筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

部屋の3次元縮小モデルを用いた MR空間内における仮想オブジェクト配置

井原 圭一

指導教員　川口 一画，志築文太郎

2022年2月

概要

本研究では，深度カメラを用いて部屋の 3 次元縮小モデルを構築し，MR において Worlds in Miniature（WiM）手法を利用可能にする．これにより，オブジェクトを 3 次元空間に自由に配置でき，配置を変更したオブジェクトの位置を即座に確認できるシステムを提案する．本研究では，まず，システムの基本設計を示すためにプロトタイプを作成した．その後，今後のシステム設計の指針を得るために，レイキャスト操作による実尺オブジェクトの操作および直接操作による縮小オブジェクトの操作を比較する実験を実施し，それらの操作手法の特性およびその特性に影響を与える MR デバイスの特性を調査した．その結果，直接操作による縮小オブジェクトの操作は，オブジェクトの探索，移動，および身体的負担において有効であるが，スケーリング操作が困難であることが示された．また，これらは MR デバイスの視野角およびハンドトラッキングの精度による影響が示唆され，今後のシステム設計における指針が得られた．

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1　背景 1
1.2　目的とアプローチ 2
1.3　本論文の構成 2

第 2 章　関連研究 **4**
2.1　オブジェクトの操作手法 4
2.1.1　MR におけるオブジェクトの操作手法 4
2.1.2　VR におけるオブジェクトの操作手法 5
2.2　深度情報の活用事例 5
2.2.1　深度情報を用いた製品 5
2.2.2　深度情報を用いた研究 6
2.3　本研究における設計指針 6

第 3 章　プロトタイプ **7**
3.1　システム構成 7
3.2　実尺オブジェクトと縮小オブジェクトのリンク 7
3.3　仮想オブジェクトの配置 8
3.3.1　仮想オブジェクトの探索 9
3.3.2　仮想オブジェクトの移動操作 10
3.3.3　仮想オブジェクトのスケーリング操作 12

第 4 章　評価実験 **14**
4.1　実験条件 14
4.2　実験タスク 14
4.3　実験手順 16
4.4　実験参加者 17
4.5　評価項目 17
4.5.1　操作時間 17
4.5.2　手の移動距離 17
4.5.3　ユーザビリティの評価 18
4.5.4　作業負荷 19

第 5 章　実験結果 **20**
5.1　分析データの前処理 20
5.2　操作時間 20
5.2.1　全体の操作時間 21
5.2.2　探索時間・移動時間・スケーリング時間 22
5.3　手の移動距離 23
5.4　SUS 24
5.5　NASA-TLX 26
5.5.1　総合的な作業負荷 26
5.5.2　各項目に関する作業負荷 26
5.6　自由記述アンケート 27

第 6 章　考察 **28**
6.1　オブジェクトの探索 28
6.2　オブジェクトの移動 28
6.3　オブジェクトのスケーリング 28
6.4　本実験の結果のまとめおよび今後のシステムの設計指針 29

第 7 章　今後の課題 **30**
7.1　類似手法との比較 30
7.2　より具体的な実験タスクによる実験 30
7.3　アプリケーションの評価 31
7.4　メッシュ表現の選定 31

第 8 章　まとめ **32**

謝辞 **33**

参考文献 **34**

図目次

1.1 プロトタイプの概要．（a）部屋に仮想オブジェクト（植木鉢，時計，および絵画）が配置されている．（b）ミニチュアを表示し，仮想オブジェクトの配置を確認する．（c，d）直接操作によってミニチュア内にある縮小されたオブジェクトの配置を変更する．（e）ミニチュア内のオブジェクトの配置はリアルタイムに実尺のオブジェクトに反映される． 3

3.1 HoloLens2 により取得した部屋のメッシュ． 8
3.2 ミニチュアを用いた探索． 9
3.3 レイキャスト操作を用いた移動操作．仮想オブジェクトである植木鉢の移動を行う．（a）仮想オブジェクトに掌を向ける．（b）親指と人差し指を使い，仮想オブジェクトをつまむ．（c）掌を目的の位置に向ける．（d）指を離し，移動を完了する． 10
3.4 ミニチュアを用いた移動操作．仮想オブジェクトである植木鉢の移動を行う．（a）親指と人差し指を使い，仮想オブジェクトをつまむ．（b）手を目的の位置に移動する．（c）指を離し，移動を完了する． 11
3.5 レイキャスト操作を用いたスケーリング操作．仮想オブジェクトである植木鉢のスケーリングを行う．（a）仮想オブジェクトに両手の掌を向ける．（b）親指と人差し指を使い，仮想オブジェクトをつまむ．（c）両手の間の距離を変えることにより大きさを変化させる．（d）指を離し，スケーリングを完了する． . 12
3.6 ミニチュアを用いたスケーリング操作．仮想オブジェクトである植木鉢のスケーリングを行う．（a）親指と人差し指を使い，仮想オブジェクトをつまむ．（b）両手の間の距離を変えることにより大きさを変化させる．（c）つまんだ指を離し，スケーリングを完了する． 13

4.1 実験環境．ユーザは Hololens2 を装着し，レイキャスト操作を行っている． . 15
4.2 球の配置候補点（青点はユーザの初期位置のため表示しない）．（右）下段は床から 0.25m の高さに位置する． 16
4.3 （a）*Real-scale* の操作の様子．（b）*Minimized* の操作の様子． 16

5.1 各条件の全体の操作時間． 21
5.2 各条件の探索時間・移動時間・スケーリング時間を示す． 22
5.3 各条件の手の移動距離を示す． 23

5.4 各質問項目の結果を示す．偶数項目は値が高いほど，ユーザビリティが低い．奇数項目は値が高いほど，ユーザビリティが高い． 24
5.5 SUS の得点を示す．得点が高いほど，ユーザビリティが高い． 25
5.6 各項目の結果およびそれらに基づき算出された NASA-TLX の総合的な作業負荷の結果を示す．値が大きいほど，その項目の負荷が高いことを示す． . . . 27

表 目 次

4.1 本実験にて利用した SUS の質問項目. 18
4.2 本実験にて利用した NASA-TLX の質問項目. 19

第1章　序論

本研究では，部屋の 3 次元縮小モデルを用い，MR 空間内における仮想オブジェクト配置を支援するシステムを提案する．本章では，本研究の背景として，MR における仮想オブジェクト配置における課題を説明する．次に，本研究の目的とアプローチおよび本論文の構成を示す．

1.1　背景

Microsoft 社の HoloLens[1] に代表される Mixed Reality（MR）デバイスは，実空間上に仮想オブジェクトを重畳表示することが可能である．さらに，ユーザはコントローラやハンドトラッキングを用いた操作によって，表示された仮想オブジェクトに対してインタラクションを行うことも可能である．近年では，NrealLight[2] ような比較的安価な製品も販売されており，今後 MR デバイスが広く普及し日常的に用いられるようになると考えられる．MR デバイスを日常的に用いる場合，自身の周辺環境に仮想的な情報を重畳し拡張していく用途が考えられる．例えば，ニュースや新着メッセージ，自身の予定等を提示する情報ウィンドウを部屋のいたるところに分散配置することが考えられる．このような用途を想定する場合，周辺環境の任意の位置に，任意の大きさで仮想オブジェクトを配置できる必要がある．この場合，既存の PC のような 2 次元のインタフェース内でオブジェクトを移動させるのとは異なり，奥行き方向の操作が必要となる．しかし，仮想オブジェクトの奥行き方向の正確な認識は困難であることが分かっている [3] ため，操作に時間がかかり，身体的負担が大きいと考えられる．

これまでの研究では，操作時間の短縮および身体的負担の軽減のため，実空間の特徴（壁やエッジ）を利用した仮想オブジェクトの配置手法 [4, 5] や，部屋の奥行き方向のスケールを縮小・復元することによる仮想オブジェクト配置手法 [6] が提案されてきた．しかし，前者では 3 次元空間内の特徴点が無い場所には仮想オブジェクトを配置できない．また後者では，部屋の奥行き方向のスケールを縮小した状態で仮想オブジェクトを操作するため，実空間上の仮想オブジェクトの配置を即座に確認することができない．

1.2 目的とアプローチ

本研究では，MR 空間内で，3 次元空間の任意の位置および大きさに自由に仮想オブジェクトを配置でき，さらに配置を即座に確認できる操作を提案する．そのために Worlds in Miniature（WiM）手法 [7] を利用する．WiM 手法とは，Virtual Reality（VR）における仮想オブジェクト操作手法の 1 つである．WiM 手法では，仮想環境全体を縮小コピーしたモデル（ミニチュア）を構築し，ユーザの近くに配置する．そしてユーザがミニチュア内で仮想オブジェクトを操作すると，それと連動して縮小前の実尺の仮想環境内でも対応するオブジェクトが操作される．MR を用いて実空間に情報を重畳提示する際，その対象となる空間はユーザの目の届く範囲，すなわち 1 つの部屋の中で完結すると考えられる．そのため，部屋のミニチュアを用いる WiM 手法が有効であると考えた．MR において，WiM 手法を実現するために，MR デバイスに搭載されている深度カメラから得られる深度情報を利用する．得られた深度情報より，部屋の 3 次元縮小モデルを生成し，ミニチュアとして利用する．ミニチュアは，ユーザの手元に配置し，その中の仮想オブジェクトを実空間の仮想オブジェクトと連動させる．これにより，ユーザはミニチュア内の仮想オブジェクトを配置することにより，実空間の仮想オブジェクトを配置させることができる．実装したプロトタイプの概要を図 1.1 に示す．

1.3 本論文の構成

本論文の構成を述べる．第 1 章では，本論文の背景，研究目的，およびアプローチを述べた．第 2 章では，関連研究について説明し，そこで得られた知見に基づき提案システムの設計指針を示す．第 3 章では，提示した設計指針に基づき実装したプロトタイプについて述べる．第 4 章では，MR におけるミニチュアを用いたオブジェクト操作の特性を調査するために実施した評価実験について述べる．第 5 章では，実験結果に対する統計的な分析について述べる．第 6 章では，実験結果の分析に基づき行った考察について述べる．第 7 章では，今後の課題として，システムおよび実験設計の改善点について述べる．第 8 章では，本研究のまとめを述べる．

