

東京大学新領域創成科学研究科
複雑理工学専攻

2022 年度
修士論文

遮蔽された仮想物体への触覚付与に よる操作性向上

2022 年 9 月 2 日提出
指導教員 篠田 裕之 教授

和田 莉奈

概要

VR 空間における仮想物体の操作性向上において、触覚フィードバックが有用であることはすでに確認されている。しかしながら、触覚フィードバックが補っている視覚情報の詳細はまだ解明されていない。そこで本稿では、非接触型触覚デバイスを用いて、次に示す二つの観点から触覚フィードバックが補う視覚情報を検証することで、VR 空間における仮想物体の操作性のさらなる向上方法を検討した。(1) 触覚フィードバックが与える物体の横幅情報の正確性について検証し、触覚情報により補うことのできる視覚情報について、横幅情報の観点から検討。(2) 触覚フィードバックが一部遮蔽物体の操作性に与える影響を検証し、触覚情報により補うことのできる視覚情報について、厚み情報と提示位置の観点から検討。

これら検討結果をもとに、より操作のしやすい VR 環境を考察する。最終的には、作業支援など日常場面で万人が使いやすい VR のインターフェースを検討する。

目次

第 1 章	序章	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	1
1.3	本論文の構成	1
第 2 章	原理	3
2.1	Head-Mounted-Display : HMD	3
2.2	触覚フィードバック	4
第 3 章	遮蔽された空間における触覚フィードバックの大きさ情報の正確性検討	8
3.1	概要	8
3.2	提案手法	9
3.3	実験	10
3.4	考察	14
3.5	結言	15
第 4 章	一部が遮蔽された仮想物体への触覚付与による操作性検討	16
4.1	概要	16
4.2	提案手法	16
4.3	実験	18
4.4	考察	24
4.5	結言	24
第 5 章	結論	26
	関連発表	27
	参考文献	28
	謝辞	30

第 1 章

序章

1.1 研究背景

近年、Head-Mounted-Display (HMD) はエンターテインメント分野のみならず、その視覚的認識の手軽さから、作業支援や医療シミュレーションの分野においても活用されている。HMD により提示される仮想現実では、視覚的に現実に近い体験をすることができ、仮想物体をインタラクティブに操作することが可能である。しかしながら、HMD 単体では実物体の把持移動動作を行う際と同様の接触感などの触力覚は提示できず、現実により近い体験を提供するには触覚フィードバックは重要な課題の一つである。また、HMD に慣れていない人には操作が難しく、同様に触覚フィードバックにより操作性が向上することが示されている [1]。しかしながら、従来研究では触覚フィードバックが補う視覚情報の検証は十分ではなく、触覚付与が与える操作性向上の影響への要因は不明瞭である。

1.2 研究目的

本研究では、まず触覚フィードバックが与える物体の横幅情報の正確性について検証した上で、触覚フィードバックが一部遮蔽物体の操作性に与える影響を検証した。これらの結果から、前者では横幅情報の観点から、後者では厚み情報と提示位置の観点から触覚情報により補うことができる視覚情報について検討した。

1.3 本論文の構成

本論文は全 5 章から構成される。第 2 章で研究背景となる HMD と触覚フィードバックの原理について述べた後、第 3 章で基礎研究として視覚情報を遮蔽された状況での触覚フィードバックによる横幅情報の正確さを検証する。この結果を踏まえ第 4 章では応用研究として、適切な触覚フィードバックを付与した HMD 環境を構築する。その上で、仮想物体の一部が視覚的に遮蔽されている場合に触覚フィードバックが与える操作性への影響を検証し、触覚情報により補うことができる視覚情報を厚み情報と提示位置の観点から検討する。これらの結果を踏

2 第1章 序章

まえた上で，第5章で結論と今後の展望を述べる．

第 2 章

原理

本章では、本研究の背景となる HMD と触覚フィードバックの原理を説明した後、本研究で
使用した装置の選定理由を述べる。

2.1 Head-Mounted-Display : HMD

2.1.1 仮想空間の提示技術

人口現実感「Virtual Reality (VR)」は、コンピューター内に構築された仮想空間と対話
するヒューマンインターフェースのことであり、時間や空間を超えた仮想体験を可能にする。
そのような仮想空間を視覚的に体験できる VR デバイスは、専用のメガネを装着することで
360 度全ての視界が仮想現実となる装置であり、メタ社の Oculus Quest 2 などがその代表例
である [2]。高い臨場感が見込める一方、ユーザーの手など実物体を仮想空間に提示するには、
様々なセンシング技術により位置を特定する必要がある、実物体を模した仮想物体映像の遅延
などリアリティにおいてまだ課題がある [3]。この遅延は映像酔いなどの違和感を生むことが
確認されており、日常的に万人が使用するには問題も多い [4]。一方、現実世界を電子的に増
強・拡張する「Augmented Reality (AR)」は、現実世界にスクリーンなどを通して文字情報
等の情報を視覚的に付与することができる。これら VR と AR を組み合わせた技術が「Mixed
Reality (MR)」である。現実世界の持つ情報を仮想空間に持ち込むことでより豊かな表現が
可能となり、作業支援や手術シミュレートなど幅広く活用されている [5]。VR や MR は未だ
発展途中ではあるが、広告や案内掲示、ネットショッピングなど一般的な幅広い利用価値を秘
めており、その開発が期待されている。

2.1.2 HoloLens 2

VR 元年と呼ばれる 2016 年に発売された HMD の一つに Microsoft 社の HoloLens 2 があ
る [6]。HoloLens 2 は先に述べた複合現実 MR を表現できるデバイスであり、半透明のレンズ
から現実世界を認識した状態でレンズから眼球に仮想現実が結像され、ユーザーは周囲の環境
を視認しつつ複合現実の世界観を楽しむことができる。また HoloLens 2 の最大の特徴は、物

4 第2章 原理

理的コントローラを介さずに、仮想物体に直接手で触れて操作することができることだ。本研究では作業支援などで、周囲の状況や手元を遅延なく直接確認しながら使用することを想定しているため、HMDの中でもMRデバイスであるHoloLens 2を使用した。

2.2 触覚フィードバック

触覚フィードバックとはその名の通り、触覚を与えることでユーザーが直感的に操作を可能にする方法である。古くは工場用ロボットをターゲットに、触覚・力覚を理解し活用する研究全般として進んだHapticsであったが、現在では医療やユーザーインターフェース、エンターテインメント、生活・健康支援といった人間の動作に対して触力覚刺激をフィードバックするインタラクション技術を主に幅広い応用領域が展開されている。特に、VR空間における触覚付与の研究が盛んに行われており、前述のOculus Quest 2では付属の専用グローブを装着することで得られる振動感により高い没入体験を可能としている。

では人間はどのように触覚刺激を感じているのか、その概要を次に示す。

2.2.1 皮膚感覚

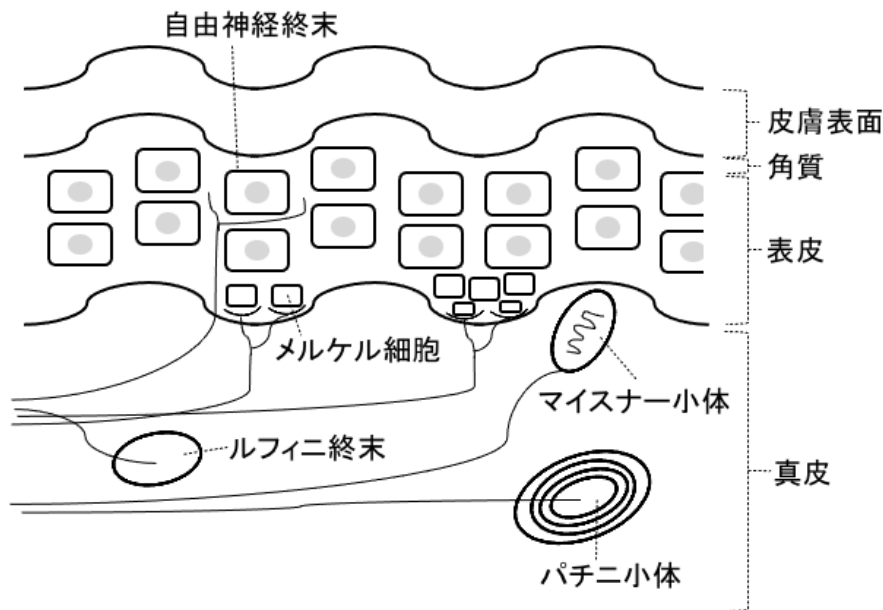


図 2.1: 皮膚の触覚センサの概要

人間の感覚について、仲谷ら [7] や下条ら [8] の先行研究をもとに説明する。

我々が触ったものの感覚「触感」を感じるのは皮膚からの感覚「触覚」だけではなく、他の五感（視覚、聴覚、嗅覚、味覚）や高次の認知機能が触覚と組み合わせられることで、一つの触感イメージとして感じられる。そもそも人間の感覚は、視覚や味覚、聴覚、嗅覚を感じる「特

殊感覚」，臓器感覚を司る「内臓感覚」，そして皮膚感覚や姿勢，運動の制御に役立つ骨格筋や腱などの固有受容感覚を感じる「体性感覚」の3つに大別される．また，五感の中で触覚のみが有する特徴の一つに，感覚を得る部位が全身に分散していることが上げられる．皮膚は面積 $1.6 \sim 1.8\text{m}^2$ （約畳一畳分），重さ 3kg と人体で最大の臓器であり，その表皮が触覚を感じるインターフェースとなっている．

