การทำงานร่วมกันด้วยความจริงเสริมสำหรับระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์

เชาวลิต ธรรมทินโน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2561

การทำงานร่วมกันด้วยความจริงเสริมสำหรับระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์

เชาวลิต ธรรมทินโน วศ.บ. (คอมพิวเตอร์)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
(ดร.สุริยา นัฏสุภัคพงศ์)

.... กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รศ. ดร.สยาม เจริญเสียง)

.... กรรมการ
(ดร.สุภชัย วงศ์บุณยยง)

.... กรรมการ
(ผศ. ดร.พูลศักดิ์ โกษียาภรณ์)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำงานร่วมกันด้วยความจริงเสริมสำหรับระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายเชาวลิต ธรรมทินโน
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร.สยาม เจริญเสียง
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
คณะ	สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
ปีการศึกษา	2561

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบการทำงานร่วมกันด้วยความจริงเสริมสำหรับระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์ ระหว่างฝึกอบรมในงาน ระบบที่พัฒนาขึ้นจะช่วยเสริมผู้ให้การฝึกอบรมที่ทำการฝึกการควบคุมหุ่นยนต์แก่ผู้รับการฝึกอบรม ระบบถูกออกแบบให้ผู้ใช้งานหลายคนสามารถเข้าถึงสภาพแวดล้อมเสมือนได้พร้อมกัน โดยสภาพแวดล้อมเสมือนมีการจำลองทางฟิสิกส์ ภายในสภาพแวดล้อมเสมือน ผู้ให้การฝึกอบรมสามารถสาธิตการควบคุมหุ่นยนต์ผ่านโฮโลแกรม ในขณะที่ผู้รับการฝึกอบรมสามารถสังเกตการณ์ดังกล่าวและปฏิสัมพันธ์กับหุ่นยนต์เสมือนผ่านโฮโลแกรมได้เช่นเดียวกัน จากนั้นมีการทดสอบระบบกับผู้ใช้งานที่ไม่เคยมีประสบการณ์ด้านการเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์มาก่อนทั้งหมด 12 คน ระหว่างการทดลองได้มีการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับกิจกรรมในการใช้งานและการทำงานร่วมกันในระบบที่เกิดขึ้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโฮโลแกรมถูกจัดวางตำแหน่งซึ่งสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริงได้อย่างถูกต้อง ผู้ใช้งานหลายคนสามารถสร้างชุดคำสั่งสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ร่วมกันได้ผ่านการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม ณ สถานที่ซึ่งเป็นที่ตั้งของหุ่นยนต์ การจำลองการทำงานของหุ่นยนต์สามารถส่งชุดคำสั่งเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์จริงซึ่งสอดคล้องกับการจำลองในระบบที่พัฒนาขึ้นได้ ผู้ใช้งานใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 21 นาที 52 วินาทีในการฝึกการควบคุมหุ่นยนต์ จากนั้นผู้ใช้งานใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 26 นาที 1 วินาทีในการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อทำงานตามโจทย์กำหนดได้สำเร็จ การทำงานร่วมกันสามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อปฏิบัติภารกิจได้

คำสำคัญ: การจำลอง/ การฝึกอบรมหุ่นยนต์/ ความจริงเสริม/ โฮโลแกรม

Thesis Title	Collaborative Work with Augmented Reality for Robot Training System
Thesis Credits	12
Author	Mr. Chaowwalit Thammatinno
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Siam Charoenseang
Program	Master of Engineering
Field of Study	Robotics and Automation
Faculty	Institute of Field Robotics
Academic Year	2018

Abstract

This research presents the design and development of augmented reality for multi-user virtual robot training system. During On-the-Job Training, this proposed system assists the trainer to train the trainee for operating the virtual robot arm at the robot station. It is designed for multiple users to access the same augmented environment including the physics-based simulation at the same time. In the augmented environment, the trainer can demonstrate the operation of the robot through the hologram while the trainee can visualize and operate the virtual robot by interaction with the hologram. The 12 users who never operated a robot were invited to test the proposed system. The activity and the collaboration in the augmented environment were collected by the system. The result showed that the same augmented environment was interacted by the trainer and the trainee successfully. The hologram was accurately mapped to the real environment. The system can send a set of commands to control the real robot as similar to the virtual robot. The users took average of 21 minutes 52 seconds to learn to operate the robot. Then, the users took average of 26 minutes 1 seconds to operate the robot to accomplish the task. The collaborative work can reduce the robot operation time to accomplish the task.

Keywords: Augmented Reality/ Hologram / Robot Training/ Simulation

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำงานวิจัยนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ. ดร.สยาม เจริญเสียง และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์ในสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม ที่ให้ความอนุเคราะห์ คำปรึกษา และคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำงานวิจัย ทั้งด้านความรู้ทางวิชาการ รวมถึงการสนับสนุนวัสดุอุปกรณ์การวิจัย และทุนวิจัย/ทุนการศึกษาจากสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม

ขอขอบคุณเพื่อน รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ทั้งในและนอกสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้กรุณาเสียสละเวลามาร่วมการทดลองในงานวิจัยนี้ ทำให้ผู้วิจัยได้รับงานวิจัยที่สามารถสร้าง เผยแพร่ และนำไปต่อยอดองค์ความรู้ได้

สุดท้ายผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่คอยให้การสนับสนุนด้านการเรียนอยู่เสมอ จนกระทั่งงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปกระกอบ	ซ
บทที่	
1 บทนำ	**1**
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 แผนการดำเนินงาน	3
2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	**4**
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 อุปกรณ์ในการแสดงผลที่เกี่ยวกับระบบความจริงเสมือน	6
2.3 หุ่นยนต์ (Universal Robot)	13
2.4 กระบวนการฝึกอบรม (Training Method)	15
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการทำงานร่วมกัน (Collaborative Work)	22
2.6 สรุป	28
3 การออกแบบและพัฒนาระบบ	**32**
3.1 การออกแบบระบบ	32
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาระบบ	36
3.3 การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานกับระบบ	37
3.4 ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน	41
3.5 การควบคุมหุ่นยนต์	49

สารบัญ (ต่อ)

		หน้า
3.6	การปรับตำแหน่งสภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนเข้าด้วยกัน	52
4	**การทดลองและผลการทดลอง**	**56**
4.1	การประเมินประสิทธิภาพของระบบ	56
4.2	ความสามารถในการใช้งานระบบ	59
4.3	ผลจากการตอบแบบสอบถามของผู้ร่วมการทดลองทั้งหมด 12 คน	68
5	**สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ**	**72**
5.1	การวิเคราะห์ผลการทดลอง	72
5.2	สรุป	77
5.3	ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง		**79**
ภาคผนวก		**86**
	ก. การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานกับระบบที่พัฒนาขึ้นเอง	86
	ข. งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ	89
ประวัติผู้วิจัย		**103**

รายการตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	เปรียบเทียบรูปแบบของระบบการทำงานร่วมกัน	28
2.2	เปรียบเทียบรูปแบบของระบบการฝึกอบรม	29
2.3	ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบ/อุปกรณ์เกี่ยวกับความจริงเสมือน	30
4.1	ผลของ Frame Rate และข้อมูลในเครือข่าย	58
4.2	ผลการฝึกการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (n = 12)	61
4.3	ผลการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมตามโจทย์ที่กำหนด (n = 12)	62
4.4	ผลการฝึกการควบคุมหุ่นยนต์ UR5	65
4.5	ผลการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อย้ายตำแหน่งวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนด (n = 12)	66
4.6	คะแนนเฉลี่ยของความสะดวกในการใช้งาน (Ease of Use) (n = 12)	68
4.7	คะแนนเฉลี่ยของความสะดวกในการเรียนรู้ (Ease of Learning) (n = 12)	68
4.8	คะแนนเฉลี่ยของความพึงพอใจ (Satisfaction) (n = 12)	68
4.9	คะแนนเฉลี่ยของคุณค่าเฉพาะทาง (Value for Specific Task) (n = 12)	69
ก.1	คำสั่งของ MyPX500	87

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
2.1	Reality-Virtuality Continuum [5]	5
2.2	Dell UltraSharp 24 InfinityEdge Monitor - U2417H [7]	6
2.3	NVIDIA Vision Glasses 2 [8]	7
2.4	Cinema 3D Glasses [9]	7
2.5	ภาพกราฟิกซ้อนทับภาพสภาพแวดล้อมจริงที่แสดงผลผ่านจอ Smartphone [10]	8
2.6	Daydream View [12]	9
2.7	HTC Vive Pro [13]	10
2.8	Microsoft HoloLens [15]	11
2.9	การปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับ Microsoft HoloLens [15]	11
2.10	ภาพโฮโลแกรมสุนัขที่อยู่ด้านหลังประตู	12
2.11	ภาพโฮโลแกรมปฏิสัมพันธ์กับผนังและพื้นผิวของโต๊ะ [15]	12
2.12	Universal Robot 5 [16]	13
2.13	Overview of Client Interfaces [17]	14
2.14	Presentation Method [24]	15
2.15	ระบบฝึกนักบิน [25]	15
2.16	การถ่ายทอดความด้วย OJT [27]	16
2.17	รูปแบบของ Mobile Augmented Reality Head-mounted Display [28]	17
2.18	ภาพกราฟิก (สีเขียว) ซ้อนทับชิ้นงานไม้ทรงกระบอก	17
2.19	ภาพรวมของการผ่าตัดกับการแสดงผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์กราฟิก [5]	18
2.20	ส่วนการเชื่อมต่อผู้ใช้งาน [30]	18
2.21	ระบบประมวลผลภาพ Marker และแสดงผลต่อผู้ใช้งานใช้งานผ่านจอภาพ [31]	19
2.22	(a) การทดสอบแบบออฟไลน์ (b) ทดสอบการฝึกแบบออนไลน์ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น	20
2.23	การจัดเตรียมการทดลอง (a) การทดลองในสถาที่ที่แตกต่างกัน (b) - (d)	20
2.24	การจำลองแท่นขุดเจาะน้ำมันแสดงผลด้วย CAVE [34]	21
2.25	การจัดเตรียมอุปกรณ์ของระบบ VISTRA	21
2.26	การติดต่อสื่อสารระหว่างระบบ (ผู้ใช้งานแต่ละคน) [36]	22
2.27	ภาพประจุไฟฟ้าภายในความจริงเสมือนและผู้ใช้งาน [37]	23
2.28	ภาพความจริงผสานของโมเลกุลในความจริงเสมือนและผู้ใช้งาน [38]	23

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
2.29	โมเดลตัวละครสามมิติในฉาก [39]	24
2.30	หุ่นยนต์กำลังเรียนรู้การกดปุ่มจากการกระทำของมนุษย์ [40]	25
2.31	แสดงแผนผังการทำงานของระบบ [41]	25
2.32	การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ [42]	26
2.33	ภาพรวมของระบบ [43]	26
2.34	ความสัมพันธ์ของข้อมูลต่าง ๆ ในระบบ [44]	27
3.1	ภาพรวมของระบบภายห้องที่ 1	32
3.2	ภาพรวมของระบบภายห้องที่ 2	33
3.3	แผนภาพกระแสข้อมูล	34
3.4	แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบ	35
3.5	การรับ-ส่งข้อมูลของ Objects ระหว่าง Server และ Client [50]	38
3.6	การตั้งค่าส่วนของ Server ใน Unity Network	39
3.7	การทดสอบการควบคุม Object ต่าง ๆ ผ่าน Network Manager	40
3.8	(a) สถานะ (Deactive) ปุ่มก่อนใช้ท่าทาง Tap (b) สถานะ (Active) ปุ่มหลังใช้ท่าทาง Tap (c) ตำแหน่งก่อนใช้ท่าทาง Tap and Hold (d) ตำแหน่งหลังใช้ท่าทาง Tap and Hold ย้ายตำแหน่ง	41
3.9	แผนผังการทำงานของส่วนติดต่อผู้ใช้งาน	42
3.10	แผนผังมุมมองด้านบนแสดงการแบ่งพื้นที่การจัดวางตำแหน่งของโฮโลแกรม	43
3.11	ภาพรวมของโฮโลแกรมภายในสภาพแวดล้อมเสมือนในมุมมองของ Server	43
3.12	Tooltip แสดงชื่อและขนาดมุมของ WRIST 1	44
3.13	(a) Script Generator (b) Script Cube ที่ถูกสร้างขึ้นจาก Script Generator	45
3.14	Tooltip แสดงค่ามุมของแต่ละส่วนของหุ่นยนต์และสถานะ Gripper ที่ Script Cube เก็บไว้	46
3.15	Script Header	47
3.16	สายของ Script Cube จากการนำ Script Cube มาต่อกันที่ Script Header	47
3.17	Recycle Bin	48
3.18	General-purpose Switch สำหรับลบ Script Cube ทั้งหมดออกจากระบบ	49
3.19	แอปพลิเคชันต้นแบบ	50

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป		หน้า
3.20	General-purpose Switch "ROBOT SIMULATION" (ซ้าย) และ "ROBOT HOME" (ขวา)	51
3.21	General-purpose Switch ชื่อ "CODE STOP" (ซ้าย) และ "CODE RUN" (ขวา)	51
3.22	การออกแบบตำแหน่งเริ่มต้นของ Microsoft HoloLens และตำแหน่งของ Virtual Robot	53
3.23	กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นในสภาพแวดล้อมจริงให้ตรงกับสภาพแวดล้อมเสมือน	53
3.24	ผลการปรับตำแหน่งสภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนด้วยวิธีการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นใช้งาน	54
3.25	รูปการติดตั้งมาร์คเกอร์เพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิง	55
3.26	มุมมองของผู้ใช้งาน (a) ก่อนและ (b) หลังการปรับตำแหน่งสภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนจากวิธีการตรวจหาตำแหน่งด้วยการประมวลผลภาพ	55
4.1	ค่า Frame Rate ที่วัดได้ต่ำสุดคือ 52.25	57
4.2	ปริมาณข้อมูลในเครือข่ายที่วัดได้สูงสุดคือ 1.3 Mbps	57
4.3	โฮโลแกรมที่ใช้ในการสาธิตการปฏิสัมพันธ์	60
4.4	มุมมองของ Server ระหว่างการวัดความสามารถใน การปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยท่าทาง	60
4.5	มุมมองของผู้วิจัยระหว่างที่ผู้ร่วมการทดลองฝึกควบคุม Virtual Robot	63
4.6	Gripper ติดตั้งที่หุ่นยนต์และวัตถุ (ฟองน้ำ)	64
4.7	การควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ด้วยโฮโลแกรมเพื่อหยิบวัตถุ (ฟองน้ำ) ไปยังจุด A	65
5.1	ระยะเวลาในการปฏิสัมพันธ์เทียบกับระยะเวลาในการฝึกการปฏิสัมพันธ์	73
5.2	ระยะเวลาในการย้ายตำแหน่งวัตถุด้วยหุ่นยนต์เทียบกับระยะเวลาในการฝึกควบคุมหุ่นยนต์	73
5.3	สัดส่วนระยะเวลาการปฏิสัมพันธ์ของผู้วิจัยต่อผู้ร่วมการทดลองเทียบกับ ระยะเวลาในการย้ายตำแหน่งวัตถุด้วยหุ่นยนต์	74
5.4	ระยะเวลาในการย้ายตำแหน่งวัตถุด้วยหุ่นยนต์เทียบกับระยะเวลาในการปฏิสัมพันธ์	75
ก.1	แผนผังส่งข้อมูลผ่าน Server จาก Client 1 ชื่อ AA ไปยัง Client 2 ชื่อ BB	88
ก.2	ไฟล์ dll ของระบบรับ-ส่งข้อมูลที่พัฒนาขึ้นเอง (MyPX500.dll)	88

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การฝึกอบรมเป็นกระบวนการที่ผู้รับการฝึกอบรมได้รับการเรียนรู้และฝึกปฏิบัติเพื่อเพิ่มพูนความรู้และทักษะในสายงานของตนเอง เมื่อบุคลากรที่ทำงานอยู่แล้วหรือเพิ่งเข้าทำงาน ผ่านการฝึกอบรมในสายงานต่าง ๆ จะทำให้สามารถเลื่อนขั้นการทำงานหรือทำงานที่มีความยากขึ้นได้ และยังส่งผลให้บริษัทหรือโรงงานอุตสาหกรรม มีกระบวนในการการผลิตที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น การฝึกอบรมบุคลากรนั้นมีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับสายงานที่บุคลากรนั้นปฏิบัติงานอยู่ ได้แก่ วิธีการนำเสนอ (Presentation Method) วิธีการจำลอง (Simulation Method) วิธีกรณีศึกษา (Case Studie Method) และวิธีฝึกอบรมในงาน (On the Job Training: OJT) โดยทั่วไปวิธีฝึกอบรมในงานนั้นเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

หลายงานวิจัยในปัจจุบันได้มีการนำเสนอระบบฝึกอบรมที่พัฒนากระบวนการฝึกอบรมรวมถึง การหลีกเลี่ยงความเสี่ยง การลดต้นทุนการฝึกอบรม การเตรียมผู้รับการฝึกสำหรับงานเฉพาะทาง การสนับสนุนการเรียนรู้ในงานที่มีความยาก เป็นต้น เทคโนโลยีความจริงเสมือน (Virtual Reality: VR) เป็นเทคโนโลยีที่เริ่มมีการใช้งานในปัจจุบันอย่างกว้างขวาง ขั้นตอนวิธี (Algorithm) ในการฝึกอบรมสามารถนำมารวมกับระบบฝึกอบรมได้ เรียกว่า ระบบฝึกอบรมเสมือน ระบบฝึกอบรมส่วนใหญ่จะมุ่งพัฒนาระบบโดยใช้วิธีการจำลอง เพื่อป้องกันความเสี่ยงจากการปฏิบัติงานในสถานที่จริง การฝึกอบรมแบบกรณีศึกษา (Case Study) จะโน้มน้าวผู้รับการฝึกอบรมให้หาวิธีการแก้ปัญหาให้เหมาะสมกับสถานะการณ์นั้น ๆ ระบบฝึกอบรมข้างต้นยังคงมีบางปัญหาอยู่ เช่น จำนวนของผู้รับการฝึกอบรมในเวลาเดียวกัน ความไม่สมจริงของการฝึกอบรมเสมือน การบิดเบี้ยว (Distortion) ของภาพจากวีดิทัศน์ การใช้มาร์คเกอร์ (Marker) ขีดจำกัดด้านมุมมอง และความยากในการปฏิสัมพันธ์กับระบบฝึกอบรม

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสมือนสำหรับผู้ใช้งานหลายคน การฝึกอบรมในสถานที่ปฏิบัติงานจริง ระบบนี้จะช่วยผู้ให้การฝึกอบรมถ่ายทอดความรู้ไปสู่ผู้รับการฝึกอบรมในการควบคุมหุ่นยนต์ในสถานที่จริงได้ ระบบมีการประยุกต์ใช้เครือข่ายคอมพิวเตอร์ (Computer Network) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเข้าถึงสภาพแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) ได้หลายคนในเวลาเดียวกัน สภาพแวดล้อมเสมือนนี่ยังสามารถปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมจริงได้ด้วยท่าทางธรรมชาติ ประกอบไปด้วยโฮโลแกรม (Hologram) ที่จำลองอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ทำผู้ให้การฝึกอบรมสามารถสาธิตการควบคุมหุ่นยนต์ผ่านโฮโลแกรมได้ ในขณะเดียวกัน ผู้รับการฝึกอบรมสามารถมองเห็นกระบวนการสาธิตดังกล่าวและยัง

สามารถฝึกควบคุมหุ่นยนต์ผ่านโฮโลแกรมได้เช่นเดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้น ระบบที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นนี้ยังสามารถส่งชุดคำสั่งจากสภาพแวดล้อมเสมือนไปยังหุ่นยนต์จริงได้อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1) ศึกษาและสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ระบบความจริงเสริมในการพัฒนาระบบฝึกอบรม
2) ออกแบบและพัฒนาระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมสำหรับผู้ใช้งานหลายคน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) ออกแบบและพัฒนาระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมสำหรับผู้ใช้งานหลายคน
2) ใช้อุปกรณ์เกี่ยวกับความจริงเสมือน Microsoft HoloLens
3) ผู้ใช้งานสามารถใช้ระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมสำหรับผู้ใช้งานหลายคน พร้อมกันไม่เกิน 3 คน
4) กลุ่มตัวอย่างของผู้ใช้งานที่ร่วมการทดลองมีอายุตั้งแต่ 19 ถึง 30 ปี เป็นเพศชายและเพศหญิง เป็นบุคคลที่ไม่อยู่ในเกณฑ์ของคนพิการทางการศึกษา พ.ศ. 2552 [1] จำนวน 12 คน ซึ่งไม่เคยมีประสบการณ์ด้านการเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ Universal Robot 5 มาก่อน และอาจจะเคยหรือไม่เคยมีประสบการณ์การใช้งาน Microsoft HoloLens

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้องค์ความรู้ของการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมสำหรับผู้ใช้งานหลายคน
2) ประยุกต์ใช้ระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมสำหรับผู้ใช้งานหลายคน กับการฝึกอบรม
3) ทำให้ผู้ใช้งานสื่อสารผ่านระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริมสำหรับผู้ใช้งานหลายคน โดยที่ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องอยู่สถานที่เดียวกัน

1.5 แผนการดำเนินงาน

รายการ / เดือน ปี	2017			2018			2019		
	1 - 3	4 - 6	7 - 9	10 - 12	1 - 3	4 - 6	7 - 9	10 - 12	1 - 2
ศึกษาเรื่องการฝึกอบรม (Training Method)	■	■	■						
ศึกษาเรื่อง CO-OP VR (Cooperative Virtual Reality)	■	■	■						
ศึกษาเรื่อง Network Programming	■	■	■						
ศึกษาเรื่อง Universal Robot	■	■	■						
ออกแบบ System Diagram		■							
ออกแบบ Data Flow Diagram		■							
พัฒนาโปรแกรมส่งข้อมูลผ่าน Network			■	■					
พัฒนาระบบ CO-OP VR			■	■					
พัฒนาโปรแกรมควบคุม Universal Robot							■	■	
ทดสอบและแก้ไขระบบตามที่ออกแบบไว้			■	■	■		■	■	
บันทึกผลการทดลอง					■			■	■
ตีพิมพ์และเผยแพร่ผลงานวิจัยระดับนานาชาติ					■		■		
ร่าง/ปรับปรุงวิทยานิพนธ์						■	■	■	■

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ความจริงเสมือน (Virtual Reality: VR)

ความจริงเสมือน คือ การประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์ในการจำลองสภาพแวดล้อมขึ้นมาโดยผู้ใช้งานสามารถโต้ตอบกับสภาพแวดล้อมที่คอมพิวเตอร์จำลองขึ้นมาได้ การโต้ตอบระหว่างผู้ใช้งานกับคอมพิวเตอร์ ในส่วนของการเชื่อมต่อกับผู้ใช้งานจะมีอุปกรณ์พิเศษเพื่อช่วยเพิ่มความเสมือนจริงให้มากยิ่งขึ้น เช่น การแสดงผลจากปกติจะใช้หน้าจอแสดงผลแบบสามมิติ หรือใช้หน้าจอแสดงผลแบบสวมใส่ได้ (Head-Mounted Display: HMD) ที่ทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกเสมือนกับว่าเข้าไปอยู่ในสภาพแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) จริงนั้นจริง ๆ และการรับรู้ทางด้านการสัมผัสสามารถใช้อุปกรณ์สำหรับสร้างแรงป้อนกลับให้กับผู้ใช้งานได้ เช่น Force Feedback Joystick, Haptic Interface และ Exoskeleton Device เป็นต้น อุปกรณ์เหล่านี้ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถสัมผัสวัตถุเสมือนจริงต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบความจริงเสมือนได้ [2-4]

2.1.2 ประเภทของระบบความจริงเสมือน [4]

1) **Window on World Systems (WoW) หรือ Desktop VR** เป็นระบบที่ใช้จอภาพคอมพิวเตอร์ในการแสดงผลกราฟิกเพื่อสร้างรูปภาพที่ดูสมจริงที่อยู่ในรูปแบบภาพ 2 มิติ
2) **Video Mapping** เป็นระบบที่มีการรับภาพเคลื่อนไหวของผู้ใช้งานและภาพคอมพิวเตอร์กราฟิกเข้าด้วยกัน ผู้ใช้สามารถดูการแสดงผลการปฏิสัมพันธ์ผ่านจอภาพ
3) **Immersive System** เป็นระบบที่ทำให้การแสดงผลอยู่ในรูปแบบของมุมมองของผู้ใช้ในโลกเสมือน รูปแบบของการแสดงผลเปลี่ยนจากการใช้หน้าจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์มาเป็นการแสดงผลผ่านหน้าจอแบบสวมใส่ได้ (HMD) ซึ่งอุปกรณ์ในลักษณะดังกล่าวจะสามารถสร้างกราฟิกได้ในมุมมองที่แตกต่างกันระหว่างสำหรับตาซ้ายและตาขวา ทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้ถึงความลึก ตื้นของวัตถุภายในสภาพแวดล้อมเสมือนได้ อีกรูปแบบหนึ่งในการแสดงผลซึ่งใช้การฉายภาพไปที่ผนังหรือห้อง คือ **CAVE (Cave Automatic Virtual Environment)** เป็นระบบที่สร้างเป็นห้องโดยที่การแสดงผลนั้นจะแสดงผลที่ผนังทุก ๆ ด้านของห้องเหมือนกับว่าผู้ใช้งานเข้าไปอยู่ในโลกที่จำลองขึ้นมาจริง ๆ
4) **Telepresence** เป็นระบบที่แสดงผลโดยคอมพิวเตอร์กราฟิกสร้างโลกเสมือนขึ้นมา รูปแบบของระบบนี้จะเป็นการเชื่อมโยงระหว่างการรับข้อมูลจากเซนเซอร์จากที่ถูกควบคุมระยะไกล (Remote) และสัมผัสของผู้ควบคุม (Operator) ตัวอย่าง เช่น การที่ผู้ใช้งานควบคุมหุ่นยนต์และหุ่นยนต์อยู่สถานที่ซึ่งต่างกัน โดยที่เมื่อหุ่นยนต์ทำการหยิบจับสิ่งของใด ๆ หุ่นยนต์จะส่งค่าแรงที่

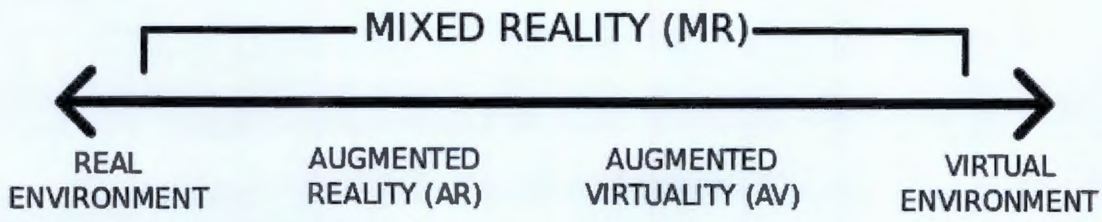
กระทำต่อข้อต่อต่าง ๆ ขณะหยิบจับวัตถุคืนกลับมาที่ส่วนควบคุม จากนั้นส่วนควบคุมจะสร้างเป็นแรงป้อนกลับให้ผู้ใช้งานรู้สึกเสมือนกับว่าได้หยิบจับวัตถุนั้นอยู่จริง ๆ

5) **Mixed Reality System** เป็นระบบที่สร้างความเสมือนจริงเข้าไปทับซ้อนกับความจริงโดยเรียกว่าระบบความจริงผสม ตัวอย่างคือการสร้างภาพหรือข้อมูลต่างๆซ้อนทับไปบนภาพที่ได้จากสภาพแวดล้อมจริงเพื่ออธิบายหรือวัตถุประสงค์อื่น ๆ เป็นต้น

2.1.3 ความจริงเสริม (Augmented Reality) และความจริงผสม (Mixed Reality) [2, 3]

ความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) ถูกนิยามไว้ว่าเป็นมุมมองแบบ Real-time ทางตรงหรือทางอ้อมลักษณะของกายภาพของสภาพแวดล้อมจริงที่ถูกเสริมโดยการเพิ่มข้อมูลที่ถูกสร้างด้วยคอมพิวเตอร์กราฟิกลงไป ความจริงเสริมสามารถปฏิสัมพันธ์และทำงานในลักษณะสามมิติโดยการผสมวัตถุจริงและวัตถุเสมือนเข้าด้วยกัน Milgram's Reality-Virtuality Continuum ถูกนิยามโดย Paul Milgram และ Fumio Kishino ที่อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพแวดล้อมจริง (Reality Environment) กับสภาพแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) โดยมี Augmented Reality (AR) และ Augmented Virtuality (AV) อยู่ระหว่างสองสิ่งนี้ ส่วนของ Augmented Reality จะอยู่ใกล้กับ Real Environment และส่วนของ Augmented Virtuality จะอยู่ใกล้กับ Virtual Environment ดัง**รูปที่ 2.1**

ความจริงผสม (Mixed Reality: MR) คือ การรวมกันระหว่าง Real Environment และ Virtual Environment เข้าด้วยกันเพื่อสร้างสภาพแวดล้อมใหม่และการแสดงผลที่วัตถุทางกายภาพและวัตถุเสมือนอยู่ร่วมกันและปฏิสัมพันธ์ได้ทั้งสองทางแบบทันทีเที่ยงตรงดัง**รูปที่ 2.1**



รูปที่ 2.1 Reality-Virtuality Continuum [5]

2.2 อุปกรณ์ในการแสดงผลที่เกี่ยวกับระบบความจริงเสมือน

2.2.1 ตัวจอภาพ LCD

ตัวจอภาพเป็นระบบความจริงเสมือนแบบ Window on World Systems มีลักษณะเป็นระนาบที่มีการเปล่งแสงที่ใช้การผสมแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน สามารถแสดงผลภาพคอมพิวเตอร์กราฟิกอยู่ในรูปแบบภาพ 2 มิติได้ [6] ดังรูปที่ 2.2 ข้อดีของตัวจอภาพ LCD คือการใช้งานระบบได้ง่าย สะดวก เพียงผู้ใช้มองไปยังตัวจอภาพ และไม่จำเป็นต้องสวมใส่อุปกรณ์บนตัวผู้ใช้ แต่ข้อเสียคือผู้ใช้ไม่สามารถรับรู้ถึงความลึกของภาพกราฟิกได้โดยตรงเนื่องจากภาพ 3 มิติจะถูกแสดงออกมาอยู่ในระนาบ 2 มิติ ข้อจำกัดด้านมุมมองที่แคบเนื่องจากตัวจอภาพส่วนใหญ่มีขนาดเล็กและไม่สามารถปรับมุมมองของภาพในทิศทางอื่นได้ ผู้ใช้ต้องมองที่จอซึ่งตั้งอยู่กับที่เท่านั้น

รูปที่ 2.2 Dell UltraSharp 24 InfinityEdge Monitor - U2417H [7]

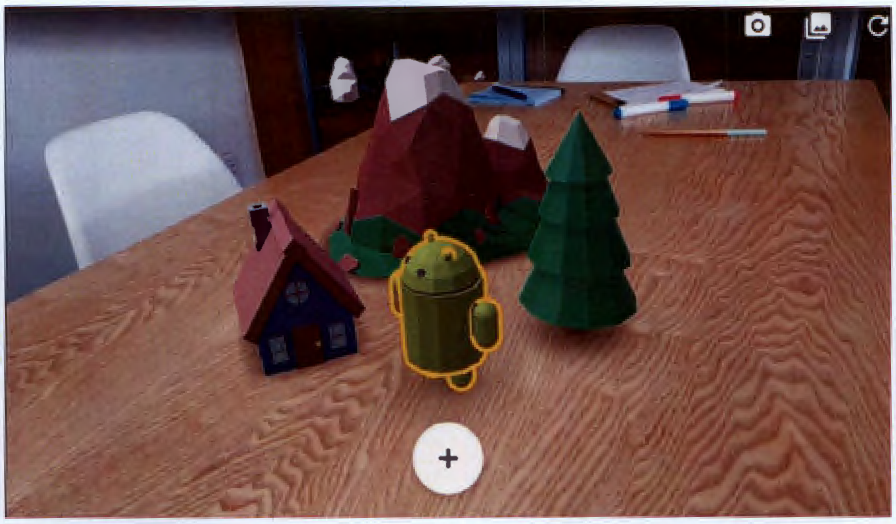
นอกจากตัวจอภาพจะสามารถแสดงภาพ 2 มิติได้แล้ว ยังมีการพัฒนาไปเป็นระบบที่สามารถแสดงผลภาพในรูปแบบ 3 มิติ (Stereoscopic) การทำให้การรับรู้ภาพของตาข้างซ้ายและตาข้างขวาในมุมมองที่แตกต่างกันด้วยอุปกรณ์สวมใส่ที่มีลักษณะเป็นแว่นตา โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะใช้เทคโนโลยีที่ต่างกัน เช่น Active Shutter ดัง**รูปที่ 2.3** และ Polarized Passive ดัง**รูปที่ 2.4** เป็นต้น ข้อดีคืออุปกรณ์สวมใส่มีลักษณะเป็นแว่นตาที่สะดวกต่อการใช้งาน การพัฒนาแอปพลิเคชันรองรับได้หลากหลายระบบปฏิบัติการ แต่ข้อเสียคือตัวจอภาพจะต้องเป็นรุ่นที่รองรับกับการทำงานกับเทคโนโลยีในข้างต้น ไม่สามารถใช้ตัวจอภาพแบบทั่วไปได้ และยังคงมีข้อจำกัดเรื่องของมุมมองเหมือนตัวจอภาพปกติทั่วไป การแสดงผลของเทคโนโลยี Active Shutter ยังมีปัญหาอยู่ (Flicker และ Eye Fatigue) ทำให้เมื่อใช้งานเป็นเวลานานทำให้เกิดอาการเวียนหัว [8]

รูปที่ 2.3 NVIDIA Vision Glasses 2 [8]

รูปที่ 2.4 Cinema 3D Glasses [9]

2.2.2 Smartphone

Smart Phone ในปัจจุบันเป็นอุปกรณ์ที่นอกจากจะใช้ในการสื่อสารแล้ว ยังมีระบบปฏิบัติการที่สามารถเพิ่มความสามารถให้กับตัว Smartphone และยังทำให้ใช้งานแอปพลิเคชันได้หลากหลาย เทคโนโลยีทางด้าน Augmented Reality สามารถประยุกต์ใช้งานกับแอปพลิเคชันใน Smartphone ได้ การใช้งานแอปพลิเคชันดังกล่าวผู้ใช้งานจะต้องใช้มือจับตัว Smartphone ผู้ใช้งานมองไปที่หน้าจอแสดงผลของ Smartphone และผู้ใช้สามารถปฏิสัมพันธ์กับแอปพลิเคชันโดยการปรับเปลี่ยนมุมมองจากการเปลี่ยนตำแหน่งและทิศทางของ Smartphone และสามารถกดที่หน้าจอแสดงผลแบบจอสัมผัส (Touch Screen) ได้ในขณะที่ระบบก็จะทำการประมวลผลเพื่อสร้างภาพกราฟิกที่สอดคล้องกับการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งาน [10] ดัง**รูปที่ 2.5** ข้อดีของ Smartphone คือสามารถซื้ออุปกรณ์ได้ง่าย วิธีการใช้งานไม่ยุ่งยาก มีขนาดกะทัดรัด พกพาได้ง่าย ข้อเสียคือการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งานยังมีข้อจำกัดเนื่องจากรับการกดที่จอสัมผัสอาจทำให้บดบังการแสดงผลของภาพกรฟิกได้ มุมมองและพื้นที่ในการแสดงผลมีขนาดเล็กทำให้แสดงข้อมูลที่มีรายละเอียดมาก ๆ ได้ไม่ดีนัก



รูปที่ 2.5 ภาพกราฟิกซ้อนทับภาพสภาพแวดล้อมจริงที่แสดงผลผ่านจอ Smartphone [10]

2.2.3 Daydream

Daydream เป็นระบบความจริงเสมือนแบบ Immersive System แสดงผลในด้วยอุปกรณ์ HMD ที่ผู้ใช้สามารถรับรู้ภาพ 3 มิติได้ (Stereoscopic) โดยที่ Daydream จะประยุกต์ใช้การแสดงผลผ่านทางหน้าจอของอุปกรณ์ Smart Phone มีการแบ่งส่วนการแสดงผลของหน้าจอออกเป็นมุมมองสำหรับตาข้างซ้ายและตาข้างขวา จากนั้น Daydream จะมีอุปกรณ์ที่สามารถยึดสมาร์ทโฟน ผู้ใช้งานสามารถสวมใส่ได้ และมีอุปกรณ์ควบคุม (Magic Wand) ที่ทำให้ผู้ใช้สามารถปฏิสัมพันธ์กับระบบได้อีกด้วย ดัง**รูปที่ 2.6** การพัฒนาแอปพลิเคชันสามารถพัฒนาด้วยระบบปฏิบัติการ Windows Linux และ Mac ได้แต่ต้องรองรับกับ Smart Phone ที่ใช้ระบบปฏิบัติการ Android เท่านั้น [11, 12] ข้อดีของ Daydream คือตัวแสดงผล (Smart Phone) ซื้อได้ง่ายเนื่องจากใช้ Smart Phone ที่ขายอยู่ทั่วไป (รองรับ 11 รุ่น) มีขนาดเล็กทำให้พกพาใช้งานนอกสถานที่ได้ อุปกรณ์สามารถปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้เมื่อผู้ใช้งานหันหน้าไปในทิศทางต่าง ๆ ได้ ข้อเสียคือไม่สามารถรับรู้สภาพแวดล้อมภายนอกและไม่เหมาะกับการเคลื่อนที่ระหว่างใช้งานระบบ

รูปที่ 2.6 Daydream View [12]

