช้งาน แต่ทางด้านความรู้สึกสะดวกในการใช้งานและเห็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานจริงนั้น ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะมีความพอใจมากถึง 82.5% และ 80.83% ตามลำดับ

8. แนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้

จากงานวิจัยในการนำระบบความจริงเสมือนไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานจะพบว่า ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะจากทั้ง 3 กลุ่มจะมีพัฒนาการของทักษะการประกอบชิ้นงานที่ดีขึ้น ผู้เข้ารับการฝึกมีความรู้สึกถึงความต่อเนื่องในการรับการถ่ายทอดทักษะ แต่สิ่งที่พบและสามารถพัฒนาให้ดีขึ้นได้ คือ การลดความผิดพลาดของผลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของหุ่นยนต์ การเพิ่มระดับความสมจริงของสภาพแวดล้อมเสมือนในการทำงาน และการเพิ่มเติมข้อมูลที่สำคัญให้ผู้รับการฝึกเข้าใจขั้นตอนการทำงานขณะที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะ ซึ่งแนวทางในการพัฒนาสามารถแสดงได้ดังนี้ คือ

8.1 การนำการมองเห็นแบบ 3 มิติ (Stereo Vision) มาประยุกต์ใช้กับการถ่ายทอดทักษะ โดยจะใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของวัตถุจริงในสภาพแวดล้อมจริงที่ปฏิบัติงาน เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการสร้างสภาพแวดล้อมเสมือน พร้อมทั้งตรวจจับตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุจริงที่ตรวจจับกับตำแหน่งของวัตถุเสมือนที่จำลองอยู่ที่ปลายแขนหุ่นยนต์ และสามารถลดผลของปัญหาการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดซึ่งเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของหุ่นยนต์ที่พบในปัจจุบัน ซึ่งการแสดงผลทั้งหมดจะแสดงผ่านระบบความจริงเสมือน โดยกระบวนการของระบบการมองเห็นแบบ 3 มิติ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 รูปแสดงกระบวนการของระบบการมองเห็นแบบ 3 มิตินำไปประยุกต์ใช้

จากรูปที่ 29 จะได้ว่าในการทำงานที่ต้องมีการใช้กล้องเข้ามาช่วยในการประมวลผลทางภาพนั้น จำเป็นต้องทำการสอบเทียบค่าพารามิเตอร์ของกล้อง (Camera Calibration) ทั้งภายใน (Intrinsic Parameter) และภายนอก (Extrinsic Parameter) พร้อมทั้งทำการลดผลเนื่องจากความบิดเบี้ยวของภาพ (Lens Distortion) เพื่อให้ภาพที่นำไปใช้ในกระบวนการตรวจจับการเคลื่อนที่ (Object Tracking) มีมาตราส่วนที่ถูกต้องตามความเป็นจริง โดยตำแหน่งของวัตถุที่ตรวจจับได้จากกล้องซ้ายและกล้องขวา จะถูกนำไปคำนวณหาความสัมพันธ์จากหลักการทางเรขาคณิต

8.2 การนำระบบความจริงเสริม (Augmented Reality) มาประยุกต์ใช้กับการถ่ายทอดทักษะ โดยระบบความจริงเสริม เป็นงานวิจัยที่พัฒนามาจากความจริงเสมือน โดยจะอาศัยเทคนิคการรวม ภาพจากมุมมองจริงและภาพเสมือนที่สร้างด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อเพิ่มข้อมูลที่สำคัญซ้อนทับลงไป บนภาพจริง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 30

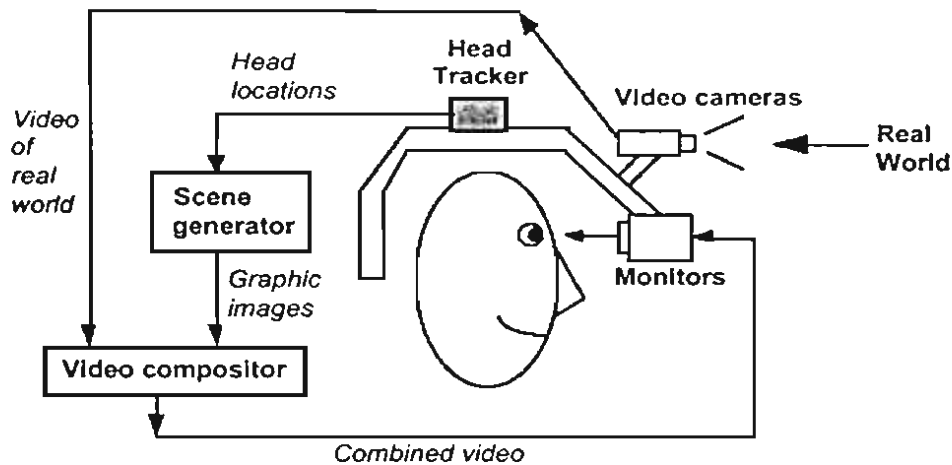


รูปที่ 30 รูปแสดงผลของระบบความจริงเสริม [16]

จากรูปที่ 30 จะพบว่าผู้ที่ใช้งานระบบความจริงเสริมจะเห็นข้อมูลที่เพิ่มเติมซ้อนทับเข้ามา ในสภาพแวดล้อมจริงที่มองเห็น ซึ่งภาพเสมือนจะต้องเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับมุมมองของภาพจริง ที่เปลี่ยนไป โดยจะอาศัยอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งศีรษะของผู้ใช้ เป้าหมายสำคัญของระบบความจริงเสริมข้อหนึ่งคือ การเสริมข้อมูลที่สำคัญที่ผ่านการประมวลผลมาแล้วซ้อนทับเข้าไปบนภาพจริง ผู้ใช้จะมองเห็นทั้งภาพจริงและภาพเสมือนที่เพิ่มเข้าไปได้พร้อมกัน เช่น การบอกทิศทางเพื่อไปยัง จุดหมาย การแสดงข้อมูลจำเพาะของวัตถุที่ผู้ใช้งานกำลังสนใจ เป็นต้น ซึ่งระบบความจริงเสริม สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ ระบบความจริงเสริมแบบใช้ Video See-through Head-Mounted Display แบบใช้ Optical See-through Head-Mounted Display และแบบที่ใช้ Monitor-based Augmented Reality

8.2.1 ระบบความจริงเสริมแบบใช้ Video See-through Head-Mounted Display

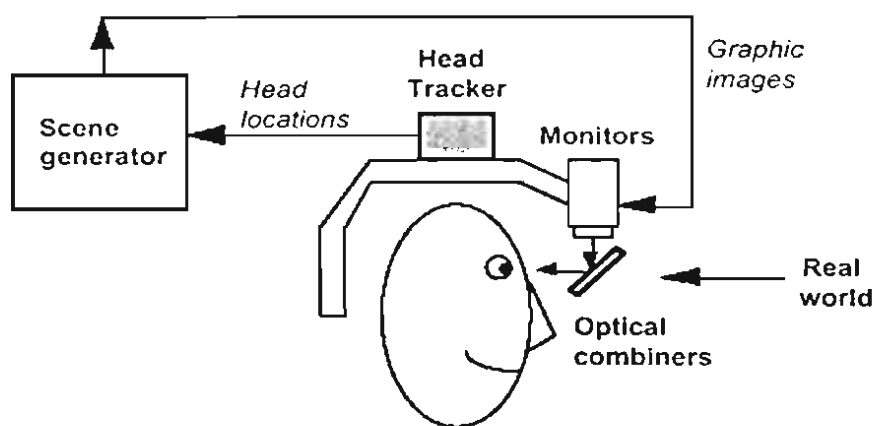
ลักษณะการทำงานคือ ภาพของสภาพแวดล้อมจริงในมุมมองของผู้ใช้ จะถูกเก็บภาพด้วย กล้องวิดีโอ จากนั้นจะถูกนำมารวมกับภาพกราฟิกที่สร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ แล้วนำผลที่ได้ส่งไปยังจอแสดงผลที่อยู่ตรงตาของผู้ใช้ โดยอาศัย Head-Mounted Display เพื่อแสดงผลให้ผู้ใช้งานมองเห็น



รูปที่ 31 แผนผังระบบความจริงเสริมแบบใช้ Video See-through Head-Mounted Display [22]

8.2.2 ระบบความจริงเสริมแบบใช้ Optical See-through Head-Mounted Display

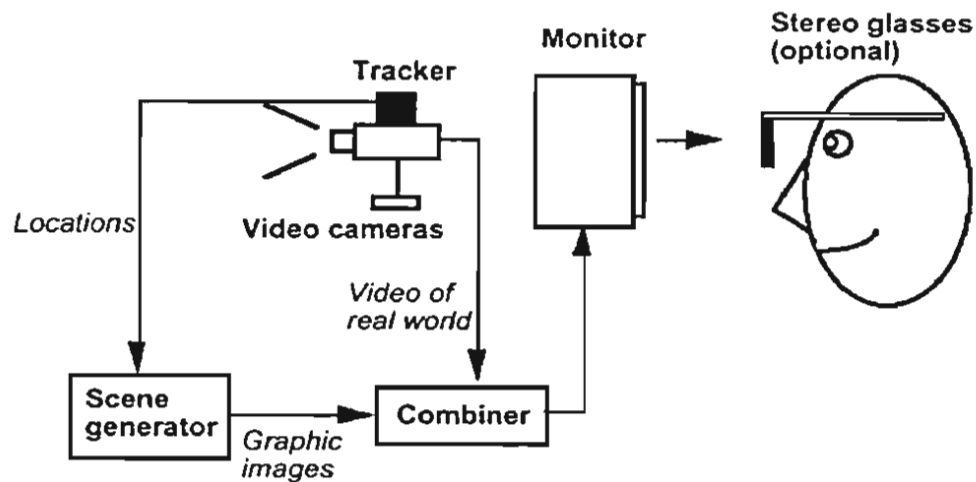
ลักษณะการทำงานคือ จะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รวมแสงอยู่ด้านหน้าของตาผู้ใช้ โดยทำหน้าที่ลดแสงที่ผู้ใช่มองเห็นจากสภาพแวดล้อมจริง และสะท้อนแสงที่ได้มาจากจอภาพกราฟิกเข้าไปยังตาของผู้ใช้ ผลรวมของแสงทั้งสองจะทำให้เกิดการรวมภาพจริงและภาพเสมือน แล้วส่งไปแสดงผลยัง Optical See-through HMD ส่วนมากอุปกรณ์นี้ทำการลดแสง จากสิ่งแวดล้อมจริง ดังนั้นในขณะที่ยังไม่ทำงาน จะมีลักษณะเหมือนแว่นกันแดด



รูปที่ 32 แผนผังระบบความจริงเสริมแบบใช้ Optical See-through Head-Mounted Display [22]

8.2.3 ระบบความจริงเสริมแบบใช้ Monitor-based Augmented Reality

ลักษณะการทำงานจะคล้ายกับระบบความจริงเสริมแบบใช้ Video See-through Head-Mounted Display คือ กล้องวิดีโอจะทำหน้าที่รับภาพจริงเข้ามา โดยตำแหน่งของกล้องจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการสร้างภาพกราฟิก ภาพกราฟิกที่ได้จะถูกนำไปรวมกับภาพจริงที่ได้จากกล้องวิดีโอ แล้วผลที่ได้จะถูกนำไปแสดงผลยังหน้าจอ



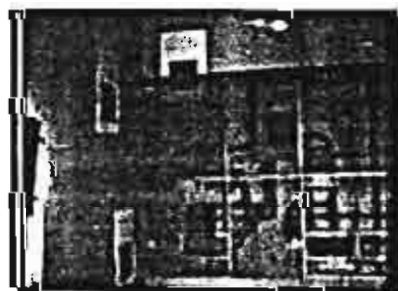
รูปที่ 33 แผนผังระบบความจริงเสริมแบบใช้ Monitor-based Augmented Reality [22]

8.3 ตัวอย่างงานวิจัยของระบบความจริงเสริม (Augmented Reality) สามารถแสดงได้ดังนี้

8.3.1 งานวิจัยทางด้านระบบความจริงเสริมที่ Fraunhofer Institute ประเทศเยอรมัน [17]

- X-Ray Vision

ระบบความจริงเสริมสามารถช่วยขยายความซึ่ดจำกัดในการมองเห็นของผู้ใช้ ตัวอย่างเช่น การช่วยให้สามารถมองผ่านไปในรายละเอียดภายในของวัตถุจริง ภาพสายไฟฟ้าหรือท่อน้ำที่อยู่ด้านหลังของกำแพงคึกซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อบอกตำแหน่งในการเจาะกำแพง เพื่อช่วยในการบำรุงรักษาและแก้ไข จะช่วยลดพลังงานที่สูญเสีย และลดการสูญเสียน้ำได้



รูปที่ 34 แสดงภาพจากโครงการ X-Ray Vision [17]

- Visual of Non-Visual Sensor Data

ระบบความจริงเสริมสามารถใช้ในการช่วยแสดงค่าข้อมูลที่ได้จากอุปกรณ์เซ็นเซอร์ ในการวัดคุณสมบัติที่ไม่สามารถเห็นด้วยตาเปล่าของวัตถุหรือสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความดัน การสั่นสะเทือน การแผ่รังสี ความต่างศักย์ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลดังกล่าวมีความจำเป็นในการควบคุมเครื่องจักร



รูปที่ 35 แสดงภาพจากโครงการ Visual of Non-Visual Sensor Data [17]

- Architecture / CAD-model in real environment

การออกแบบอาคารโดยอาศัยแบบจำลอง CAD จะเป็นการแสดงเพียงในโลกเสมือน มันเป็นการยากที่จะพิจารณาผลที่จะเกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อมจริง แต่ด้วยเทคนิคทางระบบความจริงเสริมแบบจำลองสามารถใส่ลงบนภาพวิดีโอซึ่งจะแสดงสิ่งก่อสร้างที่จะเกิดขึ้นเป็นมุมมอง 3 มิติ โดยที่สี ขนาด ยังสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้



รูปที่ 36 แสดงภาพจากโครงการ Architecture / CAD-model in real environment [17]

