複合現実によるウインドウシステムの開発

Development of a Window System Using Mixed Reality

高久　悠杜*　村岡　一信**　木戸　博***

Yuto TAKAKU*　Kazunobu MURAOKA**　and　Hiroshi KIDO ***

概要

Paper documents are increasingly being replaced by electronic data. However, electronic data is not suitable for certain uses such as looking over multiple pages as in a paper document. On the desktop computer, it is possible to look over multiple pages by using multiple displays, but this can only be done indoors. In this paper, we propose a system for placing and operating a personal computer window system in real space using mixed reality (MR). The MR device was self-made by attaching web cameras to an inexpensive head-mounted display (HMD) for virtual reality. In this system, each window is independent of the desktop and can be positioned 360 degrees around the user. The arrangement and operation of a window are performed by the motion of the user's hand, but the HMD controller can also be used. We confirmed the usefulness of this system by performing simple tasks, such as assembling bricks while looking over the assembly diagrams in the multiple windows and evaluating it by questionnaire.

1. はじめに

仮想空間と実空間を融合させる複合現実（MR）は，様々な応用が期待される興味深い分野である．MR の応用の一つとして，様々な情報を実空間に合成することによる作業の効率化が挙げられる．MR によるこれらの研究としては，仮想の家具やネットワーク機器などを実空間に合成し，実際に設置する際のシミュレーションを行うもの[1,2]．溶接作業や工作機械の作業などの訓練を，仮想空間上に表示した器具を用いて安全に行うもの[3,4]．分子構造やネットワークの接続状況などの，目に見えない物を立体的に表示するもの．仮想の書籍や書斎などの物体を実際に存在するかのように表示させるもの[7,8]などが挙げられる．また，情報を実空間に合成する研究として博物館や美術館の展示物に解説などの情報を追加表示させるシステム[9]などがある．本研究ではパーソナルコンピュータ（PC）のウインドウシステムを MR による仮想空間へ拡張する．近年，書類のペーパーレス化が進められ，PC やタブレットなどで閲覧や編集が可能となっているが，紙の文書が持つ一目で全体を見渡せる一覧性は十分ではない．デスクトップ PC では大型ディスプレイの使用やマルチディスプレイにすることによって，ある程度の一覧性を確保することができるが，使用場所がオフィスなどの室内に限定される．一方，MR を利用すれば操作者のまわりの空間すべてに画像を表示することができるため，これをマルチディスプレイの代わりに利用することで一覧性を確保することができる．このため，本論文では，MR を用いて実空間上に PC のウインドウを配置し操作するシステムを提案する．提案システムと似たようなシステムとしてマイクロソフト社の Windows Mixed Reality[10]があるが，このシステムは MR・VR 用ソフトのプラットフォームを目的としており，作業現場で電子データを参照する

2023 年 9 月 29 日受理

＊　宮城県産業技術総合センター　技師

＊＊　工学部情報通信工学科　客員研究員

＊＊＊　工学部情報通信工学科　教授

ような使用法は想定されていない. また, Windows Mixed Reality に対応したデバイスの多くは VR 用のデバイスであり，実空間を見ることができない[11]．本システムでは，オフィス内はもとより，大型ディスプレイやマルチディスプレイの利用が難しい工場や屋外の作業現場等でも，マニュアルや設計図などの電子データを紙ベースの書類と同様に一目で全体が見渡せるようになる．また，キーボードやマウス等の標準的な入力装置がなくともウインドウを操作することができ，ウインドウのグループ化など一覧性を支援する機能も有している．

なお，本論文ではユーザのまわりの空間（ユーザから見える景色）を実空間と呼び，実空間に重ねて表示されるコンピュータグラフィックス（CG）の映像やその座標系を仮想空間と呼ぶことにする．

2. 開発環境

PC として Windows11 を搭載した Dell 社の Inspiron 15 5515（ノート型，CPU Ryzen 5 5600H（3.3GHz）,GPU NVIDIA GeForce RTX 3050,RAM 16GB, SSD 512GB, ディスプレイ 15.6 インチ 1920×1080 ピクセル）を使用し，実空間と CG を合成した映像を表示するためのヘッドマウントディスプレイ（HMD）として Meta Quest2（コントローラ２台付き）（図 1（a）参照），実空間の映像を取り込むための機器として Vintoney 社の WEB カメラ（図 1（b）参照），システム開発用のソフトウェアとして Unity を使用した. また, Unity の機能を拡張するため uWindowCapture[12]というアセットと ZXing[13]というライブラリを用いた. uWindowCapture は Windows の API を用いて PC 上のウインドウをキャプチャし，Unity 上で表示できるようにするアセットであり，ZXing は二次元バーコード（QR コード）の生成や読み取りを行うライブラリである.

図 2 に本システムの構成を示す．図中の CSV ファイルは初期設定を行うためのものである．図 3 にユーザが本システムを装着している状態を示す．屋外などではノート PC をリュックなどに収納して使用することを想定している.