2.2.4 HTC Vive Pro

HTC Vive Pro เป็นระบบความจริงเสมือนแบบ Immersive System แสดงผลด้วยอุปกรณ์ HMD ที่ผู้ใช้สามารถรับรู้ภาพ 3 มิติได้ (Stereoscopic) โดยที่ระบบ HTC Vive Pro จะประกอบด้วยอุปกรณ์หลายตัวที่ทำงานร่วมกันในหน้าที่ต่าง ๆ ได้แก่ HMD ที่เป็นตัวแสดงผลภาพและยังมีลำโพงแบบ Stereo มีไมโครโฟนสำหรับรับเสียงผู้ใช้งาน และยังมีกล้อง 2 ตัว ด้านหน้าของ HMD ที่อยู่ตรงกับตำแหน่งลูกตาผู้ใช้งาน Controller 2 ตัวสำหรับรับคำสั่งด้วยการกดปุ่มต่าง ๆ ของผู้ใช้งานทั้งมือข้างซ้ายและข้างขวาแยกกันและยังสามารถตอบสนองด้วยการสั่น Base Station สำหรับการตรวจจับตำแหน่งและทิศทางของอุปกรณ์ทั้งหมดระบบทำให้การตรวจจับมีความแม่นยำสูงและตอบสนองได้รวดเร็ว ผู้ใช้งานสามารถเคลื่อนไปไปยังตำแหน่งต่างระหว่างการใช้งานระบบได้ประมาณ 12.25 ตารางเมตร [13] ดัง**รูปที่ 2.7** ข้อดีของ HTC Vive Pro คือตัว HMD สามารถปรับขนาดและระยะโฟกัสสายตา (IPD) ได้ จอแสดงผลมีความละเอียดสูง (1440 x 1600 px) ส่วนการควบคุมด้วย Controller มีการตอบสนองรวดเร็วและแม่นยำทำให้การบังคับด้วยมือทำได้ง่าย ตัวอุปกรณ์หาซื้อได้ง่าย มีเครื่องมือ (Software Developer Kit: SDK, Editor) ที่ใช้ในการพัฒนาแอฟพลิเคชันได้ง่าย กล้องที่อยู่ด้านหน้าของ HMD 2 ตัว สามารถพัฒนาแอฟพลิเคชันให้ผู้ใช้งานรับรู้สภาพแลดล้อมภายนอกได้ผ่านวีดิทัศน์ ข้อเสียคือต้องใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงมาก ระบบการตรวจจับตำแหน่ง

มีการใช้แสง Infared (IR) เมื่อใช้งานในที่มีแสงแดดหรืออุปกรณ์อื่นที่ปล่อย IR จะทำให้ระบบทำงานผิดพลาด

รูปที่ 2.7 HTC Vive Pro [13]

2.2.5 Microsoft HoloLens

Microsoft HoloLens เป็นระบบความจริงเสมือนแบบ Mixed Reality แสดงผลด้วยอุปกรณ์ HMD ที่ผู้ใช้สามารถรับรู้ภาพ 3 มิติได้ (Stereoscopic) มีแหล่งพลังงานในตัวและยังสามารถเชื่อมต่อกับระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) และ Bluetooth จอแสดงผลภาพสามารถมองทะลุได้ (See-through) ทำให้ในขณะใช้งานผู้ใช้งานมองเห็นภาพกราฟิก (Hologram) เสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมจริง ผู้ใช้งานสามารถปฏิสัมพันธ์กับ Microsoft HoloLens ได้ทั้งหมด 3 แบบคือ การมอง (Gaze) การใช้ท่าทาง (Gesture) และคำสั่งเสียง (Voice) ดัง**รูปที่ 2.9** การแสดงผลภาพโฮโลแกรมจะสอดคล้องกับการปฏิสัมพันธ์ของผู้ใช้งาน โดยที่ Microsoft HoloLens มีเซนเซอร์ที่มีความสามารถในการรับรู้สภาพแวดล้อมจริงทางกายภาพ จึงทำให้สามารถสร้างภาพโฮโลแกรมที่ถูกบดบังโดยวัตถุในสภาพแวดล้อมจริงได้ ดัง**รูปที่ 2.10** ยังสามารถปฏิสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของสภาพแวดล้อมจริงอื่น ๆ ได้ ดัง**รูปที่ 2.11** เช่น ผนังและพื้น เป็นต้น นอกจากนี้ Microsoft HoloLens ยังมีชุดคำสั่งสำหรับการพัฒนาแอฟพลิเคชันที่มีชุมชน (Community) ที่คอยส่งการตอบรับ (Feedback) เพื่อปรับปรุงพัฒนาชุดคำสั่งอยู่เสมอและรองรับเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาระบบได้หลากหลาย [14, 15] ข้อดีคือของ Microsoft HoloLens คือผู้ใช้งานสามารถรับรู้สภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนพร้อมกันได้ระหว่างการใช้งาน อุปกรณ์มีขนาดเล็ก พกพาได้งาน ทำให้

สะดวกในการใช้งานที่ต้องมีการเคลื่อนที่ อุปกรณ์สามารถเชื่อมระบบเครือข่ายได้ทำให้สามารถรับ-ส่งข้อมูลกับอุปกรณ์อื่น ๆ ได้หลากหลาย ผู้ใช้งานหลายคนสามารถใช้งาน Microsoft HoloLens พร้อมกันในสถานที่เดียวกันได้ ข้อเสียคือ Microsoft HoloLens มุมมองยังไม่กว้างมากนักเมื่อใช้งาน (Field of View: FOV) การถ่วงดุลน้ำหนักยังไม่ดีทำให้น้ำหนักกดที่ด้านหน้าผู้ใช้งาน เมื่อใช้งานเป็นเวลานานจะทำให้เกิดอาการปวดบริเวณจมูกได้ การใช้งานหนักติดต่อเป็นเวลานานเกิน 45 นาทีจะเริ่มเกิดความร้อนและอาจทำให้อุปกรณ์หยุดการทำงาน การรับคำสั่งจากท่าทาง (Gesture) ยังมีข้อจำกัดอยู่

รูปที่ 2.8 Microsoft HoloLens [15]

รูปที่ 2.9 การปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับ Microsoft HoloLens [15]

รูปที่ 2.10 ภาพโฮโลแกรมสุนัขที่อยู่ด้านหลังประตู

รูปที่ 2.11 ภาพโฮโลแกรมปฏิสัมพันธ์กับผนังและพื้นผิวของโต๊ะ [15]

2.3 หุ่นยนต์ (Universal Robot)

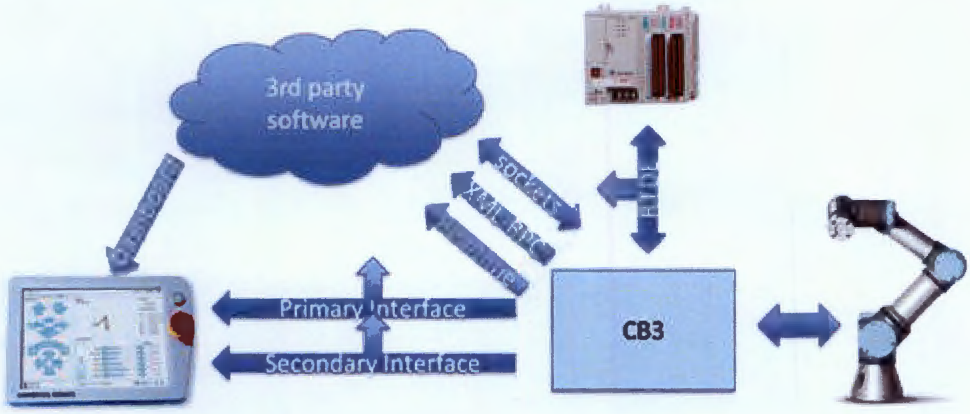
Universal Robot (UR) เป็นหุ่นยนต์ที่สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ (Collaborative Robot) ประกอบด้วยแขนกลที่มีลักษณะเป็นท่อตรง (Link) หลายท่อ มีจุดหมุน (Joint) หนึ่งแกนเพื่อเชื่อมต่อกันระหว่างท่อสองส่วนเข้าด้วยกันมีทั้งหมด 6 จุดหมุน การทำงานของแขนกลจะมีกล่องควบคุม (Control Box) ที่ควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ทั้งหมดและยังมีช่องการสื่อสารภายนอก คือ TCP/IP 100Mbit, Modbus TCP, Profinet, และ EthernetIP โดยผู้ใช้งานจะสามารถทำการควบคุมหุ่นยนต์ผ่านแป้นสอน (Teach Pendant) ที่เป็นจอสัมผัสดัง**รูปที่ 2.12** และ**รูปที่ 3.1**

รูปที่ 2.12 Universal Robot 5 [16]

การควบคุมการแขนกลสามารถทำงานได้ 2 ระดับ คือ ระดับ Graphical User-Interface ด้วยแป้นสอนและระดับ Script ด้วยการส่งข้อมูลผ่านช่องทางการสื่อสารจากภายนอก โดย URScript คือภาษาโปรแกรมหุ่นยนต์ที่ถูกใช้ในการควบคุม UR ซึ่ง URScript นั้นประกอบไปด้วยตัวแปร (Variables), ประเภท (Types), การควบคุมการทำงาน (Flow of Control Statement), ฟังก์ชัน (Function), และอื่น ๆ นอกจากนี้ URScript ยังมีตัวแปรและฟังก์ชันที่ Built-in ซึ่งตรวจจับและควบคุมการทำงานของ I/O และการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ได้ การควบคุมหุ่นยนต์ผ่านช่องทางการสื่อสารภายนอกจะแบ่งออกเป็น 6 รูปแบบดังนี้ [16, 17]

1) **Primary/Secondary Interfaces** ภายในกล่องควบคุมจะมี Server เพื่อใช้ในการส่งข้อความสถานะของหุ่นยนต์และรับคำสั่ง URScript ข้อมูลหลักที่ใช้ในการสื่อสารถูกใช้ในการสื่อสารระหว่าง GUI กับ กล่องควบคุมและยังรองรับ URScript ทำงานที่ความถี่ 10 Hz ทำให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ได้โดยตรงโดยไม่ต้องเขียนโปรแกรม
2) **Real-time Interfaces** การทำงานจะมีความคล้ายกับ Primary/Secondary Interfaces แต่จะต่างกันตรงที่มีความถี่ในการทำงานที่ 125 Hz

3) **Dashboard Server** ตัว UR สามารถถูกควบคุมระยะไกลได้ (Remote) โดยการส่งคำสั่งอย่างง่าย (Simple Command) ไปยัง GUI ผ่านช่องทาง TCP/IP Protocol หน้าที่หลักของช่องทางการสื่อสารแบบนี้คือใช้ในการควบคุมการ Load, Play, Pause, Stop โปรแกรมของหุ่นยนต์และยังสามารถกำหนดระดับสิทธิ์ของผู้ใช้งานในการเข้าถึงข้อมูลได้อีกด้วย
4) **Socket Communication** ตัว UR สามารถสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกผ่าน TCP/IP Procotol การสื่อสารรูปแบบนี้ตัวของหุ่นยนต์จะมีบทบาทเป็น Client และอุปกรณ์ภายนอกจะมีบทบาทเป็น Server การสื่อสารแบบนี้ยังรองรับ URScript และการรับ-ส่งข้อมูลที่มี Format ที่แตกต่างกัน
5) **XML-RPC** การควบคุมการทำงานด้วยการเรียกใช้ฟังก์ชัน (Function) พร้อมกับพารามิเตอร์ (Parameter) และยังสามารถอ่านค่าผลการคำนวณที่ซับซ่อนกลับมาได้ ซึ่ง URScript ไม่มีความสามารถในการทำงานรูปแบบนี้
6) **RTDE (Real-Time Data Exchange)** ถูกออกแบบมาให้ทนทาน (Robust) เพื่อแทนที่การสื่อสารแบบ Real-time การเชื่อมต่อแบบนี้สามารถเลือกการปรับแต่งข้อมูลของการส่งสถานะหุ่นยนต์ได้และมีความถี่ในการทำงานที่ 125 Hz



รูปที่ 2.13 Overview of Client Interfaces [17]

2.4 กระบวนการฝึกอบรม (Training Method)

2.4.1 Presentation Method

วิธีเก่าแก่ที่สุดและเป็นวิธีดั้งเดิมในการฝึกอบรม ซึ่งวิธีการที่ดังกล่าวเป็นวิธีการถ่ายทอดความรู้ได้ง่ายที่สุดและยังคงใช้งานอยู่ทั่วไปจนถึงปัจจุบัน ดังจะสังเกตได้จากการเรียนการสอนภายในสถานศึกษาต่าง ๆ ที่ใช้สื่อในการสอน เช่น กระดานดำ รูปภาพ วิดีทัศน์ เป็นต้น ด้วยวิธีการฝึกอบรมนี้ ผู้รับการฝึกอบรมจะเป็นรู้รับข้อมูลและทำการจดบันทึกความรู้จากผู้ให้การอบรม รวมไปถึงการเรียนรู้ด้วยต้นเองผ่านสื่อต่าง ๆ จากนั้นจะนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการปฏิบัติงาน [18-23] ดัง**รูปที่ 2.14**

รูปที่ 2.14 Presentation Method [24]

2.4.2 Simulation Method

วิธีการที่ช่วยให้ผู้รับการฝึกอบรมได้เรียนรู้และได้ลงมือปฏิบัติในสภาพแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) โดยการสร้างสภาพแวดล้อมเลียนแบบจากสถานที่ปฏิบัติงานจริง รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ วิธีการฝึกอบรมแบบนี้ยังช่วยให้หลีกความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการฝึกอบรมได้ แต่ยังทำให้ผู้รับการฝึกอบรมสามารถรู้สึกเหมือนกำลังปฏิบัติงานในสภาพแวดล้อมจริง และยังสามารถฝึกซ้ำเพื่อเพิ่มพูนทักษะได้อีกด้วย [18-20, 22, 23] ดัง**รูปที่ 2.15**

รูปที่ 2.15 ระบบฝึกนักบิน [25]

2.4.3 Case Study Method

เป็นวิธีการตั้งโจทย์ปัญหาแล้วมอบหมายให้ผู้รับการฝึกอบรมได้ทำการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น แล้วหาวิธีการที่แก้ไขปัญหานั้น ๆ เพื่อให้ให้ผู้รับการฝึกอบรมได้เรียนรู้วิธีการแก้ปัญหาเฉพาะหน้าเมื่อพบกับสถานการณ์ต่าง ๆ ที่แตกต่างกันออกไป [18-20, 22, 23]

2.4.4 On The Job Training Method

เป็นวิธีผู้ให้การฝึกอบรมถ่ายทอดความรู้โดยตรงไปยังผู้รับการอบรมในสถานที่ปฏิบัติงานจริงด้วยการสื่อสาร เช่น พูดหรือการปฏิบัติให้ดู วิธีการฝึกอบรมวิธีการนี้จะทำให้ผู้รับการฝึกอบรมนั้นได้รับประสบการณ์โดยตรงจากการปฏิบัติงานจริง โดยทั่วไปวิธีฝึกอบรมนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด [18, 19, 22, 23, 26] ดัง**รูปที่ 2.16**

รูปที่ 2.16 การถ่ายทอดความด้วย OJT [27]

2.4.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการฝึกอบรม

*ก. **Robotics In Mixed-Reality Training Simulations: Augmenting STEM Learning [28]***

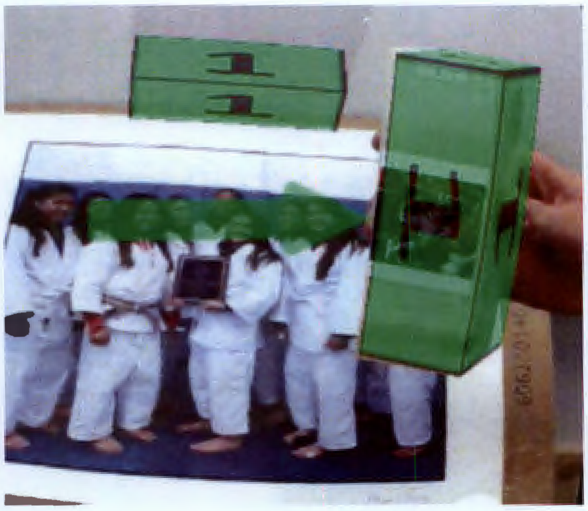
การประยุกต์ใช้สภาพแวดล้อมความจริงผสม (Mixed Reality Environment) ในการสอนด้านวิทยาการหุ่นยนต์ด้วยการใช้ผู้สอนจำลอง (Virtual Instructor) มีการเสนอแนวคิดที่จะใช้อุปกรณ์เกี่ยวกับความจริงเสมือน (Mobile Augmented Reality Head-mounted Display) ที่มีความสามารถในการเข้าใจคำพูด วัตถุ และปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งานดัง**รูปที่ 2.17**

9

รูปที่ 2.17 รูปแบบของ Mobile Augmented Reality Head-mounted Display [28]

ข. Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality [29]

การพัฒนาระบบช่วยในการประกอบชิ้นงานด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม ระบบมีการแสดงลำดับของการประกอบชิ้นงานด้วยภาพคอมพิวเตอร์กราฟิกซ้อนทับกับตัวชิ้นงาน แสดงผลผ่านอุปกรณ์เกี่ยวกับความจริงเสมือนแบบสวมใช้ (HMD) ทำให้การประกอบชิ้นงานสามารถใช้มือทั้งสองข้างประกอบชิ้นงานในขณะที่ระบบแสดงผล ช่วยให้การประกอบชิ้นงานที่มีความซับซ้อนสามารถทำได้สะดวกขึ้นดัง**รูปที่ 2.18**

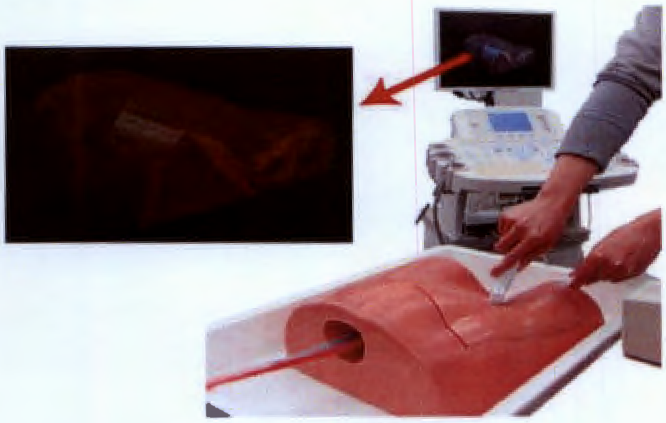


รูปที่ 2.18 ภาพกราฟิก (สีเขียว) ซ้อนทับชิ้นงานไม้ทรงกระบอก

ค. An augmented reality framework for optimization of computer assisted navigation in endovascular surgery [5]

การสร้างระบบจำลองในการฝึกการผ่านตัดโดยการสอดเครื่องมือผ่านเส้นเลือด (Endovascular Surgery) มีการติดต่อผู้ใช้งานผ่านอุปกรณ์คันบังคับควบคุมด้วยมือซึ่งเป็นกลไกที่จะนำเครื่องมือผ่าตัด

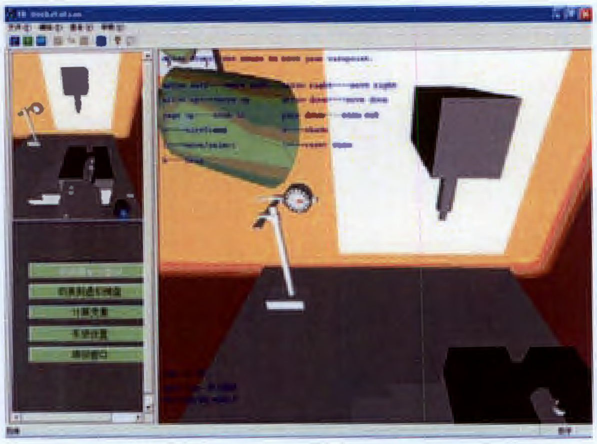
เข้าสู่ร่างกาย ระบบมีการคำนวณการวางแผนการผ่าตัด การหาเส้นทาง และยังมีการประยุกต์ใช้ความจริงเสมือนในการแสดงผลผ่านมอนิเตอร์ดัง**รูปที่ 2.19**



รูปที่ 2.19 ภาพรวมของการผ่าตัดกับการแสดงผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์กราฟิก [5]

ง. ***Development an interactive VR training for CNC machining [30]***

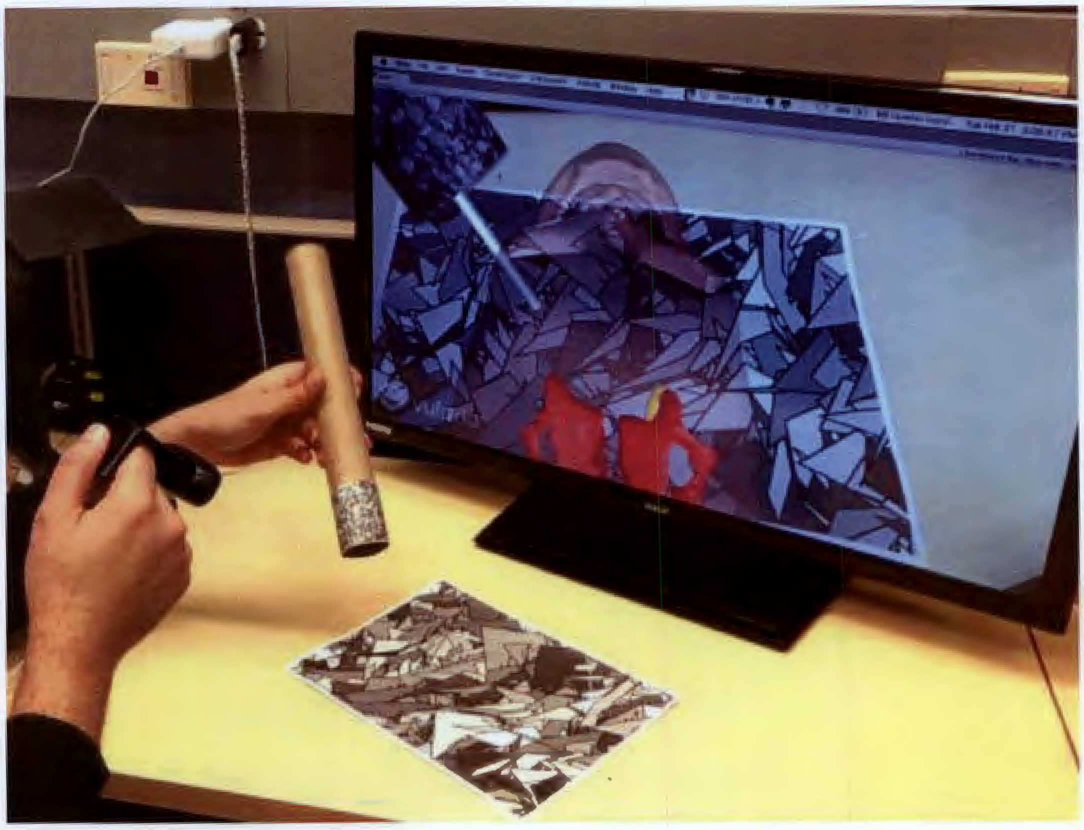
ระบบจำลองการทำงานของ CNC เพื่อใช้ในการฝึกการใช้งานเครื่อง CNC ระบบสามารถปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ด้วยความจริงเสมือนแบบ Window on World Systems (WoW) แต่ยังคงใช้เมาส์กับคีย์บอร์ดในการรับคำสั่งจากผู้ใช้งาน ไม่สามารถเปลี่ยนมุมมองทำให้ไม่ค่อยสะดวกเมื่อต้องการใช้มุมมองอื่น ๆ ดัง**รูปที่ 2.20**



รูปที่ 2.20 ส่วนการเชื่อมต่อผู้ใช้งาน [30]

ข. ***Development of augmented reality training simulator systems for neurosurgery using model-driven software engineering [31]***

การพัฒนาระบบความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) เพื่อใช้ในการฝึกหัดการผ่าตัดระบบประสาท มีการใช้มาร์คเกอร์ (Marker) เพื่ออ้างอิงตำแหน่งของอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบที่ผู้ใช้สามารถปฏิสัมพันธ์ได้โดยการใช้มือจับกับวัตถุที่มีมาร์คเกอร์ติดอยู่และรับรู้การแสดงผลผ่านจอภาพขนาดใหญ่ ระบบยังออกแบบให้สามารถใช้งานร่วมกับ HMD เพื่อใช้งานแบบ Immersive ได้ดัง**รูปที่ 2.21**



รูปที่ 2.21 ระบบประมวลผลภาพ Marker และแสดงผลต่อผู้ใช้งานใช้งานผ่านจอภาพ [31]

ฉ. ***Implementation of a Virtual Training Simulator Based on 360? Multi-View Human Action Recognition [32]***

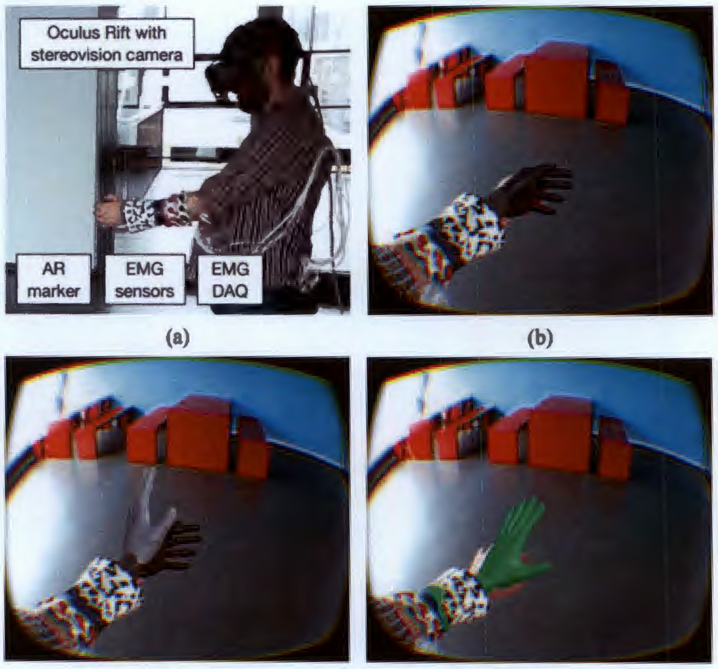
ระบบจำลองการฝึกที่สามารถเข้าใจการกระทำ (Action) ของมนุษย์ในมุมมองแบบ 360 องศา ระบบที่พัฒนาขึ้นทำให้ผู้รับการฝึก (Trainee) ไม่จำเป็นต้องสวมใส่อุปกรณ์สำหรับการตรวจจับใด ๆ (Tracking Device) ทั้งสิ้นเนื่องจากใช้ Kinect ติดตั้งไว้รอบตัวผู้ใช้งาน มีแพลตฟอร์มการเคลื่อนได้ทุกทิศทาง (Omni-directional Treadmill) ทำให้ผู้ใช้เคลื่อนที่ได้รอบทิศทาง และมีการแสดงผลรอบทิศทางที่มีลักษณะห้องเป็นโดมซึ่งใช้โปรเจคเตอร์ในการฉายภาพดัง**รูปที่ 2.22**

(a) (b)

รูปที่ 2.22 (a) การทดสอบแบบออฟไลน์ (b) ทดสอบการฝึกแบบออนไลน์ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น

ข. A novel immersive augmented reality system for prosthesis training and assessment [33]

ระบบฝึกหัดการใช้งานแขนเทียมด้วยระบบความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) โดยการรับสัญญาณ EMG จากผู้ใช้มาวิเคราะห์หารูปแบบเพื่อทำไปใช้ในการฝึกการบังคับแขนเทียมซึ่งใช้การแสดงผลในรูปแบบคอมพิวเตอร์กราฟิกผ่านอุปกรณ์สวมใส่ (HMD) ทำให้ผู้ใช้ปรับเปลี่ยนมุมมองได้สะดวกและยังสามารถมองไปยังปลายแขนที่มี Marker ติดอยู่สำหรับการแสดงผลการทำงานของแขนเทียมได้อีกด้วย แต่ระบบดังกล่าวยังจำเป็นจะต้องเชื่อมต่อสายสัญญาณกับเครื่องคอมพิวเตอร์อยู่ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ไปยังบริเวณต่าง ๆ ยังไม่สามารถทำได้สะดวกดัง**รูปที่ 2.23**



รูปที่ 2.23 การจัดเตรียมการทดลอง (a) การทดลองในสถานที่ที่แตกต่างกัน (b) - (d)

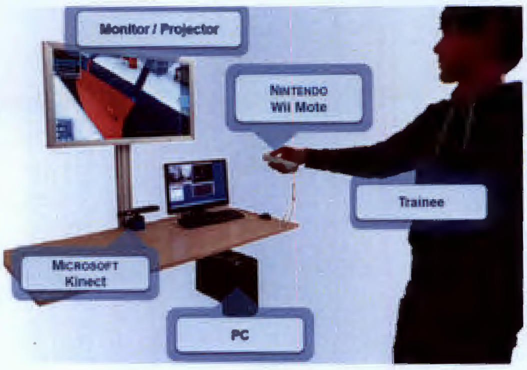
ช. Simulation Training in Oil Platforms [34]

การสร้างแพลตฟอร์มจำลองแท่นขุดเจาะน้ำมันเพื่อใช้ในการฝึก เนื่องจากแท่นขุดเจาะน้ำมันเป็นสถานที่อันตรายจึงจำเป็นต้องมีการฝึกในสถานที่จำลองก่อนไปปฏิบัติงานจริงโดยใช้สภาพแวดล้อมเสมือนมาใช้ในการแสดงผลด้วย CAVE ระบบสามารถตรวจจับมุมมองของผู้ใช้ด้วย Marker ที่ติดอยู่กับอุปกรณ์ลักษณะเป็นแว่นตาทำให้ผู้ใช้ปรับเปลี่ยนมุมมองได้ง่าย แต่ยังใช้วิธีการควบคุมด้วย Joystick ในการเคลื่อนย้ายตำแหน่งในสภาพแวดล้อมเสมือนของระบบทำให้การปฏิสัมพันธ์กับอุปกรณ์จำลองบางอย่างยังไม่เป็นท่าทางธรรมชาติดัง**รูปที่** 2.24

รูปที่ 2.24 การจำลองแท่นขุดเจาะน้ำมันแสดงผลด้วย CAVE [34]

ฌ. Serious Games and Virtual Simulator for Automotive Manufacturing Education & Training [35]

การพัฒนาระบบจำลองเพื่อการฝึกการเรียนรู้กระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมยานยนต์ (VIrtual Simulation and TRAining: VISTRA) ระบบออกแบบให้ปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้โดยมี Kinect และ WiiMote เป็นตัวรับรู้การกระทำและการเคลื่อนไหวของผู้ใช้งานแล้วแสดงผลการทำงานผ่านทางจอภาพ ระบบออกแบบให้แต่ละฉากมีภารกิจที่สอดคล้องกับอุตสาหกรรมยานยนต์เพื่อฝึกการทำงานของผู้ใช้ นอกจากนี้ระบบยังมีการประเมินระหว่างที่ผู้ใช้ทำภารกิจอีกด้วยดัง**รูปที่** 2.25



รูปที่ 2.25 การจัดเตรียมอุปกรณ์ของระบบ VISTRA

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องด้านการทำงานร่วมกัน (Collaborative Work)

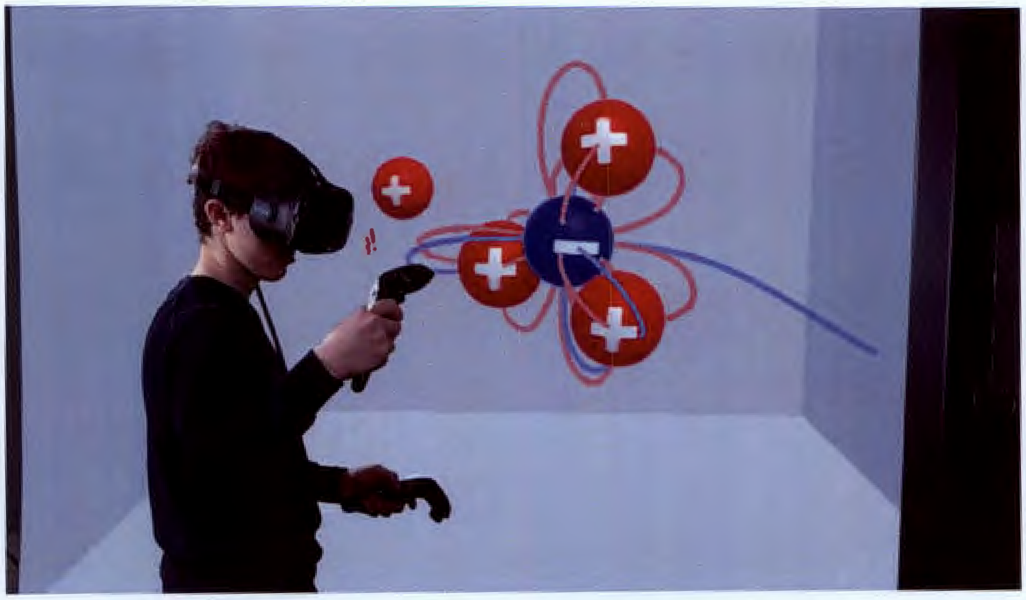
2.5.1 Collaborative work in VR Systems: A software-independent exchange of avatar data [36]

การแลกเปลี่ยนข้อมูลอวตาร (Avatar) และท่าทาง (Gesture) ในการทำงานร่วมกันในระบบความจริงเสมือน การทำงานร่วมกันในความจริงเสมือนนั้น การแลกเปลี่ยนและแสดงข้อมูลของผู้ใช้แต่ละฝั่งมีความสำคัญมากในการทำงานร่วมกัน การแสดงอารมณ์ก็เป็นส่วนหนึ่งของข้อมูลนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเสนอระบบ Virtual Reality Peripheral Network (VRPN) ในการอ่านข้อมูลกลุ่มเมฆ (Point Cloud) ที่ได้จากท่าทางของผู้ใช้งานแต่ละคนส่งผ่านระบบอินเตอร์เน็ต ทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลอวตารและท่าทางร่วมกันของผู้ใช้งานหลายคนได้ [36] ดังรูปที่ 2.26

รูปที่ 2.26 การติดต่อสื่อสารระหว่างระบบ (ผู้ใช้งานแต่ละคน) [36]

2.5.2 Electrostatic Playground: A Multi-User Virtual Reality Physics Learning Experience [37]

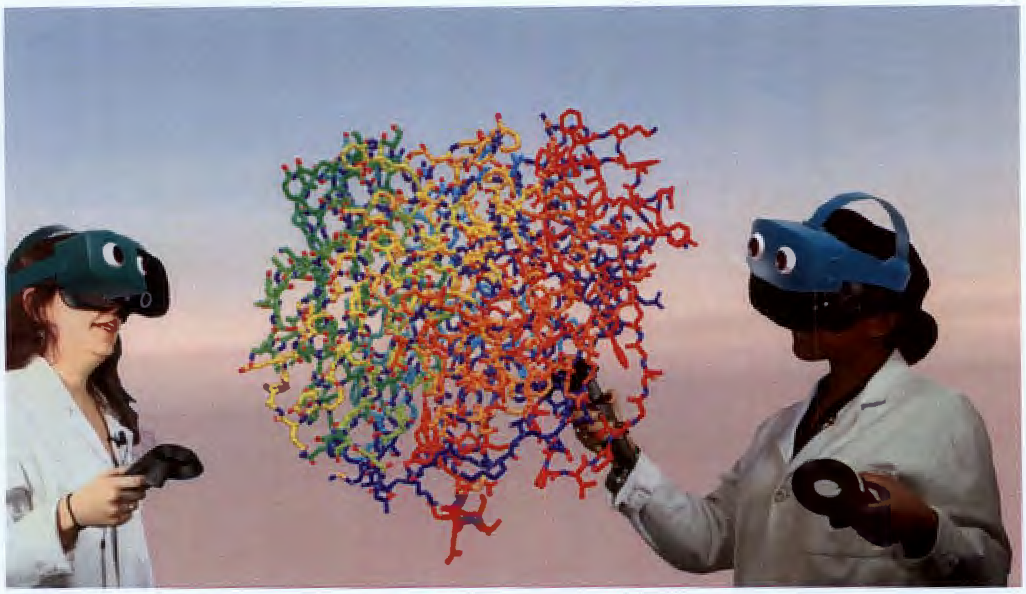
การเรียนรู้ผ่านการทดลองเรื่องไฟฟ้าสถิตด้วยความจริงเสมือน การเรียนเรื่องเกี่ยวกับไฟฟ้าสถิตนั้นผู้เรียนอาจมีความยากและสับสนที่จะทำความเข้าใจด้วยการจินตนาการและไม่สามารถสังเกตปรากฏการณ์ต่าง ๆ โดยตรงได้ เช่น การสังเกตการณ์ผ่านกล้องจุลทัศน์ ซึ่งมีความอันตรายอยู่ ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีความจริงเสมือนในการจำลองปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เป็นภาพสามมิติของประจุไฟฟ้าจึงถูกนำมาใช้ในการแสดงผลและสามารถปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งานและสามารถให้ผู้ใช้หลายคนใช้งานร่วมกันได้ดัง**รูปที่ 2.27**



รูปที่ 2.27 ภาพประจุไฟฟ้าภายในความจริงเสมือนและผู้ใช้งาน [37]