8.3.2 งานวิจัย ARVIKA: Augmented Reality for Development Production and Servicing ที่ประเทศเยอรมัน [18]

จุดมุ่งหมายของงานวิจัยเน้นไปที่การใช้เทคนิคความจริงเสริม เพื่อช่วยในการพัฒนา การผลิต และการบริการ ของผลิตภัณฑ์ที่มีความซับซ้อนทางเทคนิค ซึ่งปัญหาจะต้องขึ้นอยู่กับการทำงานของผู้ใช้ โดยเทคนิคทางความจริงเสริม จะช่วยให้สามารถรวมภาพจริงเข้ากับภาพเสมือนที่

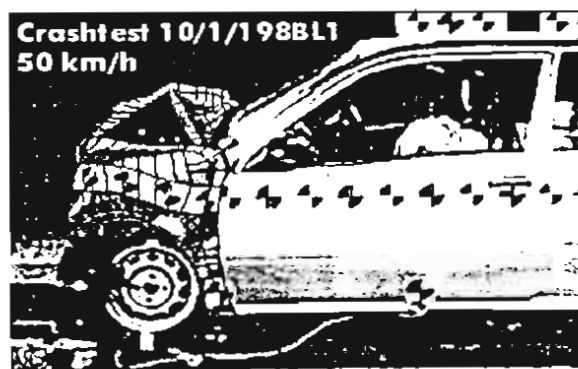
ถูกสร้างขึ้นโดยคอมพิวเตอร์ ช่วยให้การวางแผนง่าย รวดเร็ว และยังคงมีความสมจริงกับเหตุการณ์การทำงาน



รูปที่ 37 แสดงภาพจากโครงการ ARVIKA [18]

- ส่วนช่วยในการพัฒนา (Development)

เทคนิคทางความจริงเสริม จะช่วยให้การแก้ไขปัญหานั้นไปได้ง่ายขึ้น โดยการเปรียบเทียบโดยตรงระหว่างผลทางการคำนวณและผลทางปฏิบัติ เช่น ในกรณีการทดสอบ การชนของรถยนต์ การรวมภาพการจำลองการชนโดยการคำนวณลงบนภาพการชนจริง จะช่วยในการเปรียบเทียบและวิศวกรสามารถวิเคราะห์สิ่งที่เกิดขึ้นได้ง่ายและรวดเร็ว



รูปที่ 38 แสดงภาพจำลองจากการชนของรถยนต์ [18]

- ส่วนช่วยในการผลิต (Production)

ในการวางแผนและติดตามกระบวนการผลิต ต้องอาศัยความสามารถและความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งจะถูกทำให้ง่ายขึ้นถ้ามีข้อมูลสถานะของงานส่วนต่างๆ ซึ่งได้รับโดยตรงจากส่วนการผลิตต่างๆ เช่นเดียวกันกับการแสดงขั้นตอนการปฏิบัติงานให้แก่ผู้ปฏิบัติงานในรูปการผสมของภาพจริงและภาพเสมือน ทำให้การปฏิบัติงานเหมือนการฝึกหัด และยังสามารถทำการเปรียบเทียบระหว่างการปฏิบัติงานจริงและผลจากการจำลองเพื่อสรุปผลให้ได้การวางแผนที่ดีที่สุด



รูปที่ 39 แสดงภาพจำลองเพื่อช่วยในการฝึกการทำงาน [18]

- ส่วนช่วยในการบริการ (Servicing)

เทคนิคทางความจริงเสริมนั้น ทำให้สามารถได้รับข้อมูลการซ่อมบำรุงจากฐานข้อมูลดิจิทัล และส่งถ่ายข้อมูลนั้นไปยังผู้ปฏิบัติงาน รวมถึงการรวมภาพวัตถุจริงเข้ากับรายละเอียดขั้นตอนการปฏิบัติงานที่จำเป็น ทำให้เกิดความเป็นไปได้ของการแก้ปัญหาร่วมกันผู้ปฏิบัติงานกับระบบฐานข้อมูล



รูปที่ 40 ภาพแสดงส่วนเสริมในการบริการ [18]

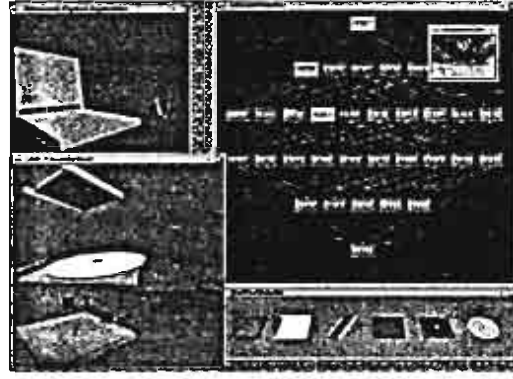
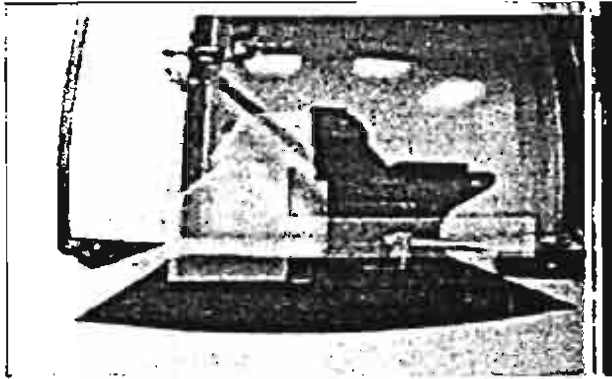
8.3.3 งานวิจัยระบบความจริงเสริมที่ Pennsylvania State University ประเทศสหรัฐอเมริกา [19]

- Augmented Reality for Assembly

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาปัญหาการนำระบบความจริงเสริมไปช่วยงานในส่วนของการประกอบชิ้นส่วน โดยเฉพาะการช่วยประสานงานกับมนุษย์ในการประกอบวัตถุทางกล หรือการหาทางเลือกในการจัดลำดับการประกอบวัตถุต้นแบบ ซึ่งประกอบด้วยวัตถุจริงและวัตถุเสมือน

ในการออกแบบระบบความจริงเสริม สำหรับการนำทางหรือค้นหาการประกอบชิ้นส่วนนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยหลายเทคนิคด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้จะติดตามการประกอบของมนุษย์ โดยจะพิจารณาในหลักการทางด้านหุ่นยนต์ ในส่วนของการออกแบบสำหรับการประกอบ (Assembly Planning) เพื่อหาสถานะของการประกอบ (Assembly States) จะพิจารณาจากเทคนิคของระบบการมองภาพด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) หรือทางด้านการแสดงผลในรูปแบบ

สเตอริโอกราฟิก 3 มิติ และเสียงซึ่งจะเกี่ยวข้องกับทางระบบความจริงเสมือน สำหรับในงานวิจัยนี้ ความสำเร็จจะพิจารณาจากการพัฒนาระบบความจริงเสริม ในการแก้ปัญหการประกอบชิ้นส่วน โดยอาศัยเทคนิคทางการมองภาพด้วยคอมพิวเตอร์

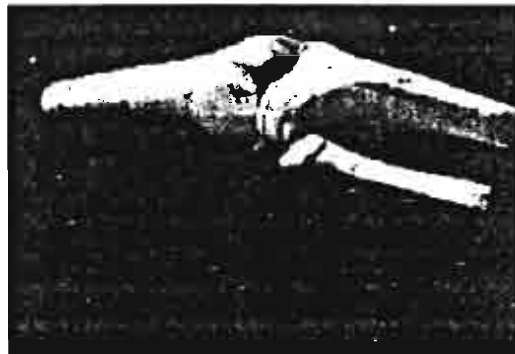


รูปที่ 41 แสดงภาพจากโครงการ Augmented Reality for Assembly [19]

8.3.4 งานวิจัยระบบความจริงเสริมที่ University of Central Florida [20]

- Augmented Reality Dynamic Anatomy Tool

จุดมุ่งหมายในการออกแบบระบบนี้เพื่อให้สามารถมองเห็นการเคลื่อนไหวของโครงสร้างภายในที่ซับซ้อนไปพร้อมกับระบบจริง โดยปัจจุบันจะเน้นไปที่หัวเข่า แต่เทคโนโลยีนี้สามารถพัฒนาไปยังส่วนข้อต่อต่างๆภายในร่างกายได้



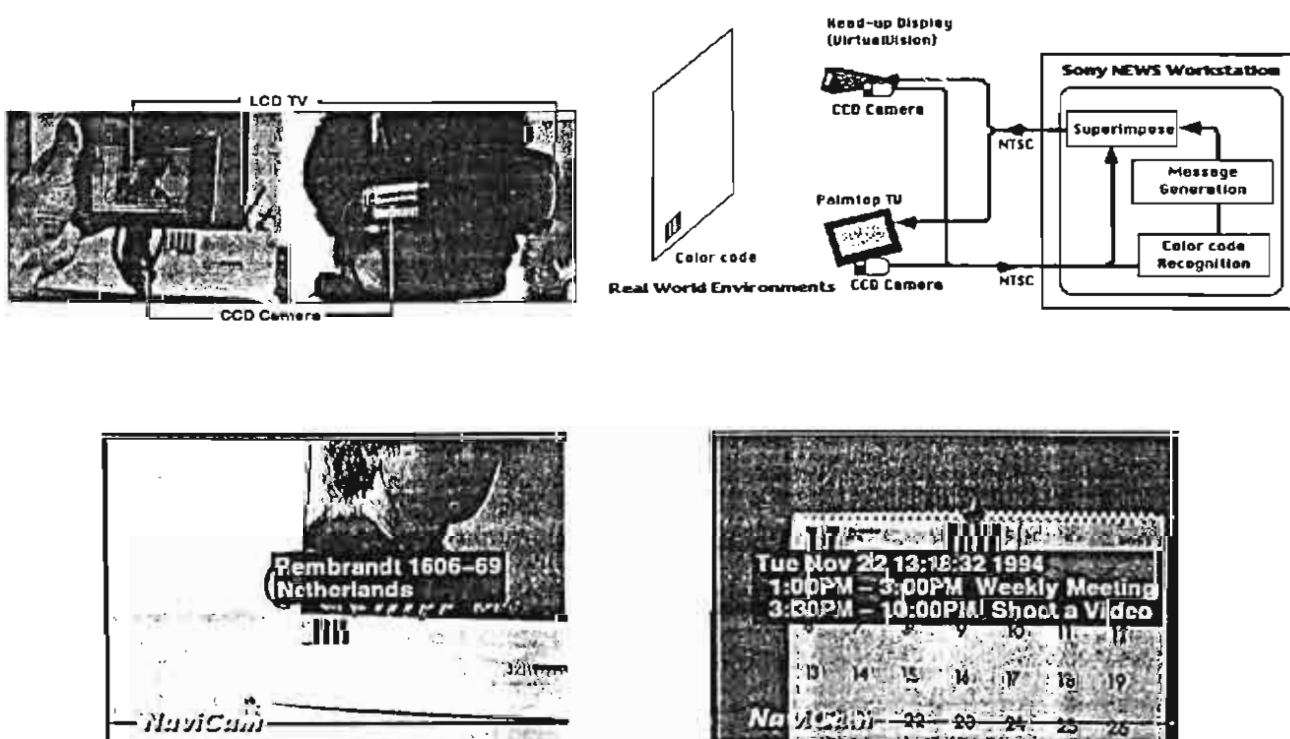
รูปที่ 42 แสดงภาพจากโครงการ Augmented Reality Dynamic Anatomy Tool [20]

8.3.5 งานวิจัยระบบความจริงเสริมที่บริษัท Sony Computer Science Laboratories, Inc. [21]

- Augmented Interaction: The World Through the Computer

เป็นการประยุกต์เทคนิคทางความจริงเสริม ในงานการเชื่อมต่อระหว่างมนุษย์และคอมพิวเตอร์ (Human-Computer Interaction: HCI) โดยจุดประสงค์เพื่อลดการกระทำกับคอมพิวเตอร์ในรูปแบบดั้งเดิมหรือ WIMP (windows, icon, mouse, and pointer device) ซึ่งจะจำกัดให้จุดสนใจของผู้ใช้และข้อมูลที่ได้รับอยู่บนคอมพิวเตอร์เท่านั้น วิธีนี้จะช่วยให้สามารถได้รับข้อมูลและการทำงานร่วมกับโลกจริง ข้อมูลที่ได้รับในสถานการณ์ต่างๆจะอยู่ในขอบเขตการจดจำของระบบคอมพิวเตอร์ โดยที่จะสามารถรู้ถึงสถานะนั้นๆผ่านทางระบบการมองภาพด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Vision) ซึ่งจะช่วยให้คอมพิวเตอร์เข้าใจถึงสถานะของสิ่งแวดล้อมจริงขณะนั้น โดยผ่านทาง การตรวจจับเครื่องหมายหรือหมายเลขประจำตัว เช่น บาร์โค้ด ซึ่งอยู่บนสิ่งแวดล้อมจริง

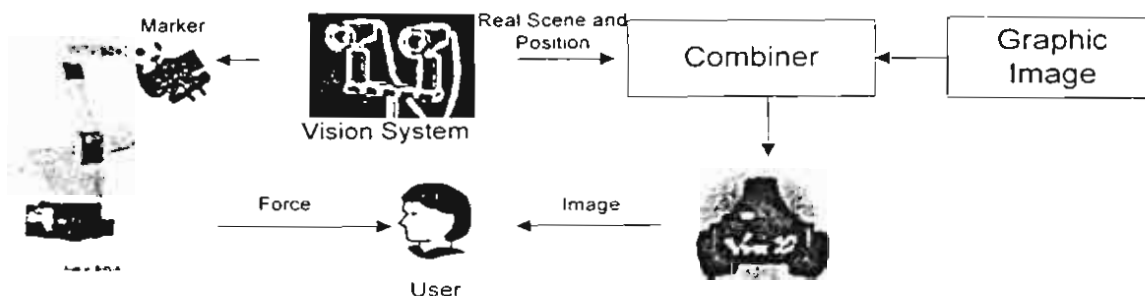
โดยระบบต้นแบบหรือ NaviCam (Navigation Camera) มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ ในรูปแบบของ Palmtop กับกล้อง CCD ขนาดเล็ก และในรูปแบบของ Video See-Through HMD กับกล้องขนาดเล็ก โดยระบบจะอาศัยการตรวจจับสัญลักษณ์สีเพื่อให้สามารถจดจำสถานะสิ่งแวดล้อมนั้น ซึ่งสัญลักษณ์สีนี้จะติดอยู่บนสิ่งแวดล้อมจริงประจำตัววัตถุนั้น