3. MR 用デバイス

MR を実現するための HMD 型のデバイスには ビデオシースルーと光学シースルーなどの種類

（a） MetaQuest2　　（b） WEB カメラ

図 1 使用デバイス

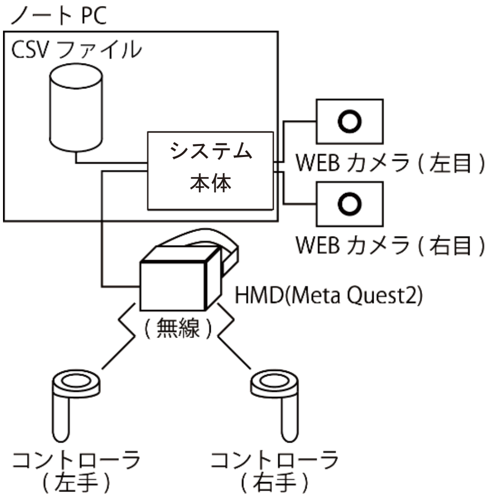


図 2 システム構成

図 3 本システムの装着

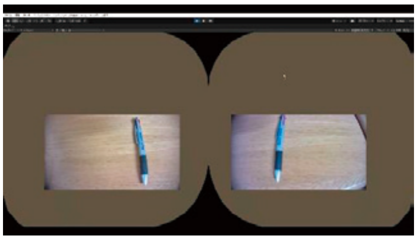
がある[14]．市販の MR 向け HMD は高価であったり，安価な製品は製造中止になっているなど適当なものが見当たらなかったため，本研究では比較的安価なバーチャルリアリティ向けの HMD（Meta Quest2）と WEB カメラを組み合わせることでビデオシースルー型の MR 用デバイスを自作した．ここでは，自作 MR デバイスとその立体視の実現について述べる.

ビデオシースルーの MR を実現するためには，実空間の映像を取り込み，そこに CG を合成させる必要がある．このため WEB カメラを HMD に取り付け，実空間の映像を取り込んだ．人間は主に両眼視差により奥行きを感じているため，WEB

カメラは2台用意し，両眼の距離だけ左右に離して取り付けている（図4(a)参照）．WEBカメラで撮影した映像は，仮想空間上の長方形のポリゴン（オブジェクト）にテクスチャマッピングした．HMDに表示された映像用オブジェクトを図4(b)に示す．

この映像表示用オブジェクトは図5の「映像表示用オブジェクト」に示したように仮想空間において HMDの動き（すなわちユーザの頭の動き）に追従し，常にHMDの前面に表示されるようにしている．このため，HMDを装着したユーザが頭を動かすと，ユーザの周囲360度の実空間を（WEBカメラ越しに）見渡すことができる．一方で，HMDの動きと同期していない（仮想空間に固定された）オブジェクトは，ユーザには空間に固定されているかのように見える．このようなオブジェクトは，PCのウインドウなどの表現に用いる（図5の「ウインドウ表示用オブジェクト」参照）．

(a) WEBカメラの取り付け



(b) 左右の映像

図4 ビデオシースルーの実現

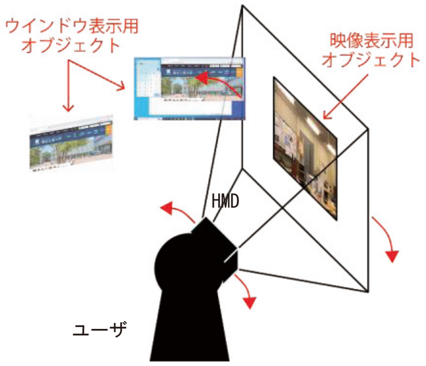


図5 オブジェクトの配置

4. MRによるウインドウシステム

ユーザの周囲にPCのウインドウを配置する方法とその機能，および制御方法について示す．

4.1 MRへのウインドウの配置

本研究では，PCのウインドウのキャプチャとMRへの表示にuWindowCaptureを使用している．本システムのウインドウには，アプリケーションを表示するためのアプリケーションウインドウと，PCの画面を表示するためのデスクトップウインドウの2種類がある．PCにおいては，アプリケーションウインドウは画面の範囲内（すなわちデスクトップウインドウの内側）に表示されているが，本システムではデスクトップウインドウの範囲を超えてアプリケーションウインドウを移動させることができる．このため，ユーザの周囲360度にウインドウを配置することができる．

4.2 ウインドウの操作機能

uWindowCaptureにはウインドウをキャプチャした画像を表示する機能しかなく，メニューやアイコン等を操作する機能はない．このため，これらのウインドウを操作するために仮想的なクリック入力や，仮想キーボードによる入力処理機能を用意した．

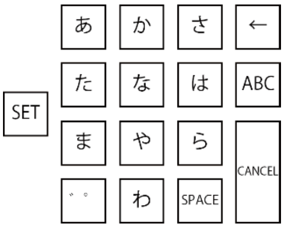
(1) クリック入力機能

クリック入力を行うためには，Windows上の実際のウインドウのポインタ位置が必要となる．このため，仮想空間上のウインドウとWindows上の実際のウインドウの比率を計算し，仮想空間上のポインタの位置から実際のウインドウ上の位置を求め，その位置にクリックイベントを発生させることでクリック入力を実現した．入力はマウスの左ボタンと右ボタンのクリックに相当する左クリック入力と右クリック入力の2種類がある．