人間は皮膚に入り込んだ末梢神経の先端にある触覚のセンサが，圧力や振動によって細胞が変化したことを感じ取ることで触覚を得ている．この触覚センサはその機能に応じて，痛みや温度，圧力を感知する「自由神経終末」と機械受容器と呼ばれる「メルケル細胞」，「マイスナー小体」，「パチニ小体」，「ルフィニ終末」などに分かれている（図 2.1）．遅順応性に分類される「メルケル細胞」「ルフィニ終末」は持続的な圧力に対して応答性を持つ [9]．やさしく押された圧覚を感じるのは「メルケル細胞」，皮膚のノビに応答するのが「ルフィニ終末」と言われているが，ルフィニ終末はその解剖学や，触覚刺激を神経に伝えるメカニズムについては未だ解明されていない．速順応性に分類される「マイスナー小体」，「パチニ小体」は皮膚上の動き刺激に強く反応する．パタパタと感じるぐらいの早さの振動や，ツツとした滑りには「マイスナー小体」が，皮膚の奥の方にありより細かい振動には「パチニ細胞」が反応する．「自由神経終末」のみでは，触れられたこと自体は把握できても，触れられたものの形までは分からず，これら機械受容器が反応し，対象の特徴を抽出することができる．

以上が現在までに明らかにされている皮膚感覚のメカニズムであるが，視覚や聴覚と異なり各受容器の空間的変形に対する応答性や，脳への伝達途中での信号処理など未解明なことも多い．触覚の完全再現には課題が多く，現在触覚フィードバックでの研究は，「物理刺激の完全再現ではなく，物理刺激が実際と異なりながらもその差異がユーザーに伝わらない」，もしくは，「知覚としても実際と異なりながらもそれを理解した上でユーザーにとって有用な刺激を目指す」ことが主流である．

2.2.2 触覚フィードバックデバイス

触覚フィードバックをユーザーに与える方法には，接触型デバイスを利用する方法と非接触型デバイスを利用する方法が存在する．接触型デバイスには，触力覚刺激の付与により物体の長さ知覚や重さ知覚等に錯覚を生じさせる Virtual Rolling Stone [10] や，振動デバイスを装着したソファ、クッション、そしてリモコンを介して，映像コンテンツに触覚を付与する超触感 HAPTIC TV [11] などがある．しかしながら，ユーザーがウェアラブルデバイスを装着する接触型触覚フィードバックデバイスはデバイス本体や配線によりユーザーの動きが制限される点，不特定多数への同時に触覚を提示するには不向きとされる点が課題となっており，これらを解決するのが非接触型触覚フィードバックデバイスである．

非接触デバイスには，超音波の音響放射圧を利用したデバイスや風の風圧を利用したデバイスなどがある．いずれも，素手で使用可能であり，仮想現実への没入感の向上や，ワークスペースの拡大などが見込まれる．中でも，次に説明する Airbone Ultrasound Phased Array (AUPA) は，時間的，空間的に高解像度に触覚を提示でき，多くの応用研究がなされている．

2.2.3 Airbone Ultrasound Phased Array : AUPA

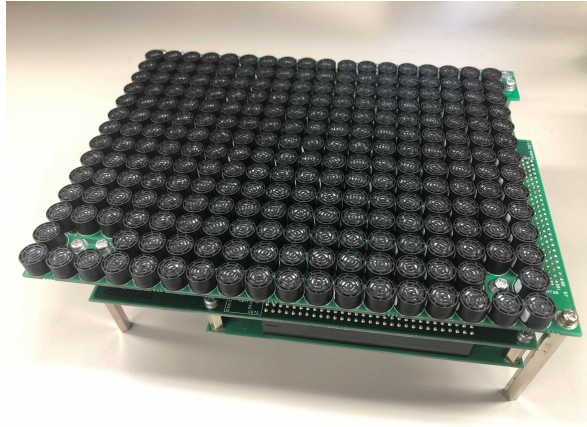


図 2.2: AUPA

空中超音波フェーズドアレイ AUPA は、表面にある超音波振動子から超音波を生成し、その位相を制御することで超音波を任意に集束させ、皮膚表面に生じる音響放射圧によって非接触に触覚を与えるデバイスである（図 2.2）[12][13][14]。音響放射圧による触覚提示は、各振動子の振幅と位相を電子的に制御することで音圧分布を変化させ、人体の皮膚表面に所望の触覚パターンを与えることが可能である。本デバイス 1 台で提示可能な最大力は 16 mN 程度である [15]。

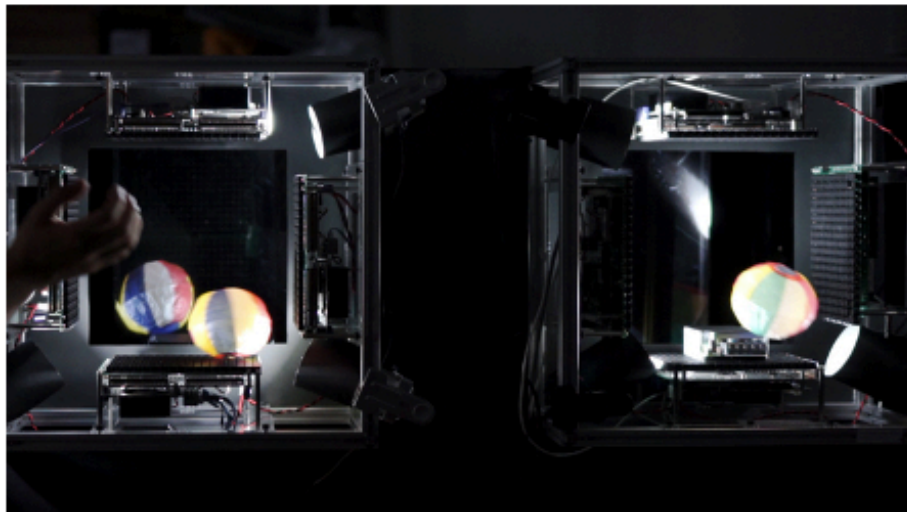
AUPA を用いた振動覚の提示手法として、超音波の振幅を周期的に変動させ振動覚を提示する Amplitude Modulation (AM) 刺激 [16] や、超音波の振幅は変化させず、刺激位置を周期的に微小変位させる Lateral Modulation (LM) 刺激 [17][18] が提案されている。これらの手法を用いると、限られた提示力のなかで、超音波触覚の知覚強度を向上させることができる。

AUPA の応用例は多岐にわたり、空中タッチパネルに触覚を付与する HaptoMime [19] や、離れた空間を仮想的に接続し触覚を付与する視触覚クローンシステム HaptoClone [20] などがある（図 2.3）。HaptoClone は触覚付与だけでなく、風船を動かす、鈴を鳴らす等、ある程度の力を実物体に作用させることが可能である。

本研究では、作業支援の場面、素手で使用し、より没入感の高い状況下での応用を想定しているため、触覚フィードバックを与えるデバイスとして、非接触型デバイスの AUPA を使用した。



(a) HaptoMime [19]



(b) HaptoClone [20]

: 左側で右側のボールを表現した仮想ボールに実際にボールを当てることで、右側のボールも動く

図 2.3: AUPA の応用例

第 3 章

遮蔽された空間における触覚フィードバックの大きさ情報の正確性検討

3.1 概要

第 2 章で述べたように，HMD により提示される仮想現実では，仮想物体をインタラクティブに操作することが可能である．しかしながら，HMD に表示された仮想物体の操作が困難な状況が存在する．その一つとして，他の仮想物体あるいは実物体との重なりにより，一部が遮蔽された仮想物体を操作する場合が挙げられる．例えば，MR デバイスにおいて機械整備作業を支援する際，複数のマニュアルやバーチャル通話画面などが重なり散らばって配置される状況がある．このように複数の仮想物体が配置された状況下で，奥に隠れた仮想物体を手前に移動させ操作したい場合，視覚情報のみではユーザーが覗き込まずに目的の物体を探し当て，手前に移動させることは困難である．他にも，実物体の PC ディスプレイの後ろに隠れた仮想物体のコップを取る場合も同様である．この際，触覚情報が付与されると，奥に隠れた仮想物体も手探りで探すことが容易となることが想像される．実際に，視覚情報なしでも，仮想物体との接触時に触覚を提示することで仮想物体を操作可能であることが既に確認されている [21]．一方で，遮蔽された仮想物体の操作性に寄与する要因は明らかではなく，それらを触覚情報によって補うことができるか検討した例はない．

本章ではまず基礎研究として，視覚的に遮蔽された空間で触覚フィードバックによる大きさ情報がどの程度ユーザーに正確に認識されるかについて検証する．具体的なアプローチは以下の通りとする．

- ・作業支援など素手での使用場面を想定し，触覚は非接触で提示した．
- ・被験者自身の指が遮蔽されている状況を想定するため，腕から先は暗幕をかけ視覚的に認識できない状況で実験を行った．
- ・指を視覚的に認識できない状況で，与えられた横幅と同じように指を開けるか，その正確性を調査した後，AUPA からの刺激幅の認知の正確性を調査した．