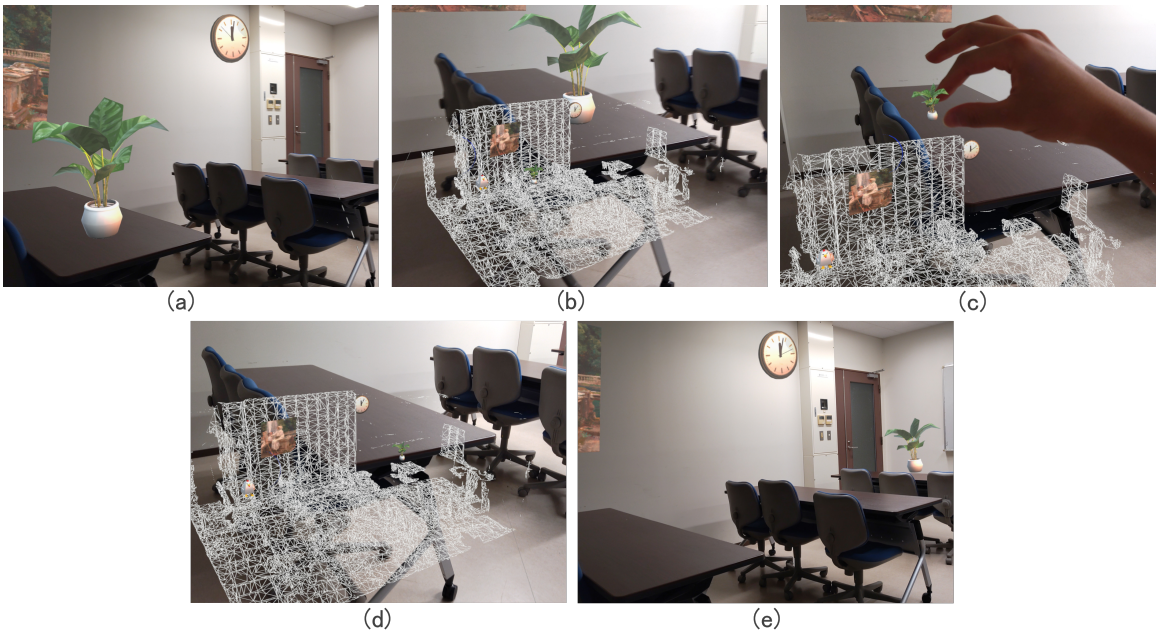

図 1.1: プロトタイプの概要．（a）部屋に仮想オブジェクト（植木鉢，時計，および絵画）が配置されている．（b）ミニチュアを表示し，仮想オブジェクトの配置を確認する．（c，d）直接操作によってミニチュア内にある縮小されたオブジェクトの配置を変更する．（e）ミニチュア内のオブジェクトの配置はリアルタイムに実尺のオブジェクトに反映される．

第2章　関連研究

本章では，まず MR におけるオブジェクト操作の既存手法および課題について述べる．次に VR におけるオブジェクト操作手法について述べる．その後，深度情報を用いた製品および研究について述べる．最後に，関連研究における知見に基づき，本研究におけるシステムの設計指針について述べる．

2.1　オブジェクトの操作手法

この節では，MR において利用されているオブジェクト操作手法およびそれらの課題について述べる．その後，それらの課題を解決するために本研究において利用する WiM 手法を紹介するため，VR におけるオブジェクトの操作手法をいくつか紹介する．

2.1.1　MR におけるオブジェクトの操作手法

本研究で着目する MR 空間内でのオブジェクト操作に対しては、レイキャストを用いる操作が最も一般的である．しかし，近年，操作時間の短縮および身体的負担の軽減のため，深度情報を利用し，オブジェクト操作を行う研究が行われている．Nuernberger ら [5] は，実物体のエッジおよび平面等の特徴点をリアルタイムに抽出した．これらの特徴点を用いることにより，実環境に合わせた仮想オブジェクトの作成および配置を可能にした．Chae ら [6] は，wall-based space manipulation（WSM）を提案した．ユーザは仮想オブジェクトの背後にある壁に重畳表示した仮想の壁をドラッグすることにより部屋に配置されたすべての仮想オブジェクトを前方に移動させ，仮想オブジェクトをユーザに近づける．これによりユーザは，仮想オブジェクトをより繊細かつ効率的に配置することが可能になる．近づけた仮想オブジェクトの配置が完了次第，仮想の壁を元の位置に戻すことにより，仮想オブジェクトのスケールは元に戻り，配置が完了する．しかし，実物体のエッジや平面などの特徴点を用いた配置では 3 次元空間にオブジェクトを自由に配置できず，壁の移動を行う場合は配置を即座に確認することができないという課題がある．

2.1.2 VR におけるオブジェクトの操作手法

VR 空間内でのオブジェクト操作に関する研究が多く実施されている．VR におけるオブジェクト操作は，一人称視点による操作および，三人称視点を用いた操作に分けられ，さらに，一人称視点による操作は手のメタファを用いた操作および，ポインタのメタファを用いた操作に分けられる [8].

手のメタファを用いた操作である Go-Go Interaction[9] は，ユーザの実際の腕および仮想の腕を非線形にマッピングすることで腕を伸ばし，離れた仮想オブジェクトを操作することを可能にしている．ポインタのメタファを用いた操作であるレイキャスト操作 [10] は，ユーザの手から放射されるレイを用いて，離れた仮想オブジェクトの操作を行う．手の伸縮やレイキャストを用いる手法は，手をオブジェクトに向けることが必要となるため，ユーザの身体的負担が大きいことが考えられる．また，MR における利用において，一人称視点のみを用いる場合，オブジェクトの位置の正確な認識が困難である [3].

三人称視点を用いた操作である WiM 手法 [7] は，仮想環境のコピーを縮小させたモデルを生成し，そのモデル内のオブジェクトを操作することにより，離れた仮想オブジェクトの操作を行う．WiM 手法は，操作における手の移動が小さいことから，身体的負担の軽減が可能であると考えられる．また，縮小したモデルを用いれば，現状の MR 環境では利用することが困難な視点（例えば，俯瞰視点）からでも仮想オブジェクトの配置を確認することが可能である．これにより，オブジェクトの配置の認識の支援が可能であると考えられる．WiM 手法は，VR におけるオブジェクト操作だけでなく，ナビゲーション [11] や IoT 操作 [12]，空間デザイン [13] 等においても用いられている．WiM 手法は，MR におけるオブジェクト操作においても，利用可能であると考えられる．しかし，MR における WiM 手法の効果は明らかにされていない．

2.2 深度情報の活用事例

MR 空間内において WiM 手法を活用するためには，周辺環境の情報を取得し，3 次元縮小モデルを作成する必要がある．本研究では，周辺環境の情報として，近年様々な製品および研究に利用されている深度情報を利用する．この節では，深度情報を用いた製品および研究を紹介する．

2.2.1 深度情報を用いた製品

深度情報は身近な製品にも利用されている．例えば，iPhone 13 Pro[14] では，ポートレート撮影や顔認証 [15] に深度情報が利用されている．また，Oculus Quest 2[16] では，ヘッドトラッキング [17] およびハンドトラッキング [18] に深度情報が利用されている．

2.2.2 深度情報を用いた研究

深度情報はこれまで VR/MR 研究においても利用されてきた．前述したオブジェクト配置のための利用 [5, 6] だけでなく，物体検出 [19] やプロジェクションマッピング [20, 21] に利用されている．他にも，深度情報は実環境の 3 次元モデル再構成を利用する研究に用いられている．3 次元モデル再構成とは，深度カメラや RGB カメラを利用し，ある空間の 3 次元モデルを再構築することである．3 次元モデル再構成を用いた研究の例として，MR において実環境の代わりに再構成された実環境の 3 次元モデルを利用し，VR における仮想環境に対するインタラクションと同様のインタラクションを実環境に対して可能にする研究が挙げられる [22, 23]．他には，実環境の 3 次元モデルの一部を VR に統合し，VR における没入感や緊張感を保ったまま，実環境とのインタラクションを可能にする研究 [24] が挙げられる．しかし，WiM 手法を実現するための深度情報の利用は検討されていない．

2.3 本研究における設計指針

MR におけるオブジェクト操作のための既存手法 [5, 6] は，操作時間の短縮および身体的負担の軽減に有効である一方で，3 次元空間にオブジェクトを自由に配置できない，またはオブジェクトの配置を即座に確認することができないという課題があった．これらの課題の解決のために，本研究では VR におけるオブジェクト操作のための手法である WiM 手法が利用できると考えた．そこで，本研究では WiM 手法を MR で実現するシステムの実装を行う．そのための設計指針は以下の通りである．

- ユーザ周囲の環境を 3 次元モデルとして取得する．
- 取得した 3 次元モデルを縮小したミニチュアを生成し，ユーザの手元に配置する．
- ミニチュア内に仮想オブジェクトを配置する機能を実装し，さらにミニチュア内での配置に対応して実空間内でも仮想オブジェクトが配置されるようにする．

これらの設計指針に基づき，WiM 手法の MR 空間での利用を可能にするシステムを実現することにより，仮想オブジェクトを 3 次元空間に自由に配置すること，およびオブジェクトの配置を即座に確認することを可能にする．また，このシステムを用いることにより，操作時間および手の移動量を減らすことが可能であると考えられる．

第3章　プロトタイプ

本章では，2.3 節で示した設計指針に基づき実装したプロトタイプについての説明を行う．

3.1　システム構成

コンピュータは m-Book K690SN-M2S5（CPU：Intel(R) Core(TM) i7-8750H，メモリ：16GB，GPU：NVIDIA GeForce MX150, OS：Windows10）を利用し，ソフトウェアは MixedRealityToolkit（MRTK, バージョン 2.6.2）[25] および Unity（バージョン 2019.4.22.f1）[26] を利用し，開発を行った．MR デバイスは HoloLens2[27] を利用し，HoloLens2 上で実行した．

入力操作には MRTK のハンドトラッキングを用い [28]，手で触れることによって入力を行う．

HoloLens2 では，内蔵された深度カメラを用いた実空間の検知機能である空間マッピング [29] を利用できる．本実装では，空間マッピングにおいて生成される部屋のメッシュを取得し（図 3.1），大きさを変更した部屋の 3 次元縮小モデルをミニチュアとして利用した（図 1.1 (b)）．そのため，本実装では追加の装置を必要とせず，またリアルタイムにミニチュアを生成できる．

3.2　実尺オブジェクトと縮小オブジェクトのリンク

ミニチュア内において仮想オブジェクトを操作すると，実空間内の対応する仮想オブジェクトも連動して操作が反映される機能を実装した．部屋の仮想オブジェクト（実尺オブジェクト）A を縮小させた仮想オブジェクト（縮小オブジェクト）Am の位置および大きさは以下のように計算される．実空間上に設定された原点の位置を Xr，実空間上に配置された実尺オブジェクト A の位置を Pr，大きさを Sr，ミニチュアの配置位置を Xm, ミニチュア内に配置された縮小オブジェクト Am の位置を Pm，大きさを Sm とおく．ミニチュアの縮小率は t とおく．

$$XrPm = XrXm + t \times XrPr \tag{3.1}$$

$$Sm = t \times Sr \tag{3.2}$$

縮小オブジェクトへの操作が検知される度に，実尺オブジェクトの位置 Pr および大きさ Sr が，縮小オブジェクトの位置 Pm および大きさ Sm に基づいて更新される．

図 3.1: HoloLens2 により取得した部屋のメッシュ．

3.3　仮想オブジェクトの配置

仮想オブジェクトの配置は 3 つのユーザ行動に分けられると考えられる．仮想オブジェクトが部屋のどこに配置されているかを探す行動（探索），仮想オブジェクトを目的の位置に移動させる行動（移動操作），仮想オブジェクトをスケーリングさせる行動（スケーリング操作）の 3 つである．これら 3 つの行動をプロトタイプによってどのように実行するかを Hololens のデフォルトのオブジェクト操作手法てあるレイキャスト操作と比較しつつ述べる．

3.3.1　仮想オブジェクトの探索

レイキャスト操作の場合，部屋のオブジェクトを探すためには，ユーザが頭をオブジェクトの方向に向けて確認する必要がある．それに対し，ミニチュアを利用する場合，手元に配置されたミニチュアを通して，部屋を俯瞰することで，配置された仮想オブジェクトを確認できる（図 3.2）．

図 3.2: ミニチュアを用いた探索.