2.5.3 Body Quest: A Room-Scale VR Playground for Biology and Chemistry [38]

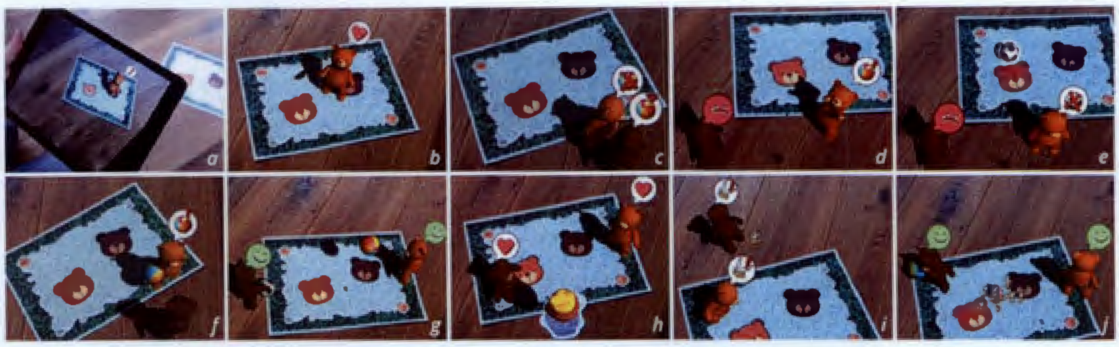
การเรียนรู้เรื่องชีววิทยาและเคมีด้วยความจริงเสมือน การเรียนรู้เกี่ยวกับโครงสร้างโมเลกุลที่มีความซับซ้อนมีความยากในการอธิบายหรือแสดงผลด้วยกระดาษ ดังนั้นการใช้เทคโนโลยีความจริงเสมือนมาใช้ในการแสดงผลกราฟฟิก จำลองภาพสามมิติ ปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้หลายคนพร้อมกัน ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเรียนรู้และเข้าใจกับกับชีววิทยาและเคมีได้ง่ายขึ้นดัง**รูปที่ 2.28**



รูปที่ 2.28 ภาพความจริงผสานของโมเลกุลในความจริงเสมือนและผู้ใช้งาน [38]

2.5.4 Computer-Assisted Authoring of Interactive Narratives [39]

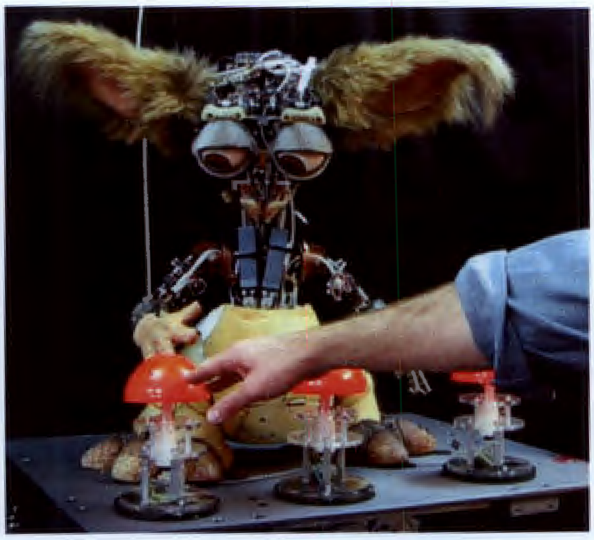
การใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมช่วยในการเล่าเรื่อง โดยระบบดังกล่าวจะสามารถทำให้ผู้เล่าเรื่องมีอิทธิพลและมีปฏิสัมพันธ์กับเรื่องโดยการใช้ Smartphone ร่วมกับเทคโลโลยี Augmented Reality ตรวจจับตำแหน่งและทิศทางของ Marker เพื่อเพิ่มสภาพแวดล้อมหรือตัวละครในฉากได้ ระบบจะมีเทคนิค Interactive Behavior Trees (IBT's) ในการดำเนินเรื่องโดยไม่ให้เกิดความขัดแย้งจากการปฏิสัมพันธ์ของผู้ใช้กับระบบ ดังนั้นตัวละครโมเดลสามมิติจะเคลื่อนไหวหรือแสดงท่าทางต่าง ๆ ตามเนื้อเรื่องที่กำหนดเอาไว้ ดัง**รูปที่ 2.29**



รูปที่ 2.29 โมเดลตัวละครสามมิติในฉาก [39]

2.5.5 Collaboration in Human-Robot Teams [40]

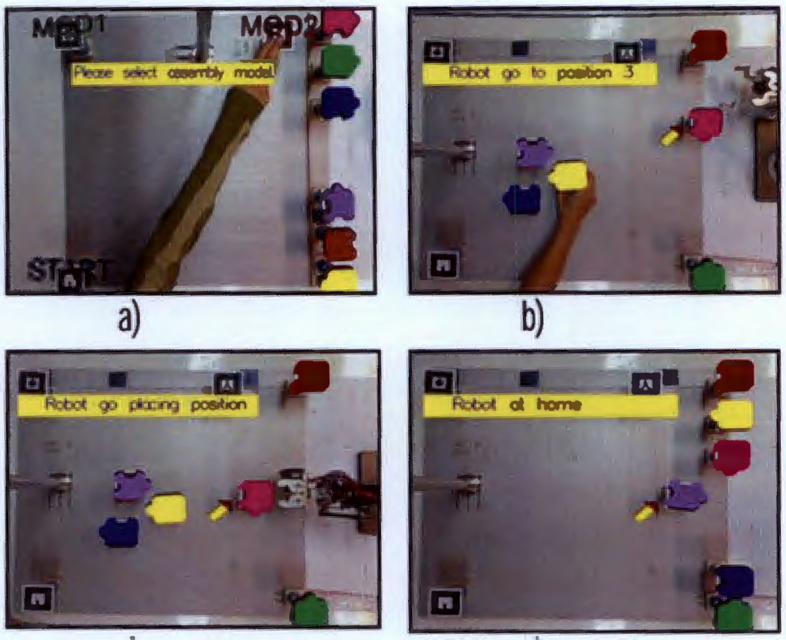
การทำงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์ที่จะออกไปปฏิบัติงานในอวกาศร่วมกับแขนกลที่ควบคุมระยะไกลโดยมนุษย์ ซึ่งการควบคุมระยะไกลของมนุษย์นั้นจะเกิดการหน่วงของสัญญาณทำให้การทำงานร่วมกันเกิดความลำบาก งานวิจัยนี้จึงมุ่งการสร้างกรอบการทำงาน (Framework) ร่วมกันที่หุ่นยนต์ที่สามารถทำงานได้อัตโนมัติ กรอบการทำงานดังกล่าวมีความสามารถที่ให้หุ่นยนต์หรือมนุษย์สามารถทำงานบ้างอย่างเพื่อช่วยเหลืออีกฝ่ายในกรณีที่อีกฝ่ายไม่สามารถทำงานบ้างอย่างได้อีกด้วย หุ่นยนต์จึงต้องสามารถในการเรียนรู้การกระทำของมนุษย์ในการปฏิบัติงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ได้ ดัง**รูปที่ 2.30**



รูปที่ 2.30 หุ่นยนต์กำลังเรียนรู้การกดปุ่มจากการกระทำของมนุษย์ [40]

2.5.6 Augmented Reality in Robot Assisted Virtual Assembly [41]

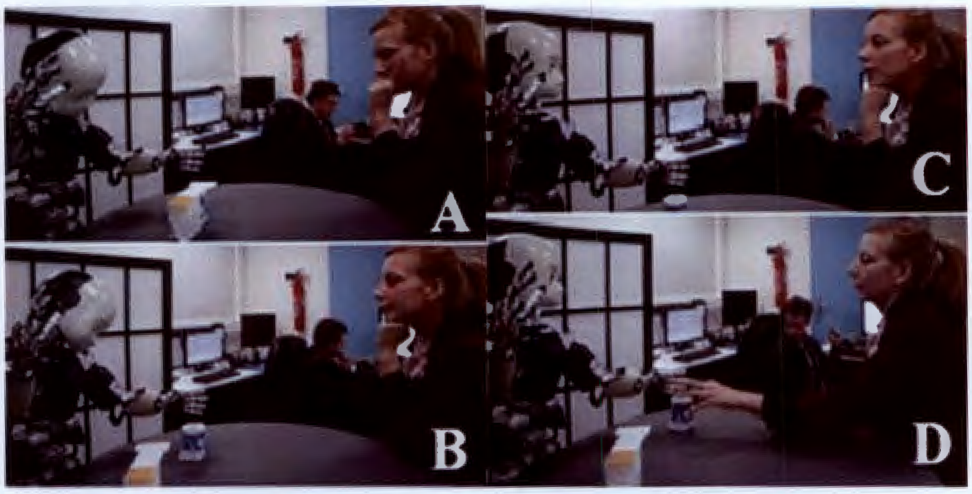
การใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมในการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ ระบบจะสร้างชิ้นงานเสมือนและข้อมูลของชิ้นงานเพื่อแสดงให้ผู้ใช้งานทราบในรูปแบบของคอมพิวเตอร์กราฟิกที่ซ้อนทับกับภาพของชิ้นงานจริง โดยมนุษย์และหุ่นยนต์จะมีพื้นที่ทำงานร่วมกัน ขณะที่ผู้ใช้งานและหุ่นยนต์ปฏิบัติงาน หุ่นยนต์จะแจ้งข้อมูลการทำงานและแผนการประกอบชิ้นงานให้ผู้ใช้ทราบรูปแบบของคอมพิวเตอร์กราฟิกดัง**รูปที่** 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงแผนผังการทำงานของระบบ [41]

2.5.7 Cooperative Human Robot Interaction Systems: IV. Communication of Shared Plans with Naïve Humans using Gaze and Speech [42]

การศึกษาพื้นฐานของการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ สร้างปัญญาประดิษฐ์จากความรู้พื้นฐานการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์แหละหุ่นยนต์ที่มีความปลอดภัยในการปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ ระบบดังกล่าวสามารถเข้าใจและสอบสนองมนุษย์ได้ เช่น ท่าทาง (Gesture) การมอง (Gaze) และการพูดของมนุษย์ ระบบสามารถใช้แผนงานร่วม (Joint Plan) ผ่านการสื่อสารด้วย ท่าทาง และการจ้องมองของมนุษย์ในการตอบสนองได้ดัง**รูปที่** 2.32



รูปที่ 2.32 การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ [42]

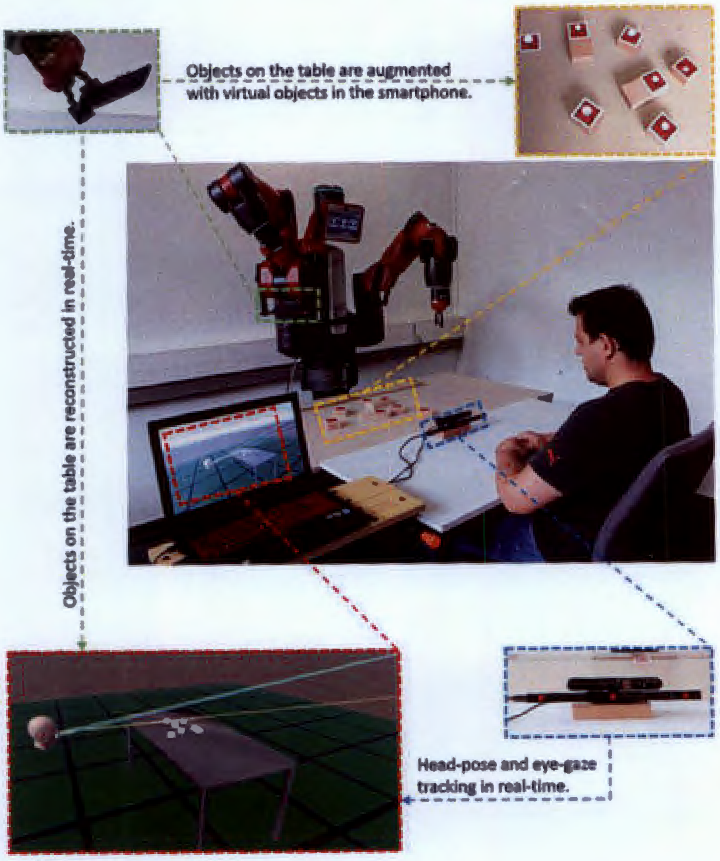
2.5.8 Cooperative robot teleoperation through virtual reality interfaces [43]

การใช้ความจริงเสมือนที่จะนำข้อมูลสภาพแวดล้อมภายนอกหุ่นยนต์ที่ทำหน้าที่เป็นเรือดำน้ำบังคับที่ใช้ในการสำรวจมาใช้แสดงข้อมูลเพื่อให้ผู้ใช้หลาย ๆ กลุ่มซึ่งไม่ได้อยู่ที่เดียวกันสามารถเข้าใจสภาพแวดล้อมรอบ ๆ ตัวหุ่นยนต์เพื่อที่จะใช้ในการตัดสินใจในการทำงานร่วมกันระหว่างผู้ใช้หลายกลุ่มด้วยเทคโนโลยีความจริงเสมือนในการนำเสนอข้อมูลได้ดัง**รูปที่** 2.33

รูปที่ 2.33 ภาพรวมของระบบ [43]

2.5.9 Human Gaze and Focus-of-Attention in Dual Reality Human-Robot Collaboration [44]

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอเกี่ยวกับการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์ 2 คน โดยผู้ใช้คนที่ 1 จะอยู่สถานที่เดียวกับหุ่นยนต์ ผู้ใช้คนที่ 2 ซึ่งอยู่คนละที่กับผู้ใช้คนที่ 1 จะสามารถสังเกตการณ์การทำงานผ่านสภาพแวดล้อมเสมือนที่ใช้ข้อมูลฝั่งของผู้ใช้คนที่ 1 โดยจะมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับรู้ตำแหน่งของวัตถุ สภาพแวดล้อม และมีอุปกรณ์ที่ตรวจวัดการมองของผู้ใช้ที่ 1 แล้วจะนำข้อมูลนั้นไปสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนเพื่อให้ผู้ใช้ที่ 2 สามารถสังเกตการณ์ทำงานต่าง ๆ หรือสามารถสั่งให้หุ่นยนต์หยิบชิ้นงานได้ ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ของผู้ใช้งานที่ 2 การสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานมีการใช้เส้นแสดงทิศทางการมองของผู้ใช้เพื่อช่วยในการสื่อสาร ดัง**รูปที่** 2.34



รูปที่ 2.34 ความสัมพันธ์ของข้อมูลต่าง ๆ ในระบบ [44]

2.6 สรุป

เทคโนโลยีความจริงเสมือนถูกใช้อย่างกว้างขวางในหลาย ๆ บทบาท สำหรับการฝึกอบรม เทคโนโลยีความจริงเสมือนสามารถทำให้พัฒนาระบบจำลองที่ช่วยส่งเสริมการฝึกอบรมของผู้ใช้งาน เช่น ผู้สอนจำลอง สภาพแวดล้อมเสมือน การแสดงข้อมูลที่สามารถปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งานได้ และการจำลองการทำงานของอุปกรณ์หรือเครื่องมือต่าง ๆ เป็นต้น ขั้นตอนวิธี (Algorithm) สำหรับการสอนสามารถประยุกต์ใช้กับระบบในบททบาทของผู้ฝึกสอนและสามารถตอบโต้กับผู้ใช้งานในแต่ละเหตุการณ์ได้ในระหว่างการฝึกอบรม การปฏิบัติงานบางอย่างอาจไม่มีความสะดวกในการปฏิบัติงานในสถานที่จริงเนื่องจากความเสี่ยง ค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรม ข้อกำหนดหรือข้อห้ามบางอย่าง และข้อจำกัดทางด้านเวลา เป็นต้น ระบบการฝึกอบรมส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นการพัฒนาสภาพแวดล้อมเสมือนในระบบจำลองการฝึกที่ปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งานได้ นอกจากนี้ระบบจำลองการฝึกอบรมยังสามารถทำให้ผู้รับการฝึกสามารถฝึกฝนในสถานการณ์เดิมซ้ำได้ ๆ หลายครั้งสำหรับการปฏิบัติหน้าที่เฉพาะทางบางอย่าง ในระบบจำลองการฝึกยังสามารถจำลองสถานการณ์เพื่อให้ผู้รับการฝึกสามารถค้นหาวิธีการในการแก้ปัญหาใหม่ ๆ ได้อีกด้วย

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในหัวข้อ 2.4 และ 2.4.5 ต่างก็นำเสนอการพัฒนาระบบเพื่อพัฒนากระบวนการฝึกอบรม เช่น การหลีกเลี่ยงความเสี่ยงที่อาจจะเกิดขึ้นขณะทำการฝึกอบรม การลดค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรม การเตรียมความพร้อมสำหรับผู้รับการอบรมในการปฏิบัติหน้าที่เฉพาะทางบางอย่าง การช่วยเสริมการเรียนรู้ในการปฏิบัติงานที่มีความยาก และการสร้างระบบอัจฉริยะเพื่อเป็นตัวช่วยในการทำงาน เป็นต้น จากข้อมูลข้างต้นสามารถสรุปเปรียบเทียบอย่างง่ายดัง**ตารางที่ 2.1** และ **ตารางที่ 2.2**

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบรูปแบบของระบบการทำงานร่วมกัน

งานวิจัย	ผู้ทำงานร่วมกันในระบบ			สภาพแวดล้อม	
	มนุษย์ 1	มนุษย์ 2, 3, ...	ระบบอัจฉริยะ	เสมือน	จริง
2.5.1	✓	✓		✓	
2.5.2	✓	✓		✓	
2.5.3	✓	✓		✓	
2.5.4	✓		✓	✓	✓
2.5.5	✓		✓		✓

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบรูปแบบของระบบการทำงานร่วมกัน (ต่อ)

งานวิจัย	ผู้ทำงานร่วมกันในระบบ			สภาพแวดล้อม	
	มนุษย์ 1	มนุษย์ 2, 3, ...	ระบบอัจฉริยะ	เสมือน	จริง
2.5.6	✓		✓	✓	✓
2.5.7	✓		✓		✓
2.5.8	✓	✓		✓	
2.5.9	✓	✓		✓	✓
ระบบที่พัฒนา	✓	✓		✓	✓

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบรูปแบบของระบบการฝึกอบรม

งานวิจัย	ประเภทของระบบความจริงเสมือน	Lecture	Simulation	Case Study	OJT
2.4.5ก	AR	✓		✓	✓
2.4.5ข	AR (Video)				✓
2.4.5ค	WoW		✓		
2.4.5ง	WoW		✓		
2.4.5จ	WoW		✓	✓	
2.4.5ฉ	Projection Mapping		✓		
2.4.5ช	AR (Video)		✓		
2.4.5ซ	CAVE		✓		
2.4.5ฌ	WoW		✓	✓	
ระบบที่พัฒนา	AR		✓	✓	✓

หมายเหตุ AR (Video) หมายถึงการแสดงภาพกราฟิกซ้อนทับกับสภาพแวดล้อมจริงที่เป็นภาพวิดิทัศน์

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในข้างต้นมีการใช้งานอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบความจริงเสมือนในจุดประสงค์ต่าง ๆ เช่น การแสดงข้อมูลด้วยภาพกราฟิก การปฏิสัมพันธ์ระกว่างผู้ใช้งานกับระบบ การติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งาน เป็นต้น อุปกรณ์แต่ละตัวมีคุณสมบัติ ข้อดี และข้อเสียที่แตกต่างกัน ทำให้การประยุกต์ใช้งานกับระบบต่าง ๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงฟังก์ชัน (Function) การทำงานของระบบ

ให้สอดคล้องกับอุปกรณ์ จากข้อมูลในหัวข้อที่ 2.2 สามารถสรุปข้อมูลฟังก์ชันของอุปกรณ์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบต่าง ๆ ได้ดัง**ตารางที่ 2.3**

ตารางที่ 2.3 ตารางเปรียบเทียบคุณสมบัติของระบบ/อุปกรณ์เกี่ยวกับความจริงเสมือน

คุณสมบัติของระบบ/อุปกรณ์	**ตัวจอภาพ LCD**	**Smartphone**	**Daydream**	**HTC Vive Pro**	**Microsoft HoloLens**
มุมมองแบบ Stereoscopic	✓		✓	✓	✓
มองเห็นสภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนซ้อนทับกันขณะใช้งานระบบ		✓		✓	✓
ปรับมุมมองตามการทิศทางการมองของผู้ใช้		✓	✓	✓	✓
มีลำโพงเพื่อส่งเสียงระหว่างการใช้งาน		✓	✓	✓	✓
ปฏิสัมพันธ์ด้วยท่าทาง (Gesture) และสามารถรับรู้ตำแหน่งของการปฏิสัมพันธ์ของผู้ใช้				✓	✓
มีเซนเซอร์รับภาพด้านหน้า		✓		✓	✓
เป็นอุปกรณ์แบบพกพาที่สวมใส่กับผู้ใช้งานได้		✓	✓		✓
เชื่อมต่อระบบเครือข่ายไร้สายได้	✓	✓	✓	✓	✓
ผู้ใช้งานหลายคนสามารถใช้งานระบบ/อุปกรณ์ที่เป็นอิสระจากกันในพื้นที่เดียวกันได้	✓	✓	✓		✓
รับรู้ลักษณะทางกายของสภาพแวดล้อมจริงได้					✓
รับรู้ตำแหน่งและทิศทางของตัวอุปกรณ์เทียบกับสภาพแวดล้อมจริงได้				✓	✓
รองรับการพัฒนากับระบบปฏิบัติการ Linux หรือ Window	✓	✓	✓	✓	✓

เอกสารคู่มือการใช้งาน (Manual หรือ User Guide) ของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ส่วนใหญ่จะถูกเผยแพร่ในรูปแบบของกระดาษซึ่งไม่มีความสะดวกในการใช้งาน [45] จากงานวิจัยหลายชิ้นแนะนำว่า Mobile Augmented Reality System (MARS) ช่วยเพิ่มความสามารถในการแสดงข้อมูลไปยังผู้ใช้งานได้โดยอัตโนมัติ ทุกที่ และทุกเวลา [46] นอกจากนี้ ผู้ใช้สามารถใช้ท่าทางธรรมชาติในการปฏิสัมพันธ์กับ MARS และอุปกรณ์ดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องรับรู้สภาพแวดล้อมจริงขณะใช้งานด้วย สำหรับงาน On-the-Job Training (OTJ) ที่ต้องการฝึกอบรมการปฏิบัติงานในสถานที่ทำงานจริง

และแสดงข้อมูลการประกอบการทำงานนั้นด้วยภาพกราฟิก ในขณะการฝึกอบรมแบบ OTJ ทั้งผู้ฝึกสอนและผู้รับการฝึกสอนจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลบางอย่างร่วมกันในรูปแบบของคอมพิวเตอร์กราฟิกที่ตอบสนองได้ทันที จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ระบบที่จะพัฒนาขึ้นนั้นจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เกี่ยวกับความจริงเสมือน MARS ที่มีความสามารถทั้งหมดดัง**ตารางที่ 2.3** ทำให้ Microsoft HoloLens เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมที่สุด

หุ่นยนต์ Universal Robot 5 (UR5) ถูกเลือกเพื่อเป็นหุ่นยนต์ที่ใช้ในการฝึกควบคุมการใช้งานเพราะมีความง่ายไม่ซับซ้อนในการควบคุม การควบคุมการเคลื่อนที่ของ UR5 มีอยู่หลายรูปแบบ ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ได้เลือกใช้การสื่อสารกับหุ่นยนต์ด้วยรูปแบบ Primary/Secondary Interfaces และส่งคำสั่ง URScript เพื่อควบคุมหุ่ยนต์ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) **movej** คำสั่งที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดแบบเชิงเส้นในมิติของ Joint Space เมื่อใช้คำสั่งนี้ หุ่นยนต์ต้องหยุดนิ่งหรือมีการใช้งานคำสั่ง movej หรือ movel ก่อนหน้านี้ ความเร็วและความเร่งจะถูกควบคุมภายใต้ Trapezoid Speed Profile
2) **stopj** คำสั่งที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ให้หยุดการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นในมิติของ Joint Space
3) **set_standard_digital_out** คำสั่งส่งสัญญาณดิจิทัลจากกล่องควบคุมไปยังมือจับชิ้นงาน (Gripper) เพื่อใช้ในการหยิบจับชิ้นงาน

ระบบการฝึกอบรมในบทที่ 2 ยังประสบกับปัญหาบางอย่างอยู่ เช่น จำนวนของผู้รับการฝึกอบรมที่ทำงานร่วมกันในเวลาเดียวกัน ณ สถานที่เดียวกัน ความไม่สมจริงของระบบ การบิดเบี้ยว (Distortion) ในการรับ/แสดงผลภาพ ความยากลำบากในการปฏิสัมพันธ์กับระบบ และมุมมองในการใช้งานระบบมีจำกัด ดังนั้น ระบบที่พัฒนาขึ้นจึงถูกออกแบบเพื่อลดปัญหาเหล่านี้โดยการประยุกต์ใช้แนวคิดของการแสดงสัญลักษณ์ท่าทาง (Gesture) และทิศทางการมอง (Gaze) ของผู้ใช้งานหลายคนด้วยภาพกราฟิกดังหัวข้อ 2.5.1 และ 2.5.9 การแสดงข้อมูลในสภาพแวดล้อมเสมือนที่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริงรวมถึงการใช้มาร์คเกอร์ดังข้อหัว 2.5.6 2.4.5ข 2.4.5จ และ 2.4.5ช การเก็บผลการใช้งานของผู้ร่วมการทดลองดังหัวข้อ 2.4.5ฌ นอกจากนี้ยังมีการจำลองระบบฟิสิกส์ในสภาพแวดล้อมเสมือน ระบบสามารถรับรู้ลักษณะทางกายภาพของสภาพแวดล้อมและสามารถนำมาใช้ในการหาตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่ของผู้ใช้งานได้ มีการใช้ระบบเครือข่ายไร้สายสำหรับรับ-ส่งข้อมูลการทำงานร่วมกันแบบหลายผู้ใช้งาน ส่วนของการติดต่อระหว่างระบบกับผู้ใช้งานได้มีการออกแบบโฮโลแกรม (Hologram) ที่สามารถปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้หลายคนร่วมกันและสภาพแวดล้อมจริงด้วยท่าทางธรรมชาติ ระบบสามารถเชื่อมต่อเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์สอดคล้องตามคำสั่งในสภาพแวดล้อมเสมือนและสามารถใช้งานระบบในสถานที่ปฏิบัติงานจริงพร้อมกันได้หลายคน

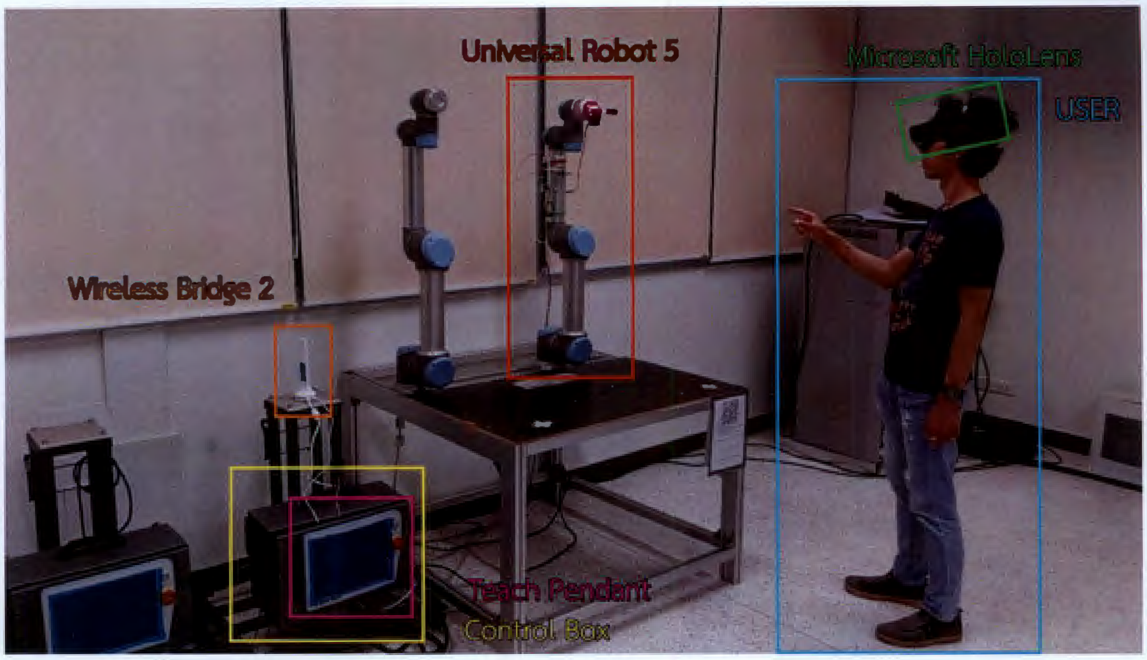
บทที่ 3 การออกแบบและพัฒนาระบบ

ในบทนี้จะเป็นการนำข้อมูลที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 มาใช้ในการออกแบบและพัฒนาระบบ ซึ่งจะกล่าวถึงแนวทางเกี่ยวกับระบบที่รองรับการทำงานผู้ใช้งานหลายคนที่ปฏิสัมพันธ์กับระบบเดียวกันในเวลาพร้อมกันได้ เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาระบบ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมเป็นส่วนติดต่อระหว่างผู้ใช้งานกับหุ่นยนต์ และการปรับตำแหน่งของภาพแวดล้อมเสมือนให้แสดงผลสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริงขณะใช้งาน

3.1 การออกแบบระบบ

3.1.1 ภาพรวมของระบบ

ในการทำงานร่วมกันเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ด้วยความจริงเสริม ผู้ใช้งานจะสวมใส่ Microsoft HoloLens ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้งานเพื่อรับคำสั่งต่าง ๆ ได้ จากนั้นผู้ใช้งานจะสามารถควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับผู้ใช้งานอื่นได้ผ่านสภาพแวดล้อมเสมือนที่ถูกสร้างขึ้น โดยที่ผู้ใช้งานทุกคนนั้นจะอยู่ในสถานที่เดียวกันกับหุ่นยนต์ UR5 ซึ่งอยู่ภายในห้องที่ 1 ดัง**รูปที่ 3.1** การติดต่อสื่อสารทั้งหมดในสภาพแวดล้อมเสมือนจะถูกควบคุมการทำงานโดยเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) ซึ่งอยู่ภายในห้องที่ 2 ดัง**รูปที่ 3.2**

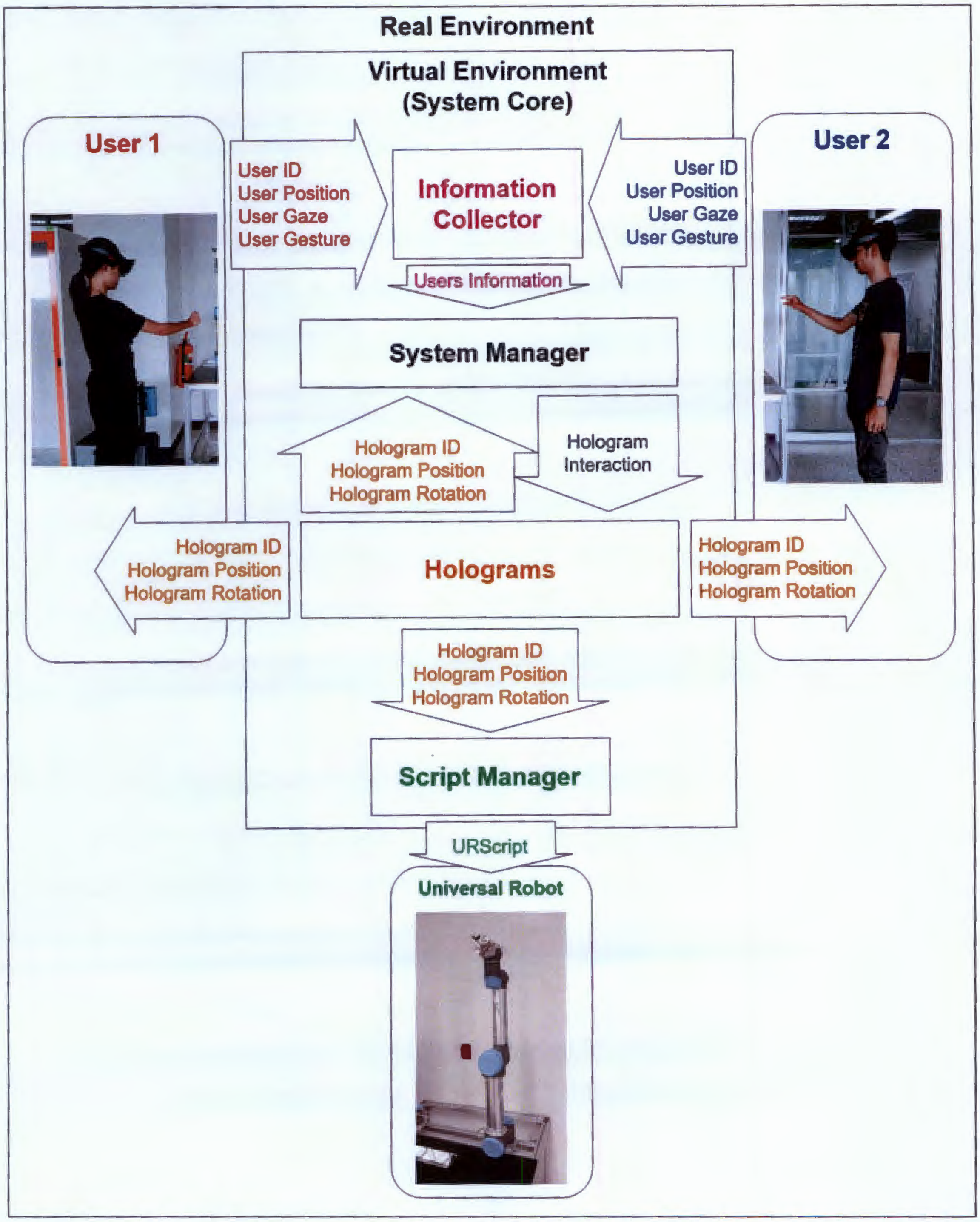


รูปที่ 3.1 ภาพรวมของระบบภายห้องที่ 1

รูปที่ 3.2 ภาพรวมของระบบภายห้องที่ 2

อุปกรณ์ Microsoft HoloLens เป็นอุปกรณ์หลักที่จะถูกใช้เป็นส่วนของการปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้ (User) กับสภาพแวดล้อมเสมือน (Virtual Environment) System Core จะเป็นตัวจัดการการเชื่อมต่อของผู้ใช้งานแต่ละคนและควบคุมการทำงานของสภาพแวดล้อมเสมือนทั้งหมด ภายใน System Core จะมีหน่วยต่าง ๆ ที่ทำงานร่วมกันได้แก่ Information Collector, System Manager, Hologram Information, และ Script Manager โดยสภาพแวดล้อมเสมือนที่สร้างขึ้นจะมีโฮโลแกรม (Hologram) เป็นส่วนติดต่อระหว่างผู้ใช้งานกับระบบ โฮโลแกรมต่าง ๆ ที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเสมือนมีหน้าที่แตกต่างกันและซึ่งตำแหน่งของโฮโลแกรมที่อยู่ในสภาพแวดล้อมเสมือนจะอ้างอิงตำแหน่งกับสภาพแวดล้อมจริง (Real Environment) และยังสามารถตอบสนองกับท่าทาง (Gesture) ของผู้ใช้งานได้อีกด้วย [14, 47] อุปกรณ์ Microsoft HoloLens จะมีการส่งข้อมูลต่าง ๆ ของผู้ใช้งานกับ System Core ได้แก่ หมายเลข (User ID) ตำแหน่งในสภาพแวดล้อมเสมือน (User Position) ทิศทางการมอง (User Gaze) และท่าทาง (User Gesture) จากนั้นข้อมูลของผู้ใช้งานทั้งหมดจะถูกรวบรวมโดย Information Collector เพื่อข้อมูลของผู้ใช้ทั้งหมดไปยัง System Manager เพื่อทำการประมวลผลว่าข้อมูลดังกล่าวมีการปฏิสัมพันธ์อะไรกับโฮโลแกรมบ้าง Script Manager จะทำการอ่านข้อมูลของโฮโลแกรมเพื่อประมวลผลคำสั่งที่จะส่งไปควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เสมือนซึ่งจะแปลงเป็น URScript แล้วส่งไปควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์จริง [48] สุดท้าย System Core จะส่งข้อมูลของโฮโลแกรมกลับมายัง Microsoft HoloLens ได้แก่ หมายเลข (Hologram ID) ตำแหน่ง (Hologram Position) และทิศทาง (Hologram Rotation)

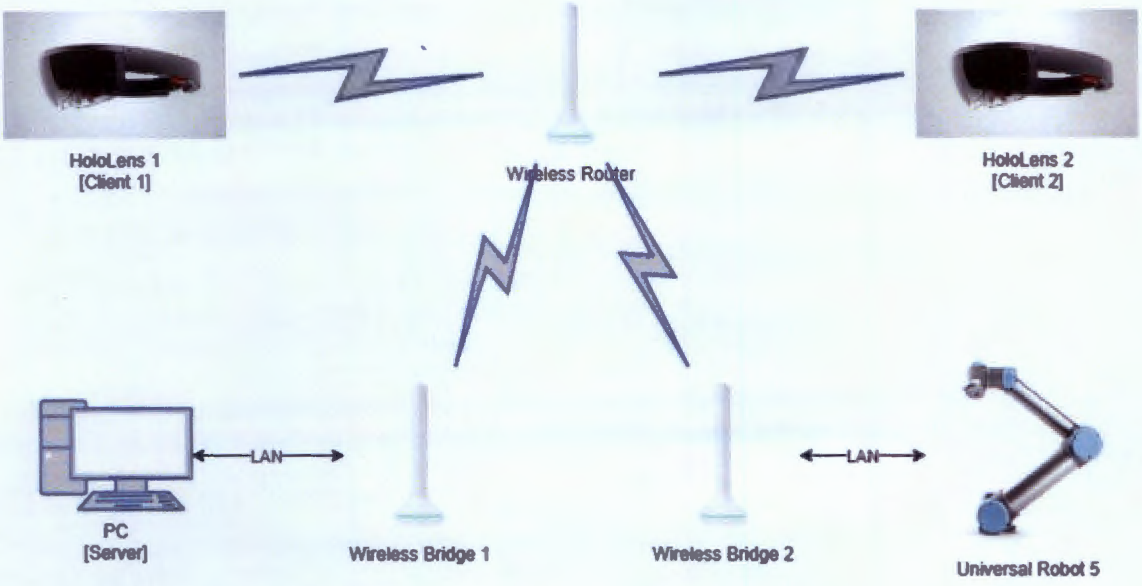
จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ระบบที่พัฒนาขึ้นจะทำให้ผู้ใช้งานที่อยู่ในระบบสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงหรือการตอบสนองของโฮโลแกรมทันทีที่ผู้ใช้งานมีการปฏิสัมพันธ์กับระบบ ผู้ใช้งานทุกคนจะสามารถปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมร่วมกันในเวลาเดียวกัน ณ สถานที่ทำงานจริงเพื่อร่วมกันควบคุมหุ่นยนต์ได้ดัง**รูปที่** 3.3