3.2 提案手法

3.2.1 システム概要

本研究では、非接触型触覚生成デバイスとして AUPA を使用し、視覚情報の提示として液晶ディスプレイを使用した。

3.2.2 システム構成

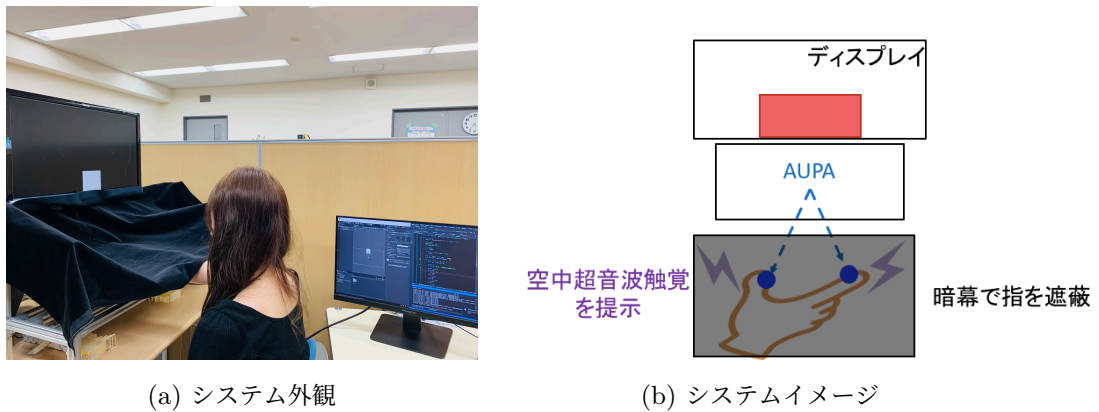


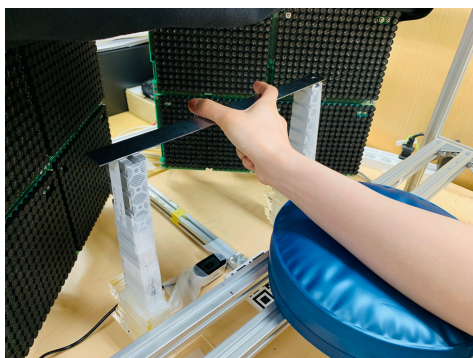
図 3.1: システム構成

本研究では、AUPA8 台、液晶ディスプレイを用いて構成したシステムを Visual Studio 2019 で制御することで実験環境を構築した（図 3.1）。AUPA による触覚提示は、被験者の親指と人差し指の腹に焦点が収束するよう Visual Studio 2019 で制御した触覚刺激を与えた。また、焦点位置のうち高さや奥行き方向は常に一定とし、横幅のみを任意に変更できる仕様とした。そのため被験者には実験の初めに触覚提示の位置合わせを行い、被験者が力を入れることなく手を固定できる場所に触覚を提示した。なお、AUPA からの触覚提示は AM 刺激を使用し、その刺激強度は 100 Hz 程度であった。

液晶ディスプレイに表示する視覚情報は、Unity で作成した横幅を任意に変更できる長方形とした。こちらも高さは 6 cm で一定とした。また、暗幕で閉鎖された空間に被験者の手を入れてもらうことで、被験者自身の手の視覚情報を遮蔽して実験を行った。

3.3 実験

3.3.1 実験概要



(a) 測定方法：手の下に web カメラを固定した



(b) 測定写真のイメージ

図 3.2: 実験 1 の測定

22 歳から 27 歳までの 12 名 (男性 9 名, 女性 3 名) を対象に被験者実験を行なった。被験者のうち右利きは 10 名, 左利きは 2 名であり, 全ての実験を利き手で行った。また AUPA を日常的に使用している被験者は 10 名, 使用経験が全くない被験者は 2 名であった。

本実験の目的は, 3.2.2 項で提案したシステムを用いた被験者実験を行い, 遮蔽された空間で触覚フィードバックによる大きさ情報がどの程度ユーザーに正確に認識されるかについて検証することである。従って, 以下の 2 つの実験を用意した。

<実験 1>

指を視覚的に認識できない状況で, 与えられた横幅と同じように指を開けるか, その正確性を検討した。具体的には, ディスプレイに表示された長方形の横幅と同じ幅になるように親指と人差し指を開いてもらった。この際, Hololen2 での応用を想定しているため, 指の形はコの字になるように開いてもらい, 表示画像と同じ大きさの仮想直方体を把持する場合を想定しながら実験するよう指示した。長方形の横幅は基準値, 基準値 $\times 0.8$, 基準値 $\times 1.2$ の 3 パターン用意し, それぞれを 3 回ずつランダムに表示されるように実験を行った。なお基準値は各被験者が自然にコの字に開いた幅とし, 実験を始める前に測定した。被験者の指の幅の測定は web カメラを使用し, 定規の真上で長方形と同じ幅だと思ふ幅に指を開いてもらい, それを写真に撮って測定した (図 3.2)。この際, 3.2.2 項の通り被験者はディスプレイの長方形だけを視覚的に認識できるように, 腕のあたりからは暗幕をかけ指の幅を視覚的に認識することはできなかった。

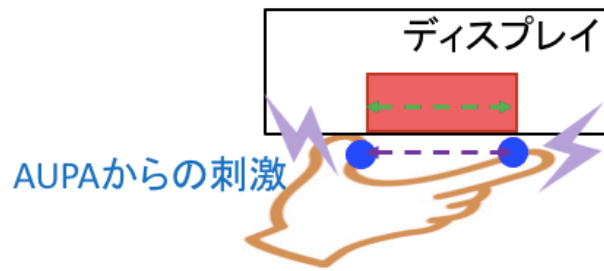


図 3.3: 実験 2 のイメージ：ディスプレイの長方形と触覚刺激の横幅を比較した

＜実験 2＞

指を視覚的に認識できない状況で、AUPA からの刺激幅の認知の正確性を検討した。ディスプレイに表示された長方形の横幅と、AUPA からの提示刺激の幅を比較してもらいその大小関係を回答させた（図 3.3）。長方形の横幅は基準値と同じに設定し、提示刺激の幅は基準値と基準値 $\pm 0.5, 1, 1.5 \text{ mm}$ の計 7 パターンを用意した。各刺激幅を 6 回、ランダムに提示し実験を行った。なおこの際も実験 1 と同様に、ディスプレイの長方形と同じ大きさの仮想直方体を把持する場合に広げる指の幅を想定しながら比較をさせた。なお、被験者は暗幕を上げ指が見える状態で 5 ～ 7 回程度刺激幅を変え練習を行い、スムーズに刺激を探せるようになってから暗幕を下ろして実験を開始した。