3.3.2　仮想オブジェクトの移動操作

レイキャスト操作の場合，仮想オブジェクトを移動するためには，掌をオブジェクトに向け，親指と人差し指を使い，オブジェクトをつまんだ後，掌を目的の位置に向け，指を離す（図 3.3）．それに対し，ミニチュアを利用する場合，手元のミニチュア内の縮小オブジェクトをつまみ，ミニチュア内において移動させることによって，実尺オブジェクトを移動できる（図 3.4）．

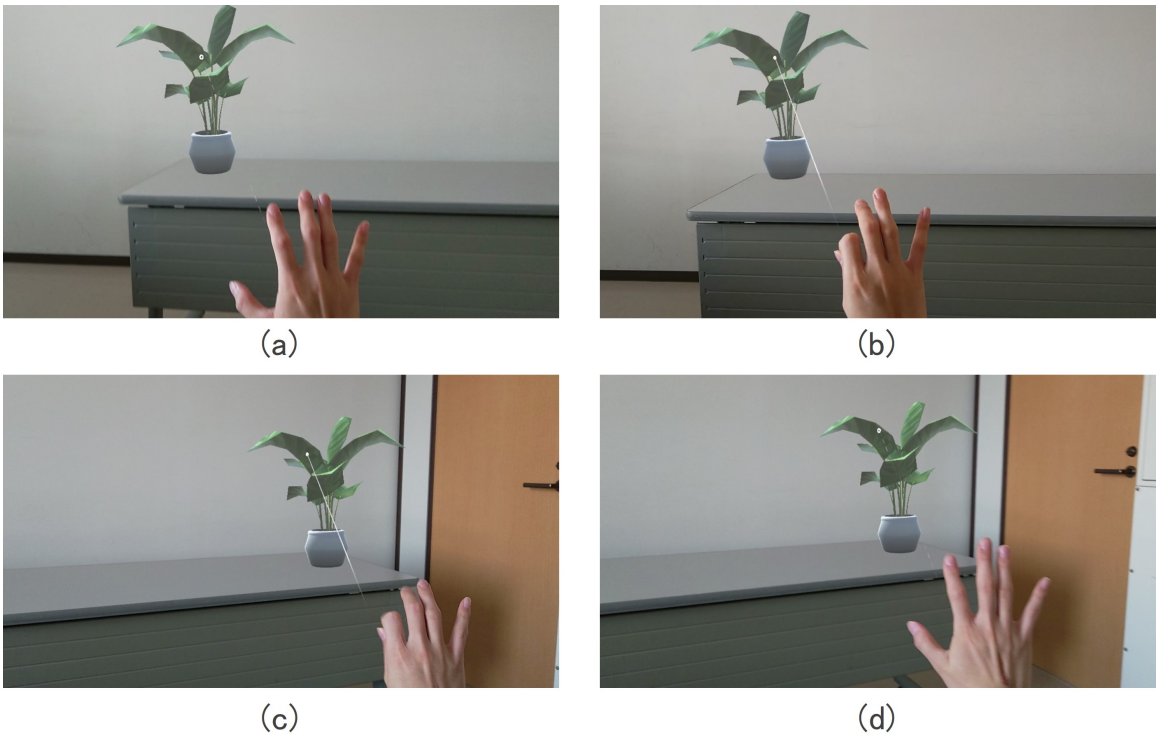

図 3.3: レイキャスト操作を用いた移動操作．仮想オブジェクトである植木鉢の移動を行う．（a）仮想オブジェクトに掌を向ける．（b）親指と人差し指を使い，仮想オブジェクトをつまむ．（c）掌を目的の位置に向ける．（d）指を離し，移動を完了する．

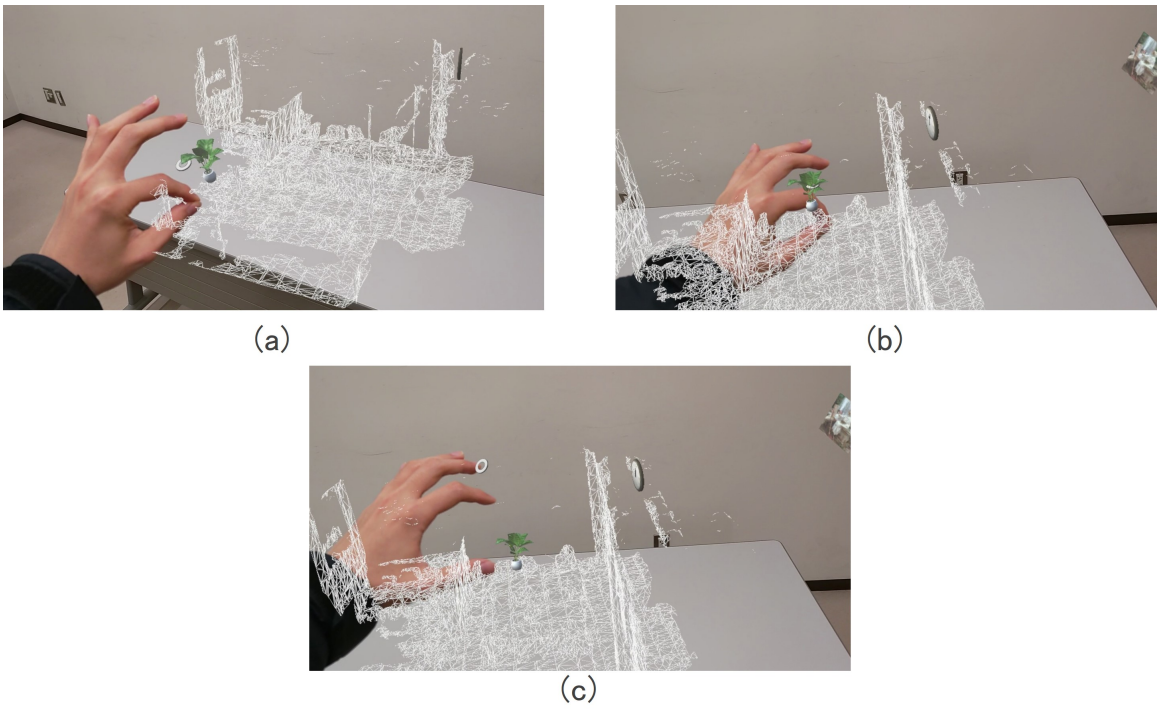

図 3.4: ミニチュアを用いた移動操作．仮想オブジェクトである植木鉢の移動を行う．（a）親指と人差し指を使い，仮想オブジェクトをつまむ．（b）手を目的の位置に移動する．（c）指を離し，移動を完了する．

3.3.3　仮想オブジェクトのスケーリング操作

レイキャスト操作の場合，仮想オブジェクトをスケーリングするためには，両手の掌をオブジェクトに向け，オブジェクトをつまんだ後，両手の間の距離を近づけることによりオブジェクトを小さくし，遠ざけることによりオブジェクトを大きくする（図 3.5）．それに対し，ミニチュアを利用する場合，手元のミニチュア内の縮小オブジェクトをつまみ，ミニチュア内でレイキャストと同様に両手の間の距離を変える操作をすることによって，実尺オブジェクトをスケーリングできる（図 3.6）．

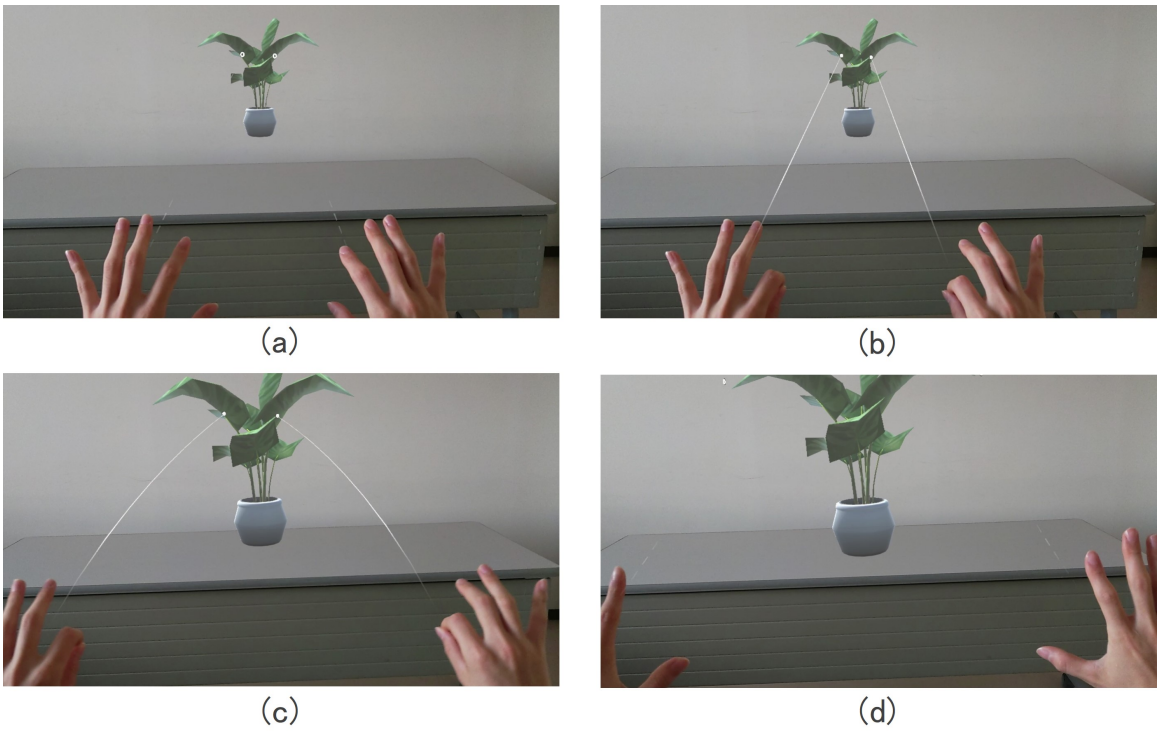

図 3.5: レイキャスト操作を用いたスケーリング操作．仮想オブジェクトである植木鉢のスケーリングを行う．(a) 仮想オブジェクトに両手の掌を向ける．(b) 親指と人差し指を使い，仮想オブジェクトをつまむ．(c) 両手の間の距離を変えることにより大きさを変化させる．(d) 指を離し，スケーリングを完了する．