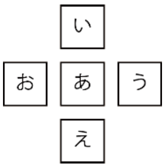
(2) キーボード入力機能

キーボード入力は，フリック入力のような仮想のキーボードを表示させ，それを操作することで行えるようにした（図6参照）．キーボードには「あ～わ」からなる10種類の子音キーと操作を補助するキーがある．これらのキーは左クリック入力を行うことで操作することができる．子音キーを入力すると5種類の母音キーが表示される．例えば，「あ」の子音キーを入力すると「あ」「い」「う」「え」「お」の母音キーが表示される．この母音キーを入力すると，キーボード上のテキスト

ボックスに入力したキーの文字が追加される．キーボードで入力した文字列を使用するには，キーボード左端のセットキー（「SET」と書かれたキー）を入力する．これにより文字がクリップボードに送信され，Windows 側に引き渡される．



(a) 初期状態（子音キーの表示）



(b)「あ」を選択した場合の母音キー

図 6 仮想のキーボード

4.3 ウインドウの制御方法

本システムで使用した HMD には，ユーザの手首の位置やその向き，また，親指が他の指と接触しているかどうかを検出するハンドトラッキングと呼ばれる機能がある．ユーザの手が認識されている間はユーザの手が映っている位置に CG による手が重なって表示される．本システムでは，この機能をウインドウの制御に用いる．なお，本論文では親指と他の指を接触させる動作をジェスチャと呼ぶことにする．また，ここでは利き手を右手として説明を行う．

ユーザがウインドウを自由に配置できるようにするため，本システムを立ち上げた直後では，ウインドウは利き手の位置に追従して動くようにした．この状態で左クリック入力を実行すると，ウインドウはその位置に固定され，HMD を装着した頭部や利き手を動かしても移動しなくなる．ウインドウの配置が完了した後，利き手側の CG から前方へ赤色の光線が伸びる．この光線が，ウインドウやキーボードなど操作可能な CG のオブジェクトに当たると，その交点に水色の円（ポインタ）が表示される（図 7 参照）．その状態でウインドウへのクリック入力やキーボードによる操作などを行うことができる．光線の色はその段階で行える入力の内容（入力モード）により変化する．通常のクリック入力モードでは赤色である．なお，両手が塞がって手やコントローラが使用できない場合は，光線の発射位置を HMD の中央に変更することもできる．利き手ではない方の CG には，その位置に追従してキーボードなどが表示される．

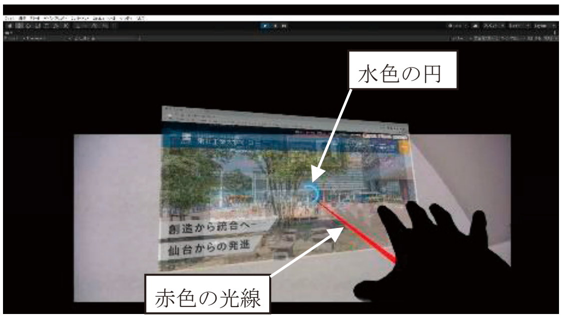


図 7 ハンドトラッキングによる操作

5. システムの操作

本システムはジェスチャや HMD のコントローラ，音声で操作する．

5.1 ジェスチャによる操作

本システムの主な操作は手の指のジェスチャで行う．操作とそれに対応するジェスチャを表 1 に示す．

ハンドトラッキングを使用した状態で作業を行うと，手の CG によって手元が見えなくなったり，手に物を持った際にジェスチャとして誤認識される場合がある．そのような事態を想定し，一時的にハンドトラッキングを停止するモード（作業モード）を用意した．作業モードを実行すると手の CG と光線の表示が消え，作業モードの解除以外の操作は行えなくなる．作業モードの解除は作業モードの実行と同じジェスチャで行う．

表 1 ジェスチャによる操作

操作	ジェスチャ
左クリック入力	右手の人差し指と親指を接触させる
右クリック入力	右手の中指と親指を接触させる
キーボードの表示	左手の人差し指と親指を接触させる
メニューの表示	左手の中指と親指を接触させる
作業モードの実行	左手の薬指と親指を接触させる

5.2 音声による操作

本システムは主に両手を使用して操作するが，手が塞がった状態でも操作できるように，音声入力機能を用意した．音声はHMDに装着したWEBカメラに内蔵されているマイクで取得し，ユーザが特定のキーワードを発声した際に，そのキーワードに該当する動作を実行する．その際，動作が正しく実行されたことを示すために，行われた動作をアナウンスする音声が再生される．

5.3 コントローラによる操作

ハンドトラッキングが正しく実行できない場合を想定し，Meta Quest2に付属されているコントローラでも操作を行えるようにした．コントローラを使用している場合は，手のCGではなくコントローラのCGが表示される．操作方法を表2に示す．

表2. コントローラによる操作方法

操作	コントローラのトリガー
左クリック入力	右側の人差し指のトリガー
右クリック入力	右側の中指のトリガー
キーボードの表示	左側の人差し指のトリガー
メニューの表示	左側の中指のトリガー