รูปที่ 43 แสดงภาพจากโครงการ Augmented Interaction [21]

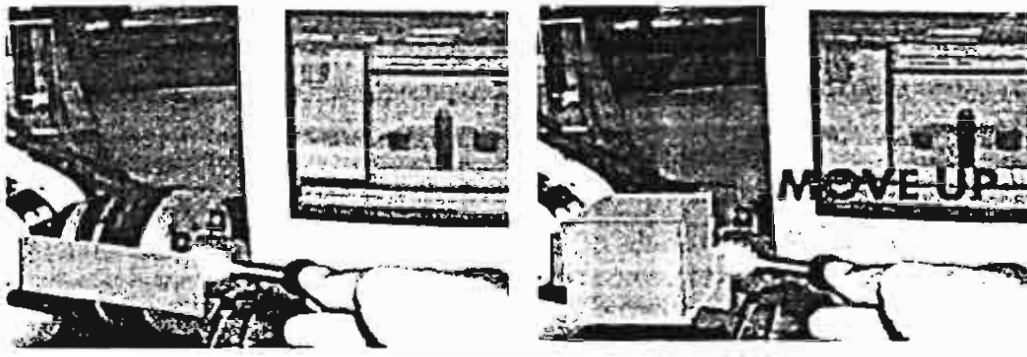
8.4 แนวทางการนำระบบความจริงเสริมมาพัฒนาระบบการถ่ายทอดทักษะที่ได้ดำเนินการแล้ว

จากงานวิจัยตัวอย่างที่ได้นำเสนอมาจะเห็นว่าระบบความจริงเสริมเป็นการนำข้อมูลจากการประมวลผลมาสร้างเป็นภาพเสมือนซ้อนทับกับภาพจริง ดังนั้นถ้ามีการนำระบบความจริงเสริมมาประยุกต์ใช้กับการถ่ายทอดทักษะที่ได้ดำเนินการแล้วที่สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จะทำให้ระบบการถ่ายทอดทักษะมีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้น โดยสามารถที่จะนำไปพัฒนาได้ทั้งการนำไปใช้ในการแสดงวิธีการและขั้นตอนในการทำงาน เสริมเข้าไปในภาพจริงที่มองเห็นในขณะที่ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะกำลังรับการฝึก หรือการนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างการโต้ตอบ (Interaction) ระหว่างวัตถุในสภาพแวดล้อมจริงกับวัตถุเสมือน เพื่อทำให้สามารถสร้างความสามารถในการประกอบชิ้นงานระหว่างวัตถุจริงและวัตถุเสมือน พร้อมทั้งรู้สึกถึงแรงตอบสนองกลับขณะที่รับการถ่ายทอดทักษะ ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะจะเกิดความเข้าใจ เห็นอุปกรณ์จริง และสภาพแวดล้อมจริงในการปฏิบัติงาน ทำให้ผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะเข้าใจในกระบวนการทำงาน มีพัฒนาการที่ถูกต้องและทำงานได้รวดเร็วยิ่งขึ้น ซึ่งการนำระบบความจริงเสริมมาประยุกต์ใช้กับการเสริมข้อมูลให้กับการถ่ายทอดทักษะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 44



รูปที่ 44 รูปแสดงพัฒนาการถ่ายทอดทักษะโดยการประยุกต์ใช้ระบบความจริงเสริม

จากรูปที่ 44 จะได้ว่าระบบวิชั่นจะทำการตรวจจับตำแหน่งของมาร์คเกอร์ซึ่งติดอยู่ที่ปลายแขนหุ่นยนต์ โดยภาพที่ได้จากชุดกล้องจะถูกส่งไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของมาร์คเกอร์ พร้อมทั้งทำการซ้อนภาพกราฟิกที่ได้ประมวลผลแล้ว ทับลงไปบนภาพจริงที่ได้จากชุดกล้อง จากนั้นจะแสดงผลให้กับผู้ใช้ผ่านทางอุปกรณ์แสดงผลแบบสวมหัว ผลที่แสดงให้ผู้ใช้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 45



(1)

(2)

รูปที่ 45 (1) ภาพในมุมมองที่ได้จากชุดกล้อง (2) ภาพที่ได้จากระบบความจริงเสริม

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Edward Colgate, Michael C. Stanley and J. Michael Brown, "Issues in the Haptic Display of Tool Use", In Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems
- [2] J. Edward Colgate and Gerd Schenkel, "Passivity of a class of sampled-data systems: application to haptic interfaces", In American Control Conference. Baltimore, 1994
- [3] Richard J. Adams and Blake Hannaford, "A Two-Port Framework for the Design of Unconditionally Stable Haptic Interfaces", In Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Page(s): 1254-1259
- [4] Richard J. Adams, Manuel R. Moreyra and Blake Hannaford, "Stability and performance of haptic displays: Theory and experiments.", In Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, pp. 227-34., Anaheim, CA, 1998
- [5] Richard J. Adams and Blake Hannaford, "Control Law Design for Haptic Interfaces to Virtual Reality", In IEEE Transactions on Control System Technology, 1999
- [6] Richard J. Adams and Blake Hannaford, "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments", In IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 3 June 1999
- [7] J. Edward Colgate and J. Michael Brown, "Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display", In Proceeding IEEE International Conference on Robotics and Automation, Los Alamitos, CA, 1994, pp. 3205-10
- [8] Lawrence Dale A. and Chapel Jim D., "Performance Trade-Offs for Hand Controller Design", In 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Page(s): 3211-3216
- [9] Yasuyoshi Yokokohji, Ralph Hollis and Takeo Kanade, "What you can see is what you can feel", In IEEE Virtual Reality Annual International Symposium, Santa Clara, CA, March 1996
- [10] Manuel Moreyra and Blake Hannaford, "A Practical Measure of Dynamic Response of Haptic Devices", In Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, May 1998
- [11] CRS Plus Inc., Arm and Controller Installation Manual, 1993.
- [12] Ferdinand P. Beer 2nd, "Vector Mechanics for Engineers Dynamics", McGraw-Hill Book Co., 1990

- [13] Andrew Witkin, David Baraff, "Physically Based Modeling: Principles and Practice Differential Equation Basics", 1997
- [14] John J. Craig 2nd, "Introduction to Robotics Mechanics and Control", Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1955.
- [15] Robert J. Schilling, "Fundamentals of Robotics Analysis and Control", Prentice Hall, 1990
- [16] www.howstuffworks.com/augmented-reality.htm
- [17] Fraunhofer Institut Graphische Datenverarbeitung, (<http://www.igd.fhg.de/>)
- [18] ARVIKA: augmented reality for development, production and service, (www.arvika.de)
- [19] The Pennsylvania State University, (<http://www.psu.edu/>)
- [20] University of Central Florida Orlando, Florida (407) 823-2000, (<http://www.ucf.edu/>)
- [21] Augmented Interaction: The World Through the Computer,
(<http://www.csl.sony.co.jp/person/rckimoto/navi.html>)
- [22] Ronald T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality", Teleoperators and Virtual Environments 6, 1997

วารสารตีพิมพ์

ฉบับที่ 1

ชื่อเรื่อง

The effect of static virtual coupling on realistic performance

ผู้เขียน

นายสมพงศ์ เลิศผลไพโรจน์

ดร.สยาม เจริญเสียง

ดร.ถวิดา มณีวรรณ

รศ.ดร.ชิต เหล่าวัฒนา

ชื่อวารสาร

Asian Conference on Robotics and its Applications

กำหนดประชุมวิชาการ

6 - 8 June 2001, Singapore

The effect of static virtual couplings on realistic performance of haptic systems

Sompong Lertpolpairoj Thavida Maneewarn Siam Charoenseang Djitt Laowattana
Center of operation for Field roBOTics development (FIBO)
King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok Thailand
<http://fibo.me.eng.kmutt.ac.th>

Abstract

The performance of haptic system depends on two properties, i.e. stability and transparency. Improving system stability unfortunately suffers transparency. A virtual coupling network, an artificial coupling between haptic devices and virtual environment, is used to guarantee system stability. However, the use of static virtual couplings could deteriorate the transparency performance. In this paper, we study the effect of a static virtual coupling on realistic performance of a haptic system. Realistic performance boundaries are then proposed as ones in which haptic systems would display realistic interaction between users and environment. These boundaries could be derived from an arbitrary virtual environment model. Finally, the effect of a static virtual coupling on transparency of a haptic system is illustrated by using realistic performance boundaries verified by experimental results.

1. Introduction

The field of virtual reality (VR) enhances communications between human and computers. The VR interface, e.g. visual, audio and etc, promotes natural feeling of human as if he or she interacts with real environment. A haptic interface is an interface that provides force feedback to human. The main objective of haptic interfaces is to provide realistic feeling to users while maintaining stability. Colgate and his colleagues [1] proposed a linear two-port network named *virtual coupling* in order to guarantee system stability. Such component is used to couple simulation of a virtual environment and a haptic device. The passivity concept developed by Colgate and Schenkel [2] was applied to determine parameters of haptic devices. These parameters are necessary for achieving system stability. Hannaford and Adams [3][4][5][6] also implemented a virtual coupling in their system. When each end of this coupling is connected with passive environment and human, necessary and sufficient conditions of the virtual coupling to guarantee the system stability, could be determined. They also modeled passive virtual environment. However, while enhancing the system stability, such a virtual coupling affects the realism of haptic simulation due to coupling impedance. The virtual coupling behaves like a mechanical coupling element connecting between a haptic device and virtual environment simulation.

A high performance haptic interface should allow users to feel like he or she interacts with real environment while, in fact, interacting with virtual environment. Hence, the transparency defined as a

quality of force and velocity transformation of haptic systems, is a very crucial property, in the required performance. Colgate and Brown [7] used a dynamic range of achievable impedance so called "Z-Width" to measure the performance of force reflecting interfaces. Furthermore, Lawrence [8] proposed a concept of "Ideal-Equivalent" which considers the limitation of human sensation. By knowing this limitation, an impedance objective, a range of realistic interaction impedance sufficiently convincing users, could be determined. Yokokohji and his colleagues [9] proposed a concept of visual/haptic interfaces called "What You can See Is What You can Feel (WYSIWYF)". This concept benefits from using correct visual/haptic registration in enhance realism.

The concept of transparency was mainly discussed in two types of motion: free motion and constraint motion. However, in actual simulation, the impedance during interacting processes usually varies considerably from these two cases above. Therefore we propose a new method in performance measuring called "realistic performance boundaries". These boundaries depend on simulation impedance. A haptic system satisfies realistic interaction if the displayed impedance is in these boundaries. We have found that the unrealistic characteristics of haptic simulation depends on several factors. One of them is the virtual coupling. Our preliminary study is to analyze the effect of a static virtual coupling, a virtual coupling whose parameters are not functions of time, on realistic performance of a haptic system (High bandwidth force display: HBFD built by Moreyra [10]) by using realistic performance boundaries. Our study aims at understanding fundamental relationships between stability and transparency such that we can optimize these two properties in our future work. The experimental results which were used to define these boundaries are also included herein.

2. Stability concept and haptic system modeling

2.1 Stability concept

Haptic interface is generally comprised of three components which are human operator, haptic device and virtual environment simulation as shown in Fig 1.

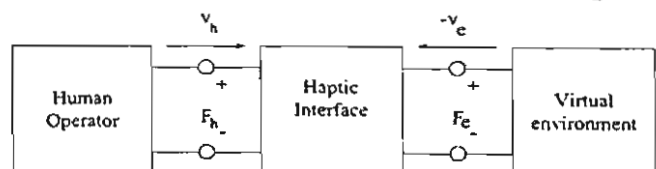


Fig.1 Two-port network of a haptic interface.

These three components could be written in form of a linear two-port mapping as

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ -v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ F_2 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

We assume that the human operator and the virtual environment are passive. Hence, the stability criteria can be derived by using Llewellyn's stability criteria [3] which provides both necessary and sufficient conditions for an absolute stability, i.e.

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

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

In the next subsection, the system model is formulated using a two-port network and the stability criteria is considered, based on eqⁿ (2) and eqⁿ (3).

2.2 Haptic system modeling and stability criteria

In this paper, we consider an impedance display haptic interface with virtual coupling as shown in Fig.2. This haptic system receives motion of a haptic device and computes forces required for such a motion.

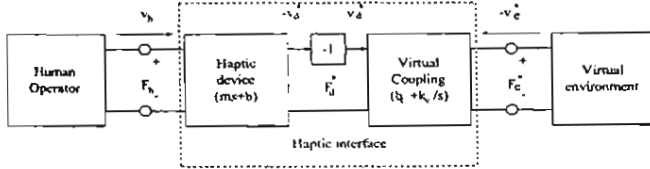


Fig.2 Two-port network of an impedance display haptic interface with a virtual coupling.

A two-port mapping of this device, based on Hannaford [3] is mathematically depicted in a matrix form:

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

where F_h , v_h , F_e and v_e are human force, human velocity, virtual environment force and virtual environment velocity respectively. The parameters with "*" are in discrete forms. As seen in Fig.2, the device impedance, $Z_d(z)$ discretized by the Tustin's method is

$$Z_d(z) = (ms + b) \big|_{s \rightarrow (2/T)(z-1/z+1)}, \quad (5)$$

where m and b are mass and coefficient of viscosity of the haptic device in Fig.2. The virtual coupling impedance $Z_c(z)$ in discretized format is

$$Z_c(z) = (b_c + \frac{k_c}{s}) \big|_{s \rightarrow (z-1)/Tz}. \quad (6)$$

where b_c and k_c are coefficient of viscosity and stiffness of the virtual coupling. The virtual environment discretized by Tustin's method is formulated as

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

where m_e , b_e and k_e are mass, coefficient of viscosity and stiffness of the virtual environment respectively. The zero-order hold operator is considered as a low pass filter:

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

By using the Llewellyn's stability criteria mentioned in eqⁿ (2) and eqⁿ (3) with the two-port mapping model in eqⁿ (4), necessary and sufficient conditions for an absolute stability of the impedance display are

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

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

In the next subsection, we will discuss stability analysis of our testbed. The experiment on this testbed aims at further understanding such conditions in eqⁿ (9) and (10).