รูปที่ 3.3 แผนภาพกระแสข้อมูล

3.1.2 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบ

จากแผนภาพกระแสข้อมูลดังรูปที่ 3.3 การทำงานร่วมกันด้วยความจริงเสริมร่วมกันหลายคนจำเป็นจะต้องมีรับ-ส่งข้อมูลผ่านแลนไร้สาย (Wireless Local Area Network) ระหว่างผู้ใช้งาน (Client) หลายคน โดยระบบจะต้องคงข้อมูลการทำงานได้อย่างต่อเนื่องแม้ผู้ใช้งานจะเข้าสู่ระบบ (Connect) เพิ่มหรือออกจากระบบ (Disconnect) ไปยังระบบศูนย์กลาง (Server) ซึ่งเป็นการทำงานแบบรวมศูนย์ (Centralized) ระบบศูนย์กลางจะเก็บข้อมูลต่าง ๆ ขณะใช้งานระบบเพื่อให้ผู้ใช้งานแต่ละคนสามารถรับ-ส่งข้อมูลที่มีอยู่ในระบบได้อย่างต่อเนื่องและข้อมูลไม่สูญหายแม้ผู้ใช้งานออกระบบ นอกจากนี้ยังต้องมีการส่งคำสั่งเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ (Universal Robot 5: UR5) จึงทำให้ทั้งสามส่วน ได้แก่ ผู้ใช้งาน ระบบศูนย์กลาง และหุ่นยนต์ต้องใช้อุปกรณ์ที่รองรับการเชื่อมต่อผ่านแลนไร้สายและมีการเชื่อมต่อดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาระบบ

งานวิจัยชิ้นนี้ใช้ซอฟต์แวร์ในการพัฒนาระบบที่เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใช้ได้โดยไม่มีค่าใช้จ่ายในการพัฒนา มีรายละเอียดดังนี้

1) Unity 2017.4.16f1 LTS (Unity 3D) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาเกม (Game Engine) เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ 3 มิติ ที่สามารถใช้สร้างแอปพลิเคชันได้หลากหลายรูปแบบและยังรองรับการพัฒนาหลายแพลตฟอร์มร่วมถึง Microsoft HoloLens [49] การออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface: UI) ต่าง ๆ จะทำผ่าน Unity 3D เป็นหลัก รวมถึงการสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนและการปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับระบบร่วมถึงหุ่นยนต์
2) Microsoft Visual Studio Community 2017 เป็น IDE (Integrated Development Environment) ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C# เพื่อใช้งานกับ Unity 3D และยังใช้เป็น Compiler แล้ว Install Application ที่สร้างขึ้นจาก Unity 3D ไปสู่ HoloLens อีกด้วย
3) MixedRealityToolkit-Unity เป็นชุดคำสั่งที่พัฒนาด้วยภาษา C# ใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันกับ Microsoft HoloLens โดยจะมีชุดคำสั่งที่ผู้พัฒนาสามารถเรียกใช้เพื่อร้องขอข้อมูลของอุปกรณ์ MiCrosoft HoloLens เพื่อใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันได้
4) Vuforia Engine เป็นซอฟต์แวร์ที่จะประมวลผลภาพแล้วหาตำแหน่งของมาร์คเกอร์เพื่อใช้คำนวณหาตำแหน่งและการหมุนของมาร์คเกอร์นั้น เป็นซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนามาใช้งานทางด้าน Augmented Reality รองรับการทำงานในหลายอุปกรณ์รวมถึง Microsoft HoloLens และยังสามารถพัฒนาโปรแกรมร่วมกัน Unity 3D อีกด้วย

3.3 การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานกับระบบ

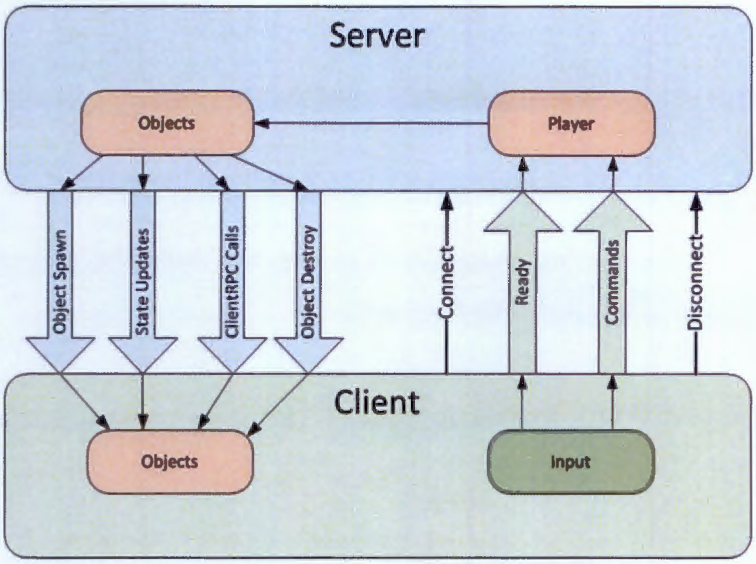
จากแผนภาพกระแสข้อมูลดังรูปที่ 3.3 งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบให้ System Core ทำงานแบบ Standalone Server โดยทำงานอยู่ในระบบศูนย์กลาง (Server) การทำงานของ System Core และ Microsoft HoloLens จะเป็นแอปพลิเคชันตัวเดียวกันแต่สามารถเปลี่ยนบทบาทการทำงานได้เป็นทั้งแบบ Server, Client หรือ Host (Server และ Client ในเวลาเดียวกัน) ได้อย่างใดอย่างหนึ่ง ทำให้มีความคล่องตัวในการพัฒนาแอปพลิเคชันและการนำไปพัฒนาต่อเพื่อใช้งานกับระบบอื่น ๆ การประมวลผลต่าง ๆ ของระบบส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในฝั่งของ System Core เพื่อลดพลังการประมวลผลของฝั่งผู้ใช้งาน (Microsoft HoloLens) ทุกคนที่ทำงานร่วมกันในระบบ ทำให้ฝั่งผู้ใช้งานมีประสิทธิภาพในการแสดงผลที่ดี ในงานวิจัยนี้ได้มีแบ่งการพัฒนาการส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการพัฒนาระบบรับ-ส่งข้อมูลที่พัฒนาขึ้นเองดังภาคผนวก ก. และส่วนที่สองจะเป็นการใช้งาน Unity Network ในการรับ-ส่งข้อมูลของระบบที่พัฒนาขึ้น การรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง Client และ Server ของ Unity 3D นั้นสามารถแบ่งการพัฒนาออกได้เป็น 2 รูปแบบคือ

1) Network Manager หรือ The High Level API เหมาะสำหรับการพัฒนาการรับ-ส่งข้อมูลที่มีจัดการข้อมูลเกี่ยวกับ Component ต่าง ๆ ของ Unity 3D
2) NetworkTransport API เหมาะสำหรับการวางโครงสร้างพื้นฐานของระบบการรับ-ส่งข้อมูลที่สามารถออกแบบรูปแบบคำสั่งได้เอง (การทำงานคล้ายกับภาคผนวก ก.)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกพัฒนาระบบรับ-ส่งข้อมูลโดยใช้ The High Level API เนื่องจากสามารถทำความเข้าใจกระบวนการทำงานและเริ่มต้นเรียนรู้ได้ง่าย ระบบการจัดการการเชื่อมต่อระหว่าง Server และ Client นั้นจะใช้ Component ตัวเดียวกันได้ ชื่อว่า Network Manager ที่สามารถตั้งค่าต่าง ๆ ในการเชื่อมต่อได้ ส่วนที่แตกต่างกันระหว่าง Server และ Client คือ Server จะเปิดช่องทางรอรับการเชื่อมต่อ (Open Port and Listening) ส่วน Client จะทำการเชื่อมต่อไปยังช่องทางที่ Server เปิดเอาไว้ (Connect) การรับ-ส่งข้อมูลผ่าน Network Manager นั้น จะมองข้อมูลต่าง ๆ เป็น Object โดยแต่ละ Object ภายใน Server เดียวกันก็จะมีข้อมูลที่เหมือนกันทุก Client ซึ่ง Object สามารถถูกควบคุมได้ทั้งจาก Client และ Server ดังรูปที่ 3.5 Network Manager ได้แบ่ง Object ออกเป็น 3 ประเภทคือ

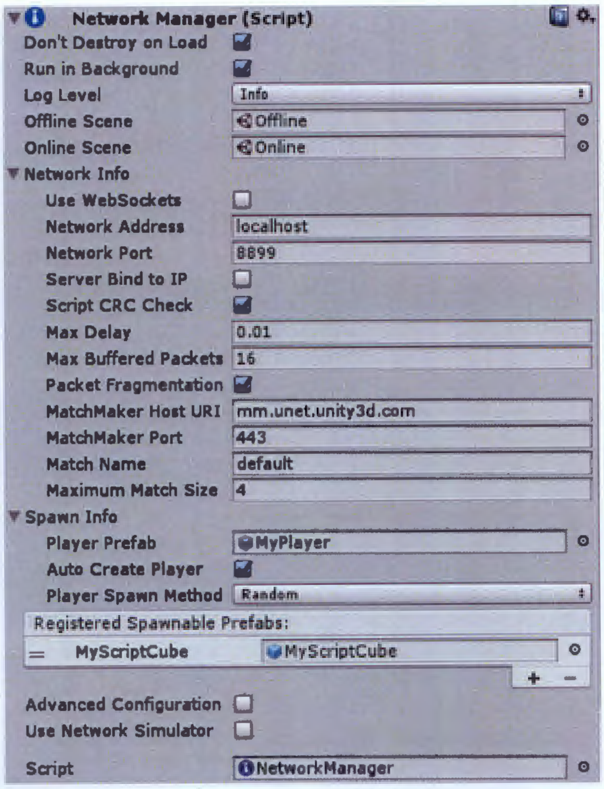
1) Local Player Authority เป็น Object ที่จะถูกควบคุมการทำงานจาก Client ที่เป็นเจ้าของ Object เท่านั้น Client อื่นหรือ Server ไม่สามารถเข้ามาควบคุมการทำงานได้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแสดงตัวละครของ Client ในเกม
2) Server Only เป็น Object ที่ถูกควบคุมโดย Server เท่านั้น Client ไม่สามารถควบคุมการทำงานของ Object นั้นได้ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างป้ายแสดงสถานะต่าง ๆ ในเกม

3) Object ที่ไม่ใช่ทั้ง Local Player Authority และ Server Only สามารถถูกควบคุมการทำงานได้จาก Client ทุกทั้งหมดรวมถึง Server สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการแสดงวัตถุต่าง ๆ ในเกม



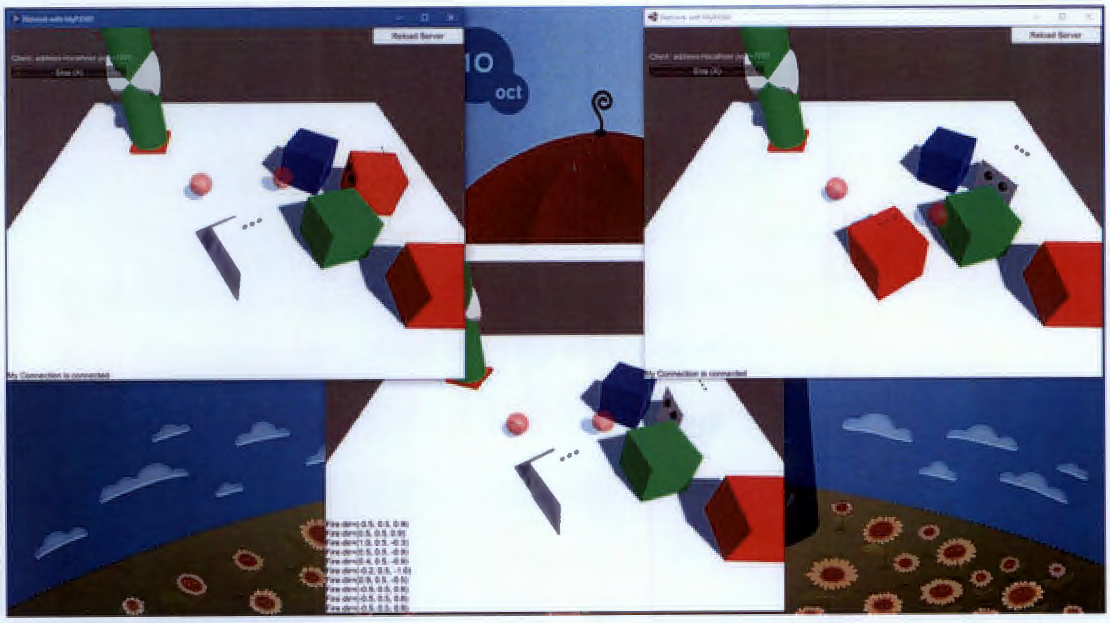
รูปที่ 3.5 การรับ-ส่งข้อมูลของ Objects ระหว่าง Server และ Client [50]

การตั้งค่าที่สำคัญใน Network Address ของ Server ในงานวิจัยชิ้นนี้คือ จะกำหนด Network Address เป็น localhost เพื่อให้ Server สามารถรับการเชื่อมต่อจาก Client ได้จากทุกช่องทาง (Interface) ของเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องนั้นและกำหนด Network Port เป็น 7777 ซึ่ง Port ดังกล่าวจะต้องไม่ซ้ำกับ Port ของแอปพลิเคชันอื่น เพราะ Port เป็นตัวกำหนดว่าการเชื่อมต่อใด ๆ จะต้องเชื่อมกับแอปพลิเคชันใดในเครื่องนั้น ๆ ดังนั้น Server จะรอการเชื่อมต่อจาก Client ทาง Port 8899 ส่วนของ Client จะใช้ Network Manager เช่นเดียวกับ Server แต่เปลี่ยน Network Address จาก localhost เป็น 192.168.2.222 (ในงานวิจัยนี้เครื่อง Server มี Static IP = 192.168.2.222) จากนั้นทำการเชื่อมต่อไปยัง Server ที่มีการตั้งค่าดัง**รูปที่ 3.6**



รูปที่ 3.6 การตั้งค่าส่วนของ Server ใน Unity Network

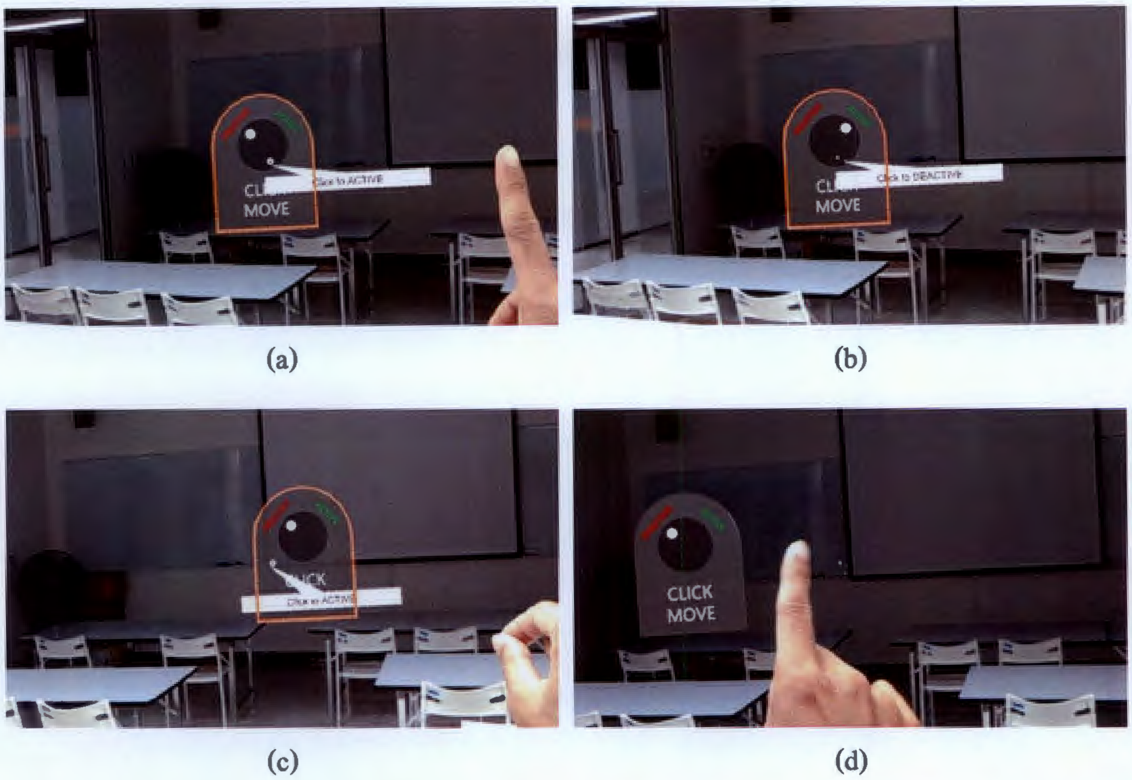
การทดสอบการทำงานของ Network Manager ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างสภาพแวดล้อมเสมือนที่มีแรงโน้มถ่วง น้ำหนัก และแรงกระทำต่อวัตถุ สร้าง Player Object (Local Player Authority) ซึ่งเป็นตัวแทนของ Client นั้น ๆ ใน ในหน้าต่างของ Client จะแสดง Player Object ของตัวเองเป็นสีแดง และยังมีทรงกลมโปร่งแสงสีแดงอยู่ด้านหน้าเพื่อใช้เป็น Cursor ในการควบคุม (Drag and Drop) กับ Object อื่น ๆ ในสภาพแวดล้อมเสมือน จากนั้นทำการสร้าง Shared Object (Object ที่ไม่ใช่ทั้ง Local Player Authority และ Server Only) ที่เป็นลูกบาศก์และทรงกลมเพื่อทดสอบการปฏิสัมพันธ์กับ Player Object นอกจากนี้ยังมีการสร้าง Object ที่มีการจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์อย่างง่าย มี 5 Link ที่อยู่ในแนวเดียวกันรวมถึงมือจับชิ้นงานที่ปลายแขนหุ่นยนต์ และ 4 Revolute Joint โดย Object ทั้งหมดที่สร้างขึ้นสามารถปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันได้ เช่น Client แต่ละ Client สามารถบังคับ Player Object ของตนเองโดยการเคลื่อนที่และควบคุม Object อื่น ๆ ในสภาพแวดล้อมเสมือนได้ แต่ละ Object สามารถตรวจจับการชนกันแล้วส่งแรงกระทำต่อวัตถุอื่นให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ โดยการทดสอบได้ทดสอบการทำงานของ Server กับ Client ในเครื่องเดียวกันดัง**รูปที่** 3.7 และ Server กับ Client ที่ทำงานอยู่คนละเครื่อง วิดิทัศน์การทำงานดังกล่าวสามารถเข้าถึงได้จาก http://bit.ly/networking-multiuser



รูปที่ 3.7 การทดสอบการควบคุม Object ต่าง ๆ ผ่าน Network Manager

3.4 ส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

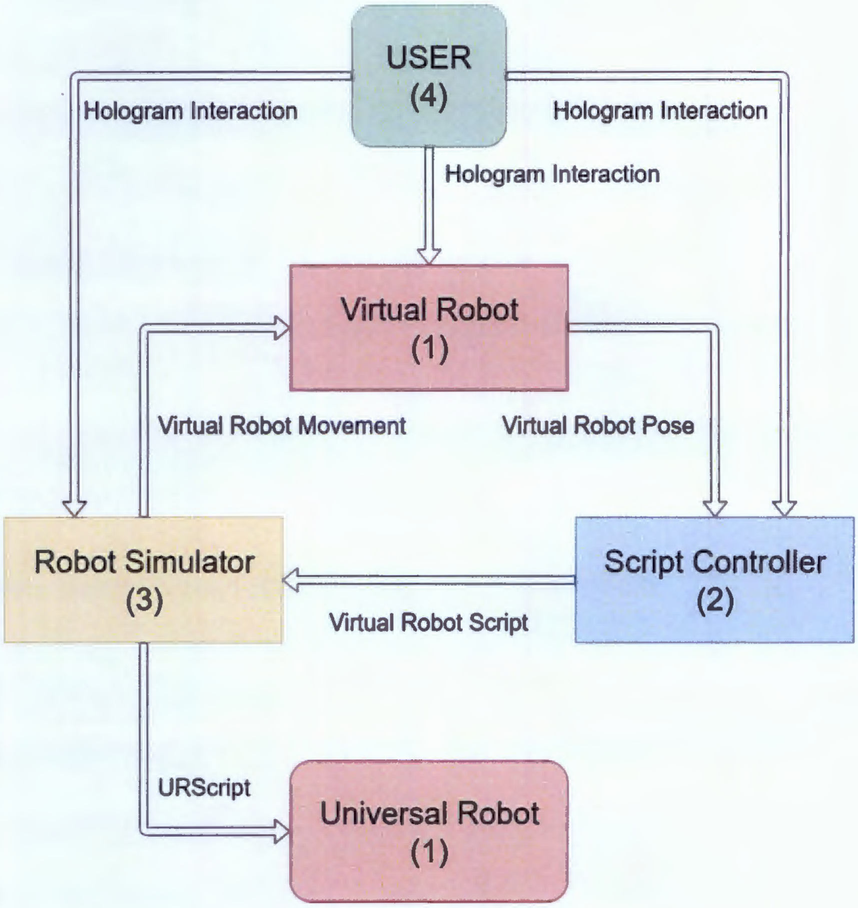
การใช้งานคอมพิวเตอร์โดยทั่วไปผู้ใช้งานสามารถป้อนคำสั่งให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ด้วยเมาส์ (Mouse) ซึ่งจะแสดงตำแหน่งเป็น **Cursor** และสามารถป้อนคำสั่ง **Click** และ **Drag and Drop** ให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลคำสั่งได้ ในส่วนของอุปกรณ์ Microsoft HoloLens ก็เช่นเดียวกันสามารถปฏิสัมพันธ์ด้วยท่าทาง (Gesture) กับโฮโลแกรมได้ ซึ่งประกอบไปด้วย **Gaze** ที่แสดงทิศทิศทางเปรียบเสมือน Cursor ของเมาส์ **Tap** ที่เป็นการป้อนคำสั่งเสมือนการ Click และ **Tap and Hold** ที่เป็นการป้อนคำสั่งในการลาก-วางเปรียบได้กับ Drag and Drop ดังนั้นผู้ใช้งานสามารถใช้ท่าทาง **Tap and Hold** เพื่อย้ายตำแหน่งของโฮโลแกรมและใช้ท่าทาง Tap เพื่อเปลี่ยนสถานะของโฮโลแกรมสวิตซ์จาก "Deactive" เป็น "Active" [14] ดัง**รูปที่ 3.8**



รูปที่ 3.8 (a) สถานะ (Deactive) ปุ่มก่อนใช้ท่าทาง Tap (b) สถานะ (Active) ปุ่มหลังใช้ท่าทาง Tap (c) ตำแหน่งก่อนใช้ท่าทาง Tap and Hold (d) ตำแหน่งหลังใช้ท่าทาง Tap and Hold ย้ายตำแหน่ง

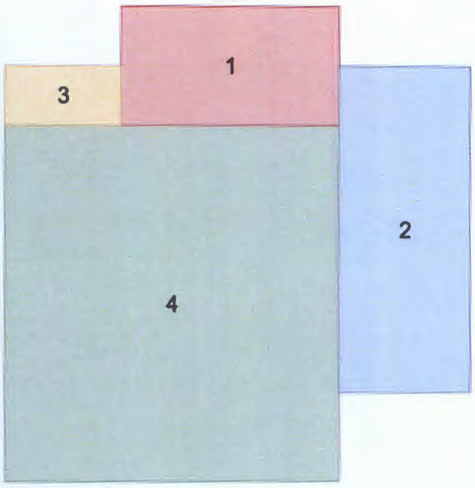
โดยทั่วไปการควบคุม UR5 นั้นจะมีส่วนติดต่อผู้ใช้งานผ่านแผงควบคุม Teach Pendant ซึ่งเป็นหน้าจอแบบสัมผัส ผู้ใช้สามารถสร้างชุดคำสั่งเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ได้ ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบส่วนติดต่อผู้ใช้งานผ่านโฮโลแกรมซึ่งทำหน้าที่แทนการใช้งานแผงควบคุม Teach Pendant ผู้ใช้งานสามารถ

ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยท่าทาง (Gesture) เพื่อสร้างชุดคำสั่งในการควบคุมหุ่นยนต์เสมือนและยังสามารถจำลองการทำงานของหุ่นยนต์เสมือนเพื่อดูผลการทำงานของชุดคำสั่งที่สร้างขึ้นก่อนที่จะส่งชุดคำสั่งดังกล่าวไปควบคุมหุ่นยนต์จริง (UR5) โฮโลแกรมทั้งหมดในระบบถูกออกแบบให้มีหน้าที่ต่างกัน โดยแบ่งตามหน้าที่การทำงานออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ (1) Virtual Robot (2) Script Controller และ (3) Robot Simulator ซึ่งแต่ละส่วนจะมีการทำงานดัง**รูปที่ 3.9**



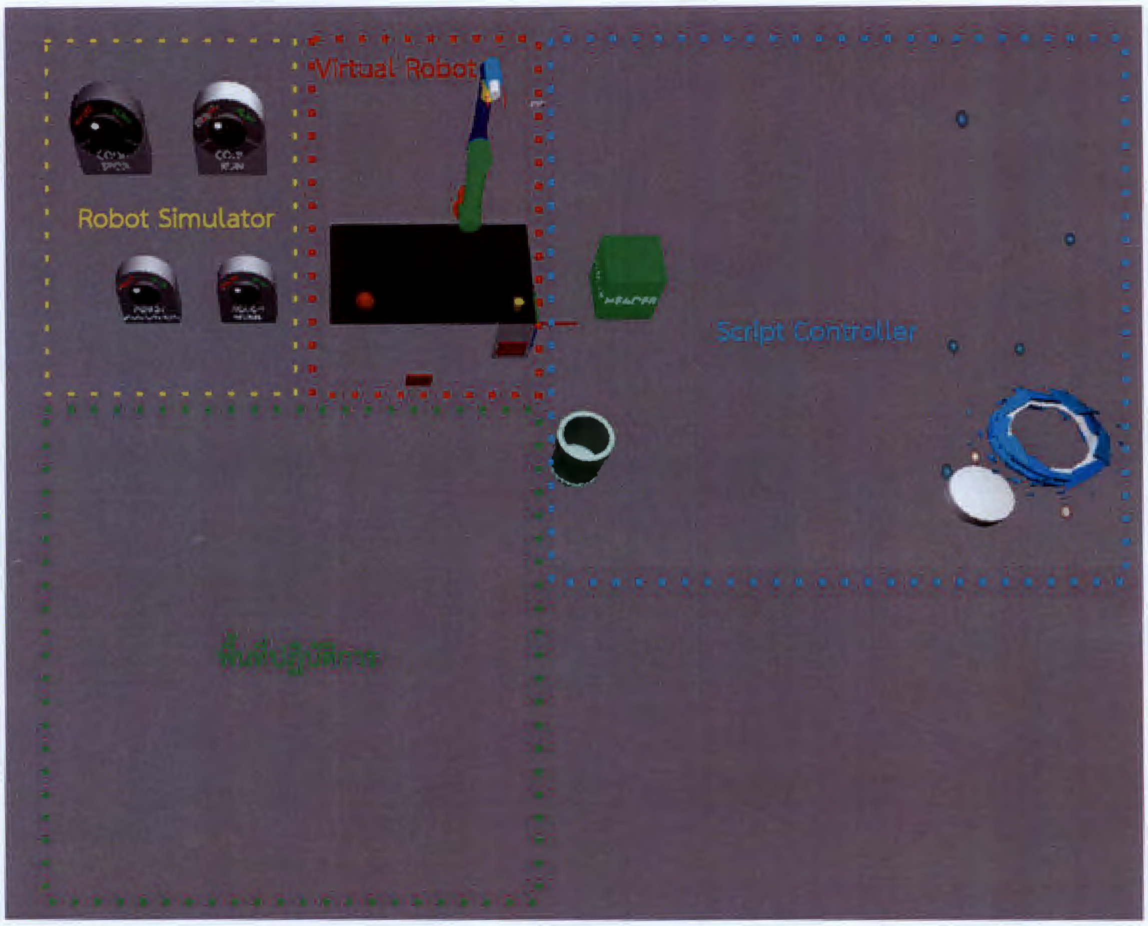
รูปที่ 3.9 แผนผังการทำงานของส่วนติดต่อผู้ใช้งาน

ระหว่างการควบคุม Virtual Robot ผู้ใช้งานทุกคนจะอยู่ในห้องเดียวกับหุ่นยนต์ UR5 ซึ่งห้องดังกล่าวมีลักษณะตรงกลางห้องเป็นที่โล่งซึ่งถูกเลือกให้เป็น (4) พื้นที่ปฏิบัติการในการควบคุมหุ่นยนต์ประมาณ2.75 x 4.28 ตร.ม. ทำให้โฮโลแกรมส่วนต่าง ๆ ในข้างต้นถูกจัดวางไว้ยังตำแหน่งภายนอกพื้นที่ (4) ดังกล่าวดัง**รูปที่ 3.10**



รูปที่ 3.10 แผนผังมุมมองด้านบนแสดงการแบ่งพื้นที่การจัดวางตำแหน่งของโฮโลแกรม

หลังจากที่ได้จัดวางตำแหน่งของโฮโลแกรมทั้งหมดแล้ว ภาพรวมของโฮโลแกรมทั้งหมดที่พัฒนาภายในสภาพแวดล้อมเสมือนจะมีลักษณะดัง**รูปที่** 3.11



รูปที่ 3.11 ภาพรวมของโฮโลแกรมภายในสภาพแวดล้อมเสมือนในมุมมองของ Server

3.4.1 หุ่นยนต์เสมือน (Virtual Robot)

หุ่นยนต์เสมือน (Virtual Robot) ถูกใช้ในการแสดงผลและลอกเลียนพฤติกรรมการทำงานของหุ่นยนต์ UR5 รวมถึงขนาดของหุ่นยนต์ รูปร่าง และการเคลื่อนไหวในส่วนต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ [51] ผู้ใช้หลายคนสามารถปฏิสัมพันธ์กับหุ่นยนต์เสมือนนี้ได้พร้อมกันด้วยท่าทาง (Gesture) หุ่นยนต์เสมือนถูกประกอบขึ้นจากหลาย ๆ ส่วน เช่น Base, Shoulder, Elbow, Wrist 1, Wrist 2, Wrist 3 และ Gripper แต่ละส่วนของหุ่นยนต์เสมือนจะถูกเติมสีที่แตกต่างกันเพื่อช่วยให้ผู้ใช้แยกแต่ละส่วนของหุ่นยนต์ได้ง่ายและมีคำอธิบาย (Tooltip) แสดงส่วนต่าง ๆ ที่ผู้ใช้กำลังจ้องมองอยู่ นอกจากนี้แต่ละส่วนของหุ่นยนต์เสมือนถูกเชื่อมต่อด้วย Configurable Joint Component ซึ่งจะบังคับให้ส่วนนั้น ๆ ของ Virtual Robot จะเกิดการหมุนเพียงแกนเดียวเท่านั้น แต่ละส่วนของ Virtual Robot จะมี Rigidbody Component เพื่อใช้ในการจำลองทางฟิสิกส์ในสภาพแวดล้อมเสมือน [52, 53] จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะทำให้ Virtual Robot นั้นมีพฤติกรรมการทำงานคล้ายกับหุ่นยนต์จริงดัง**รูปที่ 3.12**

รูปที่ 3.12 Tooltip แสดงชื่อและขนาดมุมของ WRIST 1

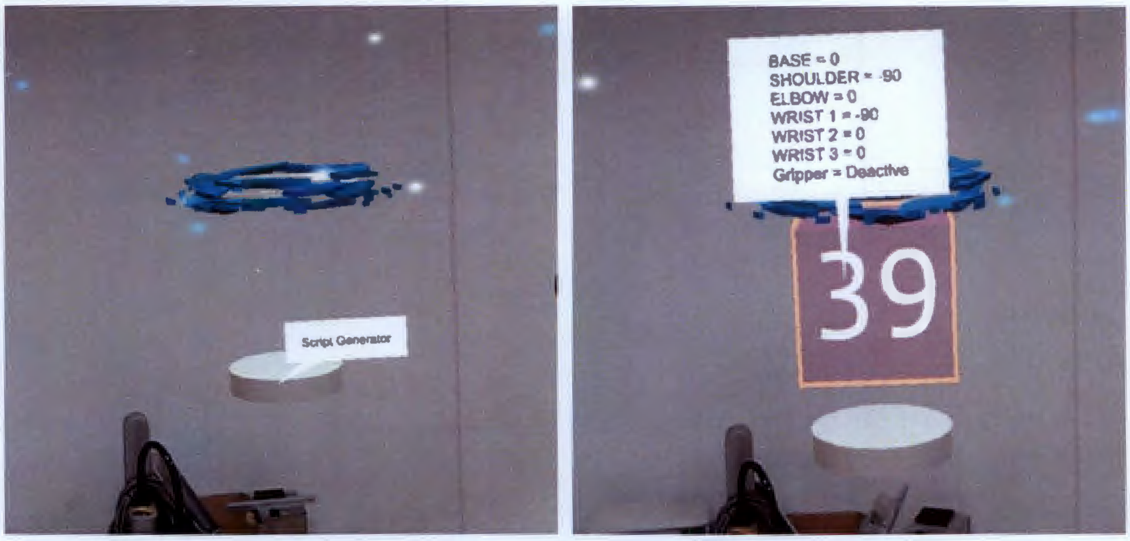
การที่ผู้ใช้งานปฏิสัมพันธ์กับ Virtual Robot เพื่อเคลื่อนไหวไปยังท่าทางต่าง ๆ จะทำให้เกิดการส่งค่า Virtual Robot Pose ไปยังส่วนของ Script Controller เพื่อสร้างคำสั่งควบคุมในขั้นต่อไป

3.4.2 Script Controller

ส่วนของ Script Copntroller จะเป็นส่วนที่จัดการเกี่ยวกับชุดคำสั่งที่อยู่ในรูปของโฮโลแกรมซึ่งถูกสร้างขึ้นในสภาพแวดล้อมเสมือน ประกอบด้วยโฮโลแกรมที่ทำหน้าที่แตกต่างกัน ได้แก่ Script Generator, Script Cube, Script Header, และ Recycle Bin มีรายละเอียดดังนี้

ก. Script Generator

Script Generator ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ Base และ Gate ในส่วนของ Base นั้นจะมีลักษณะเป็น Cylinder สีเทา มีรัศมี 0.15 เมตร มีหน้าที่จับ Script Cube ที่ถูกสร้างขึ้น ส่วนที่สองคือ Gate มีลักษณะเป็นวงแหวนสีฟ้าผสมขาว เคลื่อนที่หมุ่นรอบตัวเองอยู่เหนือ Base ระยะ 0.5 เมตร หน้าที่หลักของ Script Generator คือการสร้าง Script Cube หลังจากที่ผู้ใช้งานทำการควบคุมหุ่นยนต์เสมือน ในการสร้าง Script Cube นั้น Gate จะทำการเคลื่อนย้ายตำแหน่งตัวเองลงมาแตะที่ Base แล้วเคลื่อนที่กลับไปยังตำแหน่งเดิม จากนั้น Script Cube จะถูกสร้างขึ้นแล้วถูกผลักไปยัง Base จากนั้น Script Generator จะรับค่า Virtual Robot Pose ซึ่งเป็นข้อมูลสถานะต่าง ๆ ได้แก่ ค่ามุมแต่ละส่วนของ Virtual Robot และสถานะของ Gripper จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกแปลงเป็น Virtual Robot Script และเก็บไว้ใน Script Cube ที่ถูกสร้างขึ้นดัง**รูปที่** 3.13



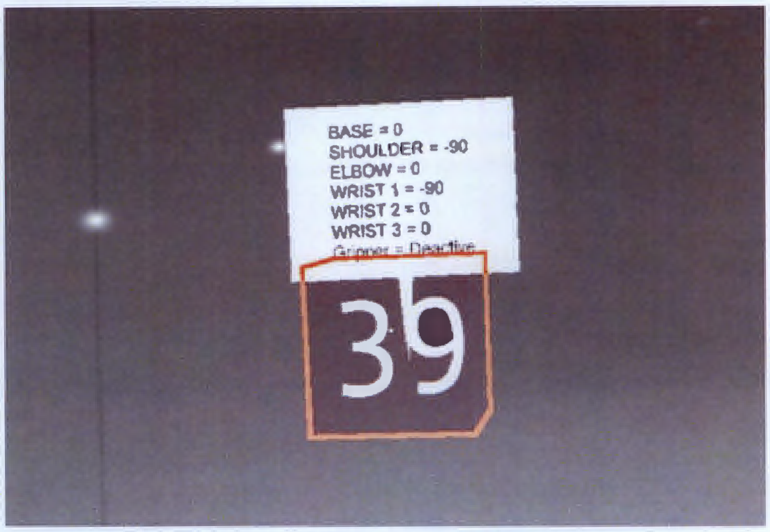
(a) (b)

รูปที่ 3.13 (a) Script Generator (b) Script Cube ที่ถูกสร้างขึ้นจาก Script Generator

ในการสร้าง Script Cube ถ้าหากยังมี Script Cube ค้างอยู่ที่ตำแหน่ง Base ระบบจะเคลื่อนย้าย Script Cube นั้นไปยัง Recycle Bin โดยอัตโนมัติ ส่งผลให้ Script Cube ที่อยู่ใน Script Generator เป็นคำสั่งที่ได้จากการปฏิสัมพันธ์กับ Virtual Robot ล่าสุดเสมอ