6. ウインドウシステムの補助システム

本システムを用いた作業を効率的に行えるようにするための補助機能について説明する．

6.1 メニュー画面

補助システムを簡単に利用できるようにするためメニュー画面を用意した（図8参照）．メニュー画面のボタンに左クリック入力を行うことにより，そのボタンに対応する補助システムの機能を実行することができる．メニューは「メニューの表示」の操作を行うとキーボードと同様に利き手ではない方の手に追従して表示される．もう一度操作すると表示が消える．

図8 メニュー画面

6.2 操作に関する補助システム

本システムは操作方法を複数用意してある．メニューから対応するボタンを操作することにより，「ハンドトラッキングとコントローラの切り替え」と「光線の発生位置の切り替え」，「音声入力の使用」を行うことができる．これらの操作方法は組み合わせることもでき，ハンドトラッキングでの操作を行いながら音声入力を使用するなどの併用が可能である．

6.3 ウインドウに関する補助システム

本機能はウインドウの表示や位置を変更するものである．これには,「ウインドウの移動」,「透明度の変更」,「ウインドウのグループ化」がある．「ウインドウの移動」ではウインドウの配置を変更することができる．実行すると入力モードがウインドウ移動モードとなり，その状態でウインドウに対して左クリック入力を実行すると，手の位置や傾きに合わせてウインドウを配置することができる．また，右クリック入力を実行すると，ウインドウをデスクトップウインドウの範囲内に戻すことができる．「透明度の変更」では，ウインドウの透明度を0〜100%の範囲内から10%刻みで変更できる．図9に透明度を70%に変更したウインドウを示す．「ウインドウのグループ化」は複数ページのマニュアルなどを使用する際に，一覧性を高めるための機能である．実行すると，表示されているウインドウが3行3列に並べられて表示される（図10参照）．このとき，最初のウインドウが上段左側，2番目が上段中央，3番目が上段右側，4番目が中央段左側，というように配置される．グループ化実行中はメニューに「左シフト」と「右シフト」の2つのボタンが表示される．各ボタンに左クリック入力すると，ウインドウの表示位置がボタンの方向に入れ替わる．すなわち，左シフトの場合は左隣りまたは上の段の右側に移動し，右シフトの場合はウインドウの位置が右隣りまたは下の段の左側に移動する．

図9 透明度70%のウインドウ

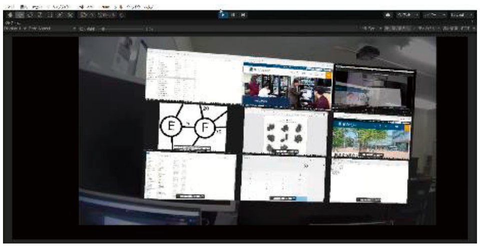


図 10 ウインドウのグループ化

6.4 スクロールに関する補助システム

本機能ではウインドウのスクロール操作を行うことができる．実行するとメニューに「▲」と「▼」，「●」の 3 種類のボタンが表示される（図 11 参照）．三角形のボタンに左クリック入力を行うと，その時に選択しているウインドウが上または下向きにスクロールする．丸のボタンに左クリック入力を行うと，その段階で PC のマウスカーソルがある座標にホイールクリック（中クリック）を行う．

6.5 カメラに関する補助システム

本機能は HMD に装着した WEB カメラを応用した機能である．この機能には，「カメラの撮影」と「ズーム機能」がある．「カメラの撮影」では右側の WEB カメラの映像を画像として保存することができる．「ズーム機能」は手元で細かい作業を行う際の補助としての機能であり，WEB カメラの映像の一部を拡大して表示できる（図 12 参照）．ズームした映像は画面の中央に表示される．ズームの倍率は 2 倍，3 倍，4 倍の 3 種類があり，メニューから選択することで倍率を変更することができる．

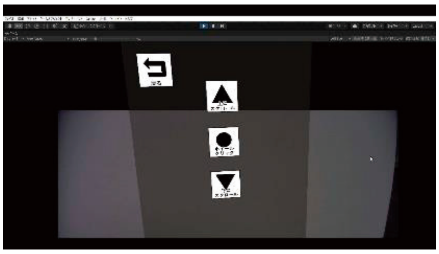


図 11 スクロール画面

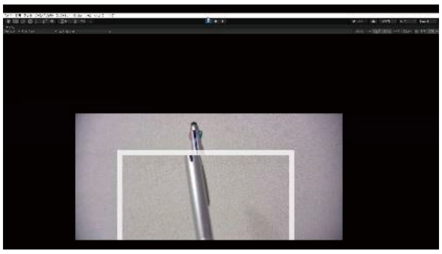


図 12 ズーム画面

6.6 情報表示に関する補助システム

本機能はシステムを使用している際の情報を表示するものである．これを実行するとウインドウマップ，時計，インフォメーションが表示される（図 13 参照）．ウインドウマップは各ウインドウの位置を表したものであり，ウインドウを見失った場合などに位置を確認するためのものである．時計は現在の時刻と年月日を表示する．インフォメーションは現在の入力モードや使用している補助システム，音声入力を使用した際のアナウンスなどを文字で表示することができる．