3.3.2 実験結果

＜実験 1＞

触覚が物体の幅知覚にどの程度効果的なのかを検証するため、まず、触覚を付与しない状況で提示された横幅をどれだけ正確に知覚できるかについて検証を行った。

ディスプレイに表示された長方形の横幅と、被験者が長方形の幅と同じになるよう開いた指の幅との差異を図 3.4 に示す。

12 第3章 遮蔽された空間における触覚フィードバックの大きさ情報の正確性検討

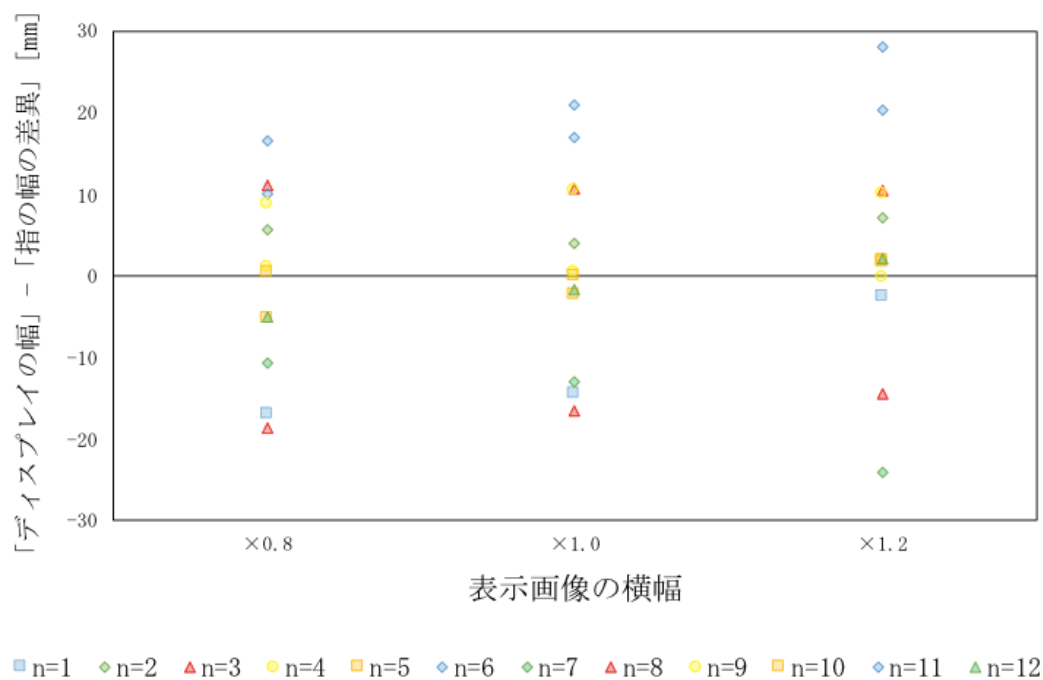


図 3.4: ディスプレイの幅と指の幅の差異

また、全被験者の差異の絶対値から求めた平均値を図 3.5 に示す。

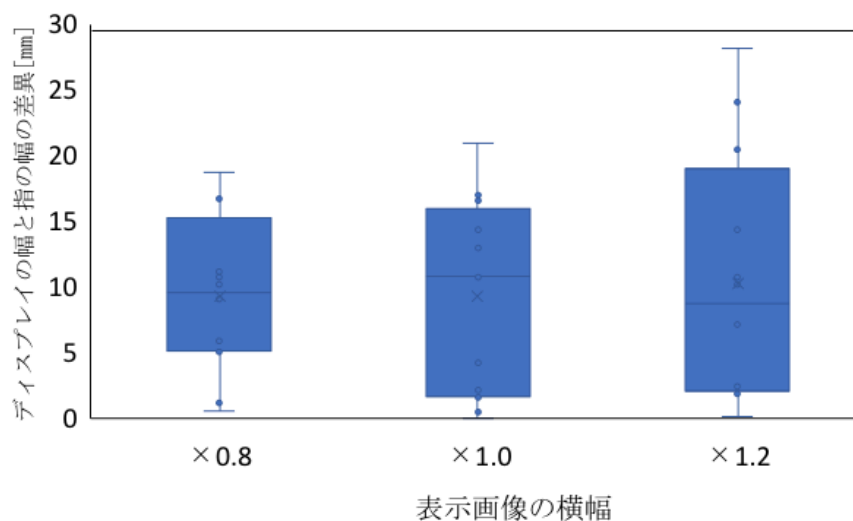


図 3.5: ディスプレイの幅と指の幅の差異の平均と標準偏差

表示画像がいずれの大きさでも誤差は 10 mm 前後となったが、標準偏差から示されるように被験者ごとのバラツキが大きい結果となった。

被験者ごとの結果を見ると、高い精度で模倣できた被験者は $n = 4, 5$ で差異は 0 ~ 1.83 mm となった一方、低い精度となった被験者は $n = 6, 7, 8, 11$ で差異は 10.67 ~

28.17 mm となった。また、長方形の横幅が大きいほど精度が低くなる傾向が全体的に見られたものの、 $n = 1$ は基準値 $\times 0.8$ では差異 17.00 mm で、基準値 $\times 1.2$ では差異 14.33 mm となるなど、横幅が小さいほど精度が低い被験者も 2 名おり、個人差が大きい結果となった。さらに、被験者ごとに差異の正負を確認すると、基準値 $\times 0.8$, 1.0 では指の幅の方が大きい被験者が 5 人、小さい被験者が 7 人とほぼ同数であったが、基準値 $\times 1.2$ では指の幅の方が大きい被験者が 4 人、小さい被験者が 8 人と小さい被験者の方が多い傾向が見られた。

<実験 2>

触覚が物体の幅知覚にどの程度効果的なのか検証するため、ディスプレイに表示された画像の横幅と AUPA で付与される 2 点の触覚の横幅を比較し、視覚情報と触覚情報の知覚の正確性について検証を行った。

ディスプレイに表示された長方形の横幅と比較した時、AUPA からの刺激幅の方が大きいと答えた被験者ごとの回答を図 3.6 に示す。

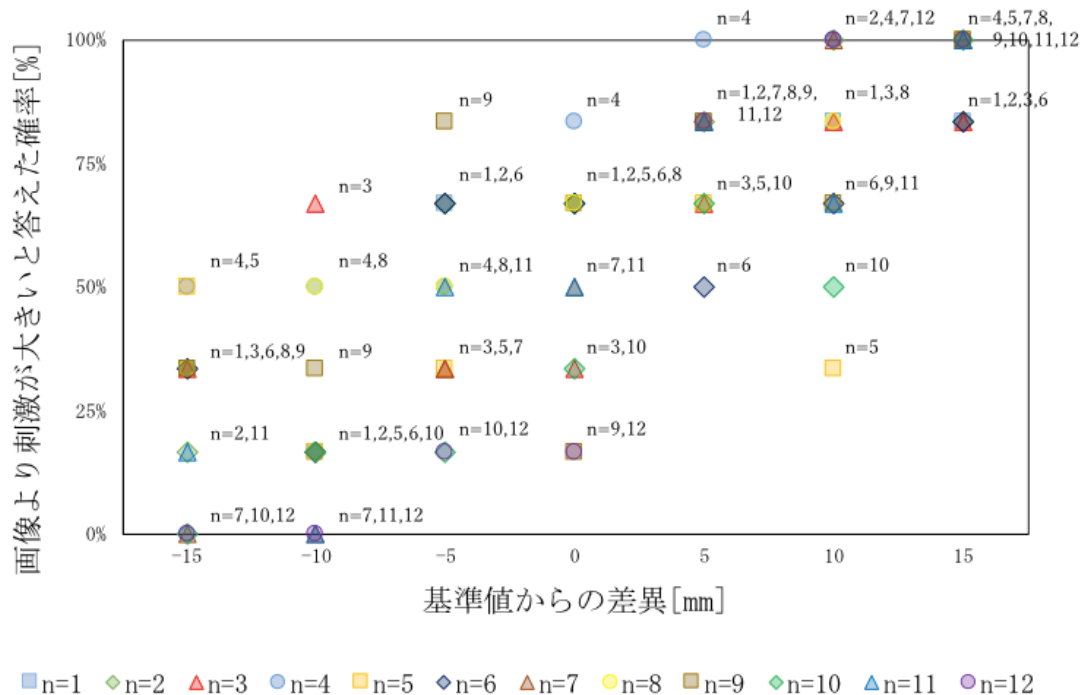


図 3.6: 画像の幅と触覚刺激を比較した際の被験者ごとの回答

差異 -15 mm の全試行全で刺激幅の方が画像の幅と比べてより小さいと正しく認識できた $n = 7, 10, 12$ の 3 人は、差異 -10 mm, -5 mm でも 67 ~ 100 % と高い正答率であった。一方、差異 -15 mm で逆転して回答した割合が最も高かった被験者は $n = 4, 5$ の 2 人おり、差異 -15 mm の全試行のうち 50 % を大きいと答えた。その被験者らは差異 -5 mm でも 33 ~ 50 % を逆転して答えた。さらに、差異 -5 mm で最も逆転した割合が大きかった被

14 第3章 遮蔽された空間における触覚フィードバックの大きさ情報の正確性検討

験者 $n = 9$ は、差異 -5 mm 全試行のうち 83% を逆転して答え、差異 -15 mm では 33% を大きいと答えた。

全被験者回答の平均をシグモイド関数でフィッティングしたものを図 3.7 に示す。

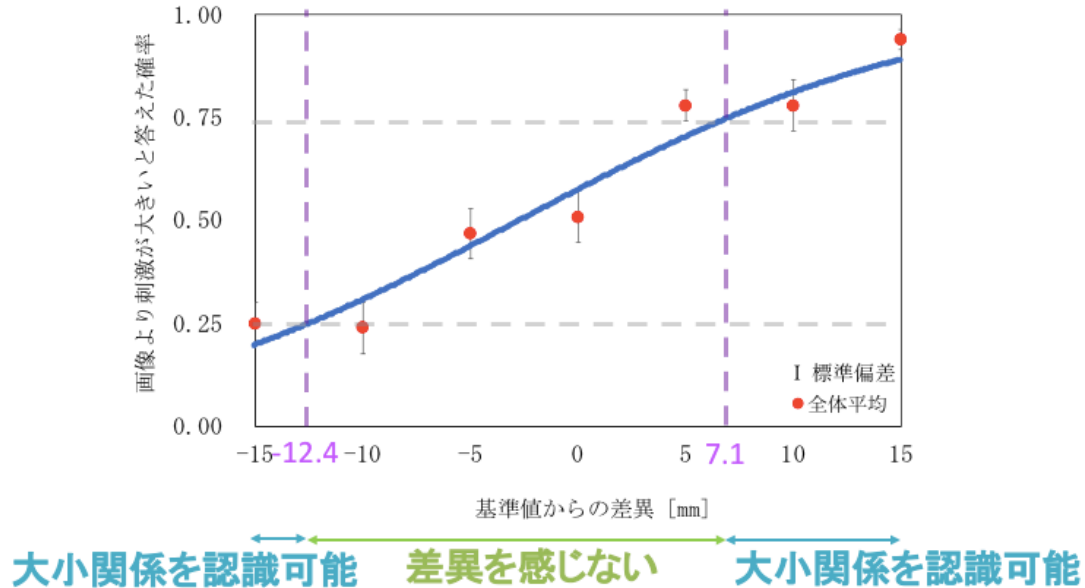


図 3.7: 全被験者の回答平均

弁別確率 75% の元での弁別域を検討すると、基準値に対して -12.4 mm 以上 7.1 mm 以下の差異であれば、視覚情報と刺激幅の差異を感じない結果が得られた。一方、 -12.4 mm 以下、 7.1 mm 以上の差異であれば、視覚情報と刺激幅の大小関係を正確に認識できる結果となった。

3.4 考察

実験 1 において長方形の横幅が大きいほど認識精度が低く、幅の再現性が低くなる傾向がみられ、実験 2 において AUPA の刺激幅がディスプレイの横幅より大きい方が視覚情報との比較をより正確にしやすい傾向が得られた。これは、物体の横幅が大きい時、視覚情報から得られる横幅情報の正確性が低く認識が曖昧となり、触覚付与による横幅情報の認識が優位に働く可能性が示唆される。

また、実験 2 において基準値 -15 mm の大小関係を逆転して答える確率が 50% と最も高かった $n = 4, 5$ は、実験 1 の精度も誤差 $0\text{ mm} \sim 1.83\text{ mm}$ と全被験者の中で最も精度の良い結果となった。これは、視覚情報と触覚により補われる情報を比較した際に、視覚情報を正確に認識できる被験者は触覚情報の認識が曖昧になりやすく、また、視覚情報の認識が曖昧な被験者は触覚情報の認識が優位になる可能性を示している。

本実験においてディスプレイで表示された映像を「HMD 空間においてユーザーの認識した映像」、つまり「仮想直方体の前面の一部」と仮定すると、仮想直方体の全容が見えた際にオブジェクトと触覚フィードバックのサイズ感に違和感を感じない大きさが、実験より得られた

−12.4 mm から 7.1 mm である (図 3.8). つまり, 仮想物体が遮蔽され一部しか視覚的に認識できない状況で仮想物体の厚みより 10 mm 前後異なる触覚を与え, 仮想物体を手前に移動させ全容を視覚的に認識した際にも, そのサイズに違和感を感じないことが明らかになった.