ข. Script Cube และ Script Header

จากกระบวนการในข้างต้น Script Cube ถูกออกแบบให้มีลักษณะเป็นลูกบาศก์ขนาด 0.3 ลูกบาศก์เมตร เพื่อให้ง่ายสำหรับการนำ Script Cube หลายอันมาต่อกัน มีสีโดยการสุ่ม และจะมีตัวเลขกำกับซึ่งเป็นตัวเลขที่เรียงลำดับตามการสร้าง Script Cube ตัวเลขดังกล่าวสามารถปรับทิศทางการแสดงผลที่สอดคล้องกับตำแหน่งของผู้ใช้งาน จึงทำให้ผู้ใช้งานสามารถอ่านข้อความที่เป็นตัวเลขได้จากทุก ๆ ทิศทาง นอกจากนี้ Virtual Robot Script ที่ถูกเก็บไว้ใน Script Cube ยังสามารถแสดงข้อมูลดังกล่าวได้โดยการจ้องมองไปที่ Script Cube นั้น ๆ แล้ว Tooltip จะแสดงข้อมูลออกมาดัง**รูปที่ 3.14**

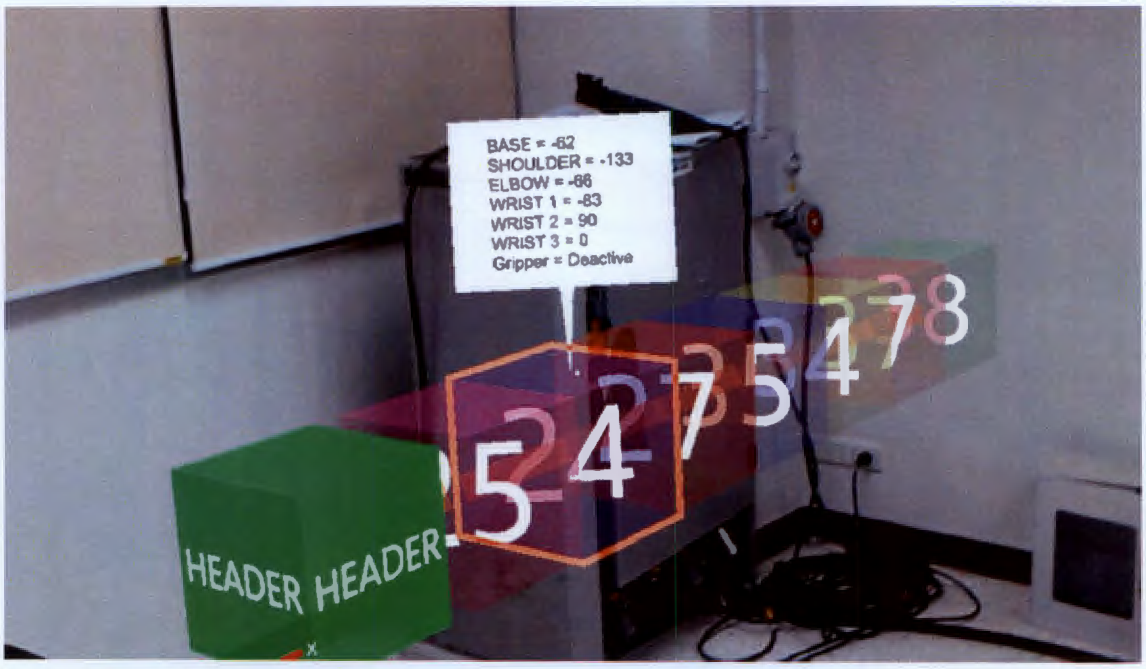


รูปที่ 3.14 Tooltip แสดงค่ามุมของแต่ละส่วนของหุ่นยนต์และสถานะ Gripper ที่ Script Cube เก็บไว้

การทำงานของหุ่นยนต์ UR5 นั้นจะมีการทำงานเป็นลำดับ (Sequence) ทีละคำสั่ง ซึ่งผู้ใช้งานสามารถนำคำสั่งหลาย ๆ คำสั่งมาเรียงต่อกันเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ UR5 ทำงานต่าง ๆ ได้ผ่านแผงควบคุม Teach Pendant ดังนั้นโฮโลแกรม Script Header จึงได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับอ่านชุดคำสั่งของ Script Cube ดังรูปที่ 3.15

รูปที่ 3.15 Script Header

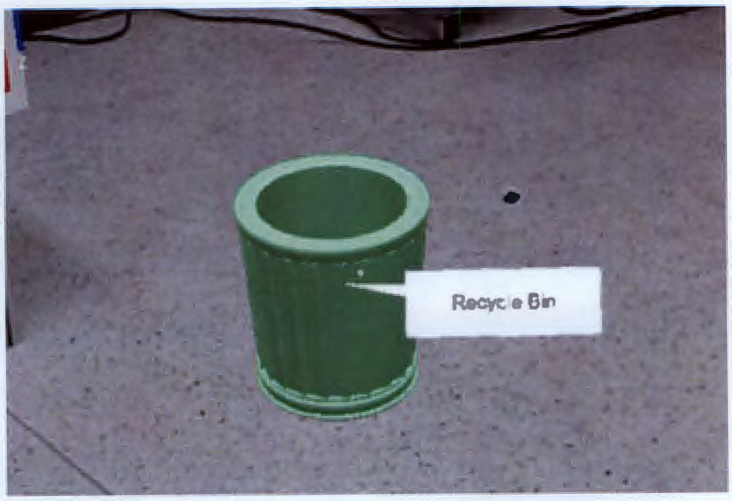
ผู้ใช้งานสามารถนำ Script Cube มาวางเรียงต่อกับ Script Header เพื่อกำหนดลำดับการทำงานของ Virtual Robot ได้ การนำ Script Cube มาต่อกันจะทำให้เกิดสายของ Script Cube (Chain of Script Cube) จากนั้นสายของ Script Cube ที่ต่อกับ Script Header จะแสดงเส้นเชื่อมต่อ ซึ่งมีการไล่สี (Gradient) จากสีเหลืองไปสู่สีแดงดัง**รูปที่ 3.16** นอกจากนี้ผู้ใช้งานยังสามารถแก้ไขชุดคำสั่งหรือสลับลำดับของ Script Cube ได้อีกด้วย



รูปที่ 3.16 สายของ Script Cube จากการนำ Script Cube มาต่อกันที่ Script Header

ค. Recycle Bin

ในระหว่างการใช้งานระบบ Script Cube ที่ไม่จำเป็นสามารถเกิดขึ้นได้ Recycle Bin จึงถูกออกแบบให้มีหน้าที่ในการสร้างความสะอาดให้กับสภาพแวดล้อมเสมือน โดยผู้ใช้งานสามารถเคลื่อนย้าย Script Cube ที่ไม่จำเป็นลบออกจากระบบหรือทำลายทิ้งที่ตำแหน่งของ Recycle Bin ดัง**รูปที่ 3.17**



รูปที่ 3.17 Recycle Bin

3.4.3 Robot Simulator

ส่วน Robot Simulator จะเป็นส่วนที่ควบคุมการจำลองการทำงานของ Virtual Robot ซึ่งจะทำการอ่านค่า Virtual Robot Script มาจาก Script Header ที่อยู่ในส่วน Script Controller ดัง**รูปที่ 3.9** การจำลองการทำงานของ Virtual Robot จะใช้หลักการเดียวกับคำสั่ง movej ของหุ่นยนต์ UR5 ดังนั้นการเคลื่อนไหวของ Virtual Robot ใน Unity 3D จึงได้ใช้ฟังก์ชัน Quaternion.Lerp (Linear Interpolation) ในการคำนวณเพื่อควบคุมให้ Virtual Robot เคลื่อนไหวตามชุดคำสั่งที่ผู้ใช้ได้สร้างขึ้นมาในขั้นตอนข้างต้น [54] หลังจากการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์แล้วผู้ใช้งานสามารถส่งชุดคำสั่งดังกล่าวไปควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ UR5 ได้ โดย Robot Simulator จะส่งค่า Virtual Robot Script ไปให้กับ Script Manager แล้วแปลเป็น URScript ดัง**รูปที่ 3.3** เพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ UR5 ตามการเคลื่อนไหวที่ได้จากการจำลองการทำงานของ Virtual Robot ในข้างต้น การเข้าถึงฟังก์ชันดังกล่าวผู้ใช้งานจะต้องปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม General-purpose Switch

ก. General-purpose Switch

ภายในสภาพแวดล้อมเสมือนที่สร้างขึ้นนั้นมีฟังก์ชันที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการใช้งานระบบ การเข้าถึงฟังก์ชันนั้นจะคล้ายกับการกดปุ่ม (Button) ในระบบปฏิบัติการ Windows ในงานวิจัยนี้จึง

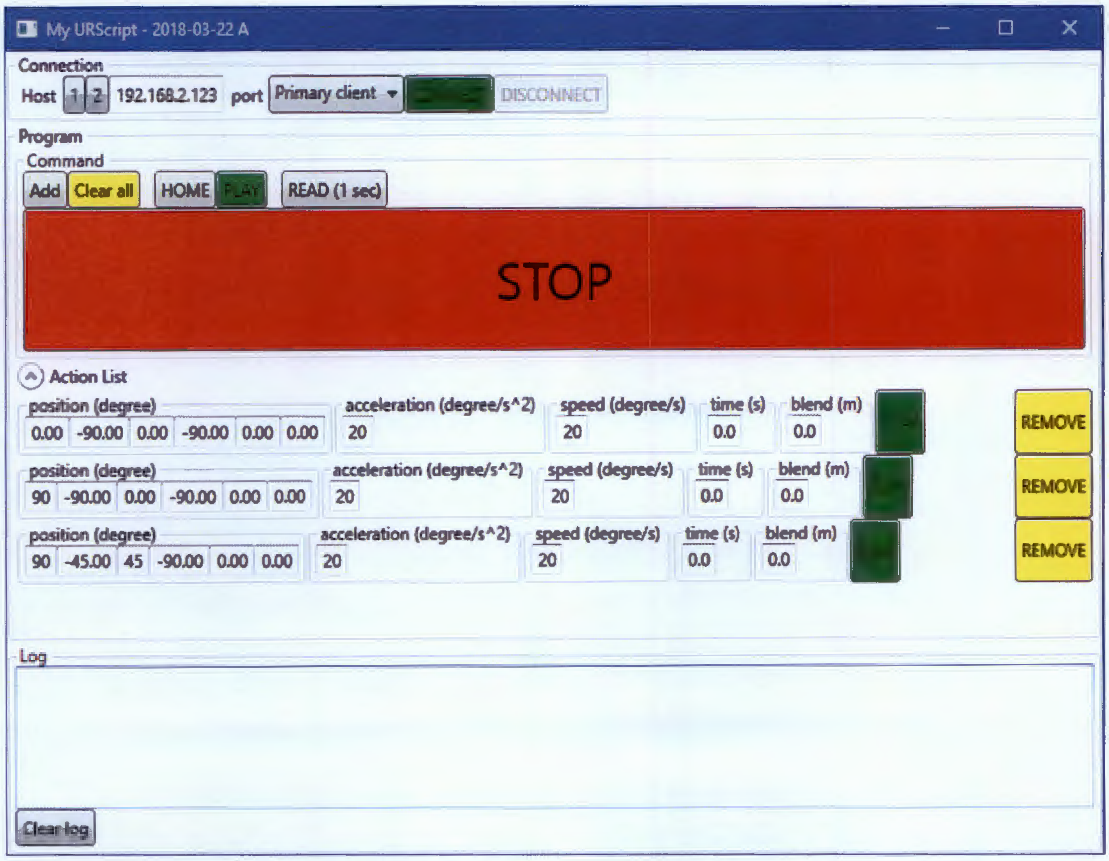
ได้พัฒนาปุ่มที่มีลักษณะการทำงานแบบ Toggle ที่มีรูปร่างลักษณ์คล้ายกับแผงควบคุมพัดลมเพดานที่ใช้การบิดสวิตซ์ สวิตชดังกล่าวได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อเข้าถึงฟังก์ชันหลายอย่าง เช่น การเริ่มจำลองการทำงานของหุ่นยนต์เสมือน สั่งให้หุ่นยนต์เสมือนกลับไปยังตำแหน่ง HOME ส่งคำสั่งเพื่อไปควบคุมหุ่นยนต์จริง ลบล้าง Script Cube ทั้งหมด และคำสั่งเกี่ยวกับการทดลองระบบ เป็นต้น ท่าทาง (Gesture) Tap จะถูกใช้เพื่อเปลี่ยนสถานะ**เปิด** (Active) หรือ**ปิด** (Deactive) ซึ่งส่วนประกอบหนึ่งของสวิตซ์จะเคลื่อนที่และชี้ให้เห็นสถานะการ**เปิด**และ**ปิด**ดังกล่าว และจะมีตัวหนังสือกำกับแสดงชื่อของปุ่มและสถานะ ไว้ดัง**รูปที่ 3.18**

รูปที่ 3.18 General-purpose Switch สำหรับลบ Script Cube ทั้งหมดออกจากระบบ

3.5 การควบคุมหุ่นยนต์

3.5.1 แอปพลิเคชันต้นแบบ

ในงานวิจัยนี้จะมีการเชื่อมต่อกับหุ่นยนต์ UR5 และควบคุมการทำงานด้วย URScript ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาแอปพลิเคชันต้นแบบ เพื่อทดสอบการควบคุมผ่าน Socket ด้วยรูปแบบ Primary/Secondary Interfaces แอปพลิเคชันต้นแบบถูกออกแบบให้ทำงานแบบ GUI มีปุ่มเพื่อกดคำสั่งต่าง ๆ ดัง**รูปที่ 3.19** ทำให้สามารถส่งชุดคำสั่ง URScript เพื่อควบคุมการทำงานหุ่นยนต์ UR5 ได้อย่างต่อเนื่อง โดยแต่ละคำสั่งจะใช้การหน่วงเวลาแล้วจึงส่งคำสั่งถัดไป นอกจากนี้คำสั่งที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 (movej) สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ "t" ซึ่งเป็นการกำหนดเวลาที่ใช้ในการสั่งให้หุ่นยนต์ UR5 เคลื่อนที่ให้สำเร็จด้วยเวลา "t" ที่กำหนด ทำให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ให้มีการเคลื่อนไหวอย่างต่อเนื่องได้อย่างปลอดภัย (ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนไวอย่างกระทันหัน) จากการทำลองใช้งานแอปพลิเคชันต้นแบบทำให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ได้ตามที่ต้องการอย่างถูกต้อง พร้อมที่จะนำไปประยุกต์ใช้กับระบบที่จะสร้างขึ้นด้วย Unity 3D ในขั้นถัดไป



รูปที่ 3.19 แอปพลิเคชันต้นแบบ

3.5.2 ประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันต้นแบบกับสภาพแวดล้อมเสมือน

หลังจากที่การพัฒนาแอปพลิเคชันต้นแบบเสร็จสมบูรณ์แล้ว จึงมีการนำหลักการทำงานของแอปพลิเคชันต้นแบบในข้างต้นมาประยุกต์ใช้กับ Unity 3D การควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ผ่านทาง Socket ด้วยการส่งชุดคำสั่ง URScript จะมีการอ่านชุดคำสั่งภายใน System Core ซึ่งมี Script Manager เป็นส่วนควบคุมชุดคำสั่งดังที่ได้กล่าวไปหัวข้อ 3.4.3 ซึ่งกระบวนดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ฝั่งของ System Core เท่านั้น ผู้ใช้งานสามารถส่งชุดคำสั่งดังกล่าวได้ด้วยการกดปุ่ม General-purpose Switch ซึ่งมีฟังก์ชันที่เกี่ยวกับการควบคุมทั้ง Virtual Robot และหุ่นยนต์ UR5 ดังนี้

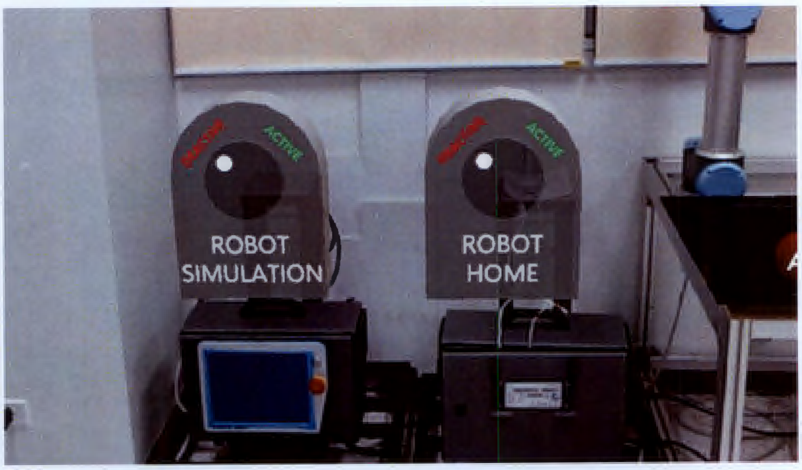
1) ROBOT HOME ดัง**รูปที่ 3.20**

- Active ทำการเคลื่อนที่ Virtual Robot ไปยังตำแหน่ง HOME
- Deactive ยกเลิกการเคลื่อนที่ Virtual Robot ไปยังตำแหน่ง HOME

2) ROBOT SIMULATION ดัง**รูปที่ 3.20**

- Active ทำการจำลองการเคลื่อนที่ Virtual Robot ตามชุดคำสั่งในส่วนของ Script Controller

- Deactive ยกเลิกการจำลองการเคลื่อนที่ Virtual Robot



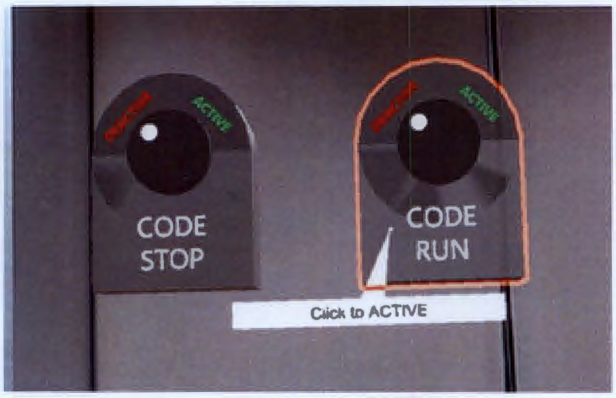
รูปที่ 3.20 General-purpose Switch "ROBOT SIMULATION" (ซ้าย)
และ "ROBOT HOME" (ขวา)

3) CODE RUN ดัง**รูปที่ 3.21**

- Active ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ UR5 ตามชุดคำสั่งในส่วนของ Robot Simulator
- Deactive ยกเลิกการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ UR5

4) CODE STOP ดัง**รูปที่ 3.21**

- Active ทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ UR5 ให้หยุด (stopj [48])
- Deactive ยกเลิกการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ UR5 ให้หยุด



รูปที่ 3.21 General-purpose Switch ชื่อ "CODE STOP" (ซ้าย)
และ "CODE RUN" (ขวา)

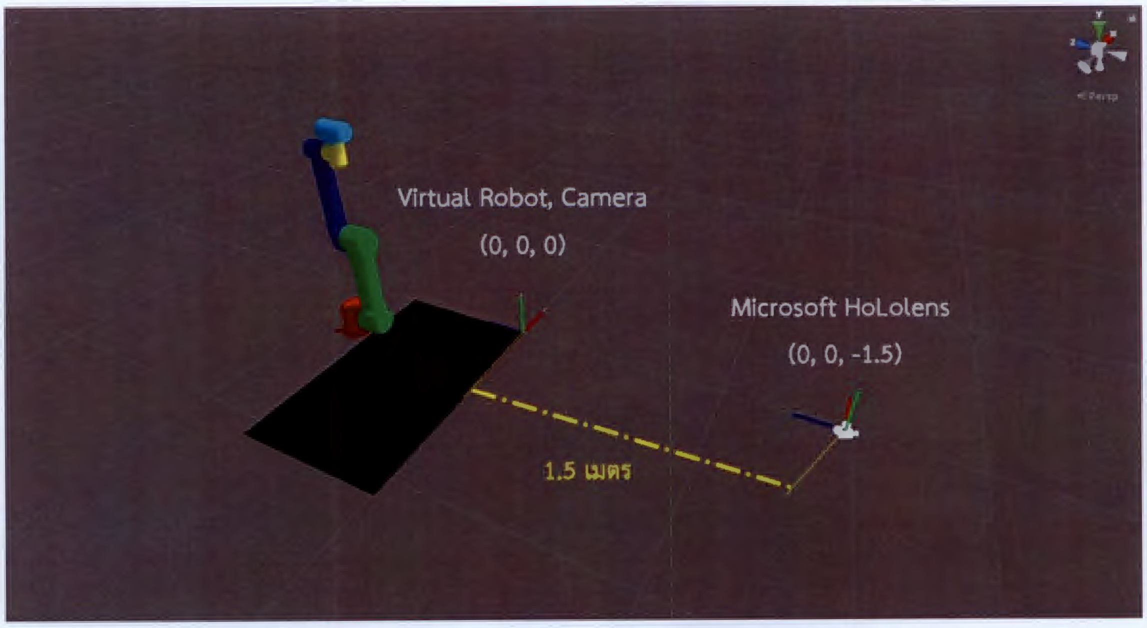
3.6 การปรับตำแหน่งสภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนเข้าด้วยกัน

Unity 3D นั้นรองรับการทำงานของระบบพิกัดฉาก 3 มิติ วัตถุ (Gameobject) ที่อยู่ใน Unity 3D อย่างน้อยจะมีส่วนประกอบอยู่หนึ่งอย่าง คือ Transform Component ซึ่งใช้ในการเก็บและประมวลผลตำแหน่ง (Position : x, y, z) การหมุน (Rotation : x, y, z) และสเกล (Scale : x, y, z) และยังมี Parent ซึ่งเป็นตัวอ้างอิงในการคำนวณตำแหน่ง การหมุน และสเกล Microsoft HoloLens มีความสามารถในการตรวจหาตำแหน่งและการหมุนของตัวอุปกรณ์เองซึ่งสัมพัทธ์กับสะภาพแวดล้อมจริง นอกจากนั้น Unity 3D ยังสามารถอ่านตำแหน่งและหารหมุนของ Microsoft HoloLens เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาปรับข้อมูลตำแหน่งและการหมุนของผู้ใช้งานในระบบภายใต้ระบบพิกัดฉาก 3 มิติของ Unity 3D หรือสภาพแวดล้อมเสมือนได้ [55]

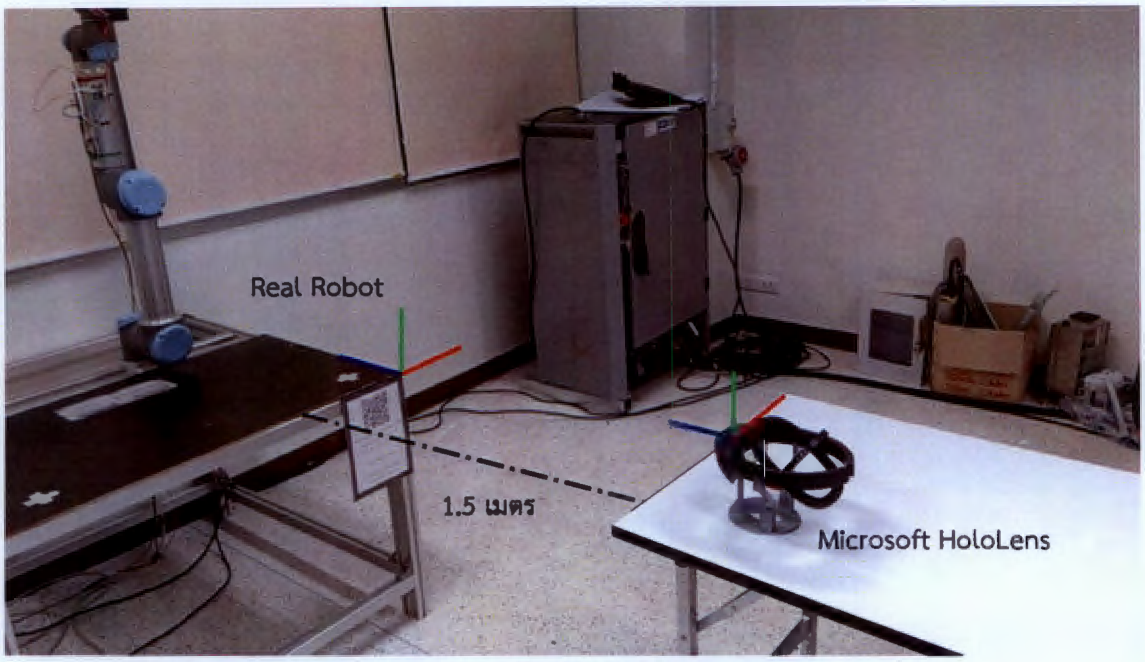
ภายในสภาพแวดล้อมเสมือนที่สร้างขึ้นนี้ผู้ใช้งานระบบหลายคนสามารถเข้าใช้งานสภาพแวดล้อมเสมือนเดียวกันและสถานที่ทำงานเดียวกันได้ ดังนั้น Microsoft HoloLens แต่ละตัวจึงต้องมีการปรับตำแหน่งระบบพิกัดฉาก 3 มิติไปยังระบบพิกัดฉาก 3 มิติของผู้ใช้อื่น ๆ ด้วย สภาพแวดล้อมเสมือนนั้นมีระบบพิกัดฉาก 3 มิติของตนเองซึ่งมีจุดอ้างอิงอยู่ที่ตำแหน่ง (0, 0, 0) ในการปรับตำแหน่งระบบพิกัดฉาก 3 มิติของผู้ใช้หลาย ๆ คนเข้าด้วยกันในงานวิจัยนี้มีทั้งหมดสองวิธีดังนี้

3.6.1 วิธีการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นใช้งาน

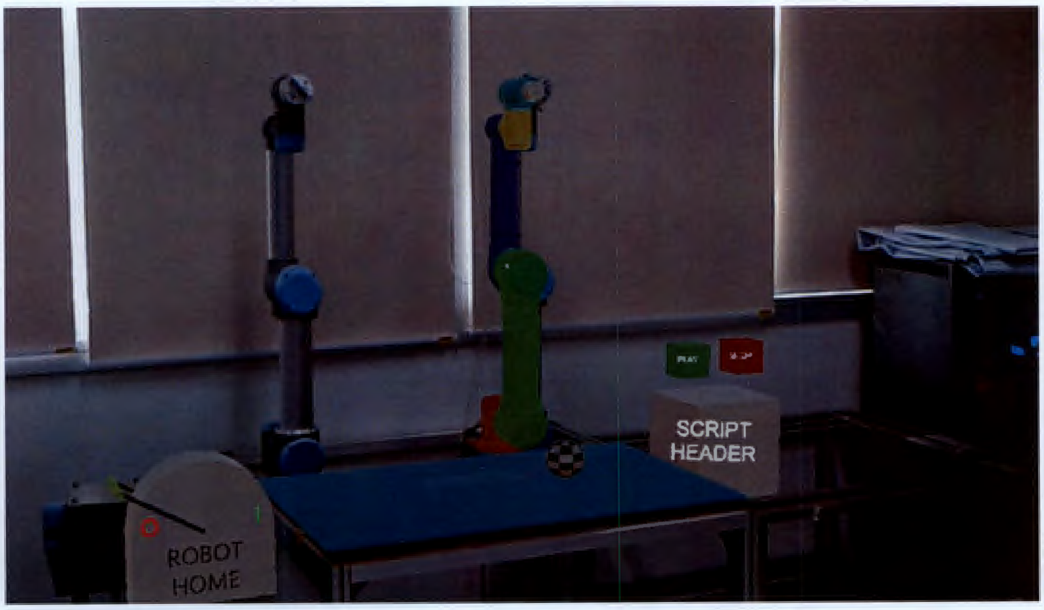
วิธีการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นใช้งานคือการออกแบบตำแหน่งเริ่มต้นของ Microsoft HoloLens และตำแหน่งของ Virtual Robot (เป็นจุดอ้างอิง) ภายในสภาพแวดล้อเสมือนให้อยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับหุ่นยนต์ UR5 ในสภาพแวดล้อมจริงดัง**รูปที่ 3.22** และ**รูปที่ 3.23** การวาง Microsoft HoloLens ไว้ยังท่าทางเดียวกัน (ตำแหน่งและการหมุน) ในระหว่างเริ่มการทำงานของแอปพลิเคชันจะทำให้ระบบพิกัดฉาก 3 มิติของ Microsoft HoloLens ของผู้ใช้แต่ละคนจะมีพิกัดอ้างอิง (Global Coordinate) อยู่จุดเดียวกันและทำให้ผู้ใช้งานทั้งหมดสามารถปฏิสัมพันธ์กับสภาพแวดล้อมเสมือนเดียวกันซึ่งสอดคล้องกับสถานที่เดียวกันดัง**รูปที่ 3.24** ข้อดี คือ เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย ไม่จำปีนต้องเขียนโปรแกรมเพิ่มเติม ข้อเสีย คือ มีความยากลำบากและต้องใช้ความแม่นยำสูงในการกำหนดจุดวาง และเมื่อใช้งานเป็นเวลานานหรือมีการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว Microsoft HoloLens จะเกิดความผิดพลาดสะสมในการอ้างอิงตำแหน่งทำให้ไม่สามารถใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.22 การออกแบบตำแหน่งเริ่มต้นของ Microsoft HoloLens และตำแหน่งของ Virtual Robot



รูปที่ 3.23 กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นในสภาพแวดล้อมจริงให้ตรงกับสภาพแวดล้อมเสมือน



รูปที่ 3.24 ผลการปรับตำแหน่งสภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนด้วยวิธีการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นใช้งาน

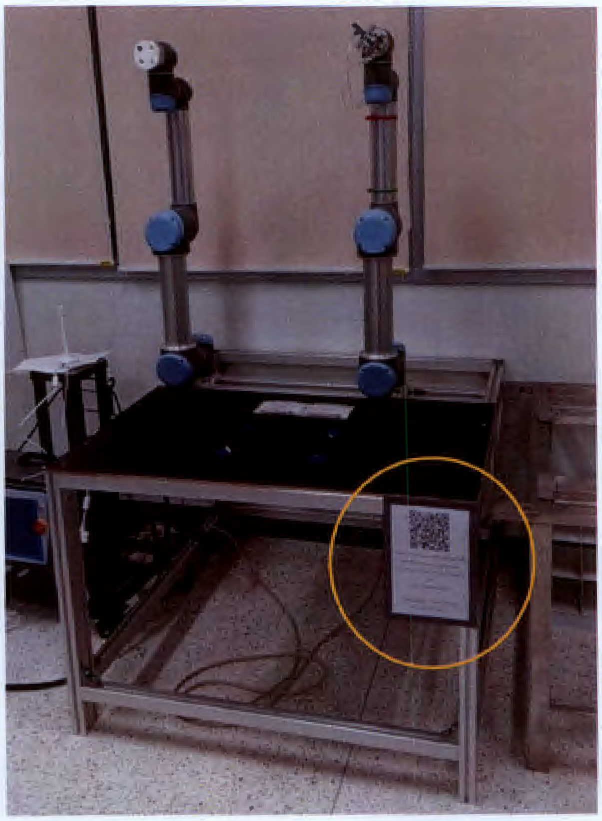
3.6.2 วิธีการตรวจหาตำแหน่งด้วยการประมวลผลภาพ

วิธีการตรวจหาตำแหน่งด้วยการประมวลผลภาพคือการประมวลผลภาพเพื่อหาตำแหน่งของมาร์คเกอร์ (Marker) ซึ่งทำการกำหนดค่าไว้แล้วในขั้นตอนการพัฒนาโปรแกรม นอกจากนี้ยังจำเป็นจะต้องพิมพ์รูปมาร์คเกอร์แล้วนำไปติดตั้งในสถานที่ใช้งานจริงซึ่งใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงคล้ายกับวิธีในข้างต้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้รูปที่มีขนาดเท่ากับกระดาษ A4 ดัง**รูปที่ 3.25** การประมวลผลภาพดังกล่าวภายใน Unity 3D จะทำให้ได้ตำแหน่งของมาร์คเกอร์ (marker) ที่อ้างอิงกับตำแหน่งกับกล้องของ Microsoft HoloLens (ใน Unity 3D คือ camera ดัง**รูปที่ 3.22**) จากนั้นทำการหาระยะห่างดังสมการที่ 3.1 เมื่อได้ระยะห่างของมาร์คเกอร์ (สภาพแวดล้อมจริง) แล้วก็จะนำตำแหน่งดังกล่าวมาเทียบตำแหน่งมาร์คเกอร์ (สภาพแวดล้อมเสมือน) เพื่อหาระยะที่คลาดเคลื่อน (error) จากตำแหน่งที่กำหนดไว้ (setpoint ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง 0, 0, 0 ดัง**รูปที่ 3.22**) ดังสมการที่ 3.2 สุดท้ายเมื่อมีระยะที่คลาดเคลื่อนจะทำการปรับตำแหน่งของผู้ใช้งานในสภาพแวดล้อมเสมือน (user) ให้สอดคล้องกับตำแหน่งที่ผู้ใช้งานในสภาพแวดล้อมจริงดังสมการที่ 3.3 ดังนั้นผู้ใช้งานทั้งหมดจึงสามารถปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมร่วมกันได้โดยที่มีตำแหน่งอ้างอิงเดียวกัน (มาร์คเกอร์) การประมวลผลภาพดังกล่าวจะใช้ Vuforia Engine

$$\text{pos} = \text{marker} - \text{camera} \tag{3.1}$$

$$\text{error} = \text{setpoint} - (\text{pos} + \text{user}) \tag{3.2}$$

$$\text{user} = \text{user} + \text{error} \tag{3.3}$$



รูปที่ 3.25 รูปการติดตั้งมาร์คเกอร์เพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิง

ข้อดีของการตรวจหาตำแหน่งด้วยการประมวลผลภาพ คือ มีความแม่นยำสูงและสะดวกในการใช้งานกว่าการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นใช้งานในหัวข้อที่ 3.6.1 ในระหว่างการใช้งานเป็นเวลานานวิธีการแบบนี้ยังสามารถตรวจหาตำแหน่งเพื่อปรับตำแหน่งสภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนเข้าด้วยกันใหม่ได้อีกด้วย

(a) (b)

รูปที่ 3.26 มุมมองของผู้ใช้งาน (a) ก่อนและ (b) หลังการปรับตำแหน่งสภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนจากวิธีการตรวจหาตำแหน่งด้วยการประมวลผลภาพ

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

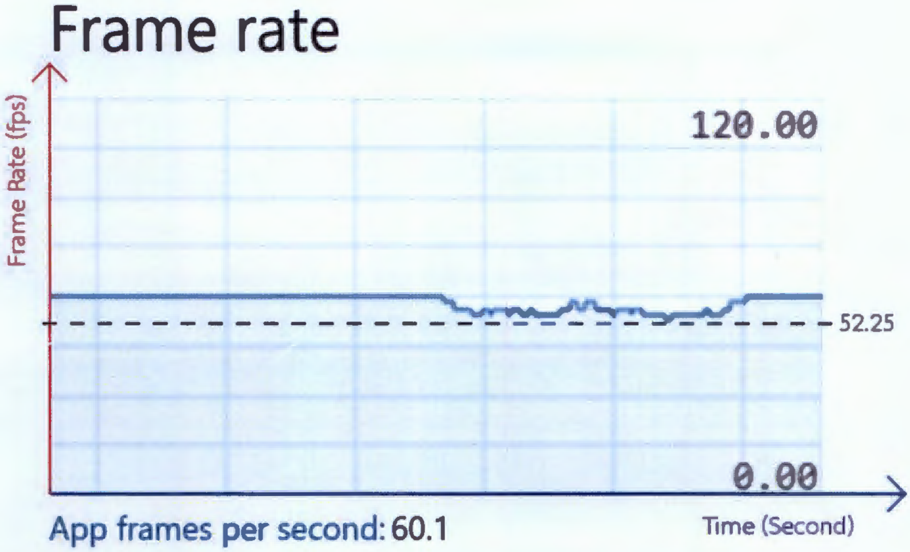
ในการประเมินผลประสิทธิภาพและความสามารถในการใช้งานของงานวิจัยชิ้นนี้จึงมีการจัดการทดลองวัด Frame Rate ขึ้นเพื่อประเมินผลประสิทธิภาพการแสดงผลและปริมาณข้อมูลในเครือข่าย (Data Transfer Rate) ของการสื่อสารระหว่าง Server กับ Client ขณะใช้งานระบบ การประเมินผลความสามารถในการใช้งานระบบของผู้ใช้งานด้วยการวัดเวลาที่ผู้ใช้งานใช้ในการเรียนรู้และแก้ปัญหาตามโจทย์ที่กำหนด โดย**ผู้ร่วมการทดลอง**อยู่ในบทบาทของ**ผู้รับการฝึกอบรม**และมี**ผู้วิจัยเป็นผู้ให้การฝึกอบรม**การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น ส่วนสุดท้ายหลังจากใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้นเสร็จแล้วเป็นการวัดความสะดวกในการใช้งาน (Ease of Use) ความสะดวกในการเรียนรู้ (Ease of Learning) และความพึงพอใจ (Satisfaction) โดยการทำแบบสอบถาม USE Questionnaire [56] รวมถึงการสอบถามเกี่ยวกับคุณค่าเฉพาะทาง (Value for Specific Task) และข้อเสนอแนะหลังจากใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้น ตัวเลือกในแบบสอบถามดังกล่าวใช้ Likert Scale [57, 58] เป็นตัวกำหนดระดับของตัวเลือกในแบบสอบถาม