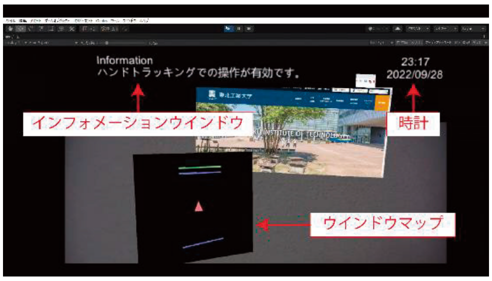


図 13 情報表示画面

6.7 ソフトウェアに関する補助システム

本システムは，マルチディスプレイなどの大画面の PC を普段使用できない屋外環境などでの利用も想定している．例えば保守点検作業でのマニュアルや図面の確認，チェックリストへの記入などである．これらの作業を効率的に行えるようにするために，作業に必要なソフトウェアやファイルを簡単に実行できる機能を用意した．ソフトウェアを実行する方法には QR コードと音声入力の 2 種類がある．QR コードを用いた方法では，特定の文字列の QR コードを WEB カメラで撮影する（ユーザが凝視する）ことでソフトウェアを実行することができる．音声入力では，ユーザが特定の起動コードを発声することにより実行する．本機能を使用するには，事前準備として CSV ファイルに QR コードの文字列と音声入力での起動コード，実行させるソフトウェアのパスを入力しておく．QR コードは ZXing の機能を用いて作成する．そうすると本システム実行中に，ユーザが QR コードの撮影や音声入力を行うと，CSV ファイルに記入されたソフトウェアが起動し，利用できるようになる．この QR コードを作業現場に貼り付けておけば，ユーザは QR コードを見るだけ

で作業に必要なソフトウェアを利用できるようになる．また，音声入力が使用できる環境であれば，さらに手軽にソフトウェアを起動させることができる．

6.8 ショートカット機能

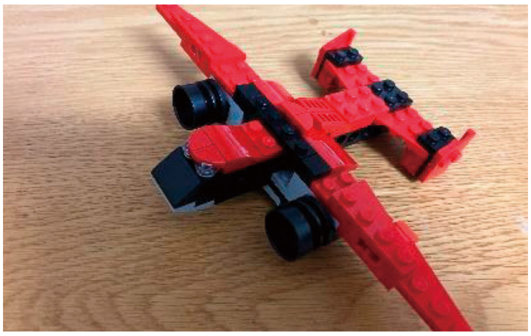
各補助システムはメニューから実行できるが，そのためには複数の手順を踏む必要があり，操作が煩雑になる．そこで，機能の操作方法をある程度理解したユーザ向けにショートカット機能を用意した．これにより 6.2〜6.7 で説明した機能を簡単に実行することができる．また，コピーや全選択などの Windows に実装されているキー入力によるショートカットも実行できるようにした．この機能の使用は，利き手から伸びる光線がウインドウやボタンなどと接触していない場合にのみ可能である．その状態で利き手の親指とそれ以外の 1 本の指を合わせるジェスチャを行うことで，各ジェスチャに割り振られたショートカットを実行できる．また，音声入力で事前に設定した起動コードを発声することでもショートカットを行える．ショートカットは事前に CSV ファイルにショートカットの内容，起動コードを入力することで割り当てることができる．ジェスチャでの割り当ては 4 つまで，音声入力での割り当ては無制限に行える．

7. システムの評価

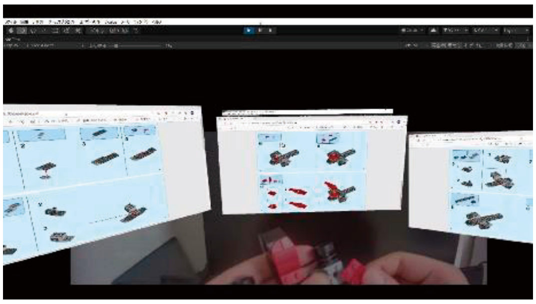
本システムが実際の作業に利用できるかどうかを試すため，立体ブロックの組み立て作業を行った．また，本システムを評価するためにアンケートを実施した．

7.1 組み立て作業

立体ブロックの組み立て図が表示された 3 つのウインドウをユーザの周囲に配置し，紙の組み立て図を使用した場合との差異を調査した．図 14（a）に組み立てる立体ブロックを，（b）に組み立て作業中の画面を示す．紙の設計図を使用した場合は部品を確認する際に，その都度組み立て図を参照するために頭を動かす必要があった．本システムを使用した場合は正面に組み立て図が表示されるため，組み立て図を参照する際にほとんど頭を動かす必要がなかった．このため，組み立て図中の部品と実際の部品の比較が行いやすいと感じた．



（a）立体ブロック



（b）組み立て作業中の画面

図 14 組み立て作業での検証

7.2 アンケートによる評価

本システムの特徴は大型ディスプレイやマルチディスプレイが使用できないような環境（屋外や工場等の作業現場等）でも一覧性を確保できる点にある．被験者の拘束時間や疲労を考慮すると，すべての機能を調査対象とすることは現実的ではないためシステムの一覧性と，使用感として WEB カメラの視認性，ハンドトラッキング機能，ウインドウの操作性，メニューの操作性，VR 酔いに絞ってアンケートを実施した．対比用の PC には開発環境として用いたノート PC を使用した．