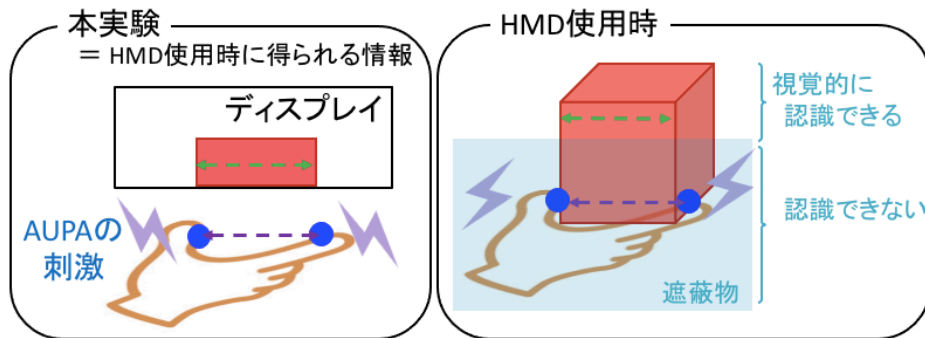


図 3.8: 本実験を HMD に応用した際のイメージ図

3.5 結言

本研究では, 視覚的に遮蔽された空間で触覚フィードバックによる大きさ情報がどの程度ユーザーに正確に認識されるかについて検討した. 被験者実験の結果を通して, 基準値となる横幅に対して −12.4 mm 以上 7.1 mm 以下の差異であれば, 視覚情報と触覚付与による刺激幅の差異を感じない結果が得られた. また, 視覚情報と触覚により補われる情報を比較した際に, そのどちらの情報が優位になるかは, 被験者ごとの特性に依存する可能性が示唆された.

本結果はディスプレイに表示された映像を HMD 空間においてユーザーが認識する仮想直方体の前面の一部だと仮定すると, MR デバイスにおける作業支援への転用が可能である. 今回得られた結果より, 一部遮蔽仮想物体に対する触覚フィードバック及び物体の把持移動の基準となる接触判定が 10 mm 程度曖昧でも問題ないことが示唆される. これは, 一部遮蔽仮想物体を把持移動させる際にユーザーが違和感を感じないために必要な触覚精度といえる. この結果を踏まえ, 次章では仮想物体の一部が視覚的に遮蔽されている場合での仮想物体の操作性を向上させる環境構築について検討した.

第 4 章

一部が遮蔽された仮想物体への触覚付与による操作性検討

4.1 概要

本章では、第 3 章の結果を踏まえ、仮想物体の一部が視覚的に遮蔽されている場合で適切な触覚フィードバックを付与した HMD 環境を構築する。構築した環境の下、ユーザーは一部の視覚情報により仮想物体の厚みや自身との相対位置をある程度把握している状態で、触覚フィードバックが遮蔽物体の操作性に与える影響を検証し、触覚情報により補うことができる視覚情報について検討する。具体的なアプローチは以下の通りとする。

- ・ 第 3 章同様作業支援など素手での使用場面を想定し、触覚は非接触で提示した。
- ・ 被遮蔽物体の初期配置や大きさによる操作性向上への影響を調査した。
- ・ 被験者へのアンケートにより、主観的效果も調査した。

4.2 提案手法

4.2.1 システム構成

本研究では、HMD として HoloLens 2 を、非接触型触覚生成デバイスとして AUPA を使用し、仮想物体に触覚を付与するシステムを構築した。

4.2.2 システム概要

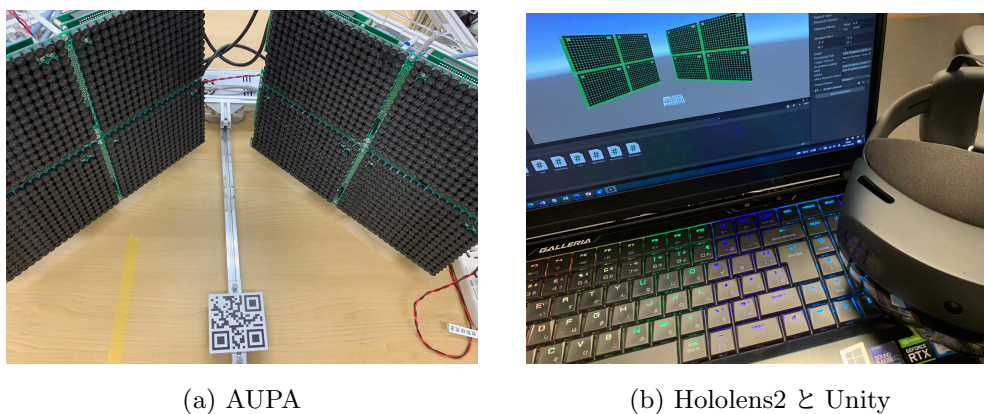


図 4.1: システム概要

本研究では、AUPA8 台、HoloLens 2 を用いて構成したシステムを Unity によって制御することで実験を行った (図 4.1)。具体的には、被験者の手の位置を HoloLens 2 のハンドトラッキング機能により取得し、指先との接触状況に応じて仮想物体の位置を変化させ、同時に超音波触覚を提示した。

触覚付与と仮想物体の把持移動の詳細は以下の通りである。

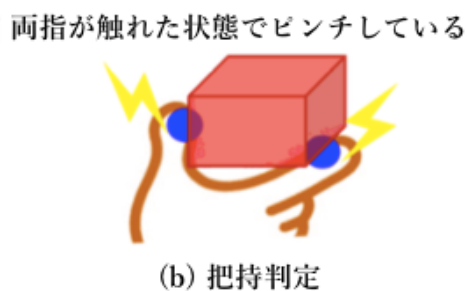
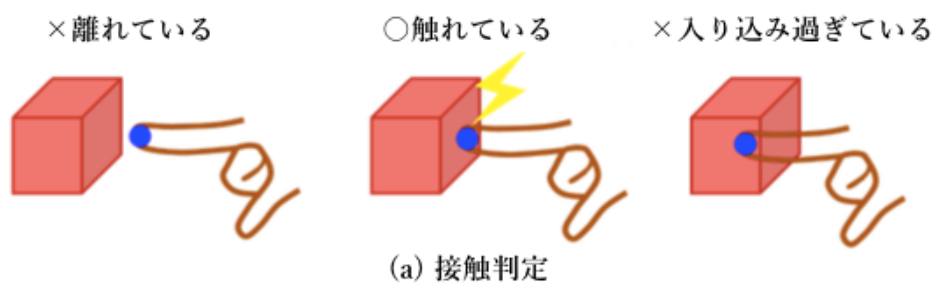


図 4.2: 仮想キューブの接触把持判定

18 第4章 一部が遮蔽された仮想物体への触覚付与による操作性検討

HoloLens 2 には、2本の指でピンチして仮想物体を移動させるジェスチャー操作が標準で用意されている。しかしながら、本研究では、より実世界での操作感覚に近づけるため、現実物体と同様に物体の表面を持つことで操作できるよう設定した(図4.2)。まず、HoloLens 2 に搭載されているハンドトラッキング機能を利用して被験者の手の位置を取得し、親指と人差し指に直径1cmのコライダーを設定した。さらに、仮想物体の表面にコライダーの両方が接触し、かつ、それらの表面が「物体の厚み-2.0cm」以上離れているときに移動するように設定した。そのため被験者は、仮想物体の一面のみを触って動かすことや、仮想物体の内側を突き抜けて持つことはできない。また、物体位置の更新はUnityのフレームレートに合わせて60fpsとした。

AUPAによる触覚提示は、HoloLens 2で取得した位置情報をもとに行った。仮想物体の表面に指先のコライダーが接触したタイミングで、その接触位置を集束点とし、親指と人差し指それぞれに触覚刺激を与えた。なお、AM刺激を使用し、刺激強度は100Hz程度であった。