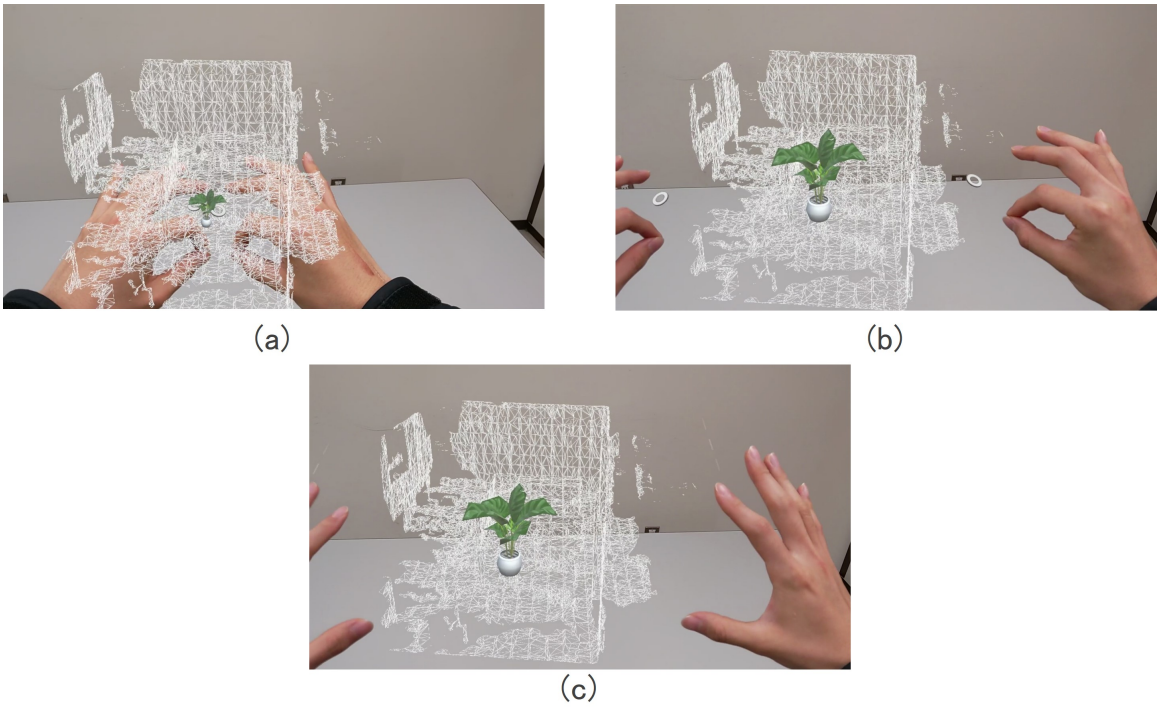

図 3.6: ミニチュアを用いたスケーリング操作．仮想オブジェクトである植木鉢のスケーリングを行う．(a) 親指と人差し指を使い，仮想オブジェクトをつまむ．(b) 両手の間の距離を変えることにより大きさを変化させる．(c) つまんだ指を離し，スケーリングを完了する．

第4章　評価実験

前章において，システムの実装に先立ち，2.3 節で示した設計指針に基づき，プロトタイプを実装した．その結果，今後のシステム設計の指針を立てるためには，縮小オブジェクトおよび実尺オブジェクトの操作にどのような特性があり，MR デバイスのどのような性質がオブジェクトの操作に影響を与えるかを調査する必要があると考えた．

よって，本実験では，オブジェクトの操作についての基礎的特性（操作時間，身体的負荷，ユーザビリティ）およびそれらに影響を及ぼす MR デバイスの特性の調査を目的とする．そのため，空間内に提示された操作対象オブジェクトをターゲット位置に移動し，決められた大きさにスケーリングするという単純な操作を実験タスクとした．

4.1　実験条件

実験条件は以下の 2 つの条件とした．

***Real-scale*．実尺オブジェクトの操作** 部屋に配置された実尺オブジェクトを操作する．

***Minimized*．縮小オブジェクトの操作** 手元に配置された縮小オブジェクトを操作する．

ここで，実尺オブジェクトの操作は MR における離れたオブジェクトの操作において最も一般的な操作であるレイキャスト操作を用い，縮小オブジェクトの操作はオブジェクトを直接つまむ操作，直接操作を用いる．

4.2　実験タスク

部屋の中に操作対象となる白い球体（以後，白球）と，ターゲットとなる赤い球体（以後，赤球）をそれぞれ 1 つずつ表示し，白球を移動およびスケーリングさせ，ターゲットの赤球に一致させるタスクを実施した．実験環境は部屋の一画に設けられた 5m × 5m × 2.5m の空間とした（図 4.1）．なお本実験は，オブジェクト操作の基礎的特性を評価することを目的としたことから，実験環境内には操作対象物とターゲットのみを提示することとし，机などの他の実オブジェクトは配置しなかった．そのためプロトタイプで実装した空間マッピングを用いたメッシュ取得およびミニチュアの作成は行わず，実験環境の範囲を示す床のみを提示した．白球と赤球は実験環境全体をグリッド上に分割した 48 個の候補点（図 4.2）のうち，タ

スク毎に無作為に配置された．白球と赤球はどちらも 48 個の候補点に重なることなく一回ずつ出現させ，計 48 回の試行を行った．白球，赤球の大きさは（0.5m，0.4m，0.3m）の 3 通りであり，それぞれを 16 回ずつ出現させた．ユーザが白球を移動させ，白球と赤球の中心間の距離が赤球の半径以下，かつ白球の大きさが赤球の大きさの± 10%となれば，タスクを完了したとみなし，次のタスクに移行した．縮小モデルは部屋の 1/10 スケールであり，部屋の中心（図 4.2（右）2 つの青点の中点）に固定した．*Real-scale* および *Minimized* どちらの条件も，移動操作は片手で行い，スケーリング操作は両手で行った．各条件の操作の様子を図 4.3 に示す．タスク終了後，参加者に対し，ユーザビリティ調査のための System Usability Scale（SUS）[8]，作業負荷調査のための NASA Task Load Index（NASA-TLX）[30]，および自由記述アンケートの 3 つを実施した．

図 4.1: 実験環境．ユーザは Hololens2 を装着し，レイキャスト操作を行っている．

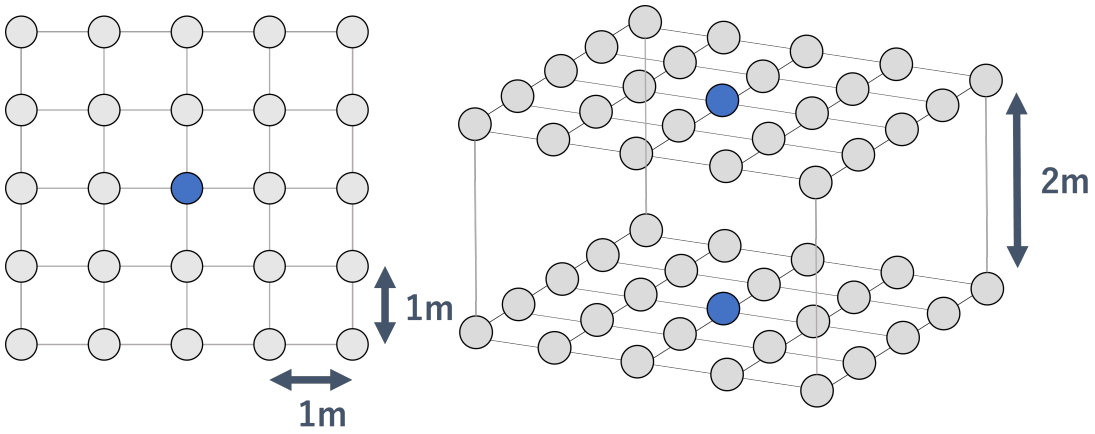

図 4.2: 球の配置候補点（青点はユーザの初期位置のため表示しない）．（右）下段は床から 0.25m の高さに位置する．

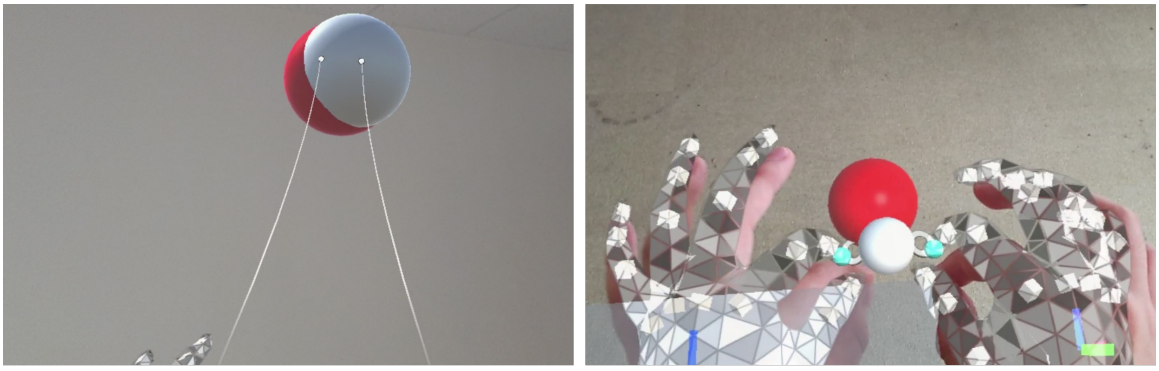

図 4.3: （a）*Real-scale* の操作の様子．（b）*Minimized* の操作の様子．

4.3 実験手順

実験では，最初に書面により研究の目的・内容等について説明した後，参加者の同意を得た．次に，本実験のタスク内容について説明を行った．続いて，参加者に MR におけるオブジェクト操作に慣れてもらうため，Hololens ヒント [31] およびオブジェクトの基本操作の練習を満足できるまで行ってもらった．その後，各条件でタスクを実施した．タスクにあたっては，より速く正確な操作を行うように実験参加者に指示した．各条件のタスク終了後，SUS，NASA-TLX，および自由記述アンケートを実施した．