2.3 High bandwidth force display (HBFD): stability analysis

The high bandwidth force display is a two-degrees of freedom cartesian haptic device built at the University of Washington Seattle as shown in Fig.3.

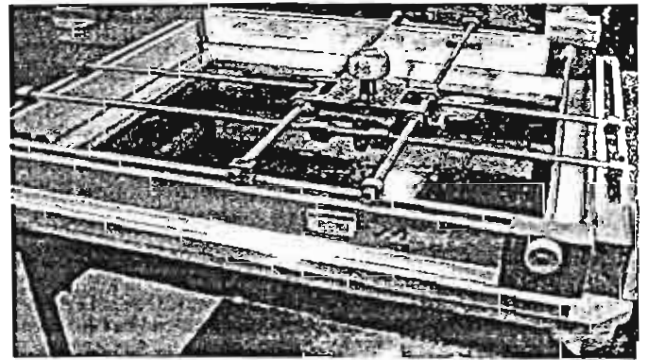


Fig.3 High bandwidth force display (HBFD)

This device can produce a high force output of 100 N (peak at 400 N). A fast update rate of 1000 Hz causes this device suitable for haptic simulation. The details of this system can be found in [10].

By following the analysis processes in [4], determining a mathematical model of the high

bandwidth force display, we can plot the right-hand side of equation eqⁿ (10) versus frequency to form a theoretical lower bound for $\text{Re}(1/Z_{c1}(z))$. It is plotted as a solid-line in Fig.4.

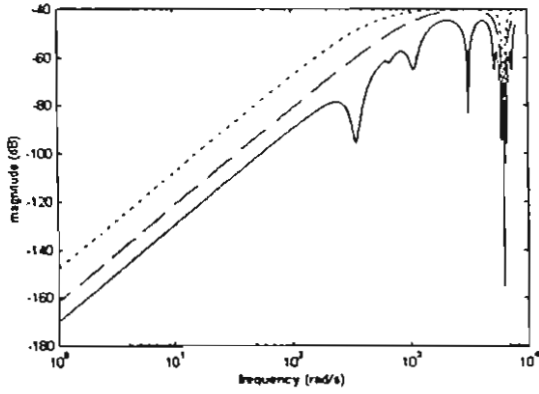


Fig.4 Stability criteria of an impedance haptic display.

The theoretical parameters of virtual coupling are as follow: $k_c=110$ kN/m and $b_c=100$ Ns/m, plotted in a long-dash-line in Fig.4. When these parameters are implemented, the system could be easily unstable. This instability results from using the worst case values of virtual coupling for ensuring system stability. In addition, factors such as nonlinear friction, human operator model and etc. are ignored. By fine tuning the virtual coupling parameters, we have found that the suitable parameters are as follow: $k_c=50$ kN/m and $b_c=100$ Ns/m. This new virtual coupling is also plotted as a short-dash-line in Fig.3.

3. Transparency Concept

Realistic performance of a haptic interface can be described in term of "Transparency" which indicates the quality of force and velocity transformation between human and virtual environment. The quality of force and velocity transformation is described by human perceived impedance which is an impedance that human perceives while interacting with a haptic system. There are two cases of human perceived impedance i.e. human perceived impedance of a haptic interface with virtual coupling ($Z_{h_vc}(z)$) and without virtual coupling ($Z_h(z)$). From (4), human perceived impedance of a haptic interface with a virtual coupling ($Z_{h_vc}(z)$) is derived as

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

where $\frac{v_e}{v_h}$ can be formulated using (6) and (7) as

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

The human perceived impedance of the haptic interface without virtual coupling ($Z_h(z)$) can be derived from eqⁿ (4) by letting $Z_c(z)$ approaches infinity as

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

The haptic device having a perfect transparency allows the force and velocity perceived by human to be equal to force and velocity of the virtual environment ($F_h = F_e$, $v_h = v_e$). Lawrence [8] proposed a transparency concept called "Ideal-equivalent". This concept is based on limitation of human perception, related to impedance objectives. These impedance objectives are impedance boundaries which adequately convince the users operating in two types of motions, i.e. free motion and constraint motion. The ideal-equivalent concept represents the bound of free and constraint motion, regardless of the realistic performance of the motion which lies between. In fact, types of motion in the real simulation are not restricted in these two cases. For this reason, we propose the realistic performance boundaries, to be thoroughly explained in next subsection.

3.1 Realistic performance boundaries

The realistic performance boundaries represent variation of human perceived impedance ($Z_h(z)$) while stably interacting with the reference environment through a haptic interface without virtual coupling. These boundaries depend on impedance of an adjustable virtual environment. They could be delineated from an experimental data. The parameters of adjustable virtual environment are adjusted by users such that they can perceive this environment to be the same as the reference environment. The adjusted parameters are analyzed using confidence interval theory to find the range of parameters that satisfies this realistic interaction. The upper and lower values of this range are substituted into the human perceived impedance equation (13) and the plot of realistic performance boundaries can be obtained as shown in Fig.5.

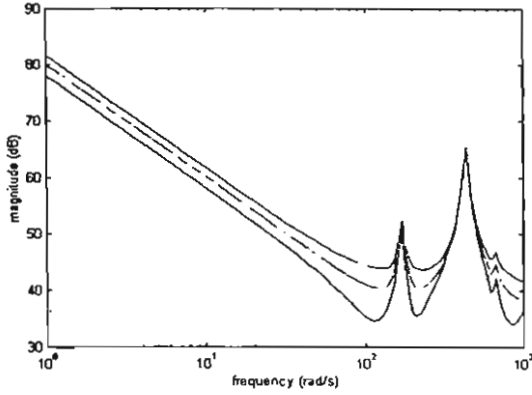


Fig.5 Realistic performance boundaries of a haptic interaction

The dash-line represents the human perceived impedance when interacting with the reference virtual environment. Two solid-lines above and under the dash-line are the upper boundary and lower boundary of realistic boundaries respectively. The band of realistic performance boundaries is defined as the difference between the upper and lower boundaries. The accuracy of these boundaries relies on number of subjects participating in this experiment. If the experimental data is a normal-distribution one, thirty subjects are sufficient to represent all population (the t-distribution will approach normal-distribution when samples are equal or more than thirty). If we use 99 percent confidence interval, we can conclude that 99 percent of users would feel realistically when the displayed impedance is within this boundary.

3.2 Experimental procedure

The experimental procedure is carried out step-by-step as follow:

Step 1: Defining a reference virtual environment impedance ($Z_e(z)$) that we want to determine the realistic performance boundaries,

Step 2: Simulating this reference environment on a haptic system (without virtual coupling). Users have to use these interacting forces generated from ($Z_e(z)$) as references,

Step 3: Using the same device to simulate another environment called an adjustable virtual environment which has different impedance from the reference virtual environment. Users are required to adjust parameters of this environment until he or she feels as if interacting with the reference environment. Meanwhile, stiffness and damping of this adjusted virtual environment (k_{e_adj} , b_{e_adj}) are observed,

Step 4: Calculating the mean ($\bar{X}$) and the standard deviation (SD) of k_{e_adj} and b_{e_adj} among n users. Using the confidence interval (CI) theory to determine the range of stiffness and damping that have 99 percent confidence interval.

The $\bar{X}$ and SD are determined as follow:

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

The upper bound (x_{UCI}) and lower bound (x_{LCI}) of the 99 percent confidence interval of data (x) can be found by

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

where n is number of sample, $x_{\text{confidence}}$ is confidence interval, $t_{\alpha/2, v}$ is the t-distribution value which have 99 percent confidence interval and $\alpha = 1 - (0.01 \times CI)$.

Step 5: Simply substituting the minimum and maximum of the range of stiffness and damping into the virtual environment model.

We obtain the lower boundary as

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

and the upper boundary as

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

The realistic performance boundaries are determined by substituting eqⁿ (16) and eqⁿ (17) into eqⁿ (13). A plot of $Z_h(z)$ in eqⁿ (13) versus frequencies is readily obtained.

4. Experimental results

In our experiment, ten subjects were performed with the high bandwidth force display using one degree of freedom (1-DOF) virtual environment. Five cases of reference virtual environment impedance are varied from nearly free motion impedance to nearly constraint impedance. Note that very low impedance is the case that b_e and k_e are 0.1 N.s/m and 10 N/m respectively; low impedance is the case that b_e and k_e are 1 N.s/m and 1000 N/m respectively; medium impedance is the case that b_e and k_e are 10 N.s/m and 10000 N/m respectively; high impedance is the case that b_e and k_e are 25 N.s/m and 25000 N/m respectively and very high impedance is the case that b_e and k_e are 50 N.s/m and 50000 N/m respectively. Our environment

was simulated as a virtual wall as shown as a dotted line in Fig.6.

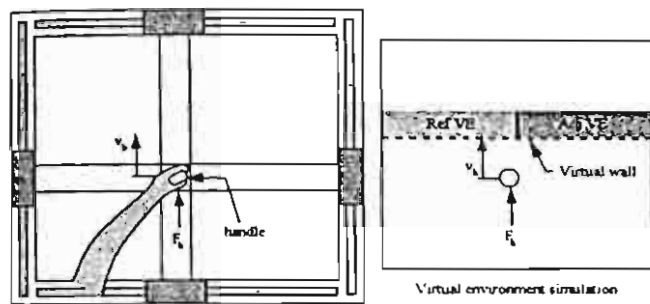


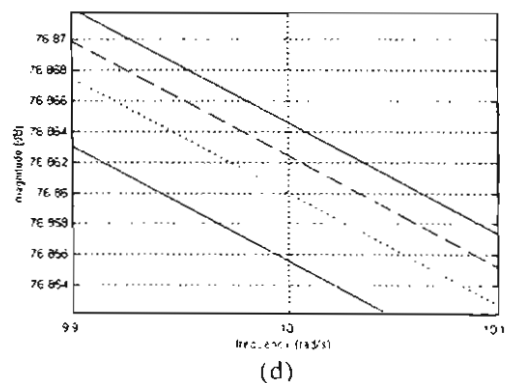
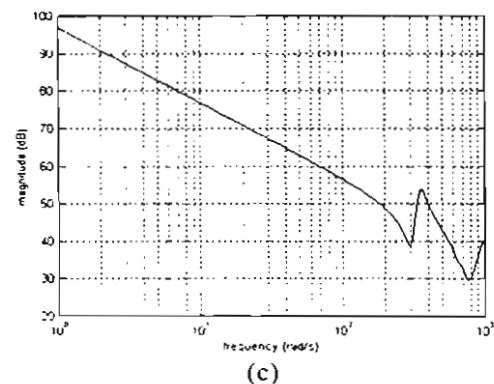
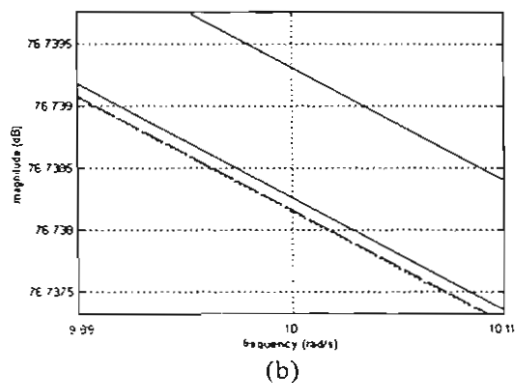
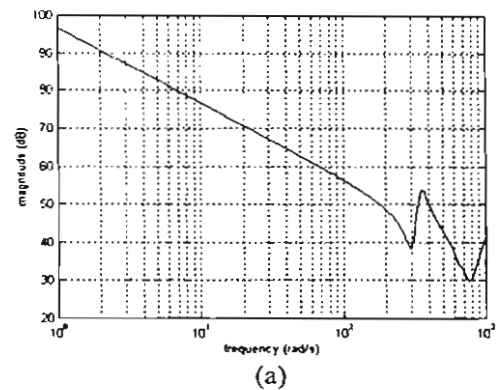
Fig.6 Virtual wall simulation. (Note that Ref VE and Adj VE are reference and adjustable virtual environment respectively)

As shown in Fig.6, the adjustable virtual environment is placed beside the reference virtual environment in order to compare the force feedback between these two environments. The updated force corresponding to the adjusted parameters, are displayed in real-time. Therefore, users can perceive the updated forces while adjusting parameters. Users can also adjust parameters of the virtual environment (b_{e_adj} , k_{e_adj}) until he or she feel like interacting with the reference virtual environment. The final adjusted parameters were analyzed by using the confidence interval theory among all subjects and shown in Table.1.

VE	Parameters	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

Table.1 Experimental results (Note that VE is virtual environment, stiffness is in N/m and damping is in N.s/m)

From Table.1, the lower and upper bound of parameters are calculated such that the realistic performance boundaries of each reference virtual environment is found. However we will analyze only three cases of virtual environment that represent three different types of interaction as plotted in Fig.7.



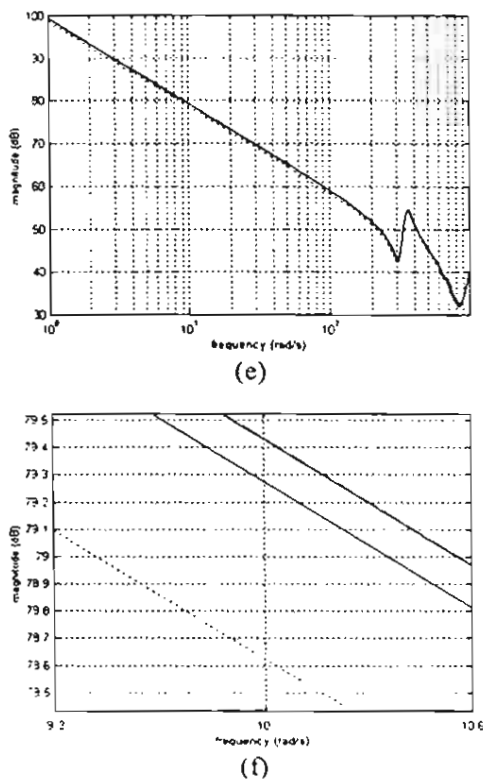


Fig.7 Plot of realistic performance boundaries (solid-line), $Z_h(z)$ (long-dash-line) and $Z_{h_vc}(z)$ (short-dash-line) when the virtual environment parameters are (a) $b_e = 0.1$ N.s/m, $k_e = 10$ N/m, (b) enlarged figure of Fig.7a, (c) $b_e = 1$ N.s/m, $k_e = 1000$ N/m, (d) enlarged figure of Fig.7c, (e) $b_e = 25$ N.s/m, $k_e = 25000$ N/m, (f) enlarged figure of Fig.7e.