4.3 実験

4.3.1 実験概要

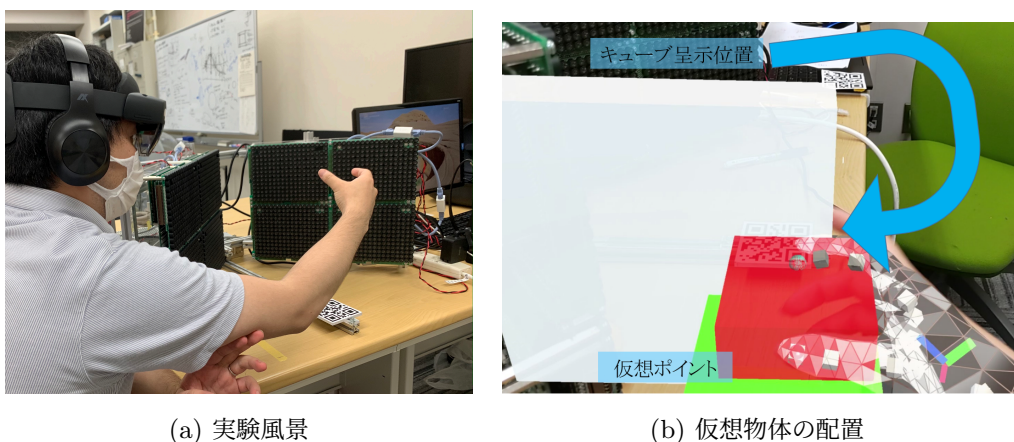


図 4.3: システム概要

22歳から26歳までの4名(男性3名、女性1名)を対象に被験者実験を行なった。被験者は、仮想物体として提示する白い壁の奥に提示された赤い仮想キューブを、壁に遮蔽された下側を把持したまま、手前の緑色の仮想ポイントまで移動させるタスクを行なった(図4.3)。この際、仮想キューブは前面の上側一部のみ視覚的に認識できるように配置した。なお、視覚情報の一部が限られている際に触覚情報が補う情報を検討するため、仮想キューブの一部が隠れるように白い壁を配置し、キューブは上側の一部のみが見えるように設定した。したがって、壁の奥に手があるとき、被験者は自身の手を視認することはできず、仮想物体や自身との手の相対位置は遮断されていた。なお、仮想物体は壁を突き抜けることはできず、必ず壁の横を

通って手前に持ってくるよう指示し、また、仮想物体は回転しないよう設定した。

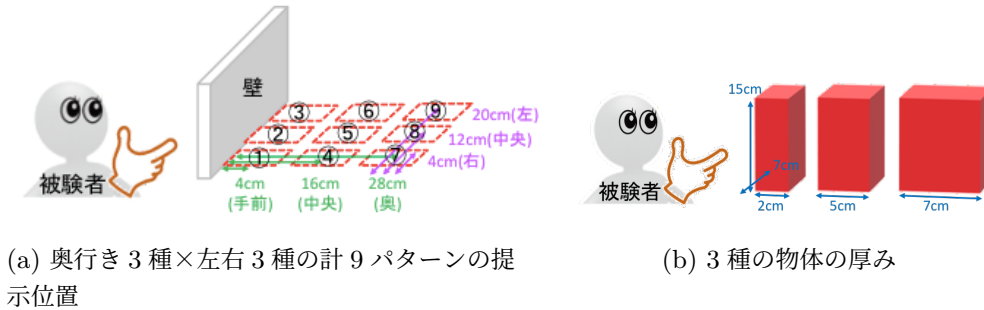


図 4.4: 提示位置と仮想キューブの厚み

本実験の目的は、4.2.2 項で提案したシステムを用いた被験者実験を行い、触覚情報を付与することで仮想物体の厚みや提示位置情報をより正確に認知できるかについて検討することである。従って、仮想キューブの厚みや提示位置を複数設定した（図 4.4）。具体的には、横幅は 7 cm、高さは 15 cm に全て固定した上で、厚みが 2 cm, 5 cm, 7 cm の 3 種類、提示位置が壁からの奥行き方向に 4 cm, 16 cm, 28 cm の 3 種類、壁の右辺から左方向に 4 cm, 12 cm, 20 cm の 3 種類の計 27 パターンを設定した。被験者にはあらかじめ、物体の厚みが 3 種類あることを伝えてから、これら 27 パターンからランダムに提示される仮想キューブを仮想ポイントまで移動させるタスクを各パターン 1 回ずつ行った。これを 1 セットとし、触覚あり/なしでそれぞれ 2 セットずつ、合計 4 セット行った。なお、被験者はいずれも HMD および AUPA に触れた経験がほとんどなかったため、触覚あり/なしをどちらも 1 セットずつ練習として行った。

実験を開始する前に、各被験者に対して、デバイスおよび触覚の位置合わせを行った。本システムでは、HoloLens 2 と AUPA の座標系を Vuforia[22] によって QR マーカーを原点として認識することで合わせている。しかし、視線追従の機能により HoloLens 2 起動時に QR マーカーの認識位置が実際とずれてしまう問題があった。そこで、今回は初期原点として認識された位置に青いキューブを生成し、それを QR コード上に移動させることで、原点の位置を補正した。

4.3.2 評価方法

タスク中の t_1 , t_2 の時間を計測し、その合計として t_3 を設定した。

t_1 : キューブが生成されてから触れるまで

t_2 : キューブに触れてから仮想ポイントに到着するまで

t_3 : キューブが生成されてから仮想ポイントに到着するまで ($t_1 + t_2$)

また、実験終了後、リッカート尺度を採用したアンケートを行うことで、厚みや提示位置の認識における触覚刺激の有用性を確かめた。アンケートの内容は以下の通りである。

Q1. 物体の位置の特定のしやすさ

(1: 非常に特定しにくい~7: 非常に特定しやすい)

Q2. 厚み知覚への触覚の関与

(1: 全く関与していない~7: 非常に関与している)

4.3.3 実験結果

触覚付与が一部遮蔽物体の操作性に与える影響を検し、触覚情報により補うことができる視覚情報について検討するため、全タスクの平均を求めたあと、厚みと提示位置ごとの結果を求めた。

まず、全タスクにおける t_1 (キューブ生成から触れるまで), t_2 (触れてから仮想ポイント到達まで), $t_3(t_1 + t_2)$ の平均値を図 4.5 に示す。

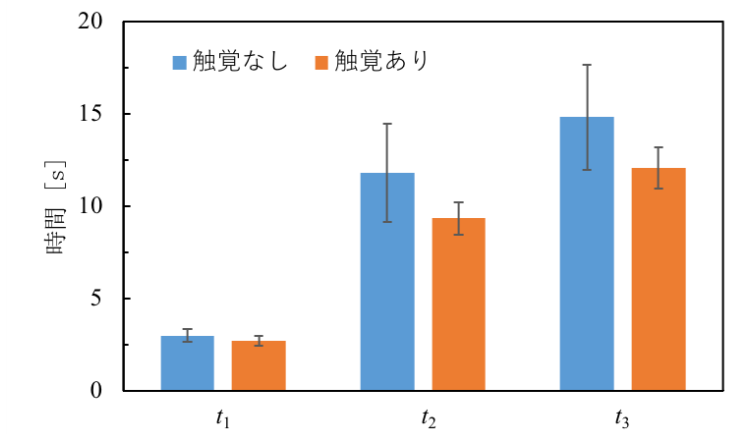


図 4.5: 所要時間の平均値

いずれも触覚フィードバックがある方が所要時間の減少が確認され、本実験において触覚情報の付与は、一部遮蔽物体の操作性向上に有用であることが確認された。

次に、仮想キューブの厚みごとの t_1 , t_2 , t_3 の平均値を図 4.6 に示す。

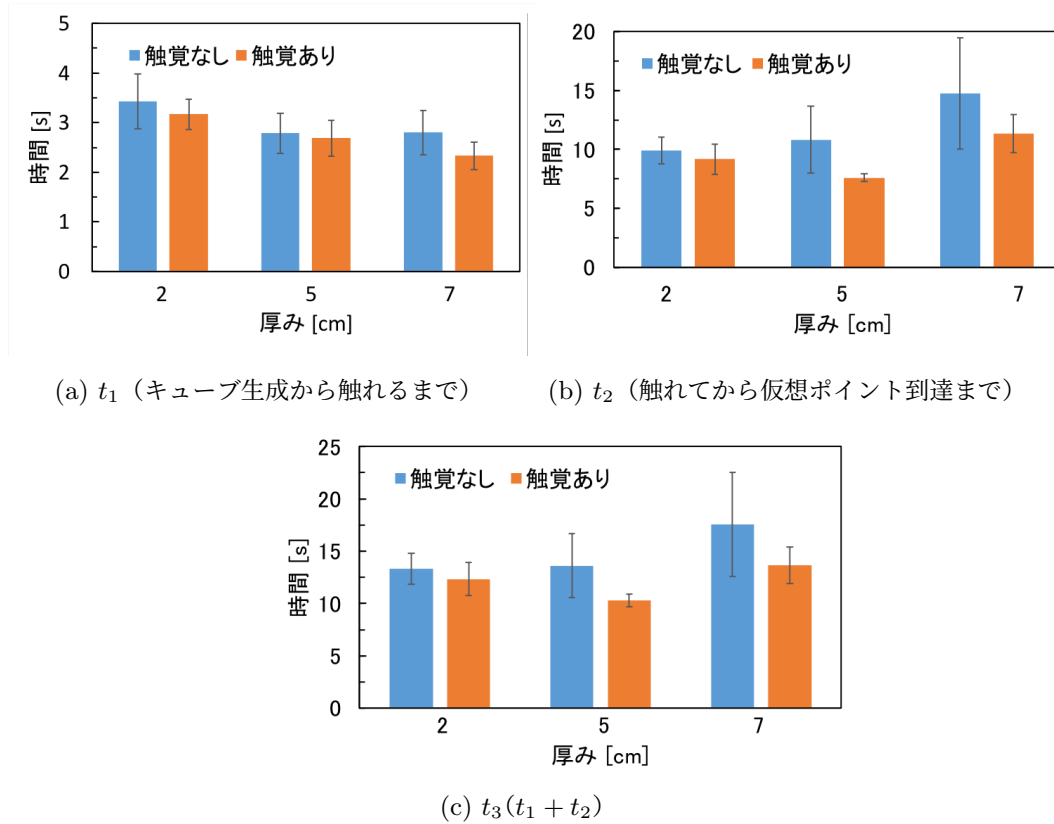


図 4.6: 仮想キューブの厚みごとの所要時間の平均値

いずれの厚みでも触覚フィードバックによって所要時間が減少したことが確認できた。ユーザー評価においても、図 4.7 に示す通り、厚み知覚において触覚フィードバックは有用であるとの評価が得られた。