4.4 実験参加者

参加者は，研究室内の大学生および大学院生 12 名（男性 10 名，女性 2 名）であり，平均年齢は 22.1 歳（SD = 0.90）であった．また，右利き 11 名，左利き 1 名であった．参加者内配置の実験計画とし，参加者はそれぞれ 2 つの条件でタスクを実施した．条件の順序はカウンターバランスをとり，6 名は *Real-scale*・*Minimized* の順序で，残りの 6 名は *Minimized*・*Real-scale* の順序でタスクを実施した．また，筑波大学の謝金規定に基づき，参加者には 860 円の謝金を支払った．

4.5 評価項目

実尺オブジェクトおよび縮小オブジェクトの配置についての基礎的特性について調査するため，操作時間，手の移動量，ユーザビリティおよび作業負荷についての評価を行った．

4.5.1 操作時間

オブジェクト操作が，探索，移動操作，およびスケーリング操作に分かれると考えたため，1 タスクの開始から終了までの時間（全操作時間）だけでなく，探索時間，移動時間，スケーリング時間の取得も行った．ここで，探索時間とはタスクが開始されてから，球の位置を把握し球に触るまでの時間として計算した．

4.5.2 手の移動距離

本実験では，タスク中の頭部位置に対する利き手の座標のログデータを取得した．得られた手の座標を時系列に並べ，隣り合った座標間の距離の和を手の移動距離として算出した．手の座標は HoloLens2 のハンドトラッキング機能によって取得した．

4.5.3 ユーザビリティの評価

システムのユーザビリティを評価するため，SUS を用いた．SUS は 10 項目の質問から成り，5 段階のリッカート尺度によって回答する．この結果をもとに満点が 100 点の得点が算出される．本実験にて利用した SUS のアンケート項目を表 4.1 に示す．

表 4.1: 本実験にて利用した SUS の質問項目.

	質問項目
Q1	このシステムをしばしば使いたいと思う
Q2	このシステムは不必要なほど複雑であると感じた
Q3	このシステムは容易に使えると思った
Q4	このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない
Q5	このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた
Q6	このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった
Q7	たいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう
Q8	このシステムはとても扱いにくいと思った
Q9	このシステムを使うのに自信があると感じた
Q10	このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった

4.5.4 作業負荷

システムの作業負荷を評価するため，NASA-TLX を用いた．NASA-TLX では，知的・知覚的要求／身体的要求／タイムプレッシャー／作業成績／努力／フラストレーションの 6 項目についての評定点と，それらの項目に対し一対比較して得られた重みを用い，作業負荷を算出する．本実験では，作業負荷の 6 項目の評価には表 4.2 の質問を利用した．

表 4.2: 本実験にて利用した NASA-TLX の質問項目．

	質問項目
知的・知覚的要求	どの程度の知的・知覚的活動 (考える，決める，計算する，記憶する，見るなど) を必要としましたか．課題はやさしかったですか難しかったですか，単純でしたか複雑でしたか，正確さが求められましたか大ざっぱでよかったですか
身体的要求	どの程度の身体的活動 (押す，引く，回す，制御する，動き回るなど) を必要としましたか．作業はラクでしたかキツかったですか，ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたか，休み休みできましたか働きづめでしたか
タイムプレッシャー	仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感はどの程度でしたか．ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか，それとも速くて余裕のないものでしたか
作業成績	作業指示者 (またはあなた自身) によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか．目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか
努力	作業成績のレベルを達成・維持するために，精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければなりませんでしたか
フラストレーション	作業中に，不安感，落胆，いらいら，ストレス，悩みをどの程度感じましたか．あるいは逆に，安心感，満足感，充足感，楽しさ，リラックスをどの程度感じましたか

第5章　実験結果

本章では，実験の各評価項目に対する統計分析の結果を示す．なお，検定に用いた有意水準は 5%である．

5.1　分析データの前処理

タスクの全体の操作時間，探索時間，移動時間およびスケール時間に対して，正規分布に従わないデータに対する外れ値の検出方法である IQR を用い，外れ値の破棄を行った．IQR は，第三四分位数に四分位範囲の 1.5 倍を足した値より大きい値もしくは，第一四分位数から四分位範囲の 1.5 倍を引いた値より小さい値を外れ値と見なし，破棄する．

5.2　操作時間

まず，全体の操作時間，つまり探索時間，移動時間，およびスケーリング時間の合計について，*Real-scale* と *Minimized* を比較する．次に探索時間，移動時間，およびスケーリング時間，それぞれについて *Real-scale* と *Minimized* を比較する．シャピロ・ウィルク検定を実施した結果，*Real-scale* の全体の操作時間（p <0.05）および *Minimized* のスケーリング時間に関して正規性が見られなかったため（p <0.05），ノンパラメトリック検定を実施した．本分析では 48 試行の操作時間の和を用いた．

5.2.1　全体の操作時間

各条件の全体の操作時間を図 5.1 に示す．各条件の全体の操作時間の平均は，*Real-scale* が 20.34 分（SD = 3.42），*Minimized* が 8.57 分（SD = 1.58）であった．ウィルコクソンの符号順位検定を実施した結果，有意差が見られた（$V = 78, p < 0.01$）．

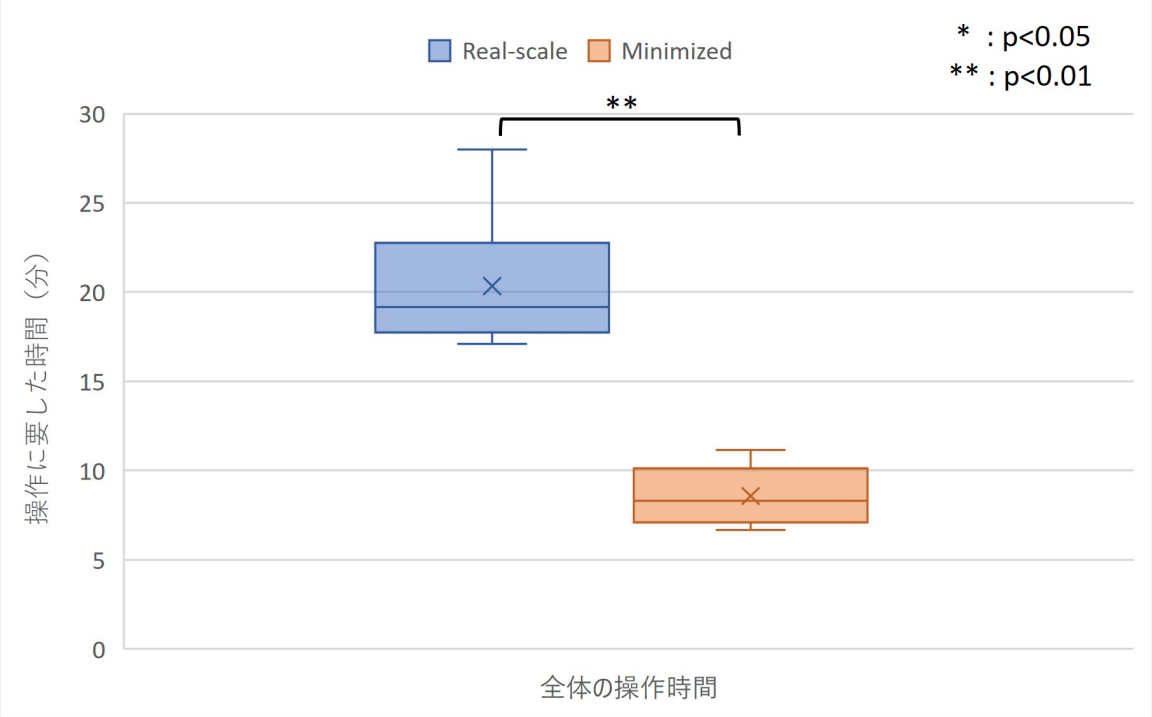

図 5.1: 各条件の全体の操作時間.

5.2.2　探索時間・移動時間・スケーリング時間

各条件の探索時間・移動時間・スケーリング時間を図 5.2 に示す．

各条件の探索時間の平均は，*Real-scale* が 11.21 分（SD = 2.23），*Minimized* が 2.93 分（SD = 0.73）であった．ウィルコクソンの符号順位検定を実施した結果，有意差が見られた（$V = 78, p < 0.01$）．

各条件の移動時間の平均は，*Real-scale* が 7.20 分（SD = 1.92），*Minimized* が 3.82 分（SD = 1.35）であった．ウィルコクソンの符号順位検定を実施した結果，有意差が見られた（$V = 78, p < 0.01$）．

各条件のスケール時間の平均は，*Real-scale* が 1.92 分（SD = 0.63），*Minimized* が 1.82 分（SD = 0.56）であった．ウィルコクソンの符号順位検定を実施した結果，有意差は見られなかった（$V = 46, p = 0.622$）．

