

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* 川口 一画†

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。我々はまず、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、実尺オブジェクトのレイキャスト操作と縮小オブジェクトの直接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、縮小オブジェクトの直接操作は、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。

1 はじめに

Microsoft社のHololens[9]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[6]の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正確な位置の認識は困難であることが分かっている[4]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[5][13]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が提案されてきた[2]。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、実空間中での仮想オブジェクトの位置を即座に確認することができない。本研究では、3次元空間の任意の位置に自由に仮想オブジェクトを配置でき、さらに配置位置を即座に確認できるWorlds in Miniature (WiM) 手法[16]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データを利用する。得られた深度データより、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操作することで、実空間の仮想オブジェクトを移動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に示す。

本論文では、まず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。次に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。その後、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。最後に、実験結果に基づき、今後のシステム設計の方針

Copyright is held by the author(s).

* 筑波大学 情報メディア創成学類

† 筑波大学 システム情報系

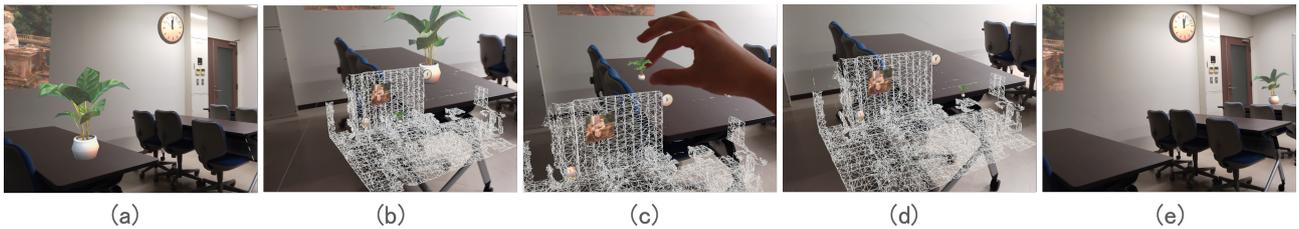


図 1. プロトタイプの概要. (a) 部屋に仮想オブジェクト（植木鉢，時計，および絵画）が配置されている. (b) ミニチュアを表示し，仮想オブジェクトの位置を確認する. (c, d) 直接操作によってミニチュア内にある縮小されたオブジェクトの配置を変更する. (e) ミニチュア内のオブジェクトの位置はリアルタイムに実尺のオブジェクトに反映される.

について述べる.

2 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．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 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らは，実物体のエッジや平面を利用し，オブジェクトの配置を行った [13]．Chaeらは，壁に重畳表示した仮想の壁を前後に移動させ，仮想的に部屋のスケールを縮小・復元することにより，オブジェクトの配置を補助した [2]．しかし，実物体のエッジや平面を用いた配置では 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．

2.2 VR におけるオブジェクトの操作手法

MR ではなく，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と，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と，ポインタのメタファを用いた操作に分けられる [1]．

手のメタファを用いた操作である Go-Go Interaction [14] は，ユーザの実際の腕と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 [4]．

三人称視点を用いた操作である WiM 手法 [16] 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，新たな視点を加えることにより，オブジェクトの位置の認識の補助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 [12] や IoT 操作 [15]，空間デザイン [17] 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，有効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．

2.3 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 [13][2] 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よって，WiM 手法を MR で実現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

び配置を変更したオブジェクトの位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距離を減らすことが可能であると考えられる。

3 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

ハードウェアはHololens2[7]を、ソフトウェアはMixedRealityToolkit (MRTK, バージョン2.6.2)とUnity (バージョン2019.4.22.f1) [10]を利用した。

3.2 ミニチュアの生成

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[11]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2)、大きさを変更した部屋の縮小モデルをミニチュアとして利用した(図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。



図2. 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 X_r 、実空間上に配置された実尺オブジェクトAの位置を P_r 、大きさを S_r 、ミニチュアの配置位置を X_m 、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 P_m 、大きさを S_m とおく。ミニチュアの縮小率は t とおく。

$$X_r P_m = X_r X_m + t \times X_r P_r \quad (1)$$

$$S_m = t \times S_r \quad (2)$$

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 P_r および大きさ S_r が、縮小オブジェクトの位置 P_m および大きさ S_m に基づいて更新される。

3.4 仮想オブジェクトの操作方法

本実装では、縮小オブジェクトの移動操作およびスケール操作に、直接操作を用いる。直接操作とは、Hololens2のデフォルトで利用できる操作であり、人差し指と親指を用いて直接オブジェクトをつまむ動作を用いた操作である。具体的には、移動操作は片手で縮小オブジェクトをつまみ、ミニチュア内の任意の位置に移動させる。スケール操作は両手で縮小オブジェクトをつまみ、両手間の距離を広げることにより、縮小オブジェクトを拡大させ、狭めることにより、縮小させる。