4.1 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

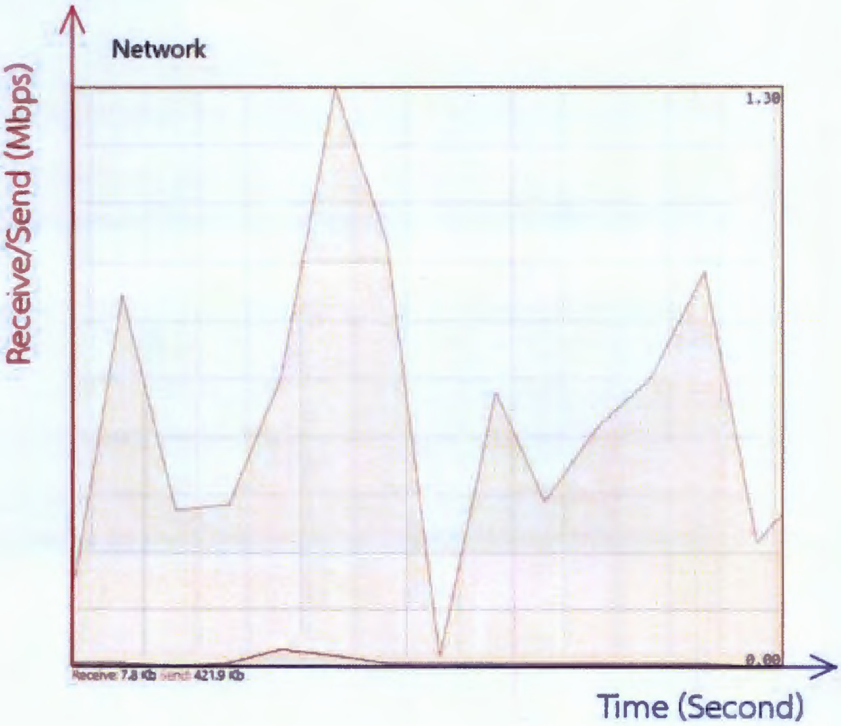
ในการแสดงผลโฮโลแกรมให้ผู้ใช้งานรู้สึกเสมือนว่ามีวัตถุเสมือนอยู่ในโลกจริงนั้น ตัวอุปกรณ์ Microsoft HoloLens จำเป็นที่จะต้องมี**การให้แสงและเงา** (Rendering) ภาพโฮโลแกรมที่มีความเร็วสูง โดยปกติแล้วการให้แสงและเงาของ Microsoft HoloLens สำหรับผู้ใช้งานอุปกรณ์ที่ได้รับประสิทธิภาพดีที่สุดจำเป็นจะต้องมีความเร็ว 60 FPS [59] การทำงานร่วมกันผ่านระบบเครือข่ายจะมีการสื่อสารข้อมูลระหว่างอุปกรณ์หลายตัวร่วมกันระหว่าง Server และ Client การเพิ่มจำนวนของอุปกรณ์จึงมีผลกระทบโดยตรงต่อ**ปริมาณข้อมูล** (Data Transfer Rate) ในเครือข่ายของระบบที่พัฒนาขึ้นดัง**รูปที่ 3.4**

การใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้นจำเป็นต้องมีการสร้าง Script Cube ซึ่งถูกสร้างโดย Script Generator ซึ่งจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นไม่แน่นอนและอุปกรณ์ยังใช้การสื่อสารผ่านระบบแลนไร้สายเป็นหลัก (Wireless Local Area Network) การทำงานดังกล่าวจะมีการใช้งานทรัพยากรของเครื่องคอมพิวเตอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงได้มีการจัดการทดลองเพื่อวัด **Frame Rate** และ**ปริมาณข้อมูลในเครือข่าย**ระหว่างการใช้งานระบบเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ในระยะเวลาประมาณ 30 นาที โดยค่าดังกล่าวจะถูกวัดผ่าน Windows Device Portal ที่เข้าถึงทาง Browser [60] ด้วยการบันทึกภาพระหว่างการใช้งานดัง**รูปที่ 4.1** และ**รูปที่ 4.2** ความคาดหวังของการทดลองคือวัดค่า Frame Rate ได้น้อยกว่า 24 FPS [61] และการวัดปริมาณข้อมูลในเครือข่ายของ Client ทั้งหมด

รวมกันต้องไม่เกินความสามารถสูงของ Server ที่ใช้อุปกรณ์ EDIMAX BR-6288ACL ย้ายความถี่ 5GHz ที่สามารถรับ-ส่งข้อมูลได้สูงสุด 433 Mbps [62] การบันทึกข้อมูลดังกล่าวจะทำการบันทึกทุก ๆ 2 นาที โดยปริมาณข้อมูลในเครือข่าย (รับ-ส่ง) จะเลือกบันทึกค่าสูงสุดของช่วงเวลานั้น (ประมาณ 10 วินาที) ดัง**ตารางที่ 4.1**



รูปที่ 4.1 ค่า Frame Rate ที่วัดได้ต่ำสุดคือ 52.25 fps



รูปที่ 4.2 ปริมาณข้อมูลในเครือข่ายที่วัดได้สูงสุดคือ 1.3 Mbps

ตารางที่ 4.1 ผลของ Frame Rate และข้อมูลในเครือข่าย

เวลาที่บันทึกข้อมูล (นาที)	**Frame Rate (fps)**	**ปริมาณข้อมูลในเครือข่ายสูงสุด (Mbps)**
0	60	1.3
2	60	0.81
4	60.1	0.75
6	60.1	0.84
8	60	1.3
10	60	0.81
12	60.1	0.97
14	60	0.85
16	60	0.86
18	60	0.8
20	60.1	0.86
22	60	0.92
24	60.1	0.92
26	60	1.05
28	58.2	0.8
30	60.1	1.03
32	60.1	1.21
34	52.25	1.12
เฉลี่ย	**59.51**	**0.96**

4.2 ความสามารถในการใช้งานระบบ

ในการทดลองนี้จะมีการทดลองเพื่อวัดความสามารถของผู้ใช้งานในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยท่าทางและความสามารถของผู้ใช้งานในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 โดยมีสมมุติฐานดังนี้

1) ระยะเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อย้ายตำแหน่งวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนดมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมตามโจทย์ที่กำหนดเป็นไปใน *ทิศทางเดียวกัน* กล่าวคือผู้ใช้งานมีความสามารถในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยท่าทางในระดับที่สูงขึ้นจะมีความสามารถในการใช้งานระบบเพื่อควบคุมหุ่นยนต์สูงขึ้นเช่นกัน
2) สัดส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิสัมพันธ์ของผู้วิจัยต่อผู้ร่วมการทดลองมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อย้ายตำแหน่งวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนดเป็นไปใน*ทิศทางตรงกันข้าม* กล่าวคือการทำงานร่วมกันด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้การควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อแก้ปัญหาใช้ระยะเวลาน้อยลง

4.2.1 ความสามารถของผู้ใช้งานในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยท่าทาง

การใช้งานระบบจะมีการปฏิสัมพันธ์ด้วยท่าทาง (Gesture) **Tap** และ **Tap and Hold** กับโฮโลแกรมระหว่างผู้ใช้งานเป็นหลัก ดังนั้นจึงได้มีการจัดการทดลองเพื่อประเมินผลความสามารถในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับโฮโลแกรมด้วยท่าทางดังกล่าว โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ช่วง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

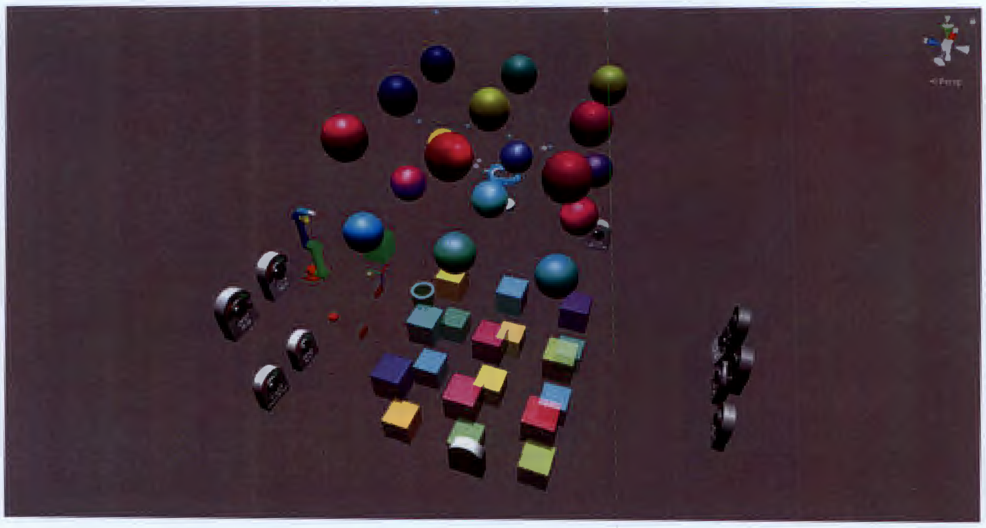
1) ผู้ร่วมการทดลองรับการฝึกการใช้งาน Microsoft HoloLens ด้วยท่าทางจากผู้วิจัย

   - ผู้วิจัยและผู้ร่วมการทดลองสวมใส่ Microsoft HoloLens และยืนอยู่ใน (4) พื้นที่ปฏิบัติการดัง **รูปที่ 3.10**
   - ผู้วิจัยกล่าวเกี่ยวกับคุณสมบัติและการทำงานของ Microsoft HoloLens
   - ผู้วิจัยสาธิตการใช้งานท่าทาง (Gesture) เพื่อปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นโดยใช้โฮโลแกรม General-purpose Switch เป็นตัวอย่างในการสาธิตดัง**รูปที่ 4.3**
   - ผู้เข้าร่วมการทดลองฝึกการใช้ท่าทาง (Gesture) เพื่อปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมในข้างต้นโดยมีผู้วิจัยคอยให้ความช่วยเหลือ ผู้ร่วมการทดลองจะฝึกการใช้ท่าทางจนกว่าผู้ร่วมการทดลองจะบอกว่าพร้อมเพื่อเข้าสู่ช่วงถัดไป

รูปที่ 4.3 โฮโลแกรมที่ใช้ในการสาธิตการปฏิสัมพันธ์

2) การวัดความสามารถในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยท่าทาง

- ผู้วิจัยทำการแสดงโจทย์ซึ่งจะเป็นโฮโลแกรมที่มีรูปร่าง 2 แบบคือทรงกลมและลูกบาศก์ โดยที่โฮโลแกรมรูปร่างเดียวกันจะมีระยะห่างกัน 75 เซนติเมตร และจะอยู่ใน (4) พื้นที่ปฏิบัติการดัง **รูปที่ 3.10**
- โฮโลแกรมลูกบาษก์อยู่ที่พื้นเรียงกัน 3 x 3 ทั้งหมด 2 ชั้น และโฮโลแกรมทรงกลมจะอยู่ด้านบนเรียงกัน 3 x 3 ทั้งหมด 2 ชั้น ดัง**รูปที่ 4.4**
- ผู้ร่วมการทดลองจะต้องใช้ท่าทาง Tap ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมทรงกลมให้ครบทั้งหมด จากนั้นโฮโลแกรมดังกล่าวจะแตกกระจายและหายไป
- ผู้ร่วมการทดลองจะต้องใช้ท่าทาง Tap and Hold ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมลูกบาศก์ลากไปที่ Recycle Bin ให้ครบทั้งหมด จากนั้นโฮโลแกรมดังกล่าวจะแตกกระจายและหายไป
- เมื่อโฮโลแกรมในข้างต้นหายไปหมดแล้วจะถือเป็นการสิ้นสุดการทดลองนี้



รูปที่ 4.4 มุมมองของ Server ระหว่างการวัดความสามารถในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยท่าทาง

โดยกิจกรรมต่าง ๆ ระหว่างใช้งานระบบในข้างต้น ระบบจะทำการบันทึกค่าเก็บไว้ในฝั่งของ Server ได้แก่ ระยะทางที่ผู้ใช้งานเคลื่อนที่ ระยะเวลาและจำนวนครั้งที่ผู้ใช้งานใช้ท่าทางปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม และเวลาทั้งหมดที่ใช้งานระบบ โดยกิจกรรมในช่วงที่ 1 จะมีผลดัง**ตารางที่ 4.2** และกิจกรรมช่วงที่ 2 จะมีผลดัง**ตารางที่ 4.3**

ตารางที่ 4.2 ผลการฝึกการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (n = 12)

ผู้เข้าร่วมการทดลอง	ผู้วิจัย			ผู้ร่วมการทดลอง			ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ทำกิจกรรม (วินาที)
	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	
A	16.09	8.36	16	8.37	7.11	5	150.86
B	14.80	4.78	17	5.92	20.66	20	157.98
C	17.47	9.63	10	6.76	33.83	30	188.68
D	55.75	27.75	27	35.85	215.12	136	731.82
E	40.68	17.01	40	13.96	86.60	40	359.94
F	30.55	39.57	21	13.48	71.19	30	341.60
G	27.09	14.67	19	6.77	32.75	12	221.40
H	31.81	14.45	23	5.74	62.93	58	329.76
I	32.57	32.22	40	27.18	46.66	31	423.71
J	44.31	20.41	34	30.27	132.31	53	544.24
K	31.68	31.21	24	11.59	99.91	56	332.67
L	35.37	19.97	30	11.01	48.95	35	345.71
ระยะเฉลี่ยเวลาที่ใช้การฝึกการใช้งาน Microsoft HoloLens ด้วยท่าทางจากผู้วิจัย							344.03

ตารางที่ 4.3 ผลการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมตามโจทย์ที่กำหนด (n = 12)

ผู้เข้าร่วมการทดลอง	**ผู้ร่วมการทดลอง**			**ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ทำกิจกรรม (วินาที)**
	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	**เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)**	**จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)**	
A	32.73	57.84	47	214.74
B	14.39	49.54	39	117.87
C	14.03	65.89	50	151.44
D	25.96	93.48	41	268.65
E	6.40	40.57	43	98.09
F	16.27	50.14	44	146.52
G	24.45	66.48	44	180.07
H	24.95	54.07	47	126.79
I	46.28	81.09	56	321.44
J	18.72	72.91	65	208.62
K	22.50	72.71	53	181.34
L	33.83	47.32	42	229.67
ระยะเวลาเฉลี่ยการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยท่าทาง				187.10

4.2.2 ความสามารถของผู้ใช้งานในการใช้งานระบบเพื่อควบคุมหุ่นยนต์

การฝึกการควบคุมหุ่นยนต์เป็นการฝึกร่วมกันระหว่างผู้ใช้งานหลายคน โดยมีผู้วิจัยเป็นผู้ถ่ายทอดความรู้ไปยังผู้ร่วมการทดลองด้วยการใช้โฮโลแกรม การฝึกควบคุมหุ่นยนต์เกิดขึ้นในสถานที่จริงซึ่งหุ่นยนต์ UR5 จะถูกควบคุมการทำงานสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานของ Virtual Robot ผู้ใช้งานจึงต้องมีความเข้าใจการทำงานและการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ UR5 การทดลองนี้จึงได้มีการจัดการทดลองเพื่อประเมินผลการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ช่วง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

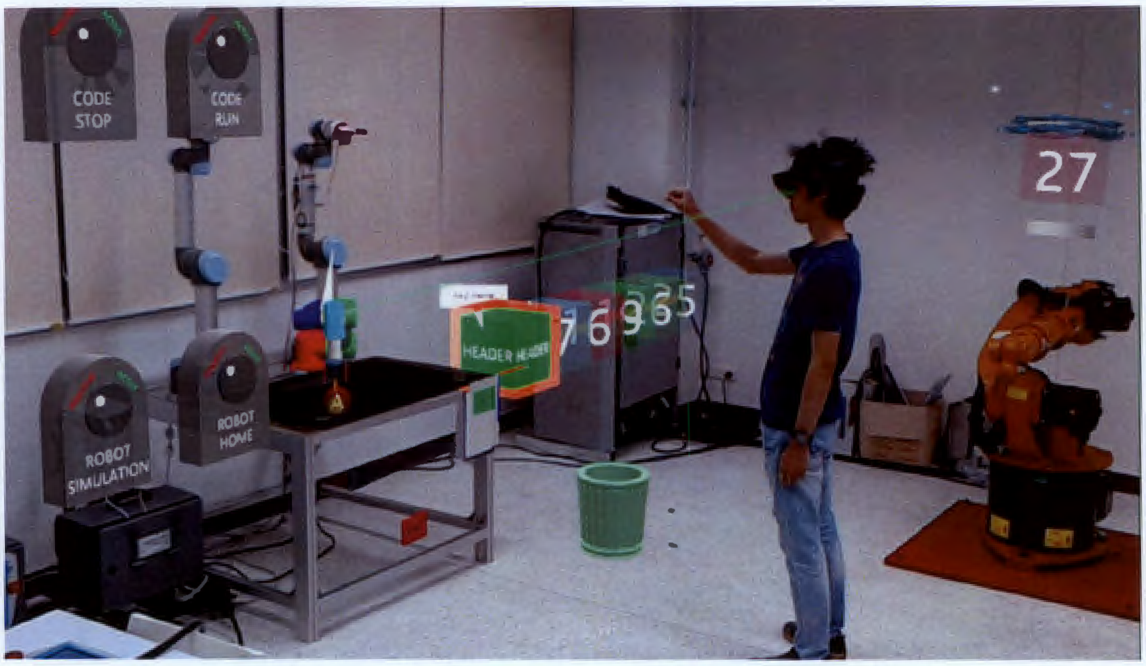
1) ผู้ร่วมการทดลองรับการฝึกการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ผ่าน Virtual Robot ด้วยท่าทางจากผู้วิจัย

– ผู้วิจัยและผู้ร่วมการทดลองยืนอยู่ใน (4) พื้นที่ปฏิบัติการดัง**รูปที่ 3.10**

- ผู้วิจัยกล่าวเกี่ยวกับคุณสมบัติและการทำงานของ Universal Robot 5 โดยอ้างอิงเนื้อหาจาก Universal Robot Academy ได้แก่

    - First Look: Feature and Terminology
    - How The Robot Works
    - Setting Up a Tool
    - Creating a Program
    - Feature Coordinate
    - Program Flow

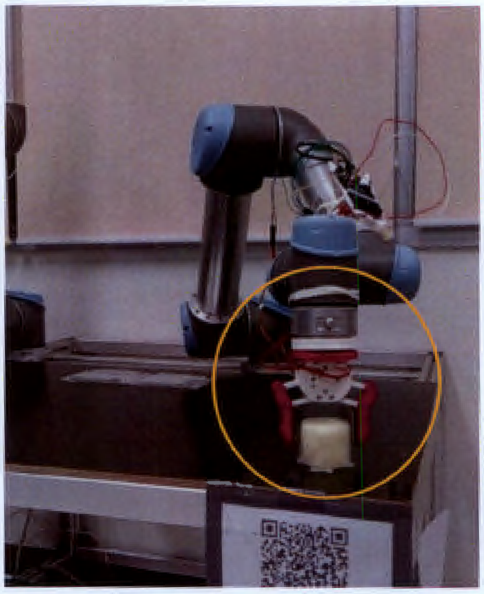
- ผู้วิจัยสาธิตการใช้งานท่าทาง (Gesture) เพื่อควบคุม Virtual Robot ด้วยเนื้อหาในข้างต้นด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น รวมถึงการจำลองการทำงานของ Virtual Robot ก่อนที่จะส่งคำสั่งเพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ UR5 ดัง**รูปที่ 4.5**
- ผู้เข้าร่วมการทดลองฝึกการใช้ท่าทาง (Gesture) เพื่อควบคุม Virtual Robot ในข้างต้น โดยมีผู้วิจัยคอยให้ความช่วยเหลือ ผู้ร่วมการทดลองจะฝึกการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 จนกว่าผู้เข้าร่วมการทดลองจะบอกว่าพร้อมเพื่อเข้าสู่ช่วงถัดไป



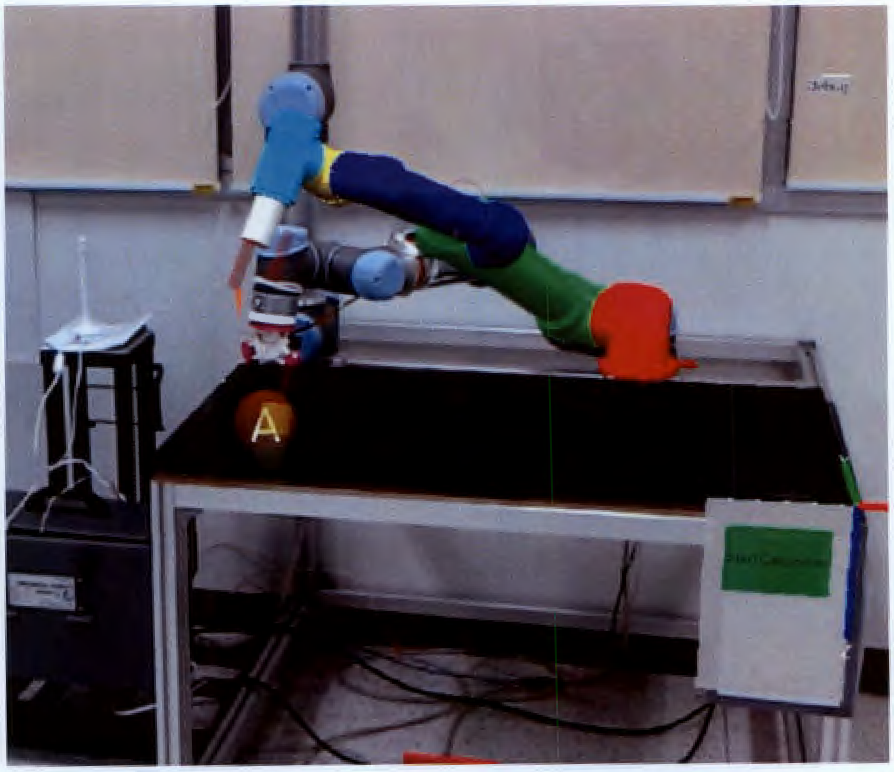
รูปที่ 4.5 มุมมองของผู้วิจัยระหว่างที่ผู้ร่วมการทดลองฝึกควบคุม Virtual Robot

2) การวัดความสามารถในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ด้วยท่าทาง

- ผู้วิจัยทำการแสดงโจทย์ซึ่งจะมีโฮโลแกรมที่เป็นวัตถุเสมือนทรงกระบอกสีเหลืองที่มีความสูง 5 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร และมีจุดสีแดงทรงกลมที่มีเส้นผ่านศูนยกลาง 5 เซนติเมตร มีตัวอักษร “A” อยู่ตรงกลางดัง**รูปที่ 4.6**
- ผู้ร่วมการทดลองจะต้องควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ซึ่งมี Gripper เพื่อหยิบวัตถุจริง (ฟองน้ำ) มีลักษณะเหมือนวัตถุเสมือนจากจุดเริ่มต้นไปยังจุด A ที่กำหนด
- ผู้ร่วมการทดลองจะต้องใช้ท่าทางควบคุม Virtual Robot หยิบวัตถุเสมือนจากจุดเริ่มต้นไปยังจุด A ซึ่งสอดคล้องกับการทำงานของหุ่นยนต์ UR5 ที่กำหนดในข้างต้น โดยมีผู้วิจัยคอยให้ความช่วยเหลือดัง**รูปที่ 4.7**
- เมื่อผลการจำลองการทำงานของ Virtual Robot สามารถหยิบวัตถุเสมือนไปยังตำแหน่งที่กำหนดสำเร็จ จากนั้นผู้ร่วมการทดลองจะควบคุมให้หุ่นยนต์ UR5 หยิบวัตถุจริงซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองการทำงานของ Virtual Robot
- เมื่อหุ่นยนต์ UR5 สามารถหยิบวัตถุจริงมายังตำแหน่งที่กำหนดได้แล้วจะถือเป็นการสิ้นสุดการทดลองนี้



รูปที่ 4.6 Gripper ติดตั้งที่หุ่นยนต์และวัตถุ (ฟองน้ำ)



รูปที่ 4.7 การควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ด้วยโฮโลแกรมเพื่อหยิบวัตถุ (ฟองน้ำ) ไปยังจุด A

โดยกิจกรรมต่าง ๆ ระหว่างใช้งานระบบในข้างต้น ระบบจะทำการบันทึกค่าเก็บไว้ในฝั่งของ Server ได้แก่ ระยะทางที่ผู้ใช้งานเคลื่อนที่ ระยะเวลาและจำนวนครั้งที่ผู้ใช้งานใช้ท่าทางปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม และเวลาทั้งหมดที่ใช้งานระบบ โดยกิจกรรมในช่วงที่ 1 จะมีผลดัง**ตารางที่ 4.4** และกิจกรรมช่วงที่ 2 จะมีผลดัง**ตารางที่ 4.5**

ตารางที่ 4.4 ผลการฝึกการควบคุมหุ่นยนต์ UR5

ผู้เข้าร่วมการทดลอง	ผู้วิจัย			ผู้ร่วมการทดลอง			ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ทำกิจกรรม (วินาที)
	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	
A	59.28	22.70	27	11.27	35.57	16	552.64
B	69.89	43.23	52	22.64	37.49	24	755.18
C	116.76	83.99	63	56.60	208.98	52	1438.86
D	75.03	96.92	58	39.75	115.47	49	1342.36
E	112.92	117.03	109	33.92	114.58	57	1465.60

ตารางที่ 4.4 ผลการฝึกการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 (ต่อ)

ผู้เข้าร่วมการทดลอง	ผู้วิจัย			ผู้ร่วมการทดลอง			ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ทำกิจกรรม (วินาที)
	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	
F	46.29	19.11	16	30.30	83.48	37	1180.90
G	87.09	131.38	132	33.50	176.18	96	1795.95
H	110.42	42.30	45	25.51	61.89	33	1165.22
I	81.51	68.61	56	89.27	152.31	58	1351.58
J	138.41	105.47	49	68.98	107.72	55	1486.71
K	101.25	106.28	53	46.16	168.81	58	1575.90
L	158.66	67.31	43	97.45	224.70	69	1633.31
ระยะเวลาเฉลี่ยการฝึกการใช้งาน Virtual Robot ด้วยท่าทาง							1312.02

ตารางที่ 4.5 ผลการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อย้ายตำแหน่งวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนด (n = 12)

ผู้เข้าร่วมการทดลอง	ผู้วิจัย			ผู้ร่วมการทดลอง			ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ทำกิจกรรม (วินาที)
	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	
A	187.88	144.90	144	138.24	491.99	264	3002.86
B	88.72	71.51	61	43.95	236.88	113	950.87
C	149.45	40.68	54	97.27	241.57	89	1276.44
D	131.30	50.25	50	37.33	289.84	93	1386.97
E	153.57	95.13	66	64.65	281.86	151	1404.95
F	129.19	61.18	20	93.07	217.87	63	1118.09
G	70.94	57.88	45	39.37	227.94	95	1135.60
H	153.89	41.64	49	27.02	80.14	48	1013.49

ตารางที่ 4.5 ผลการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อย้ายตำแหน่งวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนด (n = 12) (ต่อ)

ผู้เข้าร่วมการทดลอง	ผู้วิจัย			ผู้ร่วมการทดลอง			ระยะเวลาทั้งหมดที่ใช้ทำกิจกรรม (วินาที)
	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	ระยะทางการเคลื่อนที่ (เมตร)	เวลาที่ปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (วินาที)	จำนวนการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรม (ครั้ง)	
I	106.58	41.51	22	143.89	254.28	102	1217.59
J	202.54	91.98	53	135.02	406.21	182	2229.12
K	150.66	111.05	60	76.25	311.62	98	2124.12
L	185.02	56.41	56	115.90	500.93	126	1873.55
ระยะเวลาเฉลี่ยการควบคุม UR5 เพื่อหยิบชิ้นงานไปยังตำแหน่งที่กำหนด							1561.14

4.3 ผลจากการตอบแบบสอบถามของผู้ร่วมการทดลองทั้งหมด 12 คน

ผลจากแบบสอบถาม USE Questionnaire [56] จะมีตัวเลือก 5 ตัวเลือก โดยใช้ Likert Scale [57, 58] ได้แก่ Strongly Disagree, Disagree, Neutral, Agree, และ Strongly Agree จากตัวเลือกดังกล่าวสามารถแปลข้อมูลเชิงคุณภาพเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ (คะแนน) ที่สอดคล้องกับตัวเลือกในข้างต้น ได้แก่ 1 2 3 4 และ 5 ซึ่งสามารถนำคะแนนในแต่ละชุดคำถามสาหาค่าเฉลี่ยของข้อนั้น ๆ ได้ นอกจากนี้หาค่าเฉลีย ของหมวดหมู่คำถามนั้นได้อีกด้วย แบบสอบถามดังกล่าวมีผลดัง**ตารางที่ 4.6 ตารางที่ 4.7 ตารางที่ 4.8** และ**ตารางที่ 4.9**

ตารางที่ 4.6 คะแนนเฉลี่ยของความสะดวกในการใช้งาน (Ease of Use) (n = 12)

คำถามในแบบสอบถาม	คะแนนเฉลี่ย
It is simple to use.	3.67
It requires the fewest steps possible to accomplish what I want to do with it.	3.83
It is flexible.	3.75
I can use it without written instructions.	3.75
I can recover from mistakes quickly and easily.	4.25
I can use it successfully every time.	3.75
เฉลี่ย	3.83

ตารางที่ 4.7 คะแนนเฉลี่ยของความสะดวกในการเรียนรู้ (Ease of Learning) (n = 12)

คำถามในแบบสอบถาม	คะแนนเฉลี่ย
I learned to use it quickly.	4.08
I easily remember how to use it.	4.08
It is easy to learn to use it.	4.25
I quickly became skillful with it.	4.08
คะแนนเฉลี่ย	4.13

ตารางที่ 4.8 คะแนนเฉลี่ยของความพึงพอใจ (Satisfaction) (n = 12)

คำถามในแบบสอบถาม	คะแนนเฉลี่ย
I am satisfied with it.	4.17
I would recommend it to a friend.	4.17
It is fun to use.	4.42

ตารางที่ 4.8 คะแนนเฉลี่ยของความพึงพอใจ (Satisfaction) (n = 12) (ต่อ)

คำถามในแบบสอบถาม	คะแนนเฉลี่ย
It works the way I want it to work.	3.92
It is wonderful.	4.00
I feel I need to have it.	3.92
คะแนนเฉลี่ย	4.10

ตารางที่ 4.9 คะแนนเฉลี่ยของคุณค่าเฉพาะทาง (Value for Specific Task) (n = 12)

คำถามในแบบสอบถาม	คะแนนเฉลี่ย
การใช้โฮโลแกรมแสดงข้อมูลต่าง ๆ ในระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยให้การทำงานร่วมกันมีความสะดวก	4.33
การจำลองการทำงานของหุ่นยนต์เสมือน (โฮโลแกรม) ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นช่วยเพิ่มความมั่นใจก่อนการสั่งให้หุ่นยนต์จริงทำงาน	4.50
การใช้โฮโลแกรมจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ (UR5) ในสถานที่จริง (โฮโลแกรมหุ่นยนต์เสมือนซ้อนทับกับหุ่นยนต์จริง) ช่วยให้เข้าใจการทำงานของหุ่นยต์มากขึ้น	4.25
คะแนนเฉลี่ย	4.36

ข้อเสนอแนะด้าน User Interface

1) ควรมีเมนูตลอดเวลาที่ผู้ใช้หันซ้ายขวามากกว่าที่จะต้องไปหาตัวที่เป็น General-purpose Switch
2) ทำออกมาให้สามารถเข้าใจและใช้ง่าย ไม่ยุ่งยาก มีความเรียบง่าย
3) สีของกล่องที่แสดงถึงลำดับขั้นตอนในการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งเดียวของแขนกล น่าจะมีสีเดียวกันกับตำแหน่งของแขน เช่น Base สีแดงเคลื่อนที่อย่างเดียว กล่องที่แสดงถึงลำดับการเคลื่อนที่ก็น่าจะเป็นสีเดียวกัน แต่ถ้ามีการผสมการเคลื่อนที่ของแขนในแต่ละ Link จะเป็นสีอื่นนอกจากสีที่แสดงในแขนกล
4) ถ้าเพิ่มเมนูภาษาไทยสั้น ๆ แบบเข้าใจง่ายกำกับลงไปด้วยน่าจะใช้งานง่ายกว่านี้สำหรับผู้ที่ไม่เข้าใจคำสั่งด้านโปรแกรมเลยหรือผู้ใช้งานทั่วไป
5) Script Generator เป็นที่เขียนโค้ดน่ารักมาก

ข้อเสนอแนะด้านการใช้งานระบบ

1) อยากให้การเชื่อมต่อ Block ของโค้ดแต่ละตัวเป็นไปได้ง่ายมากกว่านี้
2) คิดว่าใส่ถุงมือที่มีเซนเซอร์จะเพิ่มความเสถียรมากกว่า การใช้นิ้วบนอากาศ
3) การลากวัตถุไม่ค่อยติดบ่อย ๆ
4) การต่อ Block (Script Cube) ยังค่อนข้างยาก
5) อุปกรณ์ Microsoft HoloLens ค่อนข้างมีหนักหนักเกินไปในการใช้งาน
6) ระบบเรียบง่ายใช้งานได้จริงตามการใช้งาน
7) น่าจะมีการใช้เสียง (Sound Effect) มาช่วยทำให้ดูน่าตื่นเต้น
8) เข้าใจได้ง่าย ทำให้เห็นภาพสำหรับคนไม่เคยได้เรียนรู้เกี่ยวกับแขนกล
9) อาจต้องใช้เวลาทำความคุ้นชินกับการบังคับสักพักนึง แต่เมื่อคุ้นชินแล้วก็สนุกดีค่ะ ทำให้เข้าใจการทำงานของหุ่นยนต์ได้มากขึ้น
10) ใช้งานง่าย แต่บางทีมัน (Microsoft HoloLens) ไม่รู้ว่ากางนิ้วแล้ว เลยลากต่อ ทำให้ควบคุมยากบางครั้ง

ข้อเสนอแนะด้านประสิทธิภาพของระบบ

1) ภาพโฮโลแกรมมีการสั่นไหวเป็นบ้างครั้ง
2) การแสดงผลของหุ่นยนต์บางครั้งมีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย
3) บางครั้งยัง map ภาพไม่ตรงเท่าที่ควร ทำให้อาจเกิดความผิดพลาดขึ้น
4) ระบบบางส่วนยังไม่เสถียรมากนักแต่โดยรวมเสถียรดีแล้ว
5) บางครั้งการเคลื่อนที่ของชิ้นงานช้ากว่าการเคลื่อนที่ของมือที่ลากไป
6) กรอบการทำงานของแว่นแคบไปทำให้มองเห็นภาพรวมไม่ชัดต้องถอยออกมาดูในวงกว้าง
7) ย้ายการทดสอบ ทรงกลมกับ ลูกบาศก์ให้อยู่ต่ำๆก็ดีนะครับ ปวดคอ (หัวข้อ 4.2.1)
8) ตัวแว่นมองได้กว้างกว่านี้ก็จะรู้สึกสบายและอิสระในการควบคุมทำให้ใช้งานได้นานขึ้น
9) การควบคุมทิศทางหุ่นยนต์ยังดูไม่ค่อยอิสระเรื่องแกน x y z บางจังหวะก็มีข้อจำกัดในการสั่งงาน
10) สำหรับผู้ไม่เคยใช้ ทำให้สามารถเรียนรู้การทำงานของอุปกรณ์ได้ง่าย และป้องกันการเกิดปัญหาเวลาไปใช้อุปกรณ์จริงได้ดี ช่วยให้เข้าใจการทำงานของแต่ละส่วนของหุ่นยนต์มากขึ้น

ข้อเสนอแนะอื่น ๆ

1) สำหรับคนใช้แว่นตาถือว่าลำบากมากในการใส่แว่นโฮโลแกรม การสวมใส่ถือว่ายุ่งยาก สำหรับมือใหม่ แว่นด้านหน้ามักจะตกลงมาเสมอทำให้ภาพที่แสดงแคบกว่าปกติ
2) ใช้แล้วรู้สึกชอบมันทำให้รู้สึกว่าการควบคุมหุ่นยนต์เป็นเรื่องน่าสนุกไม่ได้น่าเบื่อ ลดความผิดพลาดก่อนทำจริงและได้ใช้งานร่วมกันกับผู้ฝึกคนอื่นได้ทำให้เกิดการเรียนรู้ร่วมกัน แต่มันก็ยังมีข้อที่ติดขัดอย่างที่เขียนไปค่ะถ้าแก้ไขได้ก็คงจะดีเยี่ยมเลย
3) Hololens หากใช้นานๆ จะทำให้ผู้ใช้งานเกิดการล้าได้
4) คนที่ไม่มีพื้นฐานหุ่นมาเล่นอาจจะงง ๆ
5) อยากให้ทำเป็นด่าน อาจจะน่าเล่นมากขึ้น (กรณีทำเพื่อสอนให้ User เข้าใจการทำงาน) แต่ถ้าวัตถุประสงค์คือสอนใช้งาน แบบนี้ก็น่าจะเข้าใจได้ง่ายแล้ว
6) แว่นใส่ยาก เหมือนหาโฟกัสไม่เจอ
7) ไม่แน่ใจว่า ถ้าทำแบบ ให้เลือก Joint ก่อน (1 2 3 4 5 6) แล้วค่อยลาก (ซ้ายขวา ล่างบน) จะช่วยเรื่องจิ้มผิด Joint หรือไม่

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงระบบ เพื่อการวิเคราะห์ผลการทดลองด้านประสิทธิภาพของระบบ ความสามารถในการใช้งานระบบ และคุณค่าเฉพาะทางของระบบ รวมถึงแนวทางในการพัฒนาระบบในอนาคต ผลจากแบบสอบถามในหัวข้อที่ 0 สามารถแปลงกลับจากข้อมูลเชิงปริมาณเป็นข้อมลเชิงคุณภาพ โดยมีเกณฑ์การประเมิน 1 – 5 ได้แก่ 1 คือไม่เห็นด้วยอย่างยิ่ง 2 คือไม่เห็นด้วย 3 คือไม่มีความคิดเห็น 4 คือเห็นด้วย และ 5 คือเห็นด้วยอย่างยิ่ง โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวมีรายละเอียดดังนี้

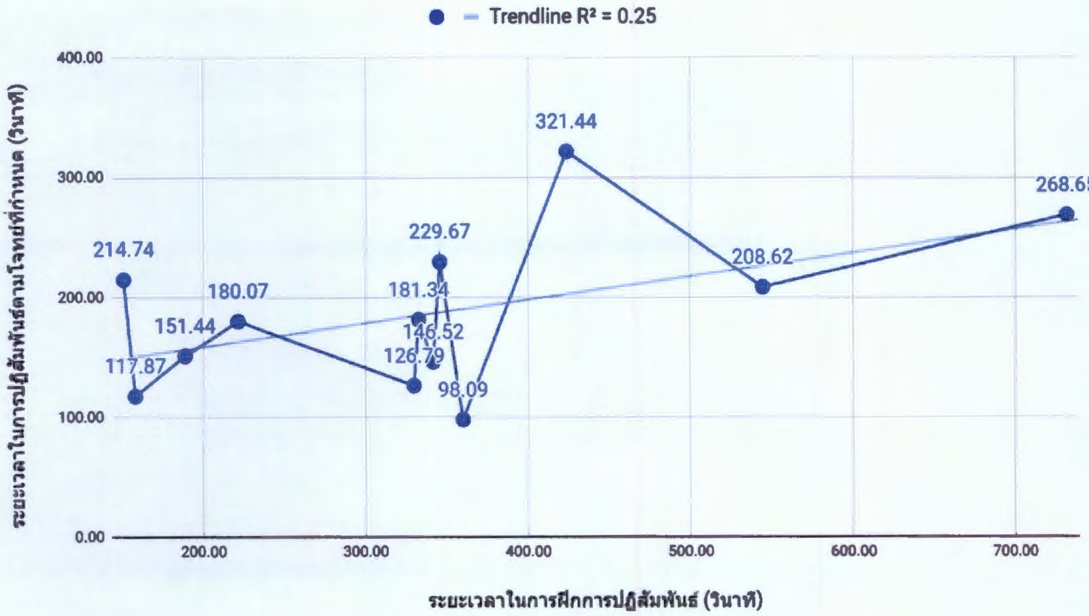
5.1 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1.1 ด้านประสิทธิภาพของระบบ

ผลการทดลองเพื่อประเมิณประสิทธิภาพของระบบแสดงให้เห็นว่า **Frame Rate** เฉลี่ยตลอดการใช้งานมีค่าเท่ากับ 59.51 fps และมีค่าต่ำสุดที่วัดได้คือ 52.25 ซึ่งมีค่ากว่า*ค่าที่ยอมรับได้* (24 fps) เนื่องจากการประมวลผลในการทำงานต่าง ๆ จะถูก**ประมวลผลในฝั่งของ Server** จึงทำให้ฝั่งของ Microsoft HoloLens นั้นไม่ได้รับภาระในการคำนวณดังกล่าว จึงใช้ทรัพยากรในส่วนของ**การให้แสงและเงา (Rendering)** ได้อย่างมีประสิทธิภาพ **ปริมาณข้อมูลในเครือข่าย**ของ Microsoft HoloLens ระหว่างการใช้งานเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 0.96 Mbps ซึ่งมี*ค่าน้อยกว่าความสามารถสูงสุดของตัว Server* (433 Mbps) หรือมีค่าเท่ากับร้อยละ 0.22 ของ Server ดังนั้นจำนวนผู้ใช้งานสูงสุด (Microsoft HoloLens) ที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบดังรูปที่ 3.4 อาจรองรับการเชื่อมต่อได้ประมาณ 454 คน เมื่อพิจารณาเฉพาะปริมาณข้อมูลในเครือข่าย

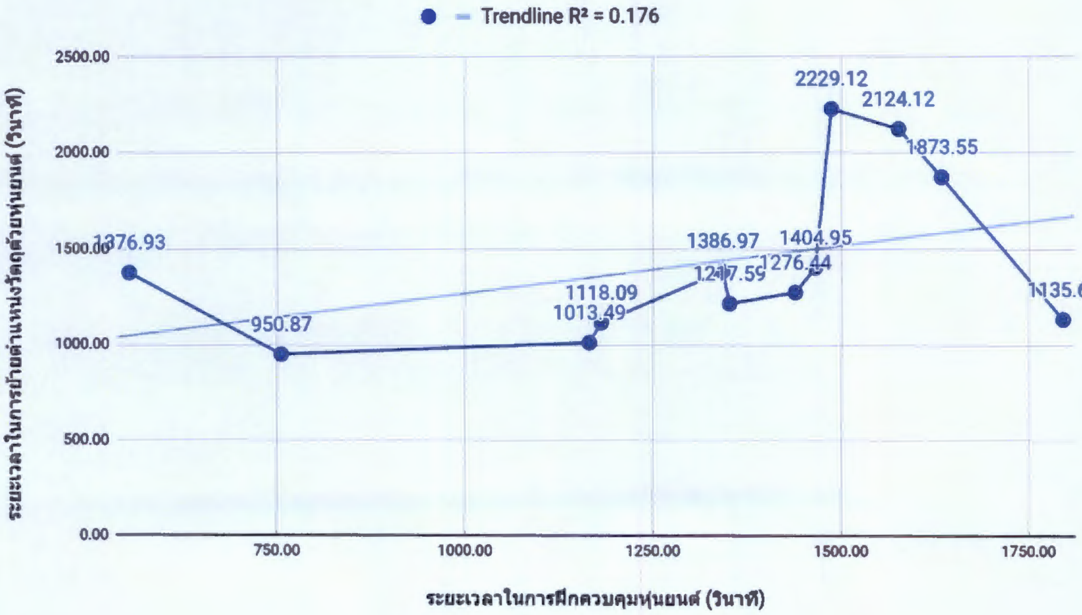
5.1.2 ด้านความสามารถในการใช้งานระบบ

ผู้เข้าร่วมการทดลองส่วนใหญ่**เคย**มีประสบการณ์การใช้งานอุปกรณ์ Microsoft HoloLens มาบ้าง**เล็กน้อย**และทุกคน**ไม่เคย**มีประสบการณ์ด้านการเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ Universal Robot 5 โดยผลการทดลองแสดงด้วยกราฟโดยมีการหาค่า Correlation Coefficient (r) ซึ่งจะมีเกณฑ์การพิจารณาค่า r คือ r = 0 แปลว่า ตัวแปรไม่สัมพันธ์กัน r มีค่าน้อยกว่า 0.400 แปลว่า ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันระดับน้อย r มีค่า 0.4 ถึง 0.6 แปลว่า ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันระดับปานกลาง r มีค่ามากกว่า 0.6 แปลว่า ตัวแปรมีความสัมพันธ์กันระดับมาก [63] โดยมีข้อมูลดังนี้



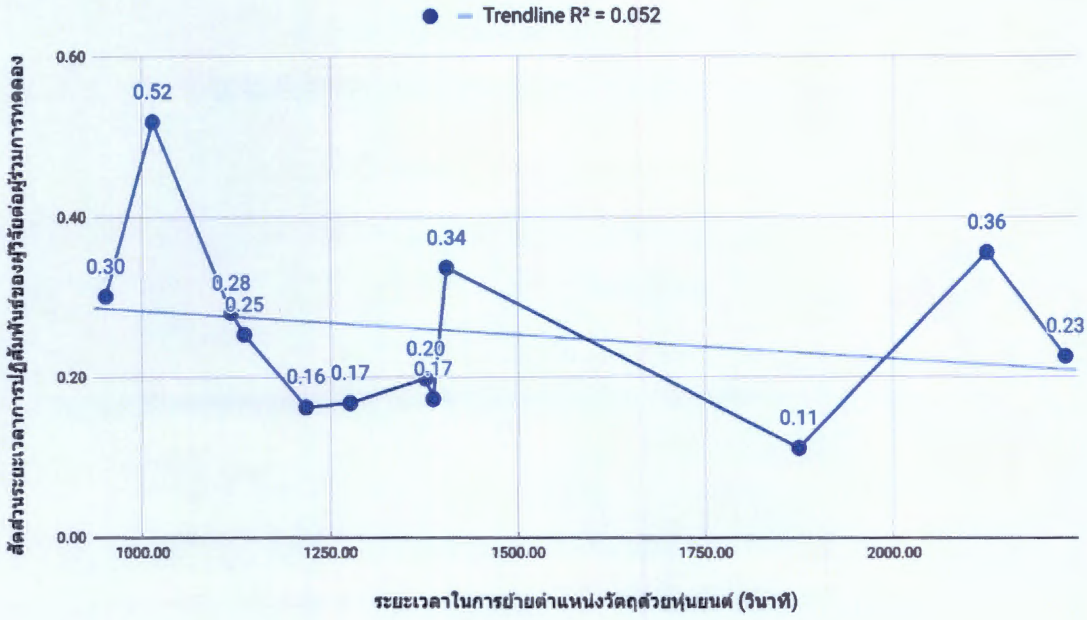
รูปที่ 5.1 ระยะเวลาในการปฏิสัมพันธ์เทียบกับระยะเวลาในการฝึกการปฏิสัมพันธ์

จาก**รูปที่ 5.1** แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมตามโจทย์ที่กำหนดมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการฝึกการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมใน*ระดับปานกลาง* (r^2=0.25, r=0.5) และเป็นไปใน*ทิศทางเดียวกัน*



รูปที่ 5.2 ระยะเวลาในการย้ายตำแหน่งวัตถุด้วยหุ่นยนต์เทียบกับระยะเวลาในการฝึกควบคุมหุ่นยนต์

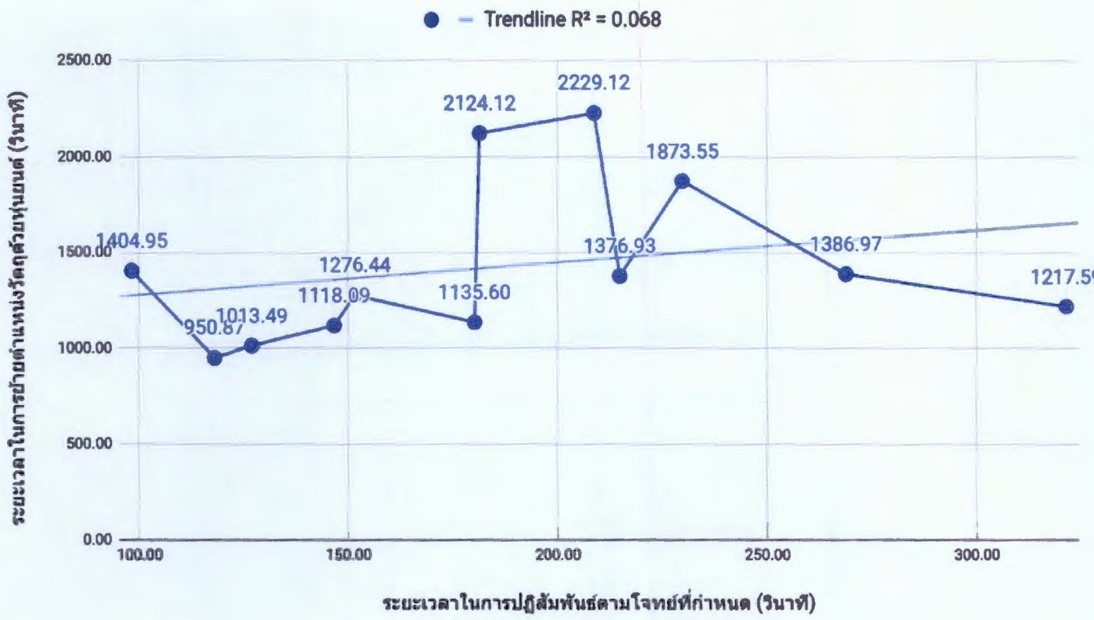
จาก**รูปที่** 5.2 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อย้ายตำแหน่งวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนดมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการฝึกการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ใน<u>*ระดับปานกลาง*</u> (r^2=0.176, r=0.419) และเป็นไปใน<u>*ทิศทางเดียวกัน*</u>



รูปที่ 5.3 สัดส่วนระยะเวลาการปฏิสัมพันธ์ของผู้วิจัยต่อผู้ร่วมการทดลองเทียบกับระยะเวลาในการย้ายตำแหน่งวัตถุด้วยหุ่นยนต์

จาก**รูปที่** 5.3 แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิสัมพันธ์ของผู้วิจัยต่อผู้ร่วมการทดลองมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อย้ายตำแหน่งวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนดใน<u>*ระดับน้อย*</u> (r^2=0.052, r=-0.228) และเป็นไปใน<u>*ทิศทางตรงกันข้าม*</u>

เมื่อพิจารณาข้อมูลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 ร่วมกันแสดงให้เห็นข้อมูลดังนี้



รูปที่ 5.4 ระยะเวลาในการย้ายตำแหน่งวัตถุด้วยหุ่นยนต์เทียบกับระยะเวลาในการปฏิสัมพันธ์

จากรูป**รูปที่ 5.4** แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อย้ายตำแหน่งวัตถุไปยังตำแหน่งที่กำหนดมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมตามโจทย์ที่กำหนดใน*ระดับน้อย* (r^2=0.068, r=0.261) และเป็นไปใน*ทิศทางเดียวกัน*

ผลจากแบบจากแบบสอบถามแสดงให้เห็นว่าโดย*ผู้ใช้งานเห็นด้วย*ในเรื่องของ**ความสะดวกในการใช้งาน (Ease of Use)** ในการใช้งานระบบและ*เห็นด้วย*กับการที่ผู้ใช้สามารถแก้ไขแก้ความผิดพลาดขณะใช้งานระบบได้อย่างรวดเร็ว ง่ายดาย เนื่องมาจากโฮโลแกรมอนุญาตให้ผู้ใช้งานปฏิสัมพันธ์ด้วยท่าทางธรรมชาติ เข้าใจได้ง่าย การทำงานโดยรวมสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ และส่วนติดต่อผู้ใช้งานยังมีความยืดยุ่นสูงในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งให้เหมาะสมกับผู้ใช้งาน นอกจากนี้*ผู้ใช้งานเห็นด้วย*ในเรื่องของ**ความสะดวกในการเรียนรู้ (Ease of Learning)** ในการใช้งานระบบและ*เห็นด้วย*กับการที่ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความง่ายต่อการเรียนรู้ในการใช้งาน เนื่องจากโฮโลแกรมที่ออกแบบไว้สามารถแสดงข้อมูลที่จำเป็นในการเรียนรู้ระบบ เช่น การแสดงชื่อ ขนาดมุม และการเติมสีส่วนต่างของหุ่นยนต์ เป็นต้น สุดท้ายผู้ใช้งาน*เห็นด้วย*ในเรื่องของ**ความพึงพอใจ (Satisfaction)** และยัง*เห็นด้วย*ว่าระหว่างการใช้งานระบบนั้นรู้สึกสนุก เนื่องจากการใช้ระบบความจริงเสริมสามารถช่วยเพิ่มความน่าสนใจ แปลกใหม่ และตื่นเต้นเมื่อใช้งานระบบ รวมไปถึงการที่ระบบออกแบบให้ผู้ใช้งานสามารถใช้งานระบบร่วมกันได้ เนื่องจากรูปแบบของระบบที่พัฒนาขึ้นที่นำมาเชื่อมโยงกับการควบคุมหุ่นยนต์นั้น ผู้ใช้งานทั่วไปไม่สามารถเข้าถึงเทคโนโลยีในลักษณะดังกล่าวได้ง่ายนัก

จากความคิดเห็นของผู้ร่วมการทดลองมีข้อเสนอแนะสำหรับปรับปรุงพัฒนาระบบ **ด้าน User Interface** ควรมีการใช้ภาษาไทยในระบบ เนื่องจากผู้ใช้งานในการทดลองนี้เป็นคนไทยทั้งหมดและเพื่อให้ง่ายแก่ผู้ที่ไม่เคยมีประสบการณ์เกี่ยวกับหุ่นยนต์หรือเทคโลยีความจริงเสมือนมาก่อนและอยากให้แสดงเมนูขึ้นด้านหน้าผู้ใช้งานแทนการใช้โฮโลแกรม General-purpose Switch เพื่อเข้าถึงฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ ของระบบ **ด้านของการใช้งานระบบ**ควรปรับปรุงของการนำ Script Cube มาต่อกันเพราะบางครั้งทำให้การใช้งานลำบากแม้จะมีการจัดระเบียบ (Alignment) แล้วก็ตาม นอกจากนี้ยังมีการเสนอให้พัฒนาเซนเซอร์ที่ตรวจจับการเคลื่อนไหวของมือเพื่อเสริมการใช้ท่าทาง (Gesture) ในการปฏิสัมพันธ์กับระบบอีกด้วย เนื่องจากผู้ร่วมการทดลองส่วนใหญ่ยังไม่ได้มีประสบการณ์ในการใช้ท่าทางมากนักและประกอบกับตัว Microsoft HoloLens บางครั้งมีการตรวจจับการใช้งาน Gesture ที่ผิดพลาดอยู่ **ด้านประสิทธิภาพของระบบ**ควรปรับปรุงการควบคุม Virtual Robot เนื่องจากส่วนของ Base ยังเคลื่อนที่ไม่สอดคล้องกับการใช้ท่าทางเท่าที่ควรและบางครั้ง Microsoft HoloLens มีการตรวจจับการใช้ท่าทางผิดพลาด ทำให้การควบคุมหุ่นยนต์ในระบบมีความคลาดเคลื่อนได้ และปัญหาสำคัญคือการปรับตำแหน่งวภาพแวดล้อมเสมือนกับสภาพแวดล้อมจริง เนื่องจากการใช้ Vuforia ที่อยู่ในช่วงกำลังพัฒนา ทำให้ยังมีปัญหาเรื่องความเข้ากันได้ (Compatibility) และปัญหาอื่น ๆ ในการใช้งานร่วมกับ Microsoft HoloLens ทำให้ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่

5.1.3 ด้านคุณค่าเฉพาะทาง

ในส่วนของคุณค่าเฉพาะทางของระบบที่พัฒนานั้น ผู้ร่วมการทดลอง**เห็นด้วย**ในเรื่องของการใช้โฮโลแกรมแสดงข้อมูลต่าง ๆ เพื่อให้เกิดความสะดวก เนื่องจากสามารถแสดงข้อมูลออกมาในรูปแบบภาพกราฟิกที่สามารถใช้ในการสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานได้ง่ายและข้อมูลดังกล่าวมีการแสดงที่สามารถปฏิสัมพันธ์ร่วมกันได้ รวมถึงการใช้โฮโลแกรมจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมจริงช่วยให้เข้าใจการทำงานของหุ่นยนต์ เนื่องจากการจำลองการทำงานของหุ่ยนต์ในสถานที่จริงทำให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้ถึงข้อจำกัดในการควบคุมหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ได้ เช่น เคลื่อนที่ชนกับผนัง เคลื่อนที่ชนสิ่งกีดขวาง เป็นต้น นอกจากนี้ผู้ร่วมการทดลองยัง**เห็นด้วยอย่างยิ่ง**กับการจำลองการทำงานของ Virtual Robot ช่วยเพิ่มความมั่นใจก่อนการสั่งให้หุ่นยนต์จริงทำงาน เนื่องจากผู้ใช้งานส่วนใหญ่ยังไม่เคยมีประสบการณ์การเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์จริง (UR5) มาก่อน การจำลองการทำงานด้วยหุ่นยนต์เสมือนและยังมีผู้ใช้งานระบบคนอื่นความรู้ (ผู้วิจัย) คอยช่วยเหลือและให้คำแนะนำจึงช่วยสร้างความมั่นใจก่อนการควบคุมหุ่นยนต์จริงได้

5.2 สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการประยุกต์ใช้ความจริงเสริมสำหรับระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์ร่วมกัน โฮโลแกรมทั้งหมดถูกสร้างมาเพื่อช่วยในการฝึกอบรม (OJT) Microsoft HoloLens ถูกเลือกให้เป็นอุปกรณ์ในการแสดงผลและปฏิสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้งานกับโฮโลแกรม System Core ประกอบไปด้วยโฮโลแกรม 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนของ Virtual Robot ที่มีการลอกเลียนแบบพฤติกรรมของหุ่นยนต์ UR5 ส่วนของ Script Controller ที่จะทำหน้าที่ควบคุมชุดคำสั่งในการจำลองการทำงานของ Virtual Robot และส่วนของ Robot Simulation ที่ทำหน้าที่จำลองการทำงานของ Virtual Robot รวมถึงการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ UR5 นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาวิธีการปรับตำแหน่งสภาพแวดล้อมจริงและสภาพแวดล้อมเสมือนเข้าด้วยกันเพื่อให้ผู้ใช้งานหลายคนสามารถใช้งานระบบในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ร่วมกันได้ การใช้งานระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ได้

ผู้ทดลองใช้ระยะเวลาในการฝึกการใช้งาน Microsoft HoloLens เฉลี่ย 344.03 วินาที หรือ 5 นาที 44 วินาที จากนั้นผู้ทดลองใช้ระยะเวลาในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมตามที่โจทย์กำหนดเฉลี่ย 187.10 วินาที หรือ 3 นาที 7 วินาที ในการเรียนรู้การควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น ผู้ร่วมการทดลองใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 1312.02 วินาที หรือ 21 นาที 52 วินาที หลังจากนั้นผู้ร่วมการทดลองได้รับโจทย์เพื่อควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อหยิบชิ้นงานใช้ระยะเวลาเฉลี่ย 1561.14 วินาที หรือ 26 นาที 1 วินาที จากสมมติฐานในหัวข้อ 4.2 พบว่า สมมติฐานที่ 1 และ 2 เป็นจริงคือ (1) ผู้ใช้งานมีความสามารถในการปฏิสัมพันธ์กับโฮโลแกรมด้วยท่าทางในระดับที่สูงขึ้นจะมีความสามารถในการใช้งานระบบเพื่อควบคุมหุ่นยนต์สูงขึ้นเช่นกัน (2) การทำงานร่วมกันด้วยระบบที่พัฒนาขึ้นจะช่วยให้การควบคุมหุ่นยนต์ UR5 เพื่อแก้ปัญหาใช้ระยะเวลาน้อยลง

การเก็บข้อมูลทั้งหมดครอบคลุมถึงการประเมินประสิทธิภาพของระบบและการประเมินความสามารถในการใช้งานระบบ ประกอบไปด้วยความสามารถในการใช้งานระบบและความสามารถในการควบคุมหุ่นยนต์ UR5 ได้จากผู้ร่วมการทดลองมีทั้งหมด 12 คน อยู่ในช่วงอายุตั้งแต่ 19 ถึง 30 ปี ประกอบไปด้วยนักศึกษาที่กำลังศึกษาระดับ ป.โท จำนวน 3 คน ป.ตรี 8 คน และบุคคลทั่วไปที่ไม่ใช้นักศึกษา 1 คน ผู้ร่วมการทดลอง*ทุกคนไม่เคย*มีประสบการณ์ด้านการเขียนโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ Universal Robot 5 มาก่อน มีผู้ที่เคยมีประสบการณ์การใช้งาน Microsoft HoloLens มาแล้ว 8 คน และไม่เคย 4 คน จากการที่ผู้ร่วมการทดสองใช้งานระบบแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถแสดงภาพโฮโลแกรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ใช้งานที่มีความสามารถในการใช้ท่าทางในการปฏิสัมพันธ์กับระบบและการทำงานร่วมกันระหว่างผู้ใช้งานหลายคน มีแนวโน้มใช้ระยะเวลาน้อยลงในการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อแก้ปัญหา การใช้โฮโลแกรมเพื่อสร้างสภาพแวดล้อม

เสมือนที่สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริง รวมถึงการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ UR5 ก่อนควบคุมหุ่นยนต์จริงช่วยเพิ่มความมั่นใจแก่ผู้เริ่มฝึกใช้งานหุ่นยนต์ได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้สามารถนำไปต่อยอดในอนาคตได้ ได้แก่ การสร้างระบบจัดเก็บความรู้ของผู้เชี่ยวชาญแล้วนำความรู้ดังกล่าวมาพัฒนาระบบผู้สอนภายในสภาพแวดล้อมเสมือน การปรับปรุงระบบการประมวลผลมาร์คเกอร์ (Marker) ให้มีประสิทธิภาพและลดปัญหาเมื่อใช้งานกับ Microsoft HoloLens รวมถึงพัฒนาระบบการควบคุม Virtual Robot ให้รองรับการควบคุมแบบ Inverse Kinematics ระบบการตรวจจับการชน (Collision Detection) ระหว่างทำการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ในสถานที่จริง และนำระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ไปต่อยอดในการประยุกต์ในงานที่อื่น เช่น การประกอบชิ้นงานร่วมกัน และการออกแบบโครงสร้างร่วมกัน เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

1. ประกาศกระทรวงศึกษาธิการ. เรื่อง กำหนดประเภทและหลักเกณฑ์ของคนพิการทางการศึกษา พ.ศ. ๒๕๕๒. สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา.

2. Borko Furht, 2011, **Handbook of Augmented Reality**, Springer Publishing Company, Incorporated.

3. Paul Milgram and Fumio Kishino, 1994, A TAXONOMY OF MIXED REALITY VISUAL DISPLAYS. **IEICE Transactions on Information Systems**. IEICE The Institute of Electronics,Information and Communication Engineers, E77-D.

4. Jerry Isdale, **What Is Virtual Reality?**, [online], Available: http://www.isdale.com/jerry/VR/WhatIsVR/noframes/WhatIsVR4.1.html [11 January 2019].

5. I. Cheng, R. Shen, R. Moreau, V. Brizzi, N. Rossol, and A. Basu,2014. "An augmented reality framework for optimization of computer assisted navigation in endovascular surgery". **2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society**, 26-30 August 2014, pp. 5647-5650.

6. **Construction and Working Principle of LCD Display**, [online], Available: https://www.elprocus.com/ever-wondered-lcd-works/ [19 January 2019].

7. **Dell UltraSharp 24 InfinityEdge Monitor - U2417H**, [online], Available: https://www1.ap.dell.com/content/products/productdetails.aspx/dell-u2417h-monitor?c=th&cs=thdhs1&l=en&s=dhs [19 January 2019].

8. Simon Baker, **3D Display Technologies**, [online], Available: http://www.tftcentral.co.uk/articles/3d_technologies.htm [17 January 2019].

9. **Cinema 3D Glasses**, [online], Available: https://www.lg.com/us/tv-audio-video-accessories/lg-AG-F210-3d-glasses [17 January 2019].

10. **Unity for Mobile AR**, [online], Available: https://unity.com/solutions/mobile-ar [2 January 2019].

11. **VIVE Pro | The professional-grade VR headset**, [online], Available: https://www.vive.com/us/product/vive-pro/ [30 January 2019].

12. **Daydream**, [online], Available: https://vr.google.com/daydream [30 January 2019].

13. **Android Studio**, [online], Available: https://developer.android.com/studio/ [30 January 2019].

14. rwinj, Matt Zeller, and Brandon Bray, **Gestures**, [online], Available: https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/gestures [19 June 2018].

15. **Why HoloLens**, [online], Available: https://www.microsoft.com/en-us/hololens/why-hololens [30 May 2017].

16. **UR5 ROBOT**, [online], Available: https://www.universal-robots.com/products/ur5-robot/ [1 June 2017].

17. **Overview of client interfaces**, [online], Available: https://www.universal-robots.com/how-tos-and-faqs/how-to/ur-how-tos/overview-of-client-interfaces-21744/ [12 November 2018].

18. **List of Training Methods**, [online], Available: https://www.hr.com/en/communities/training_and_development/list-of-training-methods_eacwezdm.html [25 October 2017].

19. Robert W. Pike, 1989, **Creative Training Techniques Handbook**.

20. Business Jargons, **Off-the-Job Training**, [online], Available: http://businessjargons.com/off-the-job-training.html [25 October 2017].

21. Kermit Burley, **The Traditional Training Methods for Human Resources**, [online], Available: https://bizfluent.com/info-8169914-traditional-training-methods-human-resources.html [25 October 2017].

22. Kirsty Saddler, 2011, **Developing HR Talent: Building a Strategic Partnership With the Business**.

23. Paul Hersey, 1982, **Management of Organizational Behavior**.

24. Bent Meier Sorensen, **Why PowerPoint Should Be Banned In Lectures**, [online], Available: https://www.lifehacker.com.au/2015/05/why-powerpoint-should-be-banned-in-lectures/ [15 November 2017].

25. **Pilot Training System**, [online], Available: http://www.whatishumanresource.com/off-the-job-methods [14 November 2017].

26. Business Jargons, **On-the-Job Training**, [online], Available: http://businessjargons.com/on-the-job-training.html [25 October 2017].

27. **Types of Job Training**, [online], Available: http://jobs.lovetoknow.com/Types_of_Job_Training [15 November 2017].

28. J. T. Doswell and P. H. Mosley,2006. "Robotics In Mixed-Reality Training Simulations: Augmenting STEM Learning". **Sixth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT'06)**, 5-7 July 2006, pp. 864-868.

29. Anna Syberfeldt, Oscar Danielsson, Magnus Holm, and Lihui Wang, 2015, "Visual Assembling Guidance Using Augmented Reality", **Procedia Manufacturing**, Vol. 1, No. Supplement C, pp. 98-109.

30. Wang Xiaoling, Zheng Peng, Wei Zhifang, Sun Yan, Luo Bin, and Li Yangchun, 2004, Development an interactive VR training for CNC machining. **Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH international conference on Virtual Reality continuum and its applications in industry**. ACM, Singapore, pp. 131-133.

31. H. Ghandorh, J. Mackenzie, R. Eagleson, and S. de Ribaupierre,2017. "Development of augmented reality training simulator systems for neurosurgery using model-driven software engineering". **2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)**, 30 April - 3 May 2017, pp. 1-6.

32. B. Kwon, J. Kim, K. Lee, Y. K. Lee, S. Park, and S. Lee, 2017, "Implementation of a Virtual Training Simulator Based on 360? Multi-View Human Action Recognition", **IEEE Access**, Vol. 5, No., pp. 12496-12511.

33. A. Boschmann, S. Dosen, A. Werner, A. Raies, and D. Farina,2016. "A novel immersive augmented reality system for prosthesis training and assessment". **2016 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI)**, 24-27 February 2016, pp. 280-283.

34. I. Santos, P. Dam, P. Arantes, A. Raposo, and L. Soares,2016. "Simulation Training in Oil Platforms". **2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)**, 21-24 June 2016, pp. 47-53.

35. Néstor Ordaz, David Romero, Dominic Gorecky, and Héctor R. Siller, 2015, "Serious Games and Virtual Simulator for Automotive Manufacturing Education & Training", **Procedia Computer Science**, Vol. 75, No. Supplement C, pp. 267-274.

36. R. Klauck, S. Lorenz, and C. Hentschel,2016. "Collaborative work in VR Systems: A software-independent exchange of avatar data". **2016 IEEE 6th International Conference on Consumer Electronics - Berlin (ICCE-Berlin)**, 5-7 September 2016, pp. 133-136.

37. Scoot W. Greenwald, Wiley Corning, Gabriel Fields, Sydney Gibson, Misha Jamy, and John Belcher, **Electrostatic Playground: A Multi-User Virtual Reality Physics Learning Experience**, [online], Available: https://www.media.mit.edu/projects/vr-physics-lab/overview [28 April 2017].

38. Scoot W. Greenwald, Wilhelm Weihofen, Theji Jayaratne, Wiley Corning, and Max Rose, **Body Quest: A Room-Scale VR Playground for Biology and Chemistry**, [online], Available: https://www.media.mit.edu/projects/body-quest/overview [28 April 2017].

39. Mubbasir Kapadia, Jessica Falk, Fabio Zund, Marcel Marti, Bob Sumner, and Markus Gross, 2015, Computer-Assisted Authoring of Interactive Narratives. **ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (i3D) 2015**.

40. Guy Hoffman and Cynthia Breazeal, "Collaboration in Human-Robot Teams".

41. ธาริณี ทองเกิด and สยาม เจริญเสียง, ความจริงเสริมสำหรับการประกอบชิ้นงานเสมือนที่มีหุ่นยนต์ช่วย. **การประชุมวิชาการทางเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและหุ่นยนต์ ครั้งที่** 5, กรุงเทพฯ.

42. S. Lallée, K. Hamann, J. Steinwender, F. Warneken, U. Martienz, H. Barron-Gonzales, U. Pattacini, I. Gori, M. Petit, G. Metta, P. Verschure, and P. F. Dominey,2013. "Cooperative human robot interaction systems: IV. Communication of shared plans with Naïve humans using gaze and speech". **2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, 3-7 November 2013, pp. 129-136.

43. A. Monferrer and D. Bonyuet,2002. "Cooperative robot teleoperation through virtual reality interfaces". **Proceedings Sixth International Conference on Information Visualisation**, 2002, pp. 243-248.

44. M. M. Moniri, F. A. E. Valcarcel, D. Merkel, and D. Sonntag,2016. "Human Gaze and Focus-of-Attention in Dual Reality Human-Robot Collaboration". **2016 12th International Conference on Intelligent Environments (IE)**, 14-16 September 2016, pp. 238-241.

45. A. Ventura Cheryl, 1988, Why switch from paper to electronic manuals. **Proceedings of the ACM conference on Document processing systems**. ACM, Santa Fe, New Mexico, USA, pp. 111-116.

46. J. T. Doswell,2006. "Context-Aware Mobile Augmented Reality Architecture for Lifelong Learning". **Sixth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT'06)**, 5-7 July 2006, pp. 372-374.

47. **Spatial mapping**, [online], Available: https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/spatial_mapping [28 June 2017].

48. **UR Script: Commands via Socket connection**, [online], Available: http://www.zacobria.com/universal-robots-zacobria-forum-hints-tips-how-to/script-via-socket-connection/ [1 June 2017].

49. **Unity (Game Engine)**, [online], Available: https://docs.unity3d.com/Manual [15 February 2018].

50. **Multiplayer and Networking**, [online], Available: https://docs.unity3d.com/Manual/UNetOverview.html [15 November 2017].

51. Shuyang Chen Long Qian, **UR5 for Unity**, [online], Available: https://github.com/qian256/ur5_unity [10 January 2018].

52. **Configurable Joint**, [online], Available: https://docs.unity3d.com/Manual/class-ConfigurableJoint.html [15 January 2018].

53. **Rigidbody**, [online], Available: https://docs.unity3d.com/Manual/class-Rigidbody.html [15 January 2018].

54. **Likert Scale – Definition, Examples & 53 Sample Questions You Can Use**, [online], Available: https://www.fieldboom.com/likert-scale [11 January 2019].

55. Alex Turner, Matt Zeller, Eliot Cowley, and Brandon Bray, **Coordinate systems in Unity**, [online], Available: https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/coordinate-systems-in-unity [19 June 2018].

56. Arnold Lund, 2001, **Measuring Usability with the USE Questionnaire**.

57. **Quaternion.Lerp**, [online], Available: https://docs.unity3d.com/2017.4/Documentation/ScriptReference/Quaternion.Lerp.html [8 January 2019].

58. **Likert scale**, [online], Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Likert_scale [11 January 2019].

59. **Hologram stability**, [online], Available: https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/hologram-stability [12 October 2017].

60. JonMLyons, Matt Zeller, Kelly Baker, and Brandon Bray, **Using the Windows Device Portal**, [online], Available: https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/using_the_windows_device_portal [19 June 2018].

61. How 24 FPS Became Standard, 2017. TWiT Netcast Network.

62. **BR-6288ACL**, [online], Available: https://www.edimax.com/edimax/merchandise/merchandise_detail/data/edimax/global/wireless_routers_ac600/br-6288acl/ [9 January 2019].