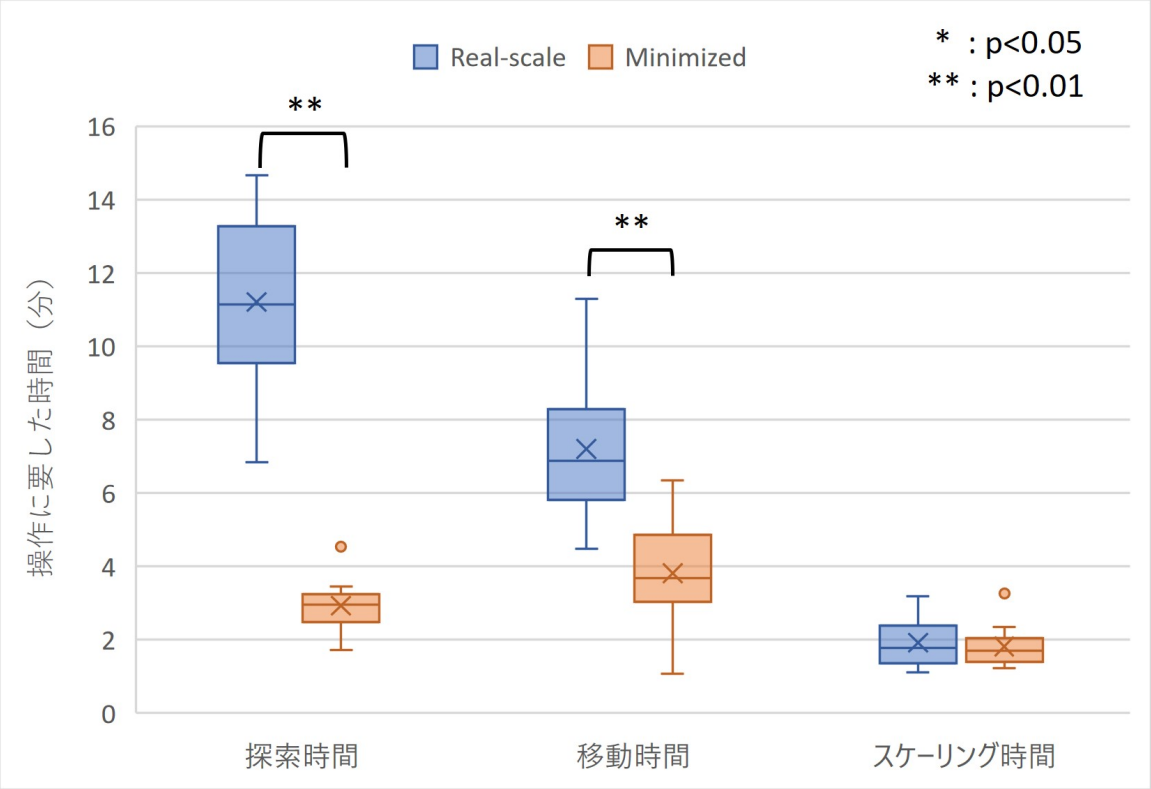

図 5.2: 各条件の探索時間・移動時間・スケーリング時間を示す．

5.3　手の移動距離

各条件の手の平均移動距離は，*Real-scale* が 223.7m（SD = 49.4），*Minimized* が 86.1m（SD = 13.3）であった（図 5.3）．シャピロ・ウィルク検定を実施した結果，*Real-scale* および *Minimized* の手の移動距離に関して有意水準が 5%で帰無仮説が棄却されなかったため（*Real-scale*：p = 0.24，*Minimized*：p = 0.87），パラメトリック検定を実施した．本分析では 48 試行の手の移動距離の和を用いた．対応のある t 検定を実施した結果，有意差が見られた（t（12）= 11.34, p <0.01）．

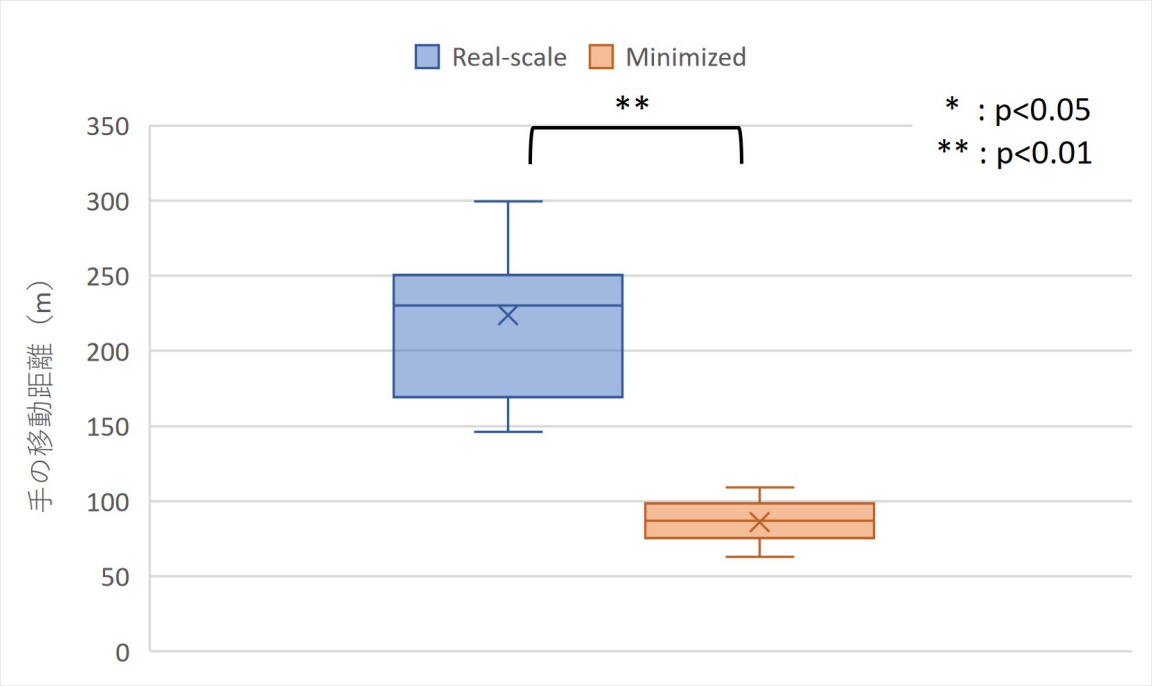

図 5.3: 各条件の手の移動距離を示す．

5.4 SUS

各質問項目の結果を図 5.4 に示し，それらに基づき算出された SUS の得点を図 5.5 に示す．各条件の SUS の平均得点は，*Real-scale* が 67.7（SD = 15.94），*Minimized* が 77.7（SD = 9.85）であった．シャピロ・ウィルク検定を実施した結果，*Real-scale* および *Minimized* の SUS の得点に関して有意水準が 5%で帰無仮説が棄却されなかったため（*Real-scale*：$p = 0.84$，*Minimized*：$p = 0.90$），パラメトリック検定を実施した．対応のある t 検定を実施した結果，有意差は見られなかった（t（12） = -1.97, $p = 0.074$）．

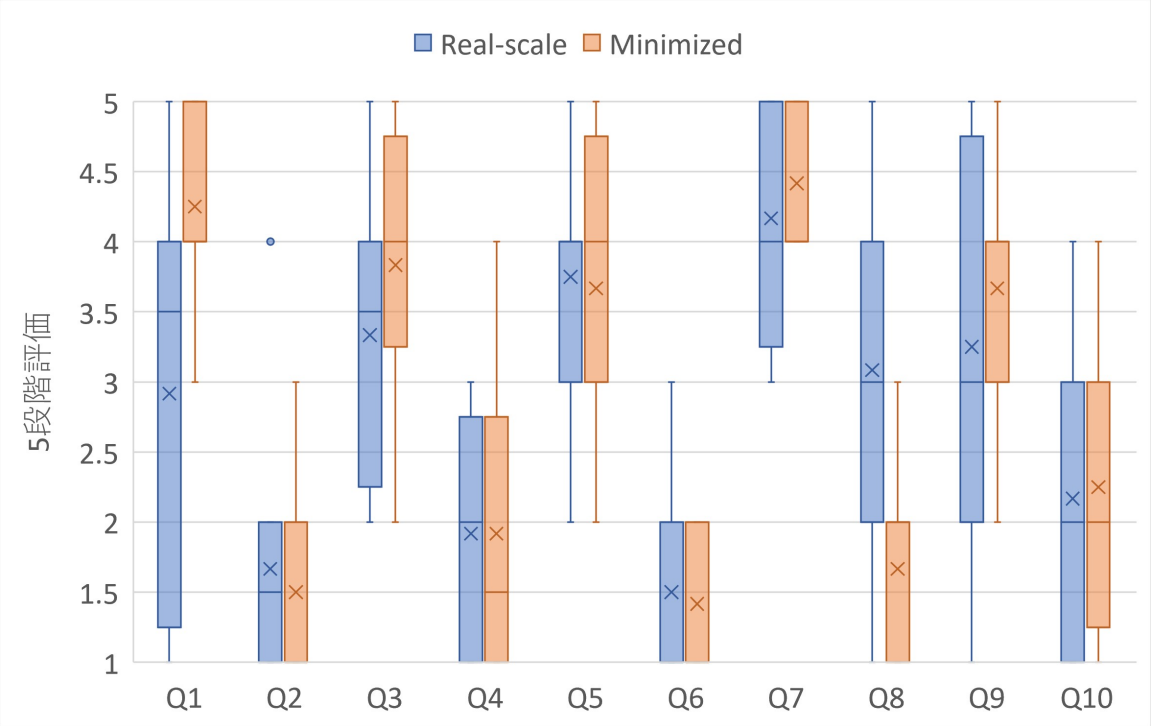

図 5.4: 各質問項目の結果を示す．偶数項目は値が高いほど，ユーザビリティが低い．奇数項目は値が高いほど，ユーザビリティが高い．

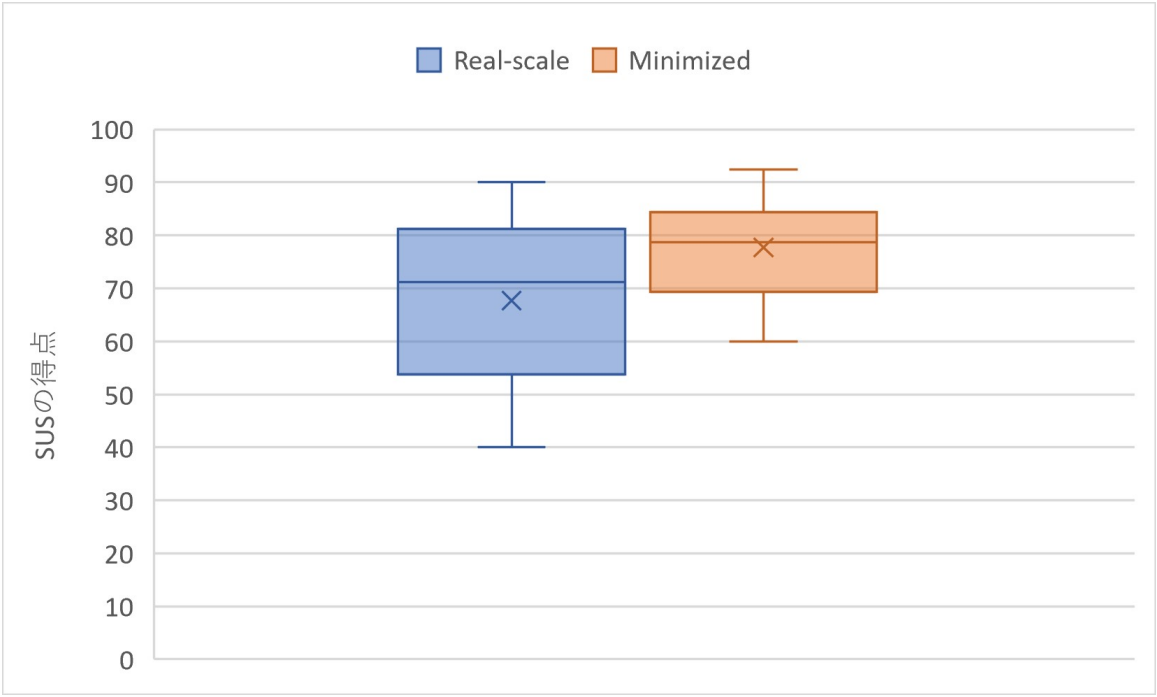

図 5.5: SUS の得点を示す．得点が高いほど，ユーザビリティが高い．

5.5 NASA-TLX

各項目の結果およびそれらに基づき算出されたNASA-TLXの総合的な作業負荷の結果を図5.6に示す．まず，各項目に関する作業負荷に基づき，算出された総合的な作業負荷に関して，*Real-scale* と *Minimized* を比較する．その後，各項目に関する作業負荷に関して，*Real-scale* と *Minimized* を比較する．シャピロ・ウィルク検定を実施した結果，*Real-scale* の知的要求，身体的要求，および作業成績，*Minimized* の身体的要求，総合的な作業負荷について正規性が見られなかったため，ノンパラメトリック検定を実施した．