また、仮想キューブの厚みが大きくなるほど t_1 が小さくなる傾向が見られた。このことから、本実験条件のように視覚情報の一部が遮断されている場合、ユーザーにとって薄い仮想物体の方が厚みの予測・把握が難しく感じることを示唆された。一方で、 t_2 は仮想キューブが薄くなるほど小さくなる傾向が見られた。

さらに、触覚あり/なしで比較を行うと、 t_1 、 t_2 、 t_3 いずれも厚みが大きくなるほど時間差が大きくなる傾向がみられた。

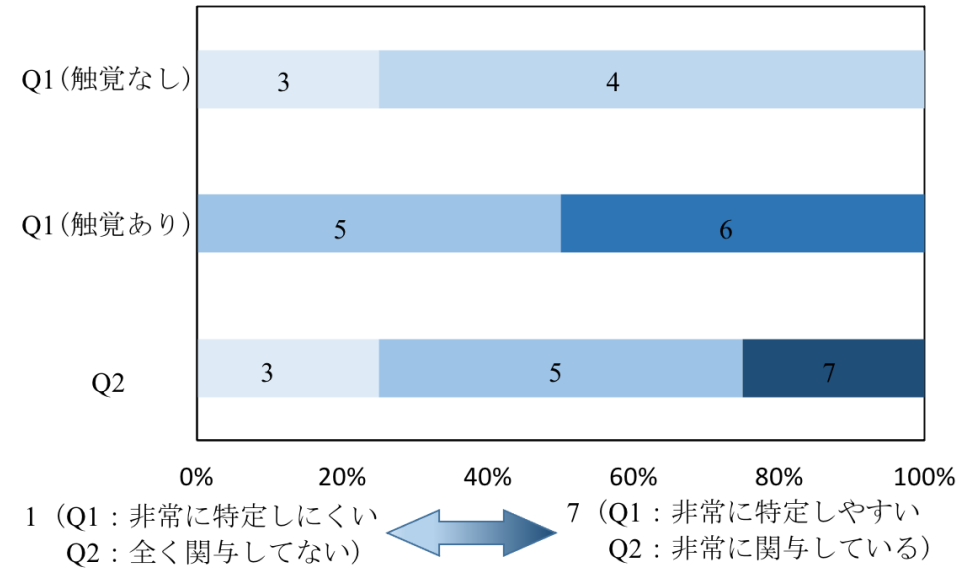


図 4.7: ユーザー評価

最後に、仮想キューブの提示位置ごとの t_1 , t_2 , t_3 の平均値を図 4.8 に示す.

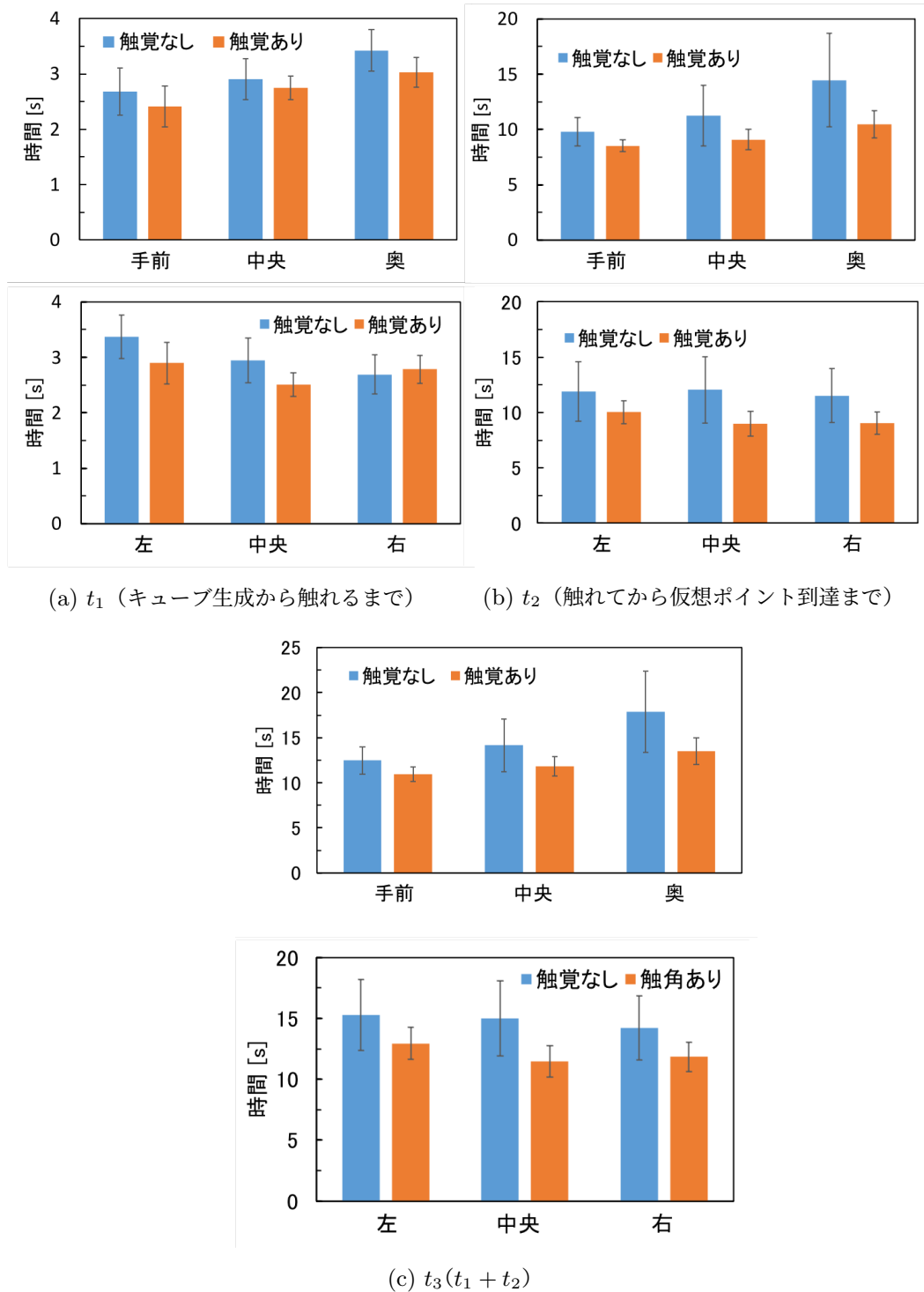


図 4.8: 仮想キューブの提示位置ごとの所要時間の平均値

いずれの提示位置でも触覚フィードバックによって所要時間は減少したため、操作性は向上したといえる。

ユーザー評価においても、図 4.7 に示す通り、物体の位置特定において触覚フィードバック

は有用であるとの評価が得られた。また、奥行き方向の提示位置による t_1 , t_2 , t_3 を比較すると、いずれもユーザーから見て奥に提示するほど所要時間は増加した。また、横方向の提示位置による t_1 を比較すると、触覚ありの場合、中央に提示した場合が最も小さい結果となった。

さらに、 t_1 , t_2 共に、奥行きが奥になるほど、また、提示位置が中央に近いほど、触覚ありとなしとの時間差が大きくなった。このことから、提示位置情報を触覚で補う際、ユーザーから奥行き方向に遠く、中央に近いほど、触覚情報が有用となることが示唆された。

4.4 考察

図 4.6 で仮想キューブが薄くなるほど t_2 は小さくなる傾向が見られた。このことから、厚い仮想物体を運ぶ際、ユーザーは自らの実空間での体験からより重みを想像し、無意識に物体を移動させる速度を低下させている可能性が考えられる。今後の研究では、横幅や高さをパラメータに加え上で、同じ厚みでも体積が異なる仮想物体の移動時間を検証するなど、視覚情報による仮想物体の重み予想についても検討したい。

また、図 4.8 で横方向の提示位置について比較すると、提示位置が中央に近いほど、触覚が位置情報をよく補うことが確認された。これは、HoloLens 2 のハンドトラッキングの精度に起因していると考えられる。本研究では、AUPA による超音波の集束点は HoloLens 2 でトラッキングした座標を元に決定した。しかし、このトラッキングカメラの反応速度やキャリブレーション精度には限界があり、HoloLens 2 の z 軸から遠ざかるとそれに応じて実際の手とメッシュがずれる傾向が見られた。本研究の様に数 cm レベルの位置精度が求められる場面では改善の必要があることが判明したといえる。今後の研究では、Realsense など外付けのキャリブレーションをシステムに組み込むことで、より高精度に超音波の焦点を生成できるように改善する。

最後に、図 4.8 に示した通り、物体の提示位置がユーザーから奥に遠くなるほど、所要時間が増加したという結果が得られた。この所要時間の増加は、ユーザーにとっての認知の難しさを示しているのではなく、単純に距離の差に起因する結果である可能性がある。今後は、奥行き方向の提示位置と所要時間に適切な補正を加え、触覚情報が補う奥行き情報を評価できる環境を構築する。