The short-dash-line is a plot of human perceived impedance of a haptic interface with a static virtual coupling ($Z_{h_vc}(z)$). The long dash-line is a plot of human perceived impedance of a haptic interface without virtual coupling ($Z_h(z)$) while the solid-lines are upper and lower boundaries. As shown in Fig. 7a, 7c and 7e, these four lines could not be distinguished. Hence, we also plotted Fig. 7b, 7d and 7f as enlarged figures of these four lines at frequency between 9.89 rad/s to 10.11 rad/s, between 9.9 rad/s to 10.1 rad/s and between 9.3 rad/s to 10.6 rad/s respectively.

5. Discussion

From Fig. 7a, 7c and 7e, it can be seen that the plot of these three different virtual environments have similarly shape but different magnitude. The magnitude is high when the virtual environment has high impedance and low when the virtual environment has low impedance. Due to the flexibility of the high bandwidth force display mechanisms, there are some peaks caused by system resonance at the frequencies

above 300 rad/s. The effect of system resonance could be also observed as several knots in Fig.4. However, the frequency range of force feedback that human can perceive is below 100 rad/s. Therefore, we can ignore the resonance effect at such a frequency.

Fig. 7b, plot of $Z_{h_vc}(z)$ is almost the same line as plot of $Z_h(z)$ but both of them lie below the realistic performance boundaries. Thus, we can conclude that at low impedance virtual environment the effect of virtual coupling on realistic performance is not significant. We also observed that boundaries of impedance allowing human to feel like interacting with the nearly-free motion impedance, are higher than the impedance that the haptic system can display. Therefore, there are minimum impedance boundaries that human can perceive called minimum free motion impedance boundaries.

Fig. 7d shows that both plot of $Z_{h_vc}(z)$ and $Z_h(z)$ are in the realistic performance boundaries. The plot of $Z_{h_vc}(z)$ lies below $Z_h(z)$. Thus, we can conclude that human perceived impedance is decreased from the effect of virtual coupling. However, $Z_{h_vc}(z)$ satisfies the realistic performance boundaries.

In Fig. 7f, both plots of $Z_{h_vc}(z)$ and $Z_h(z)$ are out of the realistic performance boundaries. It can be seen that the plot of $Z_{h_vc}(z)$ lies below lower boundary. Thus, users would perceive unrealistic interaction. Since, plot of $Z_h(z)$ lies above the upper boundary, we can conclude that human perception has limitation. As the consequence of this limitation, we can display the realistic interaction of reference virtual environment if the displayed impedance is in the realistic boundaries.

From Fig.7b, 7d and 7f, the band of realistic performance boundaries is the difference between upper and lower boundaries of interaction. This band has some relationship with the virtual environment impedance. It is small when interacting with low impedance environment and large when interacting with high impedance environment. Based on this observation, we can conclude that at low impedance simulation, the ability of human perception to distinguish the difference in virtual environment impedance is higher than one at high impedance simulation.

The human perceived impedance, displayed from the haptic system with an impedance typed virtual coupling, is always smaller than the impedance of the virtual environment. The use of static virtual coupling may affect the realistic performance of the haptic system. The static virtual coupling parameters, which are derived for guaranteeing overall system stability, only suitable for high impedance simulation. However when simulating lower or medium impedance, the human perceived impedance with static virtual coupling may not be within the realistic performance boundaries. Thus, ways to adjust the virtual coupling impedance to

satisfy both stability criteria and realistic performance boundaries should be thoroughly investigated.

6. Conclusion and Future works

In this paper, we propose the realistic performance boundaries representing variation of human perceived impedance ($Z_e(z)$). These boundaries which depend on virtual environment impedance are delineated from experimental data. Based on these boundaries, the realistic performance of haptic system can be determined. We have found that the use of static virtual coupling in haptic systems could affect realistic performance. Therefore, our future works are to enhance the realistic performance of haptic systems by adapting virtual coupling parameters according to dynamics of virtual environment.

Acknowledgement

This research is financially supported by the Thailand Research Fund (TRF) under the contact number BRG/2/2542. The authors highly appreciate such a funding. We also feel grateful of using a testbed built at the BioRobotics laboratory, University of Washington Seattle.

References:

- [1] J. Edward Colgate, Michael C. Stanley and J. Michael Brown, "Issues in the Haptic Display of Tool Use", In *Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*
- [2] J. Edward Colgate and Gerd Schenkel, "Passivity of a class of sampled-data systems: application to haptic interfaces", In *American Control Conference*, Baltimore, 1994
- [3] Richard J. Adams and Blake Hannaford, "A Two-Port Framework for the Design of Unconditionally Stable Haptic Interfaces", In *Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Page(s): 1254-1259
- [4] Richard J. Adams, Manuel R. Moreyra and Blake Hannaford, "Stability and performance of haptic displays: Theory and experiments.", In *Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*, pp. 227-34., Anaheim, CA, 1998
- [5] Richard J. Adams and Blake Hannaford, "Control Law Design for Haptic Interfaces to Virtual Reality", In *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1999
- [6] Richard J. Adams and Blake Hannaford, "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments", In *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 3 June 1999
- [7] J. Edward Colgate and J. Michael Brown, "Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display", In *Proceeding IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Los Alamitos, CA, 1994, pp. 3205-10
- [8] Lawrence Dale A. and Chapel Jim D., "Performance Trade-Offs for Hand Controller Design", In *1994 IEEE*

International Conference on Robotics and Automation, Page(s): 3211-3216

[9] Yasuyoshi Yokokohji, Ralph Hollis and Takeo Kanade, "What you can see is what you can feel", In *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, Santa Clara, CA, March 1996

[10] Manuel Moreyra and Blake Hannaford, "A Practical Measure of Dynamic Response of Haptic Devices", In *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, May 1998

วารสารตีพิมพ์

ฉบับที่ 2

ชื่อเรื่อง

Realistic and stability performances of haptic system with adaptive virtual coupling

ผู้เขียน

นายสมพงศ์ เลิศผลไพโรจน์

ดร.ถวิดา มณีวรรณ

รศ.ดร.จิต เหล่าวัฒนา

ชื่อวารสาร

IEEE International Conference on Industrial Technology

กำหนดประชุมวิชาการ

11-14 December 2002, Bangkok

Realistic and Stability Performances of Haptic System with Adaptive Virtual Coupling

S. Lertpolpairoj T. Maneewarn S. Laowattana
Center of operation for Field roBOTics development (FIBO)

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok THAILAND
<http://www.fibo.kmutt.ac.th>

Abstract

A high performance haptic system should provide both stable and realistic interaction to users. In order to improve system stability, virtual couplings have been used in order to separate the haptic display from virtual environment simulations. A static virtual coupling can improve system stability but unfortunately degrades realistic performance of the system. This improved concept named adaptive virtual coupling is designed such that its parameters can be adjusted to maximize realistic performance while ensuring stability. The experimental result indicated that with adaptive virtual coupling users could feel more realistic interaction than the existing static virtual coupling method.

Keywords: Haptic System, Realistic Performance, Virtual Reality

1. Introduction

Visual-based interaction, a VR interaction modality, while very useful for many applications, is sometimes insufficient to give the user a sense of immersion in the virtual environment. Many simulations, especially ones that involve manual dexterity, require haptic sensation to allow user to understand the digital information. Not only the correspondence of force and visual interface, but also the safety of the interaction should be seriously concerned. For these reasons, the main objective of haptic interface is to provide realistic feeling to users while maintaining stability.

Many researches have been explored the aspect of stability in haptic system for ensuring haptic system stability. Colgate and his colleague [1] proposed a linear two-port network named virtual coupling in order to guarantee system stability. Such component is used to couple simulation of a virtual environment and haptic device. These parameters are necessary for achieving system stability. Hannaford and Adams [3][4][5] also implemented a virtual coupling in their system. When each end of this coupling is connected with passive environment and human, necessary and sufficient conditions of the virtual coupling which guarantee system stability could be determined. Ryu and Hannaford [6] used a time domain passivity control in order to regulate the excess energy and perform a real-time dissipation. However, while enhancing the system stability, such a virtual coupling affects the realism of haptic simulation due to coupling impedance.

A high performance haptic interface should allow users to feel like he or she interacts with real environment while, in fact, interacting with virtual environment.

Hence, the transparency defined as a quality of force and velocity transformation of haptic systems is a very crucial property in the required performance. Colgate and Brown [7] used a dynamic range of achievable impedance so called "Z-Width" to measure the performance of force reflecting interfaces. Furthermore, Lawrence [8] proposed a concept of "Ideal-Equivalent" which considers the limitation of human sensation. By knowing this limitation, an impedance objective, a range of realistic interaction impedance sufficiently convincing users, could be determined.

2. Virtual Coupling

Consider a linear one-degree of freedom impedance display haptic system as shown in figure 1

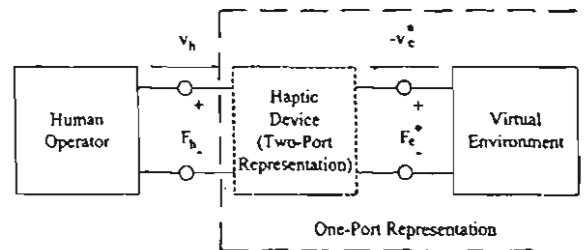


Figure 1 Impedance Display Haptic System

From figure 1, F_h , v_h , F_e and v_e represent human force, human velocity, virtual environment force and virtual environment velocity, respectively. The parameters with "*" are in discrete form. The haptic system can be modeled in form of Two-port representation as

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -v_e^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d(z) & \text{ZOH}(z) \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ F_e^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

In order to find the unconditionally stability criteria of a two-port network haptic system, the human operator and the virtual environment should be assumed to be passive operators. From Llewellyn's stability criteria [6], typical haptic system would not be unconditional stable. However, it does not mean that the system will always unstable. Therefore, Colgate and his colleague [2] proposed a virtual coupling which is a synthetic coupling. This coupling, which will be described in the next subsection, is used as a complementary component in order to make the system satisfy unconditionally stability criteria.

A virtual coupling, a synthetic coupling which is shown in figure 2, is used for connecting between the haptic device and the virtual environment in order to improve the stability of haptic interface system.

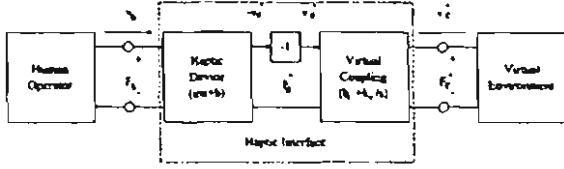


Figure 2. Schematic Diagram of a Haptic System with a Virtual Coupling

This coupling could be modeled as any arbitrary structure. As shown in figure 2, a spring/damper model is used as our coupling. The impedance of the virtual coupling is

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

The two-port representation of the haptic system with a virtual coupling can be written as

$$\begin{bmatrix} F_h \\ -v_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d(z) & ZOH(z) \\ -1 & 1/Z_c(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_h \\ F_e \end{bmatrix} \quad (3)$$

Based on Llewellyn's stability criteria [6], this haptic system with a virtual coupling would be an unconditionally stable system if

$$\text{Re}(Z_d(z)) \geq 0, \quad (4)$$

$$\text{Re}(1/Z_c(z)) \geq 0, \quad (5)$$

$$\text{Re}(1/Z_c(z)) \geq \frac{1 - \cos \angle ZOH(z)}{2 \text{Re}(Z_d(z))} |ZOH(z)| \quad (6)$$

From equation (6), the virtual coupling could be designed to satisfy the unconditionally stability criteria.

3. Adaptive Virtual Coupling

Even though the use of the pre-calculated virtual coupling can ensure system stability when the human operator and the virtual environment are passive, but at the same time the realistic performance is affected. Thus, the compromising solution between stability and realistic performance of haptic system can be found by adapting the virtual coupling parameters. The adaptive virtual coupling has parameters that are adapted according to interaction frequency to satisfy both stability condition and realistic performance during operation.

The realistic performance boundaries, proposed by Lertpolairoj and his colleagues [10], represent variation of human perceived impedance ($Z_h(z)$) while stably interacting with the reference environment through a haptic interface without virtual coupling.

These boundaries depend on impedance of an adjustable virtual environment. They could be delineated from an experimental data. The upper and lower values of this range are substituted into the human perceived impedance equation, equation (1), and the plot of realistic performance boundaries can be

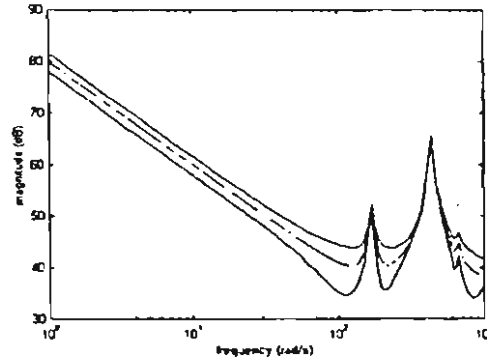


Figure 3. Realistic Performance Boundaries of a Haptic Interaction

impedance while interacting with a reference virtual environment. Two solid-lines above and under the dash-line are the upper boundary and lower boundary of the realistic performance boundaries respectively.