(1) 一覧性の評価

一覧性についてのアンケートでは，図 15（a）のような A から始まるアルファベットが書かれてあるノード（丸）とエッジ（線）から構成される経路図を用いた．被験者に経路図を見せ，左上のスタート地点からゴール地点まで，エッジを辿る経路の内，図中の線の側にある数字の合計が最小となる経路を探す問題を解かせた．この問題を PC と本システム上で行わせ，それぞれの所要時間とシステムの一覧性について評価させた．一覧性の評価は 5 段階評価で行った（1 が最も一覧性が低く，5 が最も高い）．なお，PC を使用する場合は PDF ファイルを用いて経路図の 1/9 のみが見えるようにし（図 15（b）参照），本システムを使

用する場合は 9 つの画像ビューアを開き，それをグループ化機能で表示させるようにした．アンケートの実施は，最初に練習として A4 サイズの紙に印刷した経路図を用いて行い，次に PC，最後に本システムの順番で行った．被験者は 21～25 歳の男性 13 名である．アンケート結果を図 16 に示す．（a）に所要時間ごとの箱ひげ図を，（b）に同一被験者が PC を使用した場合と本システムを使用した場合の所要時間の散布図を示す．散布図の対角線より下側に丸があれば，その被験者が本システムを使用した場合の方が所要時間が短かったことを表し，上側にあれば PC を使用した場合の方が所要時間が短かったことを表している．図 16（a）より，PC を使用した場合の所要時間の中央値は 3.48 分，本システムを使用した場合は 1.28 分で，PC を使用した場合の約 1/3 に短縮されている．PC を使用した場合は所要時間の四分位範囲は 4.55 分でばらつきが大きいが，本システムを使用した場合では四分位範囲が 1.33 分とばらつきが小さくなっており，総じて本システムを使用した場合の方が，所要時間が短縮され個人差が少なくなった．図 16（b）より，1 名を除き本システムを使用した場合の方が所要時間が短くなっており，2 分以内に解答している被験者が PC では 2 名（約 15.4%）なのに対し，本システムでは 10 名（約 77%）だった．次に，一覧性の評価結果を図 17 に示す．（a）に箱ひげ図を，（b）に同一被験者による PC と本システムの一覧性の評価の散布図を示す．散布図の対角線より上側に丸があれば，その被験者の評価は本システムの方が高かったことを，下側にあれば PC の方が高かったことを，対角線上にあれば等しかったことを表している．図 17（a）より PC を使用した場合の評価の中央値が 2 であるのに対し，本システムを使用した場合は 4 となった．評価のばらつきも PC の四分位範囲が 3 であるのに対し本システムの四分位範囲は 2 で，評価の個人差が少なくなっていることがわかる．図 17（b）より，対角線の上側に多く集まっており，本システムの方が PC より良好と判断している被験者が多いことがわかる．また，PC の評価には 1 や 2 が含まれるのに対し，本システムの評価はすべて 3 以上であることからも本システムの優位性がわかる．個別データを調べると，本システムの方が良好だった被験者は 8 名，PC の方が良好だった被験者は 2 名，同じだった被験者は 3 名であり，本システムの方が良好という評価をした被験者が過半数に達していた．また，4 以上の評価を付けた被験者も 9 名（約 69%）いた．

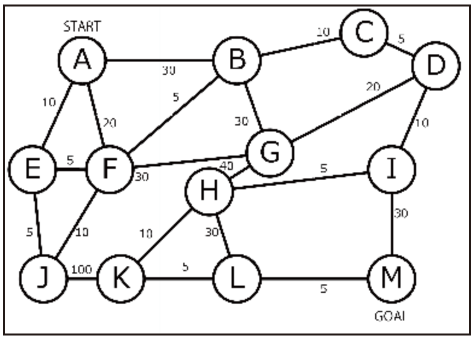
PC を用いた場合と本システムを用いた場合の違いを比較するため検定を行った．サンプル数が少ないため符号付き順位和検定を用いた．その結果，統計的な有意差が認められた（順位和 S=4，有意水準 5%）．そのため，本システムを使用した場合の方が問題を解く所要時間が短縮されたといえる．また，一覧性の評価でも同検定を行ったところ，こちらも統計的な有意差が認められた（順位和 S=5.5，有意水準 5%）．そのため，一覧性の評価も本システムの方が PC よりも上回ったといえる．

PC を用いたとき所要時間が長くなった原因としては，経路図の問題を解く際はノード間の接続とエッジに対応する数字を把握する必要があるが，PC では経路図が全体の 1/9 しか見えないため，ノード間の接続が把握しにくくなっていたこと．エッジが複数のページをまたぐ際，エッジの数字は 1 つのページにしか記載されていないため，数字を確認するために複数のページを確認する必要があったことなどが挙げられる．一方で本システムを使用した場合は画像全体を並べて表示することができるため，一覧性が向上しノード間の接続やエッジに対応する数字を一目で把握することが容易であったので，PC よりも所要時間が短縮できたものと思われる．