63. **บุญศรี พรหมมาพันธุ์**, **การวิเคราะห์ข้อมูลงานวิจัย**, [online], Available: https://goo.gl/ytP8u7

64. Brian Hall, **Beej's Guide to Network Programming**, Jorgensen Publishing.

ภาคผนวก ก

การรับ-ส่งข้อมูลระหว่างผู้ใช้งานกับระบบที่พัฒนาขึ้นเอง

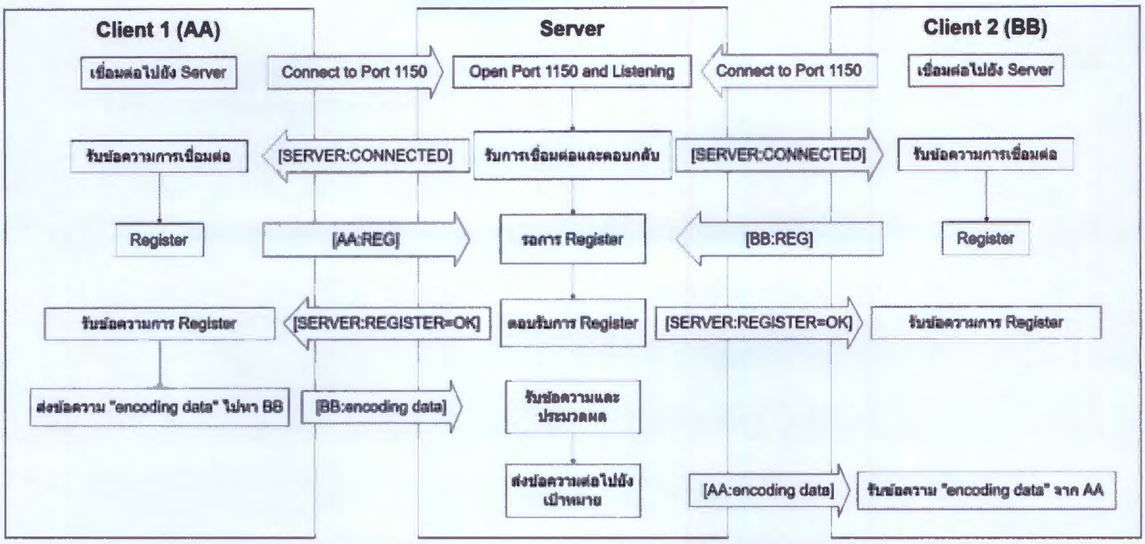
การพัฒนาระบบรับ-ส่งข้อมูลพัฒนาขึ้นเองนั้นจะใช้การส่งข้อมูลผ่าน Socket [64] ซึ่งมีความสามารถในการทำงานจาก Application Layer ถึง Network Layer ตาม OSI Model การออกแบบระบบรับ-ส่งข้อมูลจะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็น Server ที่พัฒนาเป็น Native Application และส่วนที่ทำหน้าที่เป็น Client ที่จะนำไปใช้กับ Unity 3D ซึ่งการทำงานของทั้ง Server และ Client จะมีการทำงานส่วนใหญ่คล้ายกันคือมีการส่งข้อมูลผ่านระบบเครือข่ายผ่าน Socket อีกทั้งภายใน Class ยังมี Method ที่ใช้ร่วมกันได้ เช่น การเริ่มต้นการเชื่อมต่อ การหยุดการเชื่อมต่อ การส่งข้อมูล การรับข้อมูล และการแปลงข้อมูล

การรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง Server และ Client นั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดโพรโทคอล (Protocol) เพื่อให้ทั้งผู้ส่งและผู้รับข้อมูล สามารถสื่อสารกันได้อย่างถูกต้อง โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการกำหนด Protocol ชื่อว่า MyPX500 ซึ่งมีการในการส่งข้อมูลตามรูปแบบดัง**ตารางที่ ก.1**

ตารางที่ ก.1 คำสั่งของ MyPX500

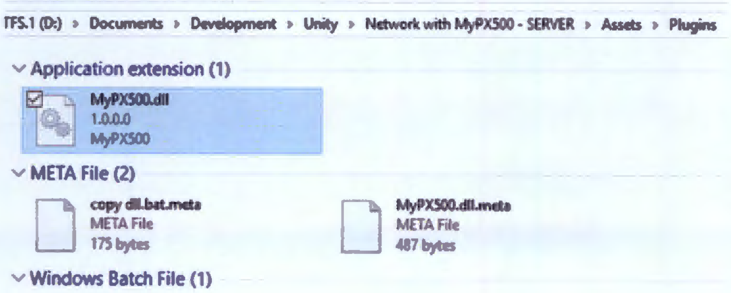
สถานะ	**การรับส่ง-ข้อมูลระหว่าง Server และ Client**	**ความหมาย**
การเชื่อมต่อสำเร็จ	[SERVER:CONNECTED]	Server ตอบรับการเชื่อมต่อจาก Client เมื่อสำเร็จ
Client เชื่อมต่อไปยัง Server	[<NAME>:REG]	<NAME> คือ ชื่อของ Client ที่ต้องการ Register เข้ากับ Server เพื่อใช้ในการระบุช่องทางในการสื่อสาร (IP Address และ Port)
รับส่งข้อมูล-ระหว่างClient	[<ADDR>:<DATA>]	ส่งข้อมูล : <ADDR> คือ ชื่อของ Client ปลายทางในการส่งข้อมูล <DATA> รับข้อมูล : <ADDR> คือ ชื่อของ Client ต้นทางในการส่งข้อมูล

ขั้นตอนการการรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง Client ผ่าน Server เริ่มตั้งแต่กระบวนการ Register ของ Client ไปยัง Server และส่งข้อมูลไปยัง Client ที่ต้องการ (ใช้ PuTTY ในการทดสอบการทำงานส่วน Client) จะมีขั้นตอนตามตัวอย่างการว่งข้อความ “encoding data” จาก Client 1 ไปยัง Client 2 ดัง**รูปที่ ก.1**



รูปที่ ก.1 แผนผังส่งข้อมูลผ่าน Server จาก Client 1 ชื่อ AA ไปยัง Client 2 ชื่อ BB

การที่จะนำระบบรับ-ส่งข้อมูลที่พัฒนาขึ้นมาเองไปใช้กับ Unity 3D ได้นั้นจะต้องทำการแปลโปรแกรม (Compile) เป็น Dynamic-link library (DLL) จากนั้นนำไฟล์ DLL ที่ได้ไปวางไปที่ Directory ที่พัฒนาด้วย Unity 3D (.\Unity Project\Assets\Plugins\) หลังจากนั้นก็จะสามารถเรียกใช้คำสั่งที่ได้พัฒนาขึ้นผ่านไฟล์ DLL ดัง**รูปที่ ก.2**



รูปที่ ก.2 ไฟล์ dll ของระบบรับ-ส่งข้อมูลที่พัฒนาขึ้นเอง (MyPX500.dll)

การรับ - ส่งข้อมูลที่พัฒนาขึ้นเองนั้น เมื่อนำมาใช้งานร่วมกับ Unity 3D แล้วทำการทดสอบ ผลปรากฏว่า Client ที่ทำงานด้วย Unity 3D สามารถเชื่อมต่อไปยัง Server ที่เป็น Native Application ได้ ทำการ Register แล้วรับ-ส่งข้อมูลระหว่าง Client ที่ทำงานด้วย Unity 3D ได้ แต่ไม่สามารถตรวจจับการหยุดการเชื่อมต่อ (Disconnect) ได้ ทำให้กระบวนการของ Server อาจจะเกิด Memory Overflow ได้เพราะไม่สามารถหยุดการเชื่อมต่อกับ Client ได้ ในขณะที่ไฟล์ DLL เดียวกันนี้นำไปประยุกต์ใช้กับ Client ที่เป็น Native Application กลับทำงานได้อย่างปกติ จึงหยุดพัฒนาการรับ-ส่งข้อมูลด้วยวิธีการดังกล่าวและใช้ Unity Network ในการส่งข้อมูลแทน

ภาคผนวก ข

งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

Development of Holographic Environment for Multi-user Virtual Robot Training System

Chaowwalit Thammatinno(✉) and Siam Charoenseang

Institute of Field Robotics (FIBO), King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok, Thailand
chaowwalit.thammatinno@gmail.com,
siam@fibo.kmutt.ac.th

Abstract. This research presents the design and development of holographic environment for multi-user virtual robot training system. During On-the-Job Training (OJT), this proposed system assists the trainer to train the trainee for operating the virtual robot arm at the robot station. It is designed for multiple users to access the same augmented environment including the physics-based simulation at the same time. In the augmented environment, the trainer can demonstrate the operation of the robot through the hologram while the trainee can visualize and operate the virtual robot by interaction with the hologram. The result showed that the same augmented environment was interacted by the trainer and the trainee successfully. Hologram environment was accurately mapped to the real environment. In the future, the proposed system can send a set of commands to control the real robot as similar to the hologram version.

Keywords: Robot training · Simulation · Hologram · Augmented reality

1 Introduction

Training is the process involving with the trainees to learn and practice lead to gain knowledge and skill in their jobs. The presentation methods are the simple ways that deliver the information to the trainee. The simulation method is the method that helps the trainee to learn and practice in the virtual environment. The trainee can feel like operate in the real environment. On-the-Job Training is the method that the trainer directly instructs to the trainee. Also, the trainee can learn and practice at the actual workplace. This method generally is the most efficient [1–3].

Several research works presented the systems to improve the training process including avoiding the risk, reducing the cost of training, preparing the trainee in the specific task, assisting learning in the difficult task, and so on. Furthermore, the research works that implement the training method into are facilitating and improve the learning of the trainees as shown in Table 1.

Virtual Reality (VR) technology has been widely spread in various tasks. For the training task, the virtual reality especially augmented reality allowed the developer to create the virtual system for assisting the user in many roles such as virtual teacher, virtual environment, interactive information, and simulation. Teaching algorithm can also be integrated into the system as a virtual trainer. It responded to the user according

© Springer International Publishing AG, part of Springer Nature 2018
M. Kurosu (Ed.): HCI 2018, LNCS 10902, pp. 466–478, 2018.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-91244-8_37

Table 1. Comparison of the training methods

Paper	Stereo-scopic	Multi user	Lecture	Simulation	Case study	OJT
4	*		*		*	*
5	*					*
6				*		
7				*		
8	*			*	*	
9				*		
10	*			*		
11	*			*		
12	*			*		
13					*	
Proposed system	*	*	*	*	*	*

to the environment and situation [4, 5]. During the training, some task was inconvenient for trainee to be trained in the actual workplace because of risk, cost, restriction, and time limit. The training system mostly aims to create the simulation for training that provided the interactive training environment [6–12]. Moreover, the virtual training allowed the trainee to practice the same situation many times for the specific scenario. Many case studies from the virtual training could help the trainee to find their suitable solutions for assigned tasks [4, 8, 13].

The above systems still have some problems related to the number of trainees at a time, unrealistic virtual training, distortion of the video camera, request of the marker, the difficulty of interaction, and limitation of point-of-view. The proposed system was designed to solve these problems by integration of networking system for multiple users and providing the holograms for natural interaction with the real environment and actual workplace.

2 System Overview

In general, most of the operational manuals, which are written in the document papers, are inconvenient [14]. Some previous research suggested that the Mobile Augmented Reality System (MARS) enhanced the capability of providing the graphics information to the user autonomously at anytime, in any place [15]. So, the MARS could be suitable for On-the-Job Training method which needs the direct instructions to perform the job in real-time. Moreover, MARS allows the users to use the natural interaction but it has to understand the details of environment at a workplace. Nowadays, the hardware device, which is suitable to the above requirements, is the Microsoft HoloLens.

During proposed On-the-Job Training, both trainer and trainee work at the same place and share some job's information in form of graphics information at the same time. So, the networking system could be good choice for sharing that kind of information. In addition, the Universal Robot 5 was chosen to be a manipulator in the proposed system because it is easy to be interfaced by sending an URScript via ethernet connection.

The main software platform chosen to development the proposed system is the Unity which is a game engine for developing the 3D application and supports various platforms including the Microsoft HoloLens [16]. In addition, Microsoft provided MixedRealityToolkit [17] that fully supports the development with the Unity.

Microsoft HoloLens was a primary hardware used to interact with the users. A desktop computer with system core was used to manage all user connections and deal with the augmented environment. The system core took care of the augmented environment which contained a lot of holograms such as virtual robot, script generator, script cube, script header, recycle bin, and general-purpose switch. The holograms were mapped and interacted by the user's gesture to the real environment accordingly to the spatial mapping [18, 19]. All users sent their information to each other via the system core. In addition, all users interacted the same augmented environment at the same actual workplace.

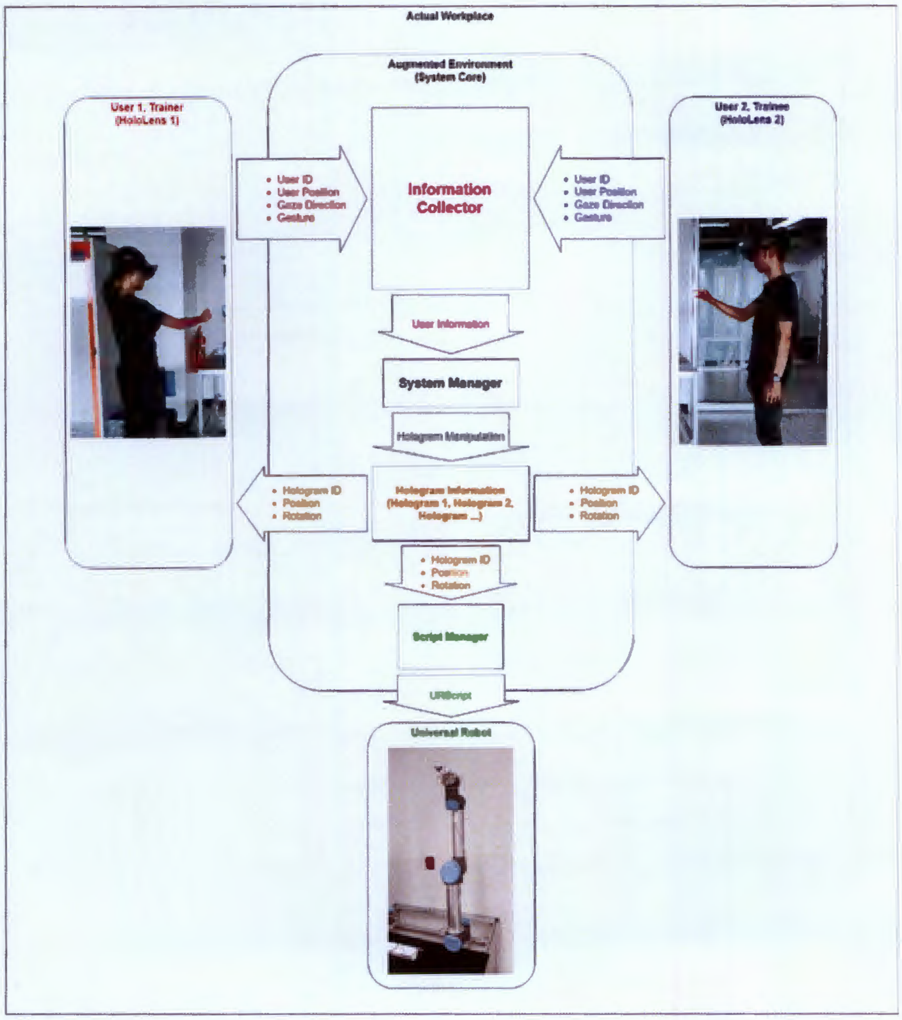


Fig. 1. System overview

During interaction with the augmented environment, all holograms were managed by the system core. So, the users had to sent the information consisted of user's position, gaze direction and gesture to the system core. Then, the processed holograms' information was broadcasted by the system core to all users. Finally, all users were able to visualize the same holograms at a the same time. In the system core, the users' information was utilized by the system manager to synchronize the interactions between users and holograms as shown in Fig. 1.

3 Holograms

In the proposed system, the holograms were the computer graphic display as the 3D object that responded to the gesture and real-world surface [20]. Moreover, it had the potential to mimic the behavior of real object including the industrial robot in the augmented environment.

3.1 Interaction

In the augmented environment, the holograms were interacted by Gaze, Air Tap, and Tap and Hold gestures. The holograms responded to Air Tap as clicking or selecting like a mouse click, Tap and Hold as selecting and dragging like a mouse click and drag. Both gestures were activated after targeting hologram with Gaze gesture.

3.2 Virtual Robot

The virtual robot was used to display the hologram and mimic behavior of the Universal Robot 5 including joint configuration, movement, size, and shape [21]. Multiple users could interact with each part of the virtual robot at the same time with gesture recognition. The virtual robot was constructed from many parts; base, shoulder, elbow, wrist 1, wrise 2, and wrise 3. Each part of a virtual robot was filled with different colors and labeled to help the users to identify each part easily. Moreover, each part was connected together by the configurable joint component and it allowed only one joint to be moved at a time. Each part of the virtual robot was also attached by the rigidbody component for physics simulation [22, 23]. Hence, the virtual robot performed similarly to the real robot as shown in Fig. 2.

3.3 Script Generator

The script generator consisted of two parts, which were a base and a gate. A base was a small gray cylinder with radius of 0.15 m to be snapped with a generated script cube. A gate was a blue ring spinning around itself over a base about 0.5 m. The main role of a script generator was to spawn a script cube when the user finished the manipulation of the virtual robot. During the spawning, a gate played an animation by moving itself down to a base and moving back to the previous position. Finally, a script cube was generate by a script generator then pushed to a base as shown in Fig. 3.

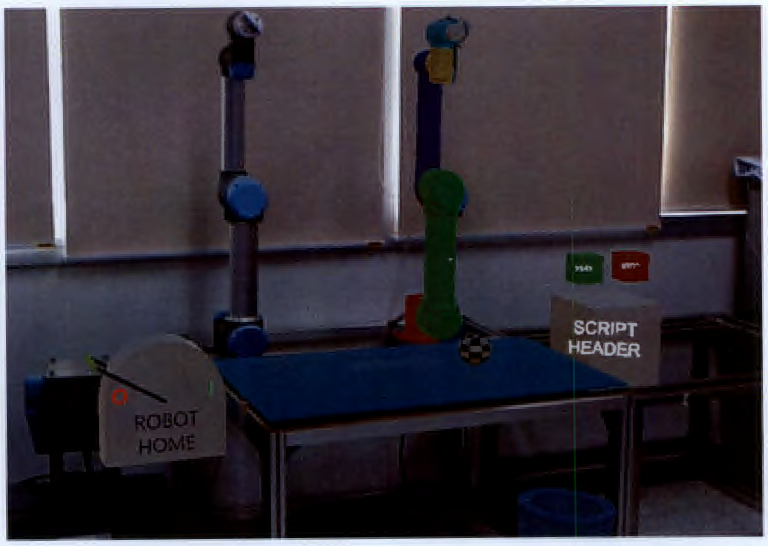


Fig. 2. Virtual robot superimposed on the right-sided real robot

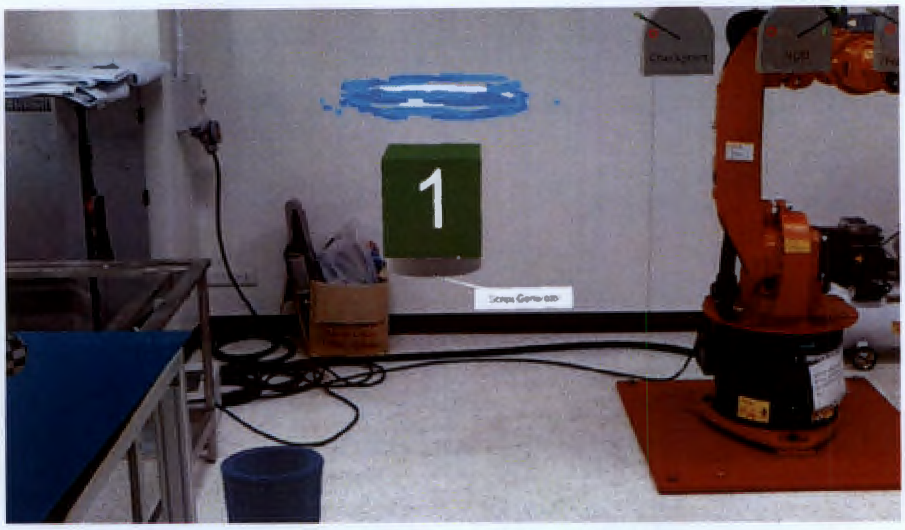


Fig. 3. Script generator

During the spawning, if the previous script cube was still at the base, that previous script cube was moved to the recycle bin automatically.

3.4 Script Cube

The script cube was displayed as a virtual cube sized of 0.3 cubic meter and carried the information of the virtual robot; joint rotation and gripper's action (active, deactive) during spawning of the script cube. Then, the script cube with the random color was

labeled by the number accordingly to the order of spawning. The label was adjusted accordingly to the user's position. Hence, the user could read the label on every point-of-view as shown in. Moreover, a chain of script cube was made by the connections of several script cubes. Such a connection occurred when many script cubes were placed near each other. Finally, a chain connected to the script header displayed a line with gradient color of yellow and red as shown in Fig. 4. Furthermore, the users could rearrange the order of the script cube in a chain. The Air Tap gesture was used to activate the script cube for executing the virtual robot operations such as rotating and picking.

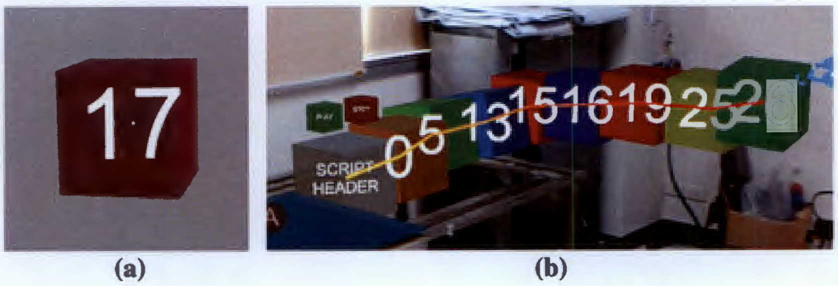


Fig. 4. (a) A script cube (b) A chain of script cube (Color figure online)

3.5 Script Header

The script header was an action executor for a chain of script cube. The users could simulate the virtual robot operation by using Air Tap gesture to a small green hologram of "PLAY" above the script header. Then, the virtual robot performed the operation accordingly to a chain of script cubes. The sequence of the operation began from a script cube which was connected next to the script header and it ran until the end of a chain as shown in Fig. 5.

Fig. 5. Script header (Color figure online)

3.6 Recycle Bin

The recycle bin was used to destroy a script cube. During training, an unnecessary script cube could occur. The recycle bin was used to clean up an augmented environment by moving that unnecessary script cube into it as shown in Fig. 6.

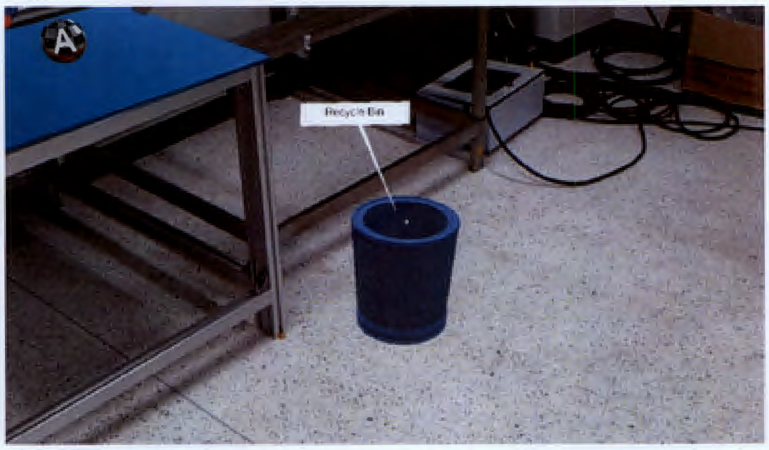


Fig. 6. Recycle bin

3.7 General-Purpose Switch

The proposed system provided many functions that helped the users to clear many script cubes, show the tooltip, and execute a special script cube of driving the robot to the home position. To access those functions, the Air Tap gesture was used to turn the general-purpose switch composing of a label and a controlling handle to be on and off as shown in Fig. 7.

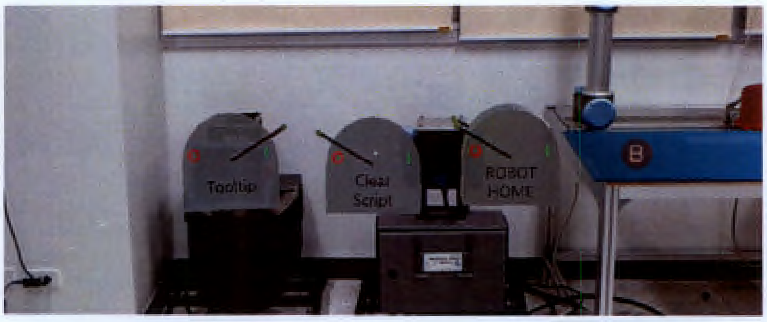


Fig. 7. Holograms of tooltip, clear script, and robot home

4 Coordinate Synchronization

The Unity engine supports the three dimensional coordinate system. The object in the Unity was described by the (x, y, z) position and the rotation about 3 axes. The HoloLens could track its position and rotation accordingly to the real world. Then, the Unity could read the HoloLens' position and rotation to update the user's head's position and rotation in the Unity coordinate or augmented environment coordinate.

In the proposed system, multiple users were able to join the same augmented environment and work place. So, each HoloLens had to synchronize its coordinate to the other one's coordinate. The augmented environment had its own coordinate system which started at the (0, 0, 0) position. To synchronize multiple HoloLenses, a simple solution was to put all HoloLenses at the same position and rotation during starting the proposed system as shown in Fig. 8. Hence, all HoloLenses' coordinates were mapped together and all users were able to interact with the same augmented environment accordingly to the same work place.

Fig. 8. Starting position

5 Experimental Results

To evaluate the proposed system's performance and usability, some experiments were conducted. The system performances such as frame rate was tested by the researcher. To check the usability, users were asked to participate with the proposed system as the trainees. First, the researcher, who was the trainer of this system, gave a brief about the proposed system's overview to the users. Then, the users were trained by the trainer using the Microsoft's Hologram application to operate the HoloLens using its recognized gestures, Air Tap, Tap and Hold, before starting the experiment. Next, experiments were conducted following the below topics. Finally, the feedback was given by the users via the USE Questionnaire [24].

5.1 Experimental Setup

In the experiments occured in the Human-Computer Interface (HCI) Lab, all participants, trainer and trainees, were students at the Institute of FIeld roBOtics, King Mongkut's University of Technology Thonburi. All devices consist of two HoloLens and a PC server connected to a dual-band WiFi router. The HoloLens was connected by 5.0 GHz wireless connection at 120 Mbps and a server was connected by ethernet connection at 100 Mbps. This configuration of the experimental setup was performed by the following below topics.

5.2 System Performance

Frame Rate

To display the holograms, the system had to make the user feel like the holograms were in the real world led to the fast graphics rendering. Normally, the rendering rate that gives the best experience for the user should be at least 60 fps [25]. In the proposed system, the script cube spawned by the script generator consumed the system resource and reduced the rendering performance. Hence, one experiment was set to measure the frame rate of rendering according to the number of the script cube. The frame rate was captured by the windows device portal over Wi-Fi [26] which covered 5 s before and after the spawning as shown in Fig. 9. The system spawned a script cube every 0.25 s while the position of script cube was randomized with radius of 1 m around the script header. The spawning ran until the number of script cube reaching to 30. The expected minimum frame rate was 24 FPS [27].

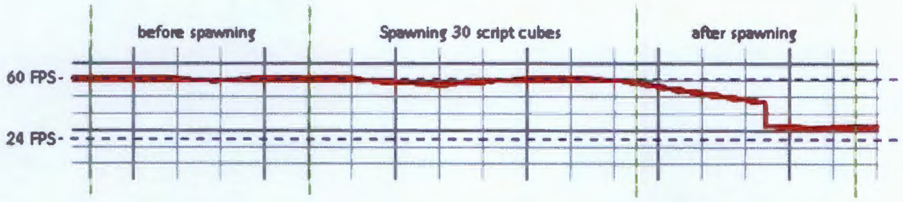


Fig. 9. Frame rates during spawning the script cubes

5.3 Usability

Gesture

In the proposed system, Tap and Hold gesture was mostly used by the user. So, one experiment was set to evaluate the capability of interaction with the holograms by Tap and Hold gesture. The number of user's interactions with the hologram was compared with the number of detected interactions by the system. Nine holograms were spawned in the form of 3 rows by 3 columns. The spawned hologram disappeared when it was

moved far from the original position. The users were asked to move the spawned holograms until it disappeared. The number of Tap and Hold gesture was counted by the researcher. The number of Tap and Hold gesture performed by the users was expected to be 9 times according to the number of the spawned holograms (Table 2).

Table 2. Comparison of the Tap and Hold gesture counted by the reseacher and the system

Participant #	Number of interaction		Error (%)
	Counted by the researcher	Detected by the system	
1	14	9	55.56
2	11		22.22
3	10		11.11
4	12		33.33
5	9		0
6	10		11.11
7	10		11.11
8	12		33.33
Avg.	11.00	9	22.22

Basic Virtual Robot Operation

The virual robot operation was the core in this proposed system. One experiment was set to evaluate the ease of use, ease of learning, and satisfacation on the virtual robot operation. First, the trainer gave a brief about the proposed system. Secondly, the trainee was trained by the trainer to operate the virtual robot. Then, a specific task was given by the trainer to the trainee to operate the virtual robot to pick a virtual object from point A to point B as shown in Fig. 10. Finally, the feedback was given by the users via the USE Questionnaire (Tables 3, 4 and 5).

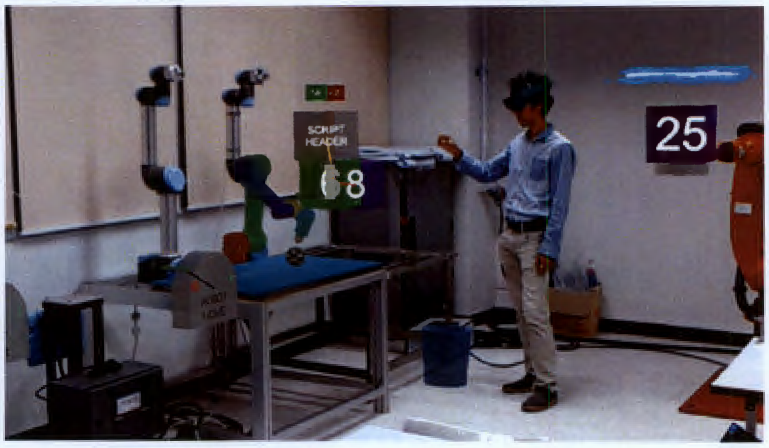


Fig. 10. Trainer's view during the virtual robot operation

Table 3. Result of the ease of use questionnaire (−3 = Strongly disagree, 3 = Strongly agree)

	Avg. score
It is easy to use	1.63
It is simple to use	2.25
It is user friendly	2.00
It requires the fewest steps possible to accomplish what I want to do with it	1.63
It is flexible	1.63
Using it is effortless	1.63
I can use it without written instructions	1.25
I don't notice any inconsistencies as I use it	1.25
Both occasional and regular users would like it	2.13
I can recover from mistakes quickly and easily	1.75
I can use it successfully every time	1.50

Table 4. Result of the ease of learning (−3 = Strongly disagree, 3 = Strongly agree)

	Avg. score
I learned to use it quickly	1.75
I easily remember how to use it	2.38
It is easy to learn to use it	2.63
I quickly became skillful with it	2.25

Table 5. Result of the satisfacation (−3 = Strongly disagree, 3 = Strongly agree)

	Avg. score
I am satisfied with it	1.75
I would recommend it to a friend	2.13
It is fun to use	2.25
It works the way I want it to work	1.75
It is wonderful	2.13
I feel I need to have it	1.75
It is pleasant to use	1.88

6 Conclusions and Future Work

This research proposed the utilization of augmented reality for robot training system. Several holograms were implemented to help multiple users to do On-the-Job Training related to virtual robot operation. Microsoft HoloLens was used to display the interactive holograms which mimiced the behaviors of the real objects, especially the UR5 robot. The system core, which covered chain of script cube, script generator, script header, recycle bin, general-purpose switch, coordinate synchronization, was developed at the Human-Computer Interface (HCI) Lab, Institute of FIeld roBOtics, King Mongkut's University of Technology Thonburi. The system performance and usability

were tested. The result of the experiments showed that the frame rate was decreased from 60 to 30 fps after spawning because several script cubes began the connections among them. So, 30 script cubes still maintained the frame rate higher than the expected minimum frame rate. The error from Tap and Hold gesture was about 22.22% which was acceptable for the operation of the proposed system. Most of users joining the experiments had no experience with HoloLens and robot operation. The result of the virtual robot operation showed that the users strongly agreed that the proposed system was user friendly, easy to learn to use, and fun to use because its holograms provided the natural interaction for the users. In addition, the users slightly agreed that the proposed system was used without written instructions, learned to be used quickly, and users were satisfied with the system because most of users had no experience with holograms and robot operation and they suggested that some parts of user interface needed to be improved.

In the future work, some parts of user interface need improvement according to feedback from the users. In addition, the URScript could be integrated into the proposed system to control the real robot via socket connection and augmented reality. Hence, the real robot can operate accordingly to the virtual robot operation. Furthermore, the spatial mapping needs to be investigated to improve the coordinate synchronization of the proposed system.

References

1. Pike, R.W.: Creative Training Techniques Handbook (1989)
2. Saddler, K.: Developing HR Talent: Building a Strategic Partnership With the Business (2011)
3. Hersey, P.: Management of Organizational Behavior (1982)
4. Doswell, J.T., Mosley, P.H.: Robotics in mixed-reality training simulations: augmenting STEM learning. In: Sixth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT 2006), pp. 864–868 (2006)
5. Syberfeldt, A., Danielsson, O., Holm, M., Wang, L.: Visual assembling guidance using augmented reality. Procedia Manufact. **1**, 98–109 (2015)
6. Cheng, I., Shen, R., Moreau, R., Brizzi, V., Rossol, N., Basu, A.: An augmented reality framework for optimization of computer assisted navigation in endovascular surgery. In: 2014 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, pp. 5647–5650 (2014)
7. Xiaoling, W., Peng, Z., Zhifang, W., Yan, S., Bin, L., Yangchun, L.: Development an interactive VR training for CNC machining. In: Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry, pp. 131–133. ACM, Singapore (2004)
8. Ghandorh, H., Mackenzie, J., Eagleson, R., Ribaupierre, S.D.: Development of augmented reality training simulator systems for neurosurgery using model-driven software engineering. In: 2017 IEEE 30th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), pp. 1–6 (2017)
9. Kwon, B., Kim, J., Lee, K., Lee, Y.K., Park, S., Lee, S.: Implementation of a virtual training simulator based on 360? Multi-view human action recognition. IEEE Access **5**, 12496–12511 (2017)

10. Boschmann, A., Dosen, S., Werner, A., Raies, A., Farina, D.: A novel immersive augmented reality system for prosthesis training and assessment. In: 2016 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI), pp. 280–283 (2016)
11. Santos, I., Dam, P., Arantes, P., Raposo, A., Soares, L.: Simulation training in oil platforms. In: 2016 XVIII Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR), pp. 47–53 (2016)
12. Jo, D., Kim, Y., Yang, U., Choi, J., Kim, K.-H., Lee, G.A., Park, Y.-D., Park, Y.W.: Welding representation for training under VR environments. In: Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry, pp. 339–342. ACM, Hong Kong (2011)
13. Ordaz, N., Romero, D., Gorecky, D., Siller, H.R.: Serious games and virtual simulator for automotive manufacturing education & training. Procedia Comput. Sci. **75**, 267–274 (2015)
14. Cheryl, A.V.: Why switch from paper to electronic manuals. In: Proceedings of the ACM Conference on Document Processing Systems %@ 0-89791-291-8, pp. 111–116. ACM, Santa Fe (1988)
15. Doswell, J.T.: Context-aware mobile augmented reality architecture for lifelong learning. In: Sixth IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT 2006), pp. 372–374 (2006)
16. Unity. https://docs.unity3d.com/Manual
17. Microsoft. https://github.com/Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity
18. Microsoft. https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/spatial_mapping
19. Microsoft. https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/gestures
20. Microsoft. https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/hologram
21. https://github.com/qian256/ur5_unity
22. Unity. https://docs.unity3d.com/Manual/class-ConfigurableJoint.html
23. Unity. https://docs.unity3d.com/Manual/class-Rigidbody.html
24. Lund, A.: Measuring Usability with the USE Questionnaire (2001)
25. Microsoft. https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/Hologram_stability.html
26. Microsoft. https://developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/using_the_windows_device_portal
27. How 24 FPS Became Standard. TWiT Netcast Network (2017)

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล	นายเชาวลิต ธรรมทินโน
วัน เดือน ปีเกิด	26 มีนาคม 2533

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาตรี	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ ปีการศึกษา 2556
ระดับปริญญาโท	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2561
ทุนการศึกษาหรือทุนวิจัย	ทุนวิจัยและพัฒนาสาขาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ สาขาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประจำปีการศึกษา 2559 ทุนประจำหลักสูตรสาขาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ สาขาวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประจำปีการศึกษา 2559
ประวัติการทำงาน	ผู้ช่วยนักวิจัย ห้องปฏิบัติการหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ 2556 - 2559
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์	Chaowwalit Thammatinno and Siam Charoenseang,2018. "Development of Holographic Environment for Multi-user Virtual Robot Training System". Human-Computer Interaction. Interaction in Context, 2018//, Cham, pp. 466-478.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ข้อตกลงว่าด้วยการโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาของนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

วันที่......5.......เดือน......มีนาคม......................พ.ศ...2562.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)........เชาวลิต ธรรมทินโน.. รหัสประจำตัว........59340700001......................... เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับ ○ ประกาศนียบัตรบัณฑิต ☑ ปริญญาโท ○ ปริญญาเอก หลักสูตร........วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต........สาขาวิชา.......วิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ... คณะ........สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม........ อยู่บ้านเลขที่........113................หมู่........16.......... ตรอก/ซอย.......-...ถนน.......-.. ตำบล/แขวง........ศิลา......................................อำเภอ/เขต........เมือง... จังหวัด........ขอนแก่น...รหัสไปรษณีย์.......40000...............เป็น "ผู้โอน" ขอโอนสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาให้ไว้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี ....รศ. ดร.สยาม เจริญเสียง......................ตำแหน่ง ....ผู้อำนวยการ.. เป็นตัวแทน "ผู้รับโอน" สิทธิในทรัพย์สินทางปัญญาและมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง.. ....การทำงานร่วมกันด้วยความจริงเสริมสำหรับระบบฝึกอบรมการควบคุมหุ่นยนต์.. ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ........รศ. ดร.สยาม เจริญเสียง.................................... อาจารย์ที่ปรึกษา และ/หรือ........-...อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์จากมหาวิทยาลัย

3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่าวิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีทุกครั้งที่มีการเผยแพร่

4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรือให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมี

ค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีก่อน

5. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำข้อมูลจากวิทยานิพนธ์ไปประดิษฐ์หรือพัฒนาต่อยอดเป็นสิ่งประดิษฐ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาประเภทอื่น ภายในระยะเวลาสิบ (10) ปีนับจากวันลงนามในข้อตกลงฉบับนี้ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีมีสิทธิในทรัพย์สินทางปัญญานั้น พร้อมกับได้รับชำระค่าตอบแทนการอนุญาตให้ใช้สิทธิดังกล่าว รวมถึงการจัดสรรผลประโยชน์อันพึงเกิดขึ้นจากส่วนใดส่วนหนึ่งหรือทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ในอนาคต โดยให้เป็นไปตามระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

6. ในกรณีที่มีผลประโยชน์เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์หรืองานทรัพย์สินทางปัญญาอื่นที่ข้าพเจ้าทำขึ้นโดยมีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีเป็นเจ้าของ ข้าพเจ้าจะมีสิทธิได้รับการจัดสรรผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญาดังกล่าวตามอัตราที่กำหนดไว้ในระเบียบสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ว่าด้วย การบริหารผลประโยชน์อันเกิดจากทรัพย์สินทางปัญญา พ.ศ. 2538

ลงชื่อ...ผู้โอนสิทธิ

(...)

นักศึกษา

ลงชื่อ...ผู้รับโอนสิทธิ

(....รศ.ดร. สยาม เจริญเสียง....)

ผู้อำนวยการ

ลงชื่อ...พยาน

(...)

ลงชื่อ...พยาน

(...)