3.1 An Algorithm for Determining Parameters of an Adaptive Virtual Coupling

adaptive virtual coupling is

$$Z_{avc}(z) = \left(b_{avc}(z) + \frac{k_{avc}(z)}{s} \right) \Big|_{s \rightarrow \frac{z-1}{Tz}} \quad (7)$$

Thus, the human perceived impedance of haptic system with an adaptive virtual coupling ($Z_{h_avc}(z)$) can

$$Z_{h_avc}(z) = Z_d(z) + ZOH(z)Z_{e_avc}(z) \quad (8)$$

$$\text{where } Z_{e_avc}(z) = \frac{Z_c(z)Z_{avc}(z)}{Z_e(z) + Z_{avc}(z)} \quad (9)$$

Suppose that we want to find an adaptive virtual coupling of a virtual environment. The first set of parameters that should be determined are the parameters of the realistic performance boundaries such as the damping and stiffness of the upper bound (b_{e_UCI} and k_{e_UCI}) and the damping and stiffness of the lower bound (b_{e_LCI} and k_{e_LCI}). The desired human perceived impedance

$(Z_{h_ds}(z))$, which represents these boundaries as shown in equation (10), can be formulated.

$$Z_{h_ds}(z) = Z_d(z) + ZOH(z)Z_{ds}(z) \quad (10)$$

, where the desired impedance is

$$Z_{ds} = \left(\frac{(b_e \cdot UC1 + b_e \cdot LC1)}{2} + \frac{(k_e \cdot UC1 + k_e \cdot LC1)}{2s} \right) \Big|_{s \rightarrow \frac{T(z-1)}{2(z+1)}}$$

The desired impedance is defined as the impedance, which its magnitude is laying in the middle between the upper bound and the lower bound. Thus, the parameters of Z_{ds} are the average parameters between the parameters of these two bounds. Reminding that the goal of the adaptive virtual coupling is to maximize the realistic performance while ensuring system stability. Hence, this goal can be mathematically formulated as: To minimize:

$$\left| Z_{h_ds}(z) - Z_{h_avc}(z) \right|^2 \quad (11)$$

Subject to constraint:

$$\text{Re}(Z_{h_avc}(z)) \geq 0, \forall \omega \in \mathbb{R} \quad (12)$$

However, it is not easy to use b_{avc} and k_{avc} as the optimized variables because the impedance equations, i.e. human perceived impedance of haptic system with adaptive virtual coupling ($Z_{h_avc}(z)$) and

$Z_{h_ds}(z)$, are all complex functions. Moreover, our constraint, which is described in form of

$\text{Re}(Z_{h_avc}(z))$, cannot be easily represented in

b_{avc} and k_{avc} . The feasible region of the solution (feasible b_{avc} and k_{avc} that satisfy the objective function and the constraint) is possibly a complicated contour and difficult to be determined. Therefore, in order to simplify our problem we use real part of $Z_{h_avc}(z)$ ($\text{Re}(Z_{h_avc}(z))$) and imaginary part of $Z_{h_avc}(z)$ ($\text{Im}(Z_{h_avc}(z))$) instead of b_{avc} and k_{avc} .

$$J = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\text{Re}(Z_{h_ds}(z)) - \text{Re}(Z_{h_avc}(z))}{\text{Re}(Z_{h_ds}(z)) - \text{Re}(Z_{h_avc_max}(z))} \right)^2 + \left(\frac{\text{Im}(Z_{h_ds}(z)) - \text{Im}(Z_{h_avc}(z))}{\text{Im}(Z_{h_ds}(z)) - \text{Im}(Z_{h_avc_max}(z))} \right)^2 \right] \quad (13)$$

where the constraint is the same as constraint equation (12). The terms $\text{Re}(Z_{h_avc_max}(z))$ and

$\text{Im}(Z_{h_avc_max}(z))$ are the maximum real part and imaginary part of the searching space, respectively. Meanwhile, two conditions, i.e.

$$\text{Re}(Z_{h_avc_max}(z)) \geq \text{Re}(Z_{h_ds}(z)) \text{ and}$$

$$\text{Im}(Z_{h_avc_max}(z)) \geq \text{Im}(Z_{h_ds}(z)) \text{ must be}$$

satisfied in order to ensure that the minimum point is located in the searching area. Instead of finding the

minimum difference between $|Z_{h_ds}(z)|$ and

$|Z_{h_avc}(z)|$, the new objective is to find the

minimum difference between $\text{Re}(Z_{h_ds}(z))$ and

$\text{Re}(Z_{h_avc}(z))$, and between $\text{Im}(Z_{h_ds}(z))$

and $\text{Im}(Z_{h_avc}(z))$. This objective function,

plotted in figure 5, is a quadratic function which has only one minimum point at.

$$[\text{Re}(Z_{h_avc}(z)), \text{Im}(Z_{h_avc}(z))] = [\text{Re}(Z_{h_ds}(z)), \text{Im}(Z_{h_ds}(z))]$$

From equation (25), the constraint is an inequality linear constraint, thus the feasible region can be directly drawn on the contour of the objective function. Such that, there are only two possible cases which are $\text{Re}(Z_{h_avc}(z)) \geq 0$ and $\text{Re}(Z_{h_avc}(z)) < 0$.

Case 1: $\text{Re}(Z_{h_avc}(z)) \geq 0$

The minimum point which is the solution is $[\text{Re}(Z_{h_avc}(z)), \text{Im}(Z_{h_avc}(z))] = [\text{Re}(Z_{h_ds}(z)), \text{Im}(Z_{h_ds}(z))]$

Case 2: $\text{Re}(Z_{h_avc}(z)) < 0$

The minimum point which is the solution is $[\text{Re}(Z_{h_avc}(z)), \text{Im}(Z_{h_avc}(z))] = [0, \text{Im}(Z_{h_ds}(z))]$

After $\text{Re}(Z_{h_avc}(z))$ and

$\text{Im}(Z_{h_avc}(z))$ are determined, b_{avc} and k_{avc}

which are the actual variables that we want to determine can be easily derived by follow these steps.

Step 1:

$$Z_{h_avc}(z) = \text{Re}(Z_{h_avc}(z)) + j\text{Im}(Z_{h_avc}(z)) \quad (14)$$

Step 2:

$$Z_{e_avc}(z) = \frac{Z_{h_avc}(z) - Z_d(z)}{ZOH(z)} \quad (15)$$

Step 3:

$$Z_{avc}(z) = \frac{Z_e(z)Z_{e_avc}(z)}{Z_e(z) - Z_{e_avc}(z)} \quad (16)$$

Step 4:

$$b_{avc} = \left[\text{Re}(Z_{avc}(z)) - \frac{k_{avc} \text{Re}(s)}{(\text{Re}(s)^2 + \text{Im}(s)^2)} \right] \Big|_{s \rightarrow \frac{T(z-1)}{2(z+1)}} \quad (17)$$

3.2 Implementation of adaptive virtual coupling

In order to implement the adaptive virtual coupling, there are two components, i.e. the interacting frequency estimator and the adaptation procedure, added in the system as illustrated in figure 4. The parameters of the

virtual coupling, i.e. b_{avc} and k_{avc} , are frequency dependent. Therefore, the frequency, which represents the response of human perceived impedance of haptic system with adaptive virtual coupling ($Z_{h_avc}(z)$), has to be determined in order to be used for adjusting the parameters of the virtual coupling. This frequency, which is called interacting frequency (IF) could be a point or a range of frequency characterized by haptic interaction.

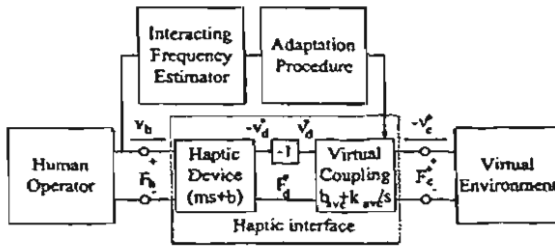


Figure 4. Schematic Diagram of a Haptic System with an Adaptive Virtual Coupling

From the parameters of the realistic performance boundaries in [10] the parameters of the adaptive virtual coupling with respect to frequency would be determined.

From Figure 5, short-dash-line is a plot of human perceived impedance of a haptic interface with a static virtual coupling. The long dash-line is a plot of human perceived impedance of a haptic interface without virtual coupling ($Z_h(z)$) while the solid-lines are upper and lower boundaries. The dash-dot-line is a plot of human perceived impedance of a haptic interface with adaptive virtual coupling ($Z_{h_avc}(z)$), while the dotted-line is the desired impedance

From these results, two criteria that we concerned are the stability and the realistic performance of the haptic system. The objectives of an adaptive virtual coupling are to eliminate or reduce the unrealistic of haptic interaction caused by the static virtual coupling while ensuring system stability. From figure 5e plot of $\text{Re}(Z_{h_avc}(z))$ (dash-dot-line) shows that this term is greater than zero, therefore the system satisfies the stability criteria. From figure 5b the plots of human perceived impedance of a haptic interface with adaptive virtual coupling ($Z_{h_avc}(z)$) are located in the realistic performance boundaries. Thus these systems are said to be realistic haptic systems based on the concept of the realistic performance boundaries.

Figure 5e show that in case of no virtual coupling, the real-part of the realistic performance boundaries are negative thus $\text{Re}(Z_{h_ds}(z)) < 0$. As these consequences, from equation (12) the

$\text{Re}(Z_{h_avc}(z)) > 0$ must be set to be greater than zero in order to ensure system stability.

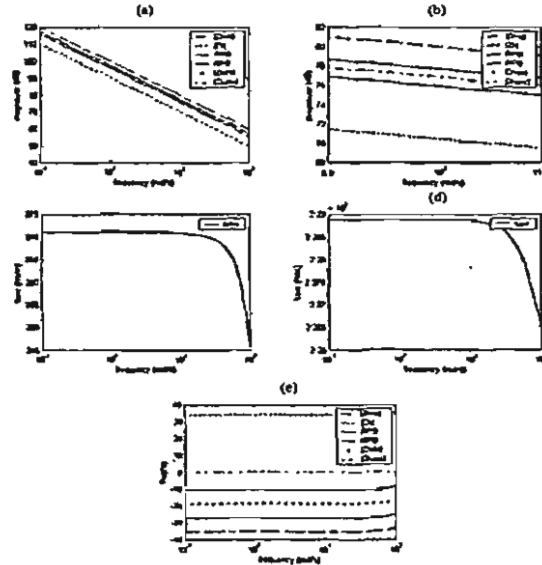


Figure 5 Plot of the Results on the Determination of the Adaptive Virtual Coupling of virtual environment ($b_e = 10$ N.s/m, $k_e = 100000$ N/m) (a) Plot of Human Perceived Impedance, (b) Enlarged Figure of Figure 5a, (c) Plot of b_{avc} , (d) Plot k_{avc} and (e) Plot of $\text{Re}(Z_h(z))$

4. Experiment : Evaluating the Realistic Performance of Adaptive Virtual Couplings

The experiment was performed to qualitatively evaluate the performance of the adaptive virtual coupling system in comparison to the static virtual coupling. Our virtual environment was a virtual wall as shown by a dotted line in figure 6. The High Bandwidth Force Display Device from University of Washington [9] was used as the haptic interface device. Based on the realism of interaction of each virtual environment, users were asked to match one of the simulations (VEC1 or VEC2) with the reference virtual environment (Ref VE). The VEC1 and VEC2 were randomly assigned to be the virtual environment with static virtual coupling or with adaptive virtual coupling. Such that, the user had no bias in the experiment. The virtual environment VE1-7 has various mechanical properties ranging from low to high stiffness respectively. The stability of the interactions was observed based on the convergence of the interaction velocity. The system is said to be a stable system if the velocity, eventually, converges to zero. The results are presented in the Table 1.

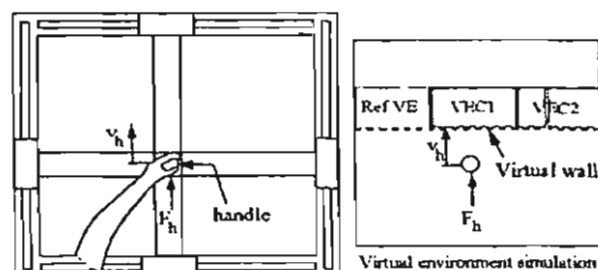


Figure 6 A Simulation Used as an Evaluation of Realistic Performance (Note that: Ref VE, VEC1 and VEC2 are Referenced Virtual Environment, Referenced Virtual Environment with Virtual Coupling (Number One) and Referenced Virtual Environment with Virtual Coupling (Number Two))

Table 1 Experimental Results on the Matching of the Virtual

VEs	No VC			Static virtual coupling			Adaptive virtual coupling			Unable to reach
	Stability	Stability	Realistic performance	Stability	Stability	Realistic performance	Stability	Stability	Realistic performance	
VE2	10	10	3	10	10	3	10	10	3	4
VE3	10	10	3	10	10	3	10	10	3	2
VE4	10	10	6	10	10	6	10	10	6	0
VE5	4	10	1	10	10	9	10	10	9	0
VE6	0	10	1	10	10	9	10	10	9	0
VE7	0	10	2	10	10	8	10	10	8	0

In the high stiffness virtual environments, such as VE5, VE6 and VE7, the realistic performance of the haptic system with adaptive virtual coupling is considerably increased as shown in Table 1. On the other hand, in the medium stiffness virtual environment, VE3 and VE4, user cannot distinguish the difference between two types of virtual coupling. Furthermore, in case of low stiffness: VE2, human could not even perceive the difference between the two simulations. These results show that the realistic performance of the haptic system with an adaptive virtual coupling is enhanced comparing with the haptic system with a static virtual coupling. However, the degree in improvement of the realistic performance depends on the impedance of the virtual environment. The adaptive virtual coupling enhances the realistic performance when it is used with the high stiffness virtual environment. However, the adaptive virtual coupling does not increase the performance when it is used with very low impedance environment.

5. Conclusions

In this research, a method of adapting the parameters of the virtual coupling according to the virtual environment which can enhance the realistic performance of haptic systems was proposed. A desired impedance based on realistic performance boundary is proposed in order to be used as our objective impedance. The parameters of the virtual coupling can be determined with respect to frequency. Therefore, each defined virtual environment has its

own set of parameters of virtual coupling that both ensure system stability and increase the realistic performance of system. The experimental results showed that the realistic performance of haptic system can be increased by using the adaptive virtual coupling especially with the high stiffness virtual environment.