5.5.1 総合的な作業負荷

各条件の総合的な作業負荷の平均は，*Real-scale* が72.5（SD = 17.7），*Minimized* が39.9（SD = 15.3）であった．ウィルコクソンの符号順位検定を実施した結果，有意差が見られた（$V = 78, p < 0.01$）．

5.5.2 各項目に関する作業負荷

ウィルコクソンの符号順位検定を実施した結果，身体的要求，作業成績，フラストレーションに関して有意差が見られた（身体的要求：$V = 78$，$p < 0.01$，作業成績：$V = 67.5$，$p < 0.05$，フラストレーション：$V = 64.5$，$p < 0.01$）．

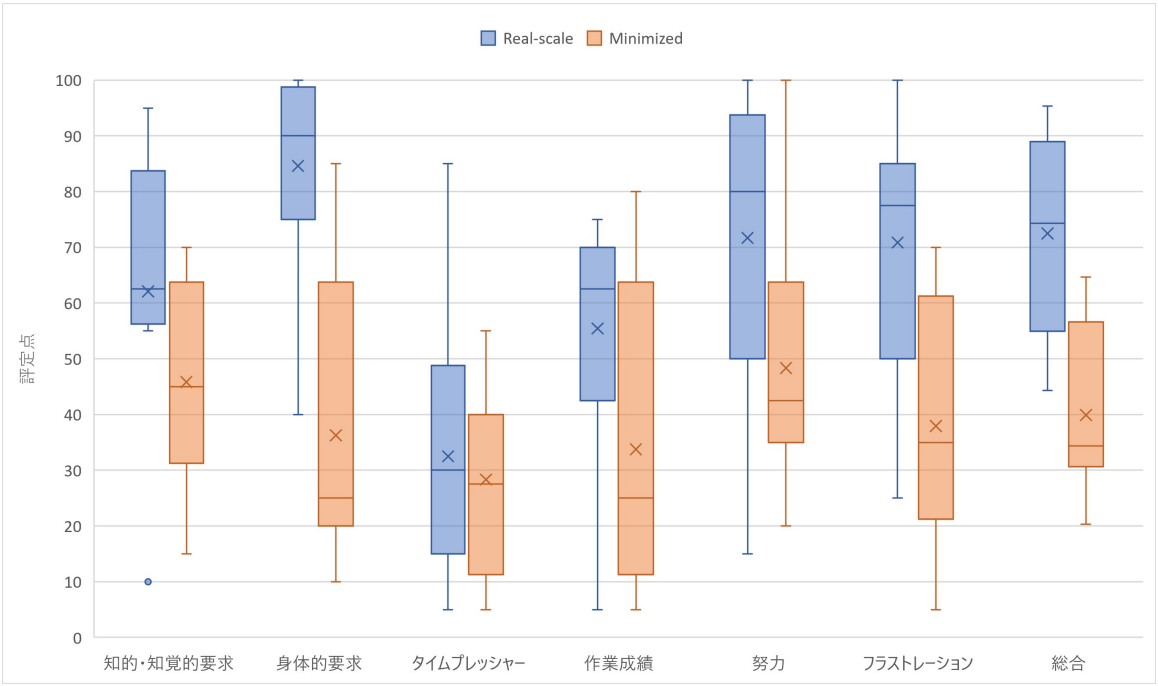

図 5.6: 各項目の結果およびそれらに基づき算出された NASA-TLX の総合的な作業負荷の結果を示す．値が大きいほど，その項目の負荷が高いことを示す．

5.6 自由記述アンケート

Real-scale の探索に関して，「視野に対して物体の置かれる範囲が広くて、探すのが一番大変だった」，「画角が狭いために、歩き回ってオブジェクトの位置を把握する必要があった」という回答が得られた．それに対し，*Minimized* の探索に関しては，「部屋全体を俯瞰的に観察できるため、操作に集中しやすく、とてもつかいやすかった」という回答が得られた．また，*Minimized* のスケーリング操作に関して，「すでに小さいものを両手でつかみ、縮小させるという操作が困難だった．枠などのハンドルがあった方が操作しやすかったと思う．」，「スケーリング（縮小）の時に両手の指がぶつかり，少々手間取った．」，「ハンドトラッキングの精度とミニチュアのサイズのトレードオフが存在すると感じた」という回答が得られた．

第6章　考察

実験結果の統計的な分析に基づき，オブジェクトの探索，移動操作，およびスケーリング操作に関する考察を行う．その後，そこで得られた知見に基づき，今後のシステムの設計指針を立てる．

6.1　オブジェクトの探索

まずオブジェクトの探索に関して，*Real-scale* より *Minimized* の方が探索時間は短かった．また，自由記述アンケートにおいて，*Real-scale* では MR デバイスの視野角の狭さから探索が困難であり，*Minimized* では部屋を俯瞰できるため，操作が簡単であったという回答が得られた．そのため，MR デバイスの視野角の狭さが，探索に影響を与えた可能性が考えられる．関連して，VR 用デバイスでは視野角 120 度程度の製品が多く存在するのに対して，現在市販されている MR デバイスは視野角が 60 度未満である（今回使用した HoloLens2 の視野角は 52 度である）．そのため，MR では広い空間内でのオブジェクト探索が VR よりも困難となることから，ミニチュアを用いる本研究のアプローチは妥当性を有すると考えられる．一方で，このような MR デバイス特有の視野角の狭さを考慮すると，ミニチュアを用いる場合にも，そのサイズや位置について十分な検討が必要になると考えられる．

6.2　オブジェクトの移動

次にオブジェクトの移動に関して，*Real-scale* より *Minimized* の方が移動時間は短かった．また，手の移動距離において *Real-scale* より *Minimized* の方が移動距離が短いという結果が得られた．そのため，手の移動距離の差によって，移動時間に差が生じたことが考えられる．関連して，身体的負担については，NASA-TLX の結果から，*Real-scale* より *Minimized* の方が作業負荷が小さいことが示された．これに関しても，手の移動距離の差によって，身体的負担に差が生じたことが考えられる．

6.3　オブジェクトのスケーリング

最後に，オブジェクトのスケーリングに関して，*Real-scale* と *Minimized* のスケーリング時間に差は見られなかった．また，自由記述アンケートにおいて，*Minimized* において両手の指

の衝突が生じたという回答や，ハンドトラッキングの精度が縮小オブジェクトの操作に影響を与えている可能性があるという回答が得られた．本実装では，ミニチュア内のオブジェクトを操作しようとする場合，操作の有効領域（タッチイベントを受け付ける範囲）もミニチュアと同等の倍率で縮小されていた．そのため両手を同時に用いた複雑な操作を要するスケーリングを行う際に，ハンドトラッキングの精度の影響が生じていたと考えられる．今後は，ミニチュア内のオブジェクトの操作を行う際の有効領域を広げる，もしくは両手を用いない別の操作方法を採用する等の検討を行う必要があると考えられる．

6.4 本実験の結果のまとめおよび今後のシステムの設計指針

本実験の結果をまとめる．直接操作による縮小オブジェクトの操作は，レイキャスト操作による実尺オブジェクトの操作と比較し，オブジェクトの探索時間が短くなることが示された．また操作のための手の移動距離および移動時間が短くなり，身体的負担も軽減されることが示された．そのため，MR でのオブジェクト操作にミニチュアを用いる本研究のアプローチは妥当性を有すると考えられる．なお，オブジェクトの探索にあたっては MR デバイス特有の視野角の狭さが影響を与えている可能性が示された．そのため今後のシステム設計においては，ミニチュアが可能な限り視野角内に収まるようにするため，サイズや位置について十分な検討を行っていく．

次にスケーリング操作に関しては，スケーリング時間に差がなく，また縮小したオブジェクトを直接操作する際にハンドトラッキングの精度が課題となる可能性が示唆された．これはミニチュアを作成する際に，操作の有効領域もミニチュアと同等の倍率で縮小されていたことによるものと考えられる．そのため，今後のシステム設計において，スケーリングを含む両手を用いた複雑な操作に対応するため，ハンドトラッキングの精度に応じて，縮小率の下限を決定する必要がある．もしくは，縮小オブジェクトに UI やハンドルを追加する等の工夫を行う必要がある．

第7章　今後の課題

本実験によって今後のシステムの設計指針を得ることができたが，システムの評価方法および設計をさらに改善するために，いくつか課題が挙げられる．まず，評価方法を改善し，本システムの有用性をさらに主張するためには，比較対象の追加，実験タスクの具体化，およびアプリケーションの評価を行う必要がある．そして，システムの設計を改善するためには，本実験では扱っていないメッシュ表現を考慮に入れる必要がある．

7.1　類似手法との比較

本論文で実施した実験では，比較をレイキャスト操作による「実尺オブジェクトの操作」と直接操作による「縮小オブジェクトの操作」の 2 条件でしか行っていない．本手法の優位性をより正確に示すためには，既存の類似手法との比較を行う必要がある．

7.2　より具体的な実験タスクによる実験

本実験ではオブジェクト操作の基礎的特性（操作時間，身体的負荷，ユーザビリティ）を確認するため，空間内に提示された操作対象オブジェクトをターゲット位置に移動するという単純な操作を実験タスクとした．そのため，既存手法における課題，すなわち 3 次元空間にオブジェクトを自由に配置できないこと，およびオブジェクトの配置を即座に確認することができないことに対する提案手法の効果を検証できていない．そのため今後はこれらの課題に対する提案手法の効果を評価するための実験を行っていく必要がある．具体的には，オフィスやリビング等でシステムを使用する場面を想定し，ユーザが自分の自由意思で周囲の環境に仮想オブジェクトを配置するタスクを設定して評価を行う．