4 評価実験

MRにおけるミニチュアを用いたオブジェクト操作手法の効果を検証するため、評価実験を行う。ここでは、オブジェクト操作の基本的特性(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する。

4.1 実験条件

実験条件は以下の2つの条件とした。

- C1. 実尺オブジェクトのレイキャスト操作 部屋に配置された実尺オブジェクトをレイキャストを用いて操作する。
- C2. 縮小オブジェクトの直接操作 手元に配置された縮小オブジェクトを直接つまむことで操作する。

参加者は、大学生および大学院生12名(男性10名、女性2名)であり、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C1・C2の順序で、残りの6名はC2・C1の順序でタスクを実施した。

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ルさせ、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。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と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3)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。白球と赤球の中心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、次のタスクに移行する。縮小モデルは部屋の1/10スケールであり、部屋の中心(図3(右)2つの青点の中点)に固定する。C1およびC2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う。各条件の操作の様子を図4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) [1], 作業負荷調査のためのNASA-TLX[3], および自由記述アンケートの3つを実施した。

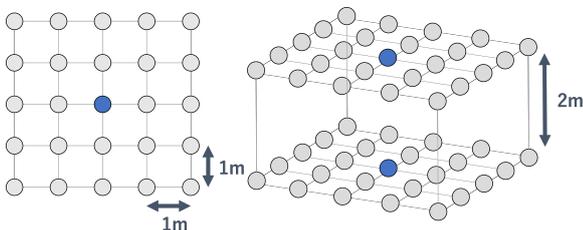


図3. 球の配置候補点(青点はユーザの初期位置のため表示しない)。(右)下段は床から0.25mの高さに位置する。

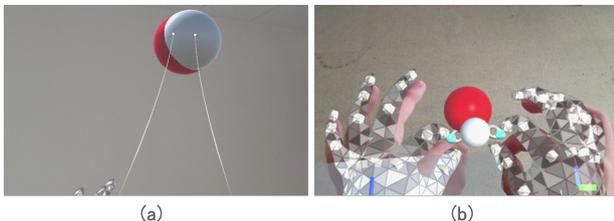


図4. (a) C1条件の操作の様子。(b) C2条件の操作の様子。

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、参加者の同意を取得した。

次に、本実験のタスク内容について説明を行った。続いて、参加者にピンチによるオブジェクト操作に慣れてもらうため、Hololens ヒント [8] 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、より速くより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 取得するデータ

我々は、オブジェクト操作が、オブジェクトを見つけるフェーズ、オブジェクトを移動させるフェーズ、オブジェクトをスケーリングさせるフェーズに分かれると考えた。そのため、我々は、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、スケール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。また、手の移動距離を取得するため、タスク中の手の位置のログデータを取得した。手の位置はHololens2のハンドトラッキング機能によって取得した。

4.5 結果

まず、タスクの全操作時間、探索時間、移動時間およびスケール時間に対して、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、破棄した。

4.5.1 操作時間

各条件の平均操作時間を図5に示す。各条件の全操作時間の平均は、C1条件20.34分(SD=3.42)、C2条件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($V=78, p<0.01$)。各条件の探索時間の平均は、C1条件11.21分(SD=2.23)、C2条件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、C1条件7.20分(SD=1.92)、C2条件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、C1条件1.92分(SD=0.63)、C2条件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($V=46, p=0.622$)。

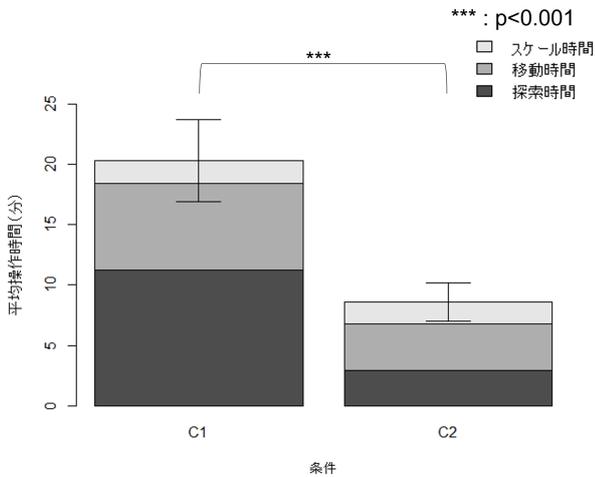


図 5. 各条件の平均操作時間。エラーバーは標準偏差を示す。なお、エラーバーおよび記号 (*) は全操作時間の平均値についての値を示す。

4.5.2 手の移動距離

各条件の手の平均移動距離は、C1 条件 223.7m (SD=49.4), C2 条件 86.1m (SD=13.3) であった (図 6)。対応のある t 検定を実施した結果、有意差が見られた ($t(12) = 11.34, p < 0.05$)。