4.5 結言

本研究では、仮想物体の一部が視覚的に遮蔽されている場合での仮想物体の操作性を向上させる環境構築について検討した上で、触覚フィードバックが遮蔽物体の操作性に与える影響を検証した。この結果、第 3 章の結論を元に 10 mm の精度で触覚を付与し、仮想物体の把持移動を可能にしたシステムでは、触覚提示により把持移動にかかる所要時間が短縮し、ユーザー評価でも触覚付与が操作性向上に有用であることが示された。

さらに、触覚情報により補うことができる視覚情報について検討するため、仮想物体の厚みや提示位置に着目して結果を解析すると、仮想物体の提示位置や厚みに関わらず、把持移動に

かかる所要時間は触覚付与により短縮することが示された。また、物体の厚みが大きいほど、触覚により厚み情報が良く補えることが確認され、ユーザーから奥行き方向に遠い位置に提示された物体ほど触覚情報が良く補えることが確認された。

一方、提案システムでは把持認識精度が低く、キャリブレーションシステムの精度を向上させる必要性も露わになった。これを解決するためには、外付けのセンサ等を利用し、トラッキング精度を上げる必要があり、今後の課題となった。また、外付けセンサを使用することによる追加効果として、実物体の奥に遮蔽された仮想物体も操作可能となり、MR デバイスの特徴をより活用してリアリティを増加することができることが考えられる。今後は、この検討結果を活用しより適切な触覚情報を与えることで、仮想現実の現実感を増し、より操作性の高い VR 環境をユーザーに提供できるシステムを構築したい。

第 5 章

結論

本研究では、VR 空間における仮想物体の操作性を向上させるため、触覚フィードバックが補っている視覚情報の詳細に着目し、二つの研究を行なった。はじめに、視覚的に遮蔽されたユーザーの手に触覚を付与した際、横幅情報をどの程度正確に認識できるかを検討した。この結果、基準値となる横幅に対して -12.4 mm 以上 7.1 mm 以下の差異であれば、視覚情報と触覚付与による刺激幅の差異を感じない結果が得られた。これはユーザーの手や操作したい仮想物体が遮蔽されている際など、HMD においてキャリブレーションが困難な場合にも応用が可能であると考えられる。これら本研究の結果より、仮想物体とユーザーの手が遮蔽され視覚的に認識出来ない場合、触覚フィードバックは操作性向上に有用であるが、触覚付与の精度は仮想物体の幅と 10 mm 程度曖昧でもユーザーは違和感を感じにくいことが期待される。

次に、仮想物体の一部が視覚的に遮蔽されている場合での仮想物体の操作性を向上させる環境構築について検討し、触覚フィードバックが遮蔽物体の操作性に与える影響と触覚情報により補うことができる視覚情報を検証した。この結果、 10 mm の精度で触覚を付与し、仮想物体の把持移動を可能にしたシステムでは、仮想物体の提示位置や厚みに関わらず、触覚提示により把持移動にかかる所要時間が短縮し、ユーザー評価でも触覚付与が操作性向上に有用であることが示された。一方、キャリブレーションシステムの精度を向上させる必要も明らかになった。

今後の展望として、操作性が向上する HoloLens 2 での環境構築に繋げ、作業支援など日常場面で万人が使いやすい VR のインターフェースの構築に活用したい。まず、外付けセンサを導入し、より高い把持認識精度のシステムを構築したい。外付けセンサの導入により、パソコンのディスプレイの裏側に隠れた仮想ウィンドウを操作するなど、実際の作業支援で想定される実物体の裏側に隠れた仮想物体の操作も可能となる。また、本研究では、仮想物体を指で挟み把持移動する場合のみを想定し、触覚フィードバックの精度と有用性を明らかにしたが、複雑な組み立てなどの作業支援に応用する際のシステムも検証したい。組み立て作業には、把持移動以外にも、ネジしめなどの回転動作や積み上げ動作など細かな作業が考えられる。これらの操作に触覚フィードバックを与えられるようシステムを実装した上で、操作性の高い VR のインターフェース構築に活用したい。

関連発表

国内会議（査読無し）

1. 和田莉奈, 水谷沙耶, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之, “遮蔽された仮想物体への触覚付与による操作性検討” 第 26 回バーチャルリアリティ学会大会, , オンライン開催, Sep.16-18, 2021

参考文献

- [1] 野間春生, 岩田洋夫. “フォースディスプレイを用いた高次元ボリュームデータの力覚表現”. Symposium on Human Interface 講演論文, pp. 121–128, 1993.
- [2] Meta Platforms, Inc., [Online]. Available. <https://store.facebook.com/jp/quest/>. (visited on 07/15/2022) .
- [3] Papadakis, Mania, and Koutroulis. “A system to measure, control and minimize end-to-end head tracking latency in immersive simulations”. In *Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry*, pp. 581–584, 2011.
- [4] Moss, Austin, Salley, Coats, and Williams, Muth. “The effects of display delay on simulator sickness”. *Displays*, No. 4(32), pp. 159–168, 2011.
- [5] 田村秀行, 大田友一. “複合現実感”. 映像情報メディア学会誌, pp. 266–273, 1998.
- [6] Microsoft HoloLens, [Online]. Available. <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>. (visited on 07/15/2022) .
- [7] 仲谷正史, 筧康明, 三原聡一郎, 南澤考太. “触楽入門”. 朝日出版社, 2016.
- [8] Makoto Shimojo, Takaji Maeno, Hiroyuki Shinoda, and Sano Akihito. “触覚認識メカニズムと応用技術：触覚センサ・触覚ディスプレイ”. SJ 出版, 2014.
- [9] Eric R. Kandel. “カンデル神経科学”. メディカル・サイエンス・インターナショナル.
- [10] Hsin-Yun Yao, V. Hayward. “An Experiment on Length Perception with a Virtual Rolling Stone”. In *Proceedings of the EuroHaptics 2006 Conference*, pp. 275–278, 2006.
- [11] NTT コミュニケーション科学基礎研究所, [Online]. Available. <https://dotby.jp/post/haptic-tv/>. (visited on 07/15/2022) .
- [12] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. “Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound”. *IEEE Trans on Haptics*, No. 3-3, pp. 155–165, 2010.
- [13] 岩本貴之, 篠田裕之. “音響放射圧の走査による触覚ディスプレイ”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, No. 11-1, pp. 77–86, 2006.
- [14] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. “AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display”. *IEEE Transactions*

on *Haptics*, 2021.

- [15] 星貴之, 岩本貴之, 篠田裕之. “空中超音波フェーズド アレイによる触覚ディスプレイ”. 第 13 回日本バー チャルリアリティ学会大会論文集, pp. 3A2-2, 2008.
- [16] Keisuke Hasegawa and Hiroyuki Shinoda. “Aerial vibrotactile display based on multiunit ultra- sound phased array”. *IEEE transactions on haptics*, No. 11-3, pp. 367–377, 2018.
- [17] William Frier, Damien Ablart, Jamie Chilles, Benjamin Long, Marcello Giordano, Marianna Obrist, and Sriram Subramanian. “Using spatiotemporal modulation to draw tactile patterns in mid-air”. *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, Springer, No. Cham, 2018.
- [18] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, and Hiroyuki Shinoda. “Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus”. *IEEE Transactions on Haptics*, 2019.
- [19] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. “Haptomime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen”. In *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, p. 663–667, 2014.
- [20] Y. Suzuki, M. Kobayashi. “Air jet driven force feedback in virtualreality”. *IEEE computer graphics and applications*, p. 44–47, 2005.
- [21] Atsushi Matsubayashi, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. “Direct Finger Manipulation of 3D Object Imagewith Ultrasound Haptic Feedback”. *CHI 2019 May 4–9*, 2019.
- [22] Parametric Technology Corporation, [Online]. Available. <https://developer.vuforia.com>. (visited on 07/15/2022) .

謝辞

本研究を進めるにあたり、篠田裕之教授には多くのご指導を頂戴しました。高校在学時に Haptics に出会い、その時感じた想いそのままに研究生生活に打ち込めたことは篠田教授のお力添えあってのことでした。厚く御礼申し上げます。また牧野泰才助教授には、mtg など多くの助言を頂き、特に、進むべき方向性がわからなくなった際には、その助言が道しるべとなり研究を進めることができました。感謝申し上げます。藤原正浩講師には何度も個別で mtg をして頂き、学会発表に向けてのご指導や研究方針についてのアドバイスを頂戴しました。お忙しい中お時間を頂戴できたこと、心より御礼申し上げます。メンターの水谷沙耶さんには、研究生生活の全てを教えて頂きました。何度もご相談に乗って下さり、研究の進め方から学会発表の方法までの多くをご教授頂きました。水谷さんがいなければ、2 年間後悔のない研究生生活を送ることができなかつたと感じています。いつも優しく話を聞いてくださり、多くの支えを頂戴したこと、感謝の想いでいっぱいです。本当にありがとうございました。同期の後藤さんとは、9 月入学で同期が 1 人しかいない中、最後まで叱咤激励しながら共に頑張ることができました。感謝の意を示します。また、2 年間研究室でお世話になった皆様にも感謝申し上げます。被験者実験にご協力頂いたり、時にはプログラミングなどの知識を教えて頂いたり、皆様のおかげで研究を進めることができました。

最後に、大学院に進学して勉強したいという夢を応援し最後まで支えてくれた父と母、そして日々の苦楽を共にし、寄り添い、鼓舞し続けてくれた鎌田悠に感謝申し上げます。