また，本実験では操作を行う仮想オブジェクトは球だけであったが，実際に本システムを利用する際は様々な形状の仮想オブジェクトを配置することが想定される．そのため，複数の異なる形状の仮想オブジェクトを用い，実験を行う必要がある．

7.3 アプリケーションの評価

上記の実験を実施した後，その結果に基づいて特定の用途に特化したアプリケーションの実装を行い，その効果の検証を行っていく．例えば，オフィス環境の拡張に特化したアプリケーションや，リビング等のインテリア検討に特化したアプリケーションを実装し，それらを用いた場合の効果を検証していく．

7.4 メッシュ表現の選定

プロトタイプでは，ミニチュアをワイヤフレームによって表現した．しかし，ミニチュアの表現方法は他にも考えられる．例えば，ワイヤフレームに面を加えたサーフェスモデルやサーフェスモデルに RGB 情報を付与したモデルがある．これらを比較し，このシステムの用途に適した表現方法を選定する必要がある．

第8章　まとめ

本研究では，深度カメラを用いた部屋の 3 次元縮小モデルを用い，MR において WiM 手法を利用可能にすることにより，オブジェクトを 3 次元空間に自由に配置でき，オブジェクトの配置を即座に確認できるシステムを提案した．また，MR において WiM 手法を利用することにより，ユーザの操作時間の減少および身体的負担の軽減が可能であると考えた．本研究ではまず，システムの基本設計を示すためにプロトタイプを作成した．その後，今後のシステム設計の指針を得るために，レイキャスト操作による実尺オブジェクトの操作と直接操作による縮小オブジェクトの操作を比較する実験を実施し，それらの操作手法の特性とその特性に影響を与える MR デバイスの特性を調査した．その結果，直接操作による縮小オブジェクトの操作は，オブジェクトの探索，移動，および身体的負担において有効であるが，スケーリング操作が困難であることが示された．今後は実験によって得られた指針に基づき，示された欠点を補完するための機能を追加し，システム設計を完了させる．また，そのシステムを用いたアプリケーションの開発および評価実験を実施する．

謝辞

本研究を進めるにあたり，川口一画先生，志築文太郎先生，高橋伸先生には多くのご指導を頂きました．心から感謝申し上げます．特に，川口先生には，日頃から研究の進み具合に応じて，多くのご助言を頂きました．ここに深く感謝の意を表します．

インタラクティブプログラミング研究室の同輩，先輩方には，研究活動において大変お世話になりました．COMMUNICATION チームの皆様には，チームゼミにおいて，研究に関する多くの貴重なご意見を頂きました．特に，飯塚陸斗氏には論文執筆や研究発表において多くのご助言を頂きました．深く感謝いたします．加えて，WAVE チームの皆様には，研究発表においてご意見とご指導を頂きました．心から感謝いたします．

また，実験に参加していただいた皆様には，長時間の実験にご協力頂きましたことを大変感謝しております．最後に，研究生活においてお世話になった全ての方々に心より感謝いたします．

参考文献

[1] Microsoft Corporation. Microsoft HoloLens — Mixed Reality Technology for Business. https://www.microsoft.com/en-us/hololens. (Accessed on 02/18/2022).

[2] Nreal Ltd. Nreal Light - ウェアラブル複合現実グラス. https://www.nreal.ai/light/. (Accessed on 02/18/2022).

[3] Ernst Kruijff, J. Edward Swan, and Steven Feiner. Perceptual issues in augmented reality revisited. In *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 3–12, 2010.

[4] Joon Hyub Lee, Sang-Gyun An, Yongkwan Kim, and Seok-Hyung Bae. Projective Windows: Bringing Windows in Space to the Fingertip. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–8, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[5] Benjamin Nuernberger, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson. SnapToReality: Aligning Augmented Reality to the Real World. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1233–1244, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

[6] Han Joo Chae, Jeong-in Hwang, and Jinwook Seo. Wall-Based Space Manipulation Technique for Efficient Placement of Distant Objects in Augmented Reality. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 45–52, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[7] Richard Stoakley, Matthew J. Conway, and Randy Pausch. Virtual Reality on a WIM: Interactive Worlds in Miniature. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '95, pp. 265–272, USA, 1995. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.

[8] John Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, Vol. 189, , November 1995.

[9] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, and Tadao Ichikawa. The Go-Go Interaction Technique: Non-Linear Mapping for Direct Manipulation in VR. In *Proceedings of*

the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '96, pp. 79–80, New York, NY, USA, 1996. Association for Computing Machinery.

[10] Mark R. Mine. Virtual Environment Interaction Techniques. Technical report, USA, 1995.

[11] Alessandro Mulloni, Hartmut Seichter, and Dieter Schmalstieg. Indoor Navigation with Mixed Reality World-in-Miniature Views and Sparse Localization on Mobile Devices. In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, AVI '12, pp. 212–215, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.

[12] Dong Woo Seo, Hyun Kim, Jae Sung Kim, and Jae Yeol Lee. Hybrid reality-based user experience and evaluation of a context-aware smart home. *Computers in Industry*, Vol. 76, pp. 11–23, 2016.

[13] Yuta Sugiura, Hikaru Ibayashi, Toby Chong, Daisuke Sakamoto, Natsuki Miyata, Mitsunori Tada, Takashi Okuma, Takeshi Kurata, Takashi Shinmura, Masaaki Mochimaru, and Takeo Igarashi. An Asymmetric Collaborative System for Architectural-Scale Space Design. In *Proceedings of the 16th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, VRCAI '18, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[14] iPhone 13 Pro と iPhone 13 Pro Max - Apple（日本）. https://www.apple.com/jp/iphone-13-pro/. (Accessed on 02/18/2022).

[15] iPhone や iPad Pro で Face ID を使う - Apple サポート (日本). https://support.apple.com/ja-jp/HT208109. (Accessed on 02/18/2022).

[16] Oculus Quest 2 は、シリーズ最先端かつ最新のオールインワン型 VR ヘッドセットです。息をのむようなゲームやほかにはない自由な没入体験を提供する広大なライブラリをチェックしましょう。Oculus Link で PC 接続も可能です。 https://www.oculus.com/quest-2/. (Accessed on 02/18/2022).

[17] Quest 2 および Quest のヘッドセットのトラッキング, howpublished = https://support.oculus.com/articles/headsets-and-accessories/using-your-headset/turn-off-tracking/. (Accessed on 02/18/2022).

[18] Oculus Quest 2 および Quest でジェスチャーコントロールを使用する. https://support.oculus.com/articles/headsets-and-accessories/controllers-and-hand-tracking/hand-tracking-quest-2/. (Accessed on 02/18/2022).

[19] Shuran Song and Jianxiong Xiao. Sliding shapes for 3d object detection in depth images. In David Fleet, Tomas Pajdla, Bernt Schiele, and Tinne Tuytelaars, editors, *Computer Vision – ECCV 2014*, pp. 634–651, Cham, 2014. Springer International Publishing.

[20] Brett Jones, Rajinder Sodhi, Michael Murdock, Ravish Mehra, Hrvoje Benko, Andrew Wilson, Eyal Ofek, Blair MacIntyre, Nikunj Raghuvanshi, and Lior Shapira. RoomAlive: Magical Experiences Enabled by Scalable, Adaptive Projector-Camera Units. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 637–644, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.

[21] Andreas Fender, Philipp Herholz, Marc Alexa, and Jörg Müller. *OptiSpace: Automated Placement of Interactive 3D Projection Mapping Content*, pp. 1–11. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2018.

[22] David Lindlbauer and Andy D. Wilson. Remixed Reality: Manipulating Space and Time in Augmented Reality. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.

[23] Ya-Ting Yue, Yong-Liang Yang, Gang Ren, and Wenping Wang. SceneCtrl: Mixed Reality Enhancement via Efficient Scene Editing. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 427–436, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.

[24] Jeremy Hartmann, Christian Holz, Eyal Ofek, and Andrew D. Wilson. RealityCheck: Blending Virtual Environments with Situated Physical Reality. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[25] Microsoft Corporation. MRTK-Unity Developer Documentation - Mixed Reality Toolkit — Microsoft Docs. `https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/mrtk-unity/?view=mrtkunity-2021-05`. (Accessed on 02/18/2022).

[26] Unity - Unity. `https://unity.com/ja`. (Accessed on 02/18/2022).

[27] Microsoft Corporation. HoloLens 2—Pricing and Options — Microsoft HoloLens. `https://www.microsoft.com/en-us/hololens/buy`. (Accessed on 02/18/2022).

[28] ハンド トラッキング - Mixed Reality Toolkit — Microsoft Docs. `https://docs.microsoft.com/ja-jp/windows/mixed-reality/mrtk-unity/features/input/hand-tracking?view=mrtkunity-2021-05`. (Accessed on 02/18/2022).

[29] Microsoft Corporation. 空間マッピング - Mixed Reality — Microsoft Docs. `https://docs.microsoft.com/ja-jp/windows/mixed-reality/design/spatial-mapping`. (Accessed on 02/18/2022).

[30] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139–183. North-Holland, 1988.

[31] Microsoft Corporation. HoloLens ヒント を入手 - Microsoft Store ja-JP. https://www.microsoft.com/ja-jp/p/hololens-%E3%83%92%E3%83%B3%E3%83%88/9pd4cxkklc47. (Accessed on 02/18/2022).

著者論文リスト

参考論文

本論文の主な内容は，下記にて公表済みである．

- 公表済み論文

  1. 井原圭一, 川口一画．部屋の 3 次元縮小モデルを用いた MR 空間内における仮想オブジェクト配置．第 29 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ（WISS2021），pp. 50 – 56, 日本ソフトウェア科学会，2021 年 12 月．

付録A SUSアンケート

ユーザビリティ調査（SUS）

下記に書いた１０の指標について、１（まったくそう思わない）～５（まったくそう思う）の５段階評価を行ってもらいます

このフォームの送信時に回答者のメールアドレス（**null**）が記録されました。

*必須

1。 メールアドレス *

2。 名前 *

3。 このシステムをしばしば使いたいと思う *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

4。 このシステムは不必要なほど複雑であると感じた *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

5。 このシステムは容易に使えると思った *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

6。 このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

7。 このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

8。 このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

9。 たいていのユーザは、このシステムの仕様方法について、素早く学べるだろう *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

10。 このシステムはとても扱いにくいと思った *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

11。 このシステムを使うのに自信があると感じた *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

12。 このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった *

1 つだけマークしてください。

1	2	3	4	5
◯	◯	◯	◯	◯

このコンテンツは Google が作成または承認したものではありません。

Google フォーム