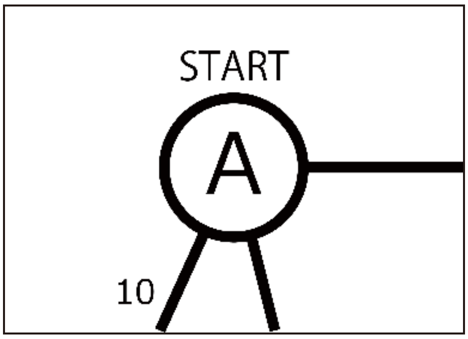
一覧性の評価について，大多数の被験者が本システムの方が PC より良好と回答したのに対し，2 名の被験者が PC の場合の方が良好と回答している．この理由としては，PC は日常的に使用する機会が多く，初体験となる本システムよりも被験者が慣れていたことが要因ではないかと考えられる．しかし，その 2 名も本システムを使用した場合の方が PC を使用した場合よりも所要時間が短縮されており，本システムに慣れれば評価は改善されるのではないかと思われる．

(2) 使用感の評価

使用感のアンケートは経路図のアンケートの後に行った．ウインドウ移動機能と左クリック入力の操作を試してもらい，システムを使用した感

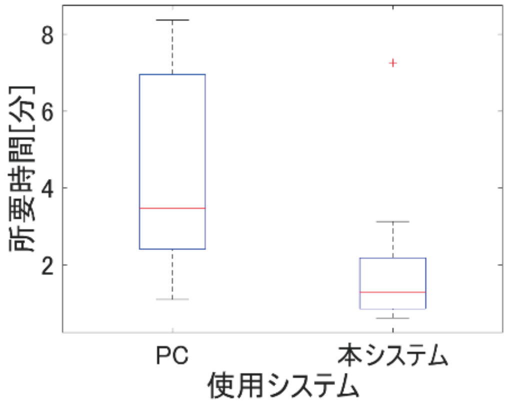


（a）経路図の全体

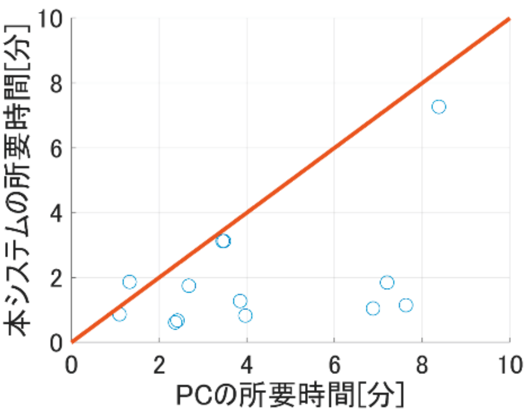


（b）分割した経路図

図 15 使用した経路図

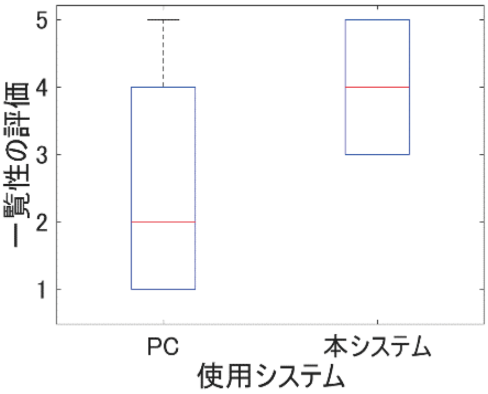


（a）箱ひげ図

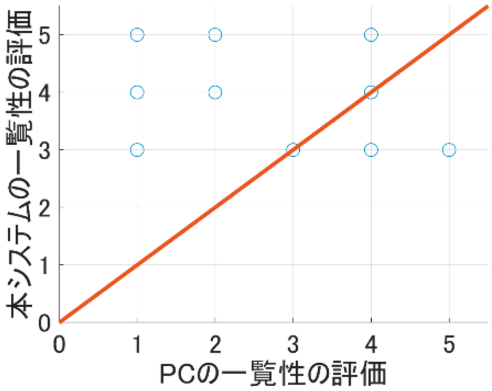


（b）散布図

図16 問題を解く所要時間



（a）配置のイメージ



（b）実際のウインドウ配置

図17 一覧性の評価

想について質問した．質問項目は「WEB カメラの視認性」，「VR 酔いの度合い」，「ハンドトラッキングの使用感」，「ウインドウの操作性」，「メニューの操作性」の 5 項目であり，それぞれの評価は 5 段階評価で行った（1 が最も低く，5 が最も高い）．図 18 に使用感の評価の箱ひげ図を示す．図 18 より，WEB カメラの視認性の評価の中央値が 3.5，VR 酔いの度合いの中央値が 1 となった（VR 酔いの評価は 1 が酔わない, 5 が酔うとした 5 段階）．この 2 つの項目は四分位範囲が 1.5 以下でばらつきも小さいので，WEB カメラの映像には大きな問題はなく，VR 酔いもほとんどないといえる．操作性に関しては，メニューの操作性の中央値 4 と比較的高かったのに対して，ハンドトラッキングの使用感とウインドウの操作性は共に中央値 3 と中間の評価となった．これはシステムの操作に慣れが必要な部分があることが原因だと考えられる. Meta Quest2 のハンドトラッキングは HMD のカメラで手を検出して行われるが，手の映り方により精度が変化する．そのため，左クリック入力だけのメニューの操作性の評価は