References

- [1] Colgate, E. J., Stanley, M.C. and Brown, M.J., 1995, "Issues in the Haptic Display of Tool Use," Proceedings of the 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems
- [2] Colgate, E.J. and Schenkel, G., 1994, "Passivity of a Class of Sampled-Data Systems: Application to Haptic Interfaces," American Control Conference, Baltimore
- [3] Adams, J. R. and Hannaford, B., 1998, "A Two-Port Framework for the Design of Unconditionally Stable Haptic Interfaces," Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1254-1259.
- [4] Adams, J.R., and Hannaford, B., 1999, "Control Law Design for Haptic Interfaces to Virtual Reality," IEEE Transactions on Control System Technology.
- [5] Adams, J. R. and Hannaford, B., 1999, "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments," IEEE Transactions on Robotics and Automation, June, Vol. 15, No. 3
- [6] Ryu, H. J. and Hannaford, B., 2001, "Time Domain Passivity Control of Haptic Interfaces," Proceeding of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1863-1869.
- [7] Colgate, E. J. and Brown, M.J., 1994, "Factors Affecting the Z-Width of a Haptic Display," Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Los Alamitos, pp. 3205-3210.
- [8] Lawrence A.D. and Chapel, D.J., 1994, "Performance Trade-Offs for Hand Controller Design," IEEE of International Conference on Robotics and Automation, pp. 3211-3216.
- [9] Moreyra, M., 1996, Design of a planar High Bandwidth Force Display with Force Sensing, Master of Science in Electrical Engineering Thesis, Electrical Engineering Program, University of Washington
- [10] Lertpolpairoj, S., Maneewarn, T., Charoensang, S. and Laowattana, D. 2001, "The Effect of Static Virtual Couplings on Realistic Performance of Haptic Systems," The 4th Asian Conference on Robotics and Its Applications, 6 June 2001, Singapore, pp. 57-63

วารสารตีพิมพ์

ฉบับที่ 3

ชื่อเรื่อง

Virtual Environment for Skill Transfer in Assembly Task

ผู้เขียน

นายณัฐพล ปฐมอารีย์

ดร.สยาม เจริญเสียง

ชื่อวารสาร

TRS Conference on Robotics and Industrial Technology (CRIT 2004)

กำหนดประชุมวิชาการ

26-27 March 2004, Nakornpatom

สภาพแวดล้อมเสมือนสำหรับการถ่ายทอดทักษะในการประกอบชิ้นงาน

Virtual Environment for Skill Transfer in Assembly Task

สยาม เจริญเสียง และ ณัฐพล ปฐมอารีย์

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กทม. 10140

โทรศัพท์ 0-2470-9339 โทรสาร 0-2470-9691 E-mail : siam@fibo.kmutt.ac.th, neo_nat@fibo.kmutt.ac.th

Siam Charoenseang and Nattapol Pathomaree

Institute of Field Robotics, King Mongkut's University of Technology Thonburi

91 Pracha-u-tid Rd. Bangmod Tungkru Bangkok 10140 Thailand

Tel: 0-2470-9339 Fax: 0-2470-9691 E-mail: siam@fibo.kmutt.ac.th, neo_nat@fibo.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการนำระบบความจริงเสมือน (Virtual Reality System) ไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงาน โดยในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงาน จะจำลองผ่านทางระบบความจริงเสมือนที่มีแรงตอบสนองกลับ เพื่อให้ผู้ใช้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะรู้สึกว่าคุณอยู่ในโลกเสมือน และรู้สึกถึงแรงตอบสนองกลับ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้หุ่นยนต์เป็นตัวขับเคลื่อนวัตถุเสมือนที่ต้องการนำไปประกอบ ในขณะที่มีการปฏิสัมพันธ์กับอุปกรณ์สร้างแรงป้อนกลับนั้น ตำแหน่งของวัตถุเสมือนที่เกิดจากแรงกระทำของผู้ใช้ จะถูกนำไปอัปเดตสภาพแวดล้อมเสมือนที่สร้างขึ้นจากกราฟิก 3 มิติ ทำให้การประกอบชิ้นงานในระบบความจริงเสมือนมีความสมจริงมากขึ้น โดยในการแสดงผลให้กับผู้ใช้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะนั้น จะแสดงผ่านจอภาพแบบสวมหัว (Head-mounted Display) งานวิจัยจึงเป็นต้นแบบของการนำระบบความจริงเสมือนที่มีแรงป้อนกลับไปประยุกต์เพื่อเพิ่มความสมจริงในการฝึกหัดหรือการถ่ายทอดทักษะ

Abstract

This research proposes a virtual reality (VR) system for skill transfer in assembly task. The skill transfer in this research is simulated through the VR system with force feedback for obtaining more realistic in a virtual world. In the system, a user moves the end-effector of a CRS robot in order to manipulate a virtual object in the assembly task. While the user interacts with the VR system, a position of a virtual object will be calculated from the user's applied force and then sent continuously to update the 3-D graphical virtual environment displayed on HMD. Thus, this VR-based system with

force feedback can make a training system or skill transfer more effective and realistic.

1. บทนำ

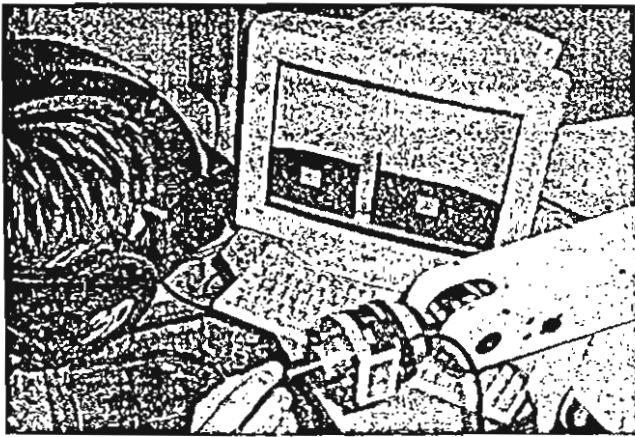
ในการถ่ายทอดทักษะโดยตรงจากผู้เชี่ยวชาญไปสู่ตัวผู้ฝึกหัด เช่น การผ่าตัด การเล่นกีฬา เป็นต้น นั้นมีความยากลำบากในการที่จะถ่ายทอดให้ได้อย่างถูกต้อง เพราะทักษะเหล่านั้นประกอบไปด้วยสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้เช่น ขนาดและทิศทางของแรง เป็นต้น จึงเกิดแนวคิดในการพัฒนาระบบซึ่งสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการถ่ายทอดทักษะ พร้อมทั้งสามารถถ่ายทอดทั้งแรง ทิศทาง และภาพที่สอดคล้องกัน โดยในงานวิจัยนี้จะนำระบบการมองเห็นแบบสเตอริโอมาประยุกต์ใช้กับระบบการถ่ายทอดทักษะ ทำให้ทราบถึงตำแหน่ง 3 มิติของวัตถุที่สนใจในสภาพแวดล้อมจริง เพื่อนำข้อมูลที่ได้อัปเดทการเคลื่อนไหวของสภาพแวดล้อมเสมือนและใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ถูกต้องของผู้ใช้ เพิ่มความสามารถในการถ่ายทอดทักษะ เช่น ทักษะการประกอบชิ้นงาน เป็นต้น

ระบบความจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) เป็นระบบซึ่งสามารถสร้างภาพเสมือนที่ทำให้ผู้ใช้รู้สึกว่าคุณอยู่ในโลกเสมือน แต่ผู้ใช้ระบบ VR ก็ยังไม่สามารถรู้สึกถึงแรงตอบสนองกลับขณะที่มีการปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมเสมือนนั้น โดยในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานในระบบความจริงเสมือนประเภทที่ใช้หุ่นยนต์เป็นตัวขับเคลื่อนการเคลื่อนที่ จะประกอบด้วยส่วนสร้างความสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้กับอุปกรณ์ถ่ายทอดทักษะ ส่วนการจำลองทางด้านฟิสิกส์ในการเคลื่อนที่ และส่วนการควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามการคำนวณทางด้านฟิสิกส์ จึงจะทำให้ผู้ใช้มีความรู้สึกที่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมเสมือนที่ต้องการ แต่ปัญหาที่พบก็คือ ระบบไม่สามารถถ่ายทอดทิศทางที่ควรเคลื่อนที่ไป ทำให้ผู้ใช้ที่เข้า

รับการถ่ายทอดทักษะไม่ทราบถึงเส้นทางเดินที่ควรเคลื่อนที่ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการนำกราฟฟิกเส้นทางต้นแบบ รวมถึงแรงเสมือนที่ตั้งเข้าสู่เส้นทางต้นแบบ มาช่วยในการถ่ายทอดทักษะ เพื่อให้ผู้ที่ได้รับการถ่ายทอดทักษะมีพัฒนาการที่ถูกต้องและทำงานได้รวดเร็วขึ้น

2. ลักษณะการทำงานของระบบ

งานวิจัยนี้เป็นการนำระบบความจริงเสมือนแบบมีแรงป้อนกลับ มาช่วยในการพัฒนาการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงาน เพื่อให้ผู้ที่ได้รับการถ่ายทอดสามารถรับรู้ได้ทั้งแรงตอบสนอง ภาพการเคลื่อนที่ของวัตถุเสมือน และกราฟฟิกเส้นทางต้นแบบการเคลื่อนที่ โดยลักษณะของระบบที่พัฒนาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



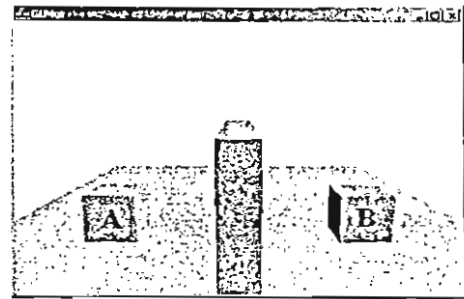
รูปที่ 1 รูปแสดงระบบที่พัฒนา

จากรูปที่ 1 จะได้ว่า ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือนที่ต้องการนำไปประกอบผ่านการเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำของผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะ จะถูกส่งไปอัปเดตยังส่วนแสดงผล เพื่อให้กราฟฟิกของสภาพแวดล้อมที่จำลองขึ้นเกิดการเคลื่อนที่สอดคล้องกับการกระทำ โดยแสดงผลจะแสดงผลผ่านจอภาพแบบสวมหัว เพิ่มความสมจริงให้กับผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะ

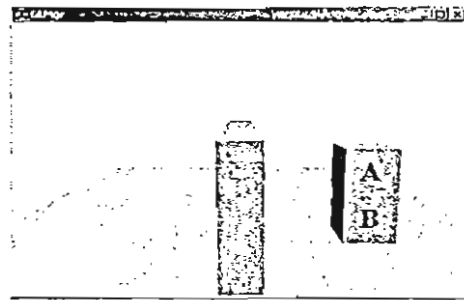
ซึ่งในระบบการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานที่สร้างขึ้นจะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ คือ

2.1. ส่วนสภาพแวดล้อมเสมือนและการจำลองทางด้านฟิสิกส์

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



รูปที่ 2 แสดงภาพเริ่มต้น



รูปที่ 3 แสดงภาพขั้นตอนสุดท้าย

จากรูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงกราฟฟิกของระบบการประกอบชิ้นงานที่จำลองขึ้น โดยตำแหน่งของกล่อง A จะเป็นตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ และตำแหน่งของกล่อง B จะเป็นตำแหน่งของจุดที่ต้องการนำกล่อง A ไปวางซ้อนทับ

นอกจากนั้นส่วนสภาพแวดล้อมเสมือนที่จำลองขึ้น ยังเป็นส่วนที่ใช้ในการแสดงผลทางด้านกราฟฟิกให้ผู้รู้สึกคล้ายตามกับงานที่กำลังกระทำด้วย เนื่องจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ของภาพกราฟฟิกที่เกิดขึ้น เป็นตำแหน่งที่ได้จากการนำแรงที่ผู้ใช้กระทำผ่านปลายแขนหุ่นยนต์เข้าไปคำนวณผ่านการจำลองทางด้านฟิสิกส์ เพื่อให้การเคลื่อนที่ไปเป็นไปตามกฎของธรรมชาติหรือมีความเหมือนจริงมากที่สุด เช่น การที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้เมื่อเกิดการชนกันระหว่างสองวัตถุ การตกอย่างอิสระของวัตถุ หรือการเคลื่อนที่ของวัตถุเมื่อมีแรงกระทำ เป็นต้น จึงทำให้ภาพที่มองเห็นกับการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์ที่สมจริง

โดยในการถ่ายทอดทักษะให้กับผู้ที่เข้ารับการฝึกฝนกลุ่มที่มีแรงดึงดูดกลับเข้าหาเส้นทางเดินของผู้ชำนาญ ขณะออกแรงกระทำกับระบบ จะมีการสร้างแรงเสมือนให้กับผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดทักษะ โดยแรงเสมือนที่สร้างขึ้น คำนวณมาจากการหารระยะที่สั้นที่สุดระหว่างตำแหน่งขณะนั้นของผู้ที่เข้ารับการถ่ายทอดกับเส้นทางต้นแบบที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญ แล้วนำเข้าไปคำนวณหาแรงจากแบบจำลองของสปริงและแดมเปอร์ เพื่อดึงมือผู้ที่เข้ารับการฝึกฝนให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามเส้นทางของผู้เชี่ยวชาญ

2.2 ส่วนหุ่นยนต์

เป็นส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามการคำนวณทางคานาฟิสิกส์ เพื่อใช้เป็นตัวขับเคลื่อนวัตถุเสมือนที่ต้องการนำไปประกอบ โดยแขนกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ แขนกล CRS A255 [1] ที่มี 5 องศาอิสระ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5