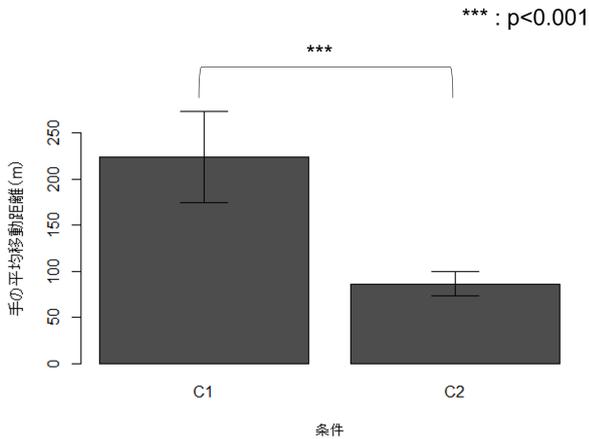


図 6. 各条件の手の平均移動距離。エラーバーは標準偏差を示す。

4.5.3 SUS

各条件の SUS の平均得点は、C1 条件 67.7 (SD=15.94), C2 条件 77.7 (SD=9.85) であった。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 ($t(12) = -1.97, p = 0.074$)。

4.5.4 NASA-TLX

各条件の総合的な作業負荷の平均は、C1 条件 72.5 (SD=17.7), C2 条件 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 ($V=78, p < 0.05$)。各条件の身体的要求に関する作業負荷の平均は、C1 条件 84.6 (SD=17.2), C2 条件 36.3 (SD=25.1) 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 ($V=78, p < 0.05$)。

4.5.5 自由記述アンケート

C1 条件の探索に関して、「レイキャストは、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、C2 条件の探索に関しては、「ミニチュア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、C2 条件のスク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。棒などのハンドルがあった方が操作しやすかったと思う。」、「スクーリング (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。

5 考察

5.1 オブジェクトの探索

まずオブジェクトの探索に関して、C1 条件より C2 条件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、C1 条件では MR デバイスの視野角の狭さから探索が困難であり、C2 条件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 (Hololens2: 54 度)。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。

5.2 オブジェクトの移動

次にオブジェクトの移動に関して、C1 条件より C2 条件の方が移動時間は短かった。また、手の移動距離において C1 条件より C2 条件の方が移動距離が

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、C1条件よりC2条件の方が作業負担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。

5.3 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、C1条件とC2条件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、C2条件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。

5.4 今後のシステムの設計指針

本実験の結果をまとめる。縮小オブジェクトの直接操作は、実尺オブジェクトのレイキャスト操作と比較し、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を追加する、もしくは縮小オブジェクトより大きなハンドルを設ける等の工夫を行う必要がある。

5.5 今後の課題

本論文で実施した実験では、比較を「実尺オブジェクトのレイキャスト操作」と「縮小オブジェクトの直接操作」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。また、本実験ではオブジェクト操作の基礎的特性（操作時間、身体的負担、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。

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。

6 まとめ

我々は、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、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。我々はまず、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、実尺オブジェクトのレイキャスト操作と縮小オブジェクトの直接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、縮小オブジェクトの直接操作は、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。

参考文献

- [1] J. Brooke. SUS: A quick and dirty usability scale. *Usability Eval. Ind.*, 189, Nov. 1995.
- [2] H. J. Chae, J.-i. Hwang, and J. 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.
- [3] S. G. Hart and L. E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In P. A. Hancock and N. Meshkati eds., *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139–183. North-Holland, 1988.
- [4] E. Kruijff, J. E. Swan, and S. Feiner. Perceptual issues in augmented reality revisited. In *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 3–12, 2010.
- [5] J. H. Lee, S.-G. An, Y. Kim, and S.-H. 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.
- [6] N. Ltd. Nreal Light - ウェアラブル複合現実グラス. <https://www.nreal.ai/light/>. (Accessed on 09/20/2021).
- [7] Microsoft Corporation. HoloLens 2—Pricing and Options — Microsoft HoloLens. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens/buy>. (Accessed on 09/20/2021).
- [8] 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?activetab=pivot:overviewtab>. (Accessed on 09/20/2021).
- [9] Microsoft Corporation. Microsoft HoloLens — Mixed Reality Technology for Business. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>. (Accessed on 09/20/2021).
- [10] 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 09/20/2021).
- [11] 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 09/20/2021).
- [12] A. Mulloni, H. Seichter, and D. 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.
- [13] B. Nuernberger, E. Ofek, H. Benko, and A. 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.
- [14] I. Poupyrev, M. Billinghamst, S. Weghorst, and T. 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.
- [15] D. W. Seo, H. Kim, J. S. Kim, and J. Y. Lee. Hybrid reality-based user experience and evaluation of a context-aware smart home. *Computers in Industry*, 76:11–23, 2016.
- [16] R. Stoakley, M. J. Conway, and R. 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.
- [17] Y. Sugiura, H. Ibayashi, T. Chong, D. Sakamoto, N. Miyata, M. Tada, T. Okuma, T. Kurata, T. Shinmura, M. Mochimaru, and T. 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.