高くなったが，左クリック入力をしながら手を移動しなければならないウインドウの操作では，手が HMD のカメラで正しく検知できない位置になる場合があったことから低くなったと考えられる．これは指がカメラに写るように意識して操作することによりある程度対策できるが，そのような操作には慣れが必要である．この影響は箱ひげ図にも現れており，メニューの操作性の四分位範囲は 1 とばらつきが小さくなっているのに対して，ハンドトラッキングの使用感とウインドウの操作性の四分位範囲は共に 2 とばらつきがやや大きくなっている．これは被験者が，本システムの操作にすぐ慣れた者と短時間で慣れることができなかった者に分かれたことが原因だと考えられる．このような慣れを要する操作性は本システムの改善すべき点と考える．

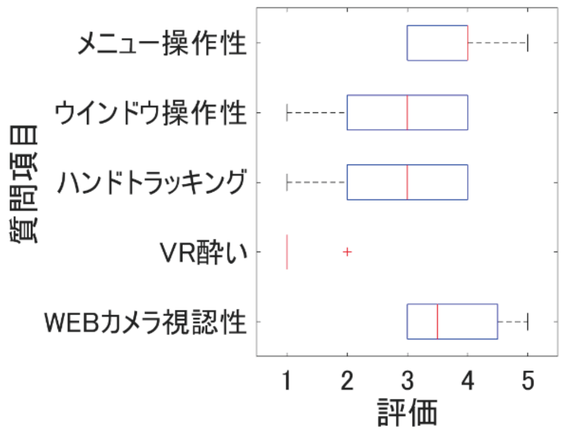


図 18 使用感の評価

8. まとめ

ユーザの周りの空間に PC のウインドウを配置し操作する MR システムを提案した．本システムには PC の操作に必要な入力処理の機能と，作業効率化のための補助システムが含まれる．また，ハンドトラッキング，音声入力，コントローラで操作することができる．

本システムにより，PC のウインドウをユーザの周囲に表示させ操作することが可能であり，電子データの一覧性が実現できること，電子データを参照しながら作業することが可能であることを確認した．また，アンケート調査によりノート PC より本システムの方が一覧性で優っていること，VR 酔いなどの副作用も少ないことなどを明らかにした．

今後の課題としては，慣れがなくとも直感的に扱える操作方法の実装，ハンドトラッキングの精度の改善，ハードウェアの軽量化，アンケートの被験者を多くしてより正確な統計的な評価を行うことなどが挙げられる．

参　考　文　献

[1] 大寺，古矢，岡田，“MR を用いた家具に対する部屋環境の可視化，” 研究報告デジタルコンテンツクリエーション， 2015-DCC-11, No.3, pp.1-6, 2015

[2] 後安，井口，“MR によって実空間に実務環境を再現するネットワーク設計補助システムの検討，” インターネットと運用技術シンポジウム論文集, 2019, pp.39-46, 2019

[3] 榊原, 坂田, 水野,“溶接作業訓練支援のための VR/AR 技術を用いた作業の三次元可視化，” 研究報告デジタルコンテンツクリエーション， 2018-DCC-19, No.3, pp.1-7, 2018

[4] 橋本，御簾納，加藤，“実機を利用した汎用工作機械作業の複合現実感システム, ”精密工学会誌, 77 巻, 12 号, pp.1175-1179, 2011

[5] 坂本，関嶋，“Mixed Reality による創薬支援システムの開発と応用，”研究報告バイオ情報学, 2017-BIO-50, No.43, pp.1-6, 2017

[6] 小林，大澤，高野，佐久田，“Hololens を用いた Wi-Fi 接続情報の可視化，” 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション, 2019-HCI-181, No.16, pp.1-6, 2019

[7] 平澤，山元，杉山，松川，何，小南，“博物館鑑賞支援 MR ブックビューアの開発，” 第 81 回全国大会講演論文集, 2019, No.1, pp.3-4, 2019

[8] 大和田，佐藤，成見，“Mixed Reality 空間における仮想書斎システムの開発，” エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, 2015, pp.127-130, 2015

[9] 北村，“展示鑑賞に AR 技術を利用し文化遺産自身とデジタル情報を融合させたインタラクションの評価，” 研究報告ヒューマンコンピュータインタラクション, 2018-HCI-177, No.23, pp.1-8, 2018

[10] Windows Mixed Reality Headset + Motion Controllers ：特長 - FMWORLD.NET（個人）：富士通パソコン, https://www.fmworld.net/fmv/option/1712/motion_controllers/，2017，(参照 2022/10/28)

[11] 板宮，“VR/AR によるシミュレーション結果の可視化から体験化，経験化へ : 防災教育等への応用，” 日本臨床麻酔学会誌, Vol.41, No.1, pp.109-114, 2021

[12] GitHub - hecomi/uWindowCapture: Unity asset to capture windows and make them available in Unity as Texture2D，https://github.com/hecomi/uWindowCapture, 2019，(参照 2022/10/28)

[13] GitHub - zxing/zxing: ZXing （"Zebra Crossing"） barcode scanning library for Java, Android, https://github.com/zxing/zxing，2016，(参照 2022/10/28)

[14] 舘，”バーチャルリアリティ入門，”筑摩書房，2002