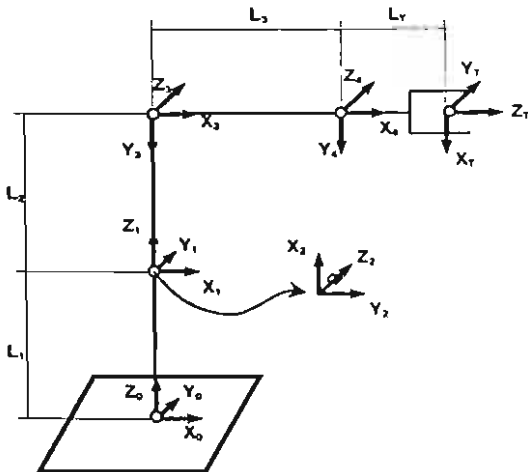


รูปที่ 5 รูปแสดงหุ่นยนต์ CRS ที่ใช้ในงานวิจัย

โดยในการควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณทางคานาฟิสิกส์นั้น จะใช้สมการโคเนเมติกส์ (Kinematics) [7][8] ซึ่งเป็นการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบแกนของหุ่นยนต์กับระบบแกนในระนาบ xyz เพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

2.2.1 สมการฟอร์เวิร์ดโคเนเมติกส์ (Forward Kinematics)

เป็นสมการที่แปลงความสัมพันธ์จากระบบแกนของหุ่นยนต์ไปสู่ระบบแกนในระนาบ xyz สำหรับการหาสมการฟอร์เวิร์ดโคเนเมติกส์ นั้น จะใช้การนิยามของ Denavit-Hartenberg โดยการตั้งแกนในตำแหน่งต่างๆ ของข้อต่อหุ่นยนต์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงการตั้งแกนของหุ่นยนต์ CRS

จากนิยามของ Denavit-Hartenberg สามารถหาสมการทรานส์ฟอร์มเมชันเมตริกซ์ (Transformation Matrix) ได้ดังสมการที่ 1

$${}^0_5T = \begin{bmatrix} c_1c_{234}c_5 - s_1s_5 & -c_1s_5 - c_1c_{234}s_5 & c_1s_{234} & c_1(c_2L_2 + c_{23}L_3 + c_{234}L_4) \\ c_{234}c_5s_1 + c_1s_5 & c_1c_5 - c_{234}s_1s_5 & s_1s_{234} & s_1(c_2L_2 + c_{23}L_3 + c_{234}L_4) \\ -c_1s_5c_{234} & s_{234}s_5 & c_{234} & L_1 - s_2L_2 - s_{23}L_3 - s_{234}L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2.2 สมการอินเวอร์ตโคเนเมติกส์ (Inverse Kinematics)

เป็นการแปลงความสัมพันธ์จากระบบแกนระนาบ xyz ไปสู่ระบบแกนของหุ่นยนต์ ซึ่งก็คือส่วนกลับของสมการฟอร์เวิร์ดโคเนเมติกส์ โดยสมการอินเวอร์ตโคเนเมติกส์จะใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการในระนาบแกน xyz ได้อย่างถูกต้อง สมการอินเวอร์ตโคเนเมติกส์ของหุ่นยนต์ CRS สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} q_1 &= a \tan 2(P_y, P_x) \\ q_{234} &= a \tan 2({}^1_5a_x, {}^1_5a_z) \\ q_5 &= a \tan 2({}^1_5n_y, {}^1_5o_y) \\ q_2 &= a \tan 2(s_2, c_2) \\ (i_2 + j_2)s_2^2 - 2kjs_2 + (k_2 - i_2) &= 0 \\ (i_2 + j_2)c_2^2 - 2kic_2 + (k_2 - j_2) &= 0 \\ i &= {}^1_5P_x - c_{234}L_4, \quad j = -s_{234}L_4 - {}^1_5P_z, \quad k = \frac{L_2^2 + i_2 + j_2 - L_3^2}{2L_2} \\ q_{34} &= q_{234} - q_2 \\ q_3 &= a \tan 2\left(\frac{-s_2s_5^1P_x - c_2s_5^1P_z - s_{34}L_4}{L_3}, \frac{c_2s_5^1P_x - s_2s_5^1P_z - c_{34}L_4 - L_2}{L_3}\right) \\ q_4 &= q_{234} - q_2 - q_3 \end{aligned} \quad (2)$$

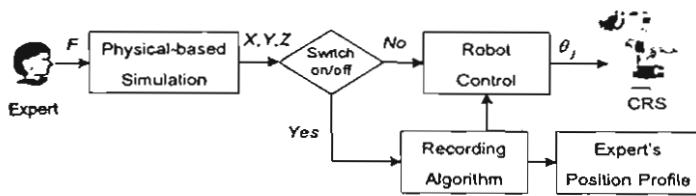
โดย q_n เป็นมุมการหมุนของข้อต่อที่ n

3. การถ่ายทอดทักษะ

เป็นส่วนที่ใช้ในการทำให้ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะมีทักษะในการทำงานเพิ่มขึ้น และรู้สึกเหมือนกับว่ากำลังยกกล่องมาวางเรียงกันยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ โดยผู้เข้ารับการฝึกฝนจะรู้สึกถึงแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นด้วย ในการถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานนั้นจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือ

3.1 ส่วนการจำลองเส้นทางเดินจากผู้ชำนาญทักษะ (Expert's Path Profile)

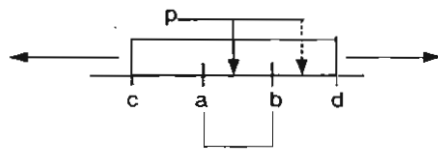
เป็นส่วนที่จำลองเส้นทางเดินของตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Position Profile) จากผู้ชำนาญทักษะ จะให้ผู้ชำนาญทักษะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือนผ่านการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยจะเก็บค่าเส้นทางเดินที่เกิดขึ้น ค่าที่เก็บได้จะถูกนำไปใช้เป็นเส้นทางที่ผู้เข้ารับการฝึกต้องเคลื่อนที่ตามกระบวนการเก็บเส้นทางต้นแบบจากผู้ชำนาญสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 กระบวนการเก็บเส้นทางต้นแบบจากผู้ชำนาญ

3.2 ส่วนการเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Position Comparison)

เป็นส่วนแสดงผลความถูกต้องของตำแหน่งที่ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะเคลื่อนที่ เป็นเกณฑ์แสดงผลของผู้เข้ารับการฝึกฝนกลุ่มที่ 2 ใช้แสดงผลให้ผู้ฝึกทักษะรู้ว่าขณะทำการฝึกทักษะผู้ฝึกได้ทำการเคลื่อนที่ถูกต้องหรือไม่ ด้วยการกำหนดขอบเขตช่วงของการแสดงผลดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงช่วงของการแสดงผลต่อผู้ฝึกหัด

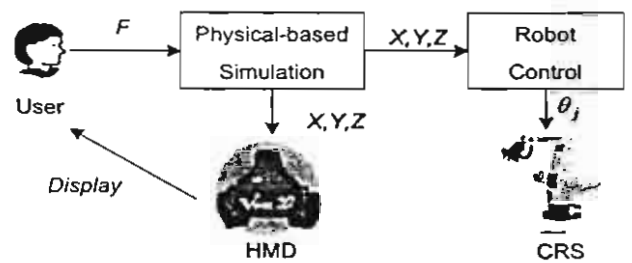
เมื่อ p คือ ค่าตำแหน่งขณะทำการฝึกทักษะ
 a b c และ d คือ ค่าขอบเขตที่กำหนด

โดยสามารถพิจารณาเป็น 3 ระดับในการแสดงผลคือ

1. ระดับที่ยอมรับไม่ได้ อยู่ในช่วง $p < c$ และ $p > d$ เส้นทางเดินต้นแบบที่ได้จากผู้ชำนาญจะเปลี่ยนเป็นสีแดง
2. ระดับที่ยอมรับได้แต่ไม่ถูกต้อง อยู่ในช่วง $c \leq p < a$ และ $b < p \leq d$ เส้นทางเดินต้นแบบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน
3. ระดับที่ถูกต้องอยู่ในช่วง $a \leq p \leq b$ เส้นทางเดินต้นแบบจะมีสีเขียว

3.3 ส่วนการถ่ายทอดทักษะกลุ่มที่ 1

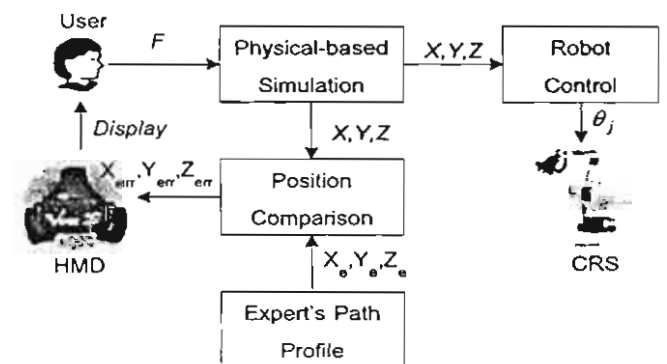
เป็นการถ่ายทอดทักษะที่ผู้เข้ารับการฝึกฝนจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือน ผ่านการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ โดยไม่มีการแสดงเส้นทางเดินที่ได้จากผู้ชำนาญและไม่มีแรงดึงกลับเข้าหาเส้นทางเดินของผู้ชำนาญ ดังกระบวนการในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานของกลุ่มที่ 1

3.4 ส่วนการถ่ายทอดทักษะกลุ่มที่ 2

เป็นการถ่ายทอดทักษะที่ผู้เข้ารับการฝึกฝนจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือน ผ่านการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ โดยมีการแสดงเส้นทางเดินที่ได้จากผู้ชำนาญ ให้ผู้ที่เข้ารับการฝึกทักษะเคลื่อนที่ตาม และมีการแสดงสีของทางเดินที่เตือน เมื่อผู้ฝึกเคลื่อนที่ต่างจากทางเดินของผู้ชำนาญ ดังกระบวนการในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การถ่ายทอดทักษะการประกอบชิ้นงานของกลุ่มที่ 2

3.5 ส่วนการถ่ายทอดทักษะกลุ่มที่ 3

เป็นการถ่ายทอดทักษะที่ผู้เข้ารับการฝึกฝนจะทำการเคลื่อนที่วัตถุเสมือน ผ่านการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ โดยมีแรงดึงกลับเข้าหาเส้นทางเดินของผู้ชำนาญ ขณะที่ผู้เข้ารับการฝึกทักษะออกแรงกระทำกับระบบ ดังกระบวนการในรูปที่ 11

ในการทำงานจริงครั้งแรก อีกทั้งเกิดความกังวลในการที่จะออกแรงกระทำ จึงไม่กล้าจะลงมือทดลองดู ทำให้ความสำเร็จในการถ่ายทอดทักษะมีน้อยที่สุด คือได้เพียง 81.25% แต่เมื่อเทียบถึงพัฒนาการทางด้านเวลา จะพบว่าการกระจายของข้อมูลทางเวลาจะแคบลงอย่างต่อเนื่องเมื่อจำนวนครั้งการฝึกฝนมากขึ้น ทำให้ทราบถึงพัฒนาการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งถือได้ว่ามีความแม่นยำกว่าการเห็นทางสายด้ายกลุ่มที่ 2 อีกทั้งความผิดพลาดเฉลี่ยทางด้านเส้นทางเคลื่อนที่ก็ไม่แตกต่างจากกลุ่มที่ 2 มากนัก

ดังนั้นจะพบว่า การถ่ายทอดทักษะแต่ละแบบมีความสามารถที่แตกต่างกัน คือ ในระบบการถ่ายทอดทักษะของกลุ่มที่ 1 จะไม่มีการพัฒนาที่แน่นอน ขึ้นอยู่กับความสามารถของแต่ละบุคคลในการทำงาน ส่วนในกลุ่มที่ 2 นั้น มีความสำเร็จสูงในการทำงานจริง แต่จะใช้เวลานานในการทำงานให้สำเร็จ ซึ่งถือเป็นการพัฒนาการเรียนรู้ที่ดีถ้าไม่คำนึงถึงเวลา ส่วนระบบการถ่ายทอดทักษะในกลุ่มสุดท้าย คือ กลุ่มที่ 3 จะทำให้เห็นพัฒนาการเรียนรู้เร็วที่สุด ทักษะที่ได้เป็นไปในแนวทางเดียวกัน แต่ก็มีเสี่ยงต่อการทำงานไม่สำเร็จในการทำงานจริง

นอกจากนี้ จากแบบสอบถามที่ได้ให้ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะให้ความคิดเห็นและให้คะแนน จะพบว่า ทางด้านการแสดงผลทางด้านความรู้สึกถึงแรงป้อนกลับ ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะมีความรู้สึกสมจริงถึง 74.17% ส่วนทางด้านการแสดงผลด้วยภาพนั้น ผู้เข้ารับการฝึกมีความรู้สึกถึงความต่อเนื่องของการแสดงผลกราฟิก 78.33% แต่มีความรู้สึกสอดคล้องระหว่างภาพกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เพียง 68.33% เนื่องจากมุมมองไม่สอดคล้องกับมุมมองจริงของผู้เข้าฝึกทักษะ ซึ่งสามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้อุปกรณ์แสดงภาพแบบสวมหัว (Head Mounted Display, HMD) ในการแสดงภาพในมุมมองของผู้ที่เข้าฝึกฝน นอกจากนี้ทางด้านความรู้สึกสะดวกในการใช้งานและความสมเหตุสมผลในการนำไปใช้งานจะพบว่า 71.67% ของผู้รับการถ่ายทอดทักษะมีความเห็นว่าการจำลองมีความสมจริงกับลักษณะการใช้งาน แต่ทางด้านความรู้สึกสะดวกในการใช้งานและเห็นประโยชน์ในการนำไปใช้งานจริงนั้น ผู้เข้ารับการถ่ายทอดทักษะมีความพอใจมากถึง 82.5% และ 80.83% ตามลำดับ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] CRS Plus Inc., Arm and Controller Installation Manual, 1993.
- [2] Ferdinand P. Beer 2nd, "Vector Mechanics for Engineers Dynamics", McGraw-Hill Book Co., 1990
- [3] Andrew Wilkin, David Baraff, "Physically Based Modeling Principles and Practice Differential Equation Basics", 1997
- [4] John J. Craig 2nd, "Introduction to Robotics Mechanics and Control", Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1995.
- [5] Robert J. Schilling, "Fundamentals of Robotics Analysis and Control", Prentice Hall, 1990.