



遮蔽された仮想物体への触覚付与による操作性検討

和田莉奈¹⁾, 下村光彦²⁾, 水谷沙耶²⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Lina WADA, Mitsuhiko SHIMOMURA, Saya MIZUTANI, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO,
and Hiroyuki SHINODA

- 1) 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, wada@hapis.k.u-tokyo.ac.jp, Masahiro Fujiwara@ipc.i.u-tokyo.ac.jp, {yasutoshi makino, hiroyuki shinoda}@k.u-tokyo.ac.jp)
2) 東京大学大学院 情報理工学系研究科 (〒113-8656 東京都 文京区 本郷 7-3-1, {mizutani, shimomura}@k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 遮蔽された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, HMD と非接触型触覚デバイスを用いて, 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, 厚み情報と呈示位置の観点から検討した.

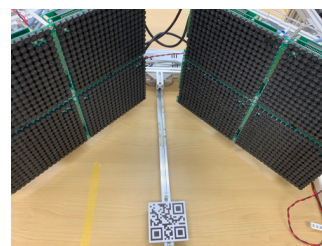
キーワード: 空中超音波, 触覚フィードバック, 空中映像

1. はじめに

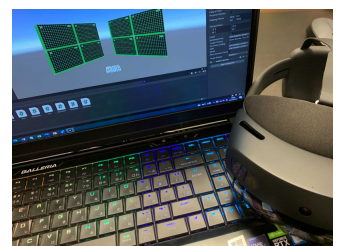
近年, Head-Mounted-Display (HMD) はエンターテインメント分野のみならず, その視覚的認識の手軽さから, 作業支援や医療シミュレーションの分野においても活用されている. HMD により呈示される仮想現実では, 視覚的に現実に近い体験をすることができ, 仮想物体をインタラクティブに操作することが可能である.

しかしながら, HMD による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, 複数のアプリケーションで同時に作業する際, ウィンドウが重なって配置され, 操作したい仮想物体が他のアプリケーションの奥に隠れてしまうことがある. 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などが考えられる. 視覚情報なしでも, 仮想物体との接触時に触覚を呈示することで仮想物体を操作することが可能であることが既に確認されている[1]. 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.

本研究では, ユーザーが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.



(a) AUPA



(b) HoloLens 2 と Unity

図 1 システム概要

2. 提案システム

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空中超音波フェーズドアレイ (Airborne Ultrasound Phased Array: AUPA) を使用した.

2.1.1 AUPA

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. 非接触型デバイスを用いた触覚呈示は, 物理的なコントローラやグローブを装着する必要がなく, 仮想現実への没入感が向上するという利点がある. 本研究では, より没入感の高い状況下での転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.

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[2][3][4]。本デバイス 1 台で呈示可能な最大力は 16 mN 程度である[5]。

AUPA を用いた振動覚の呈示手法として、超音波の振幅を周期的に変動させ振動覚を呈示する AM (Amplitude Modulation)刺激[6]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 LM (Lateral Modulation)刺激[7][8]が提案されている。これらの手法を用いると、限られた呈示力のなかで、超音波触覚の知覚強度を向上させることができる。

2.1.2 HoloLens 2

HMD の中でも、仮想現実を現実世界に投影することのできるデバイスとして Mixed Reality (MR)デバイスがある。中でも、Microsoft 社の HoloLens 2 は、物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。本研究ではよりリアリティの高い仮想現実を設定するため、HoloLens 2 を使用した。

2.2 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 1)。

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に設定した。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 1 cm 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 - 2.0 cm」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 60 fps とした。

AUPA による触覚呈示は、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。

3. 実験

3.1 実験概要

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、仮想物体として呈示する白い壁の奥に呈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 2)。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。

本実験の目的は、2.2 章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

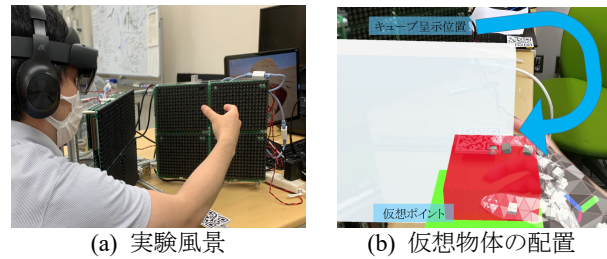


図 2 実験概要

みや呈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呈示位置を複数設定した。具体的には、横幅は 7 cm、高さは 15 cm で全て固定した上で、厚みが 2 cm、5 cm、8 cm の 3 種類、呈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。被験者はこれら 27 パターンからランダムに呈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[9]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。

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($t_1 + t_2$)

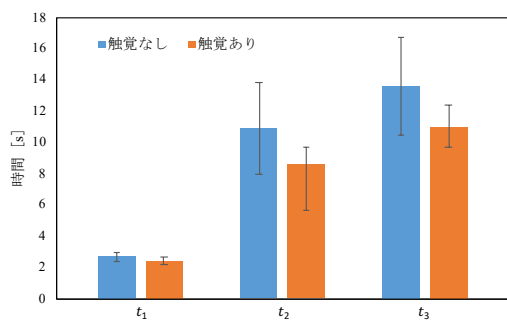
また、実験終了後、リッカート尺度を採用したアンケートを行うことで、厚みや呈示位置の認識における触覚刺激の有用性を確かめた。アンケートの内容は以下の通りである。

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)

図3 全タスクにおける t_1 , t_2 , t_3 の平均値

3.3 結果

3.3.1 全タスクにおける結果

全タスクにおける t_1 , t_2 , t_3 の平均値を図3に示す。いずれも触覚フィードバックがある方が所要時間が減少しており、本実験において触覚情報の付与が操作性向上に有用であることが確認された。

3.3.2 仮想キューブの厚みによる比較

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に示す。いずれ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5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。

3.3.3 仮想キューブの呈示位置による比較

最後に、仮想キューブの呈示位置ごとの t_1 , t_2 , t_3 の平均値を図6に示す。いずれ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5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、奥行き方向の呈示位置による 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呈示するほど所要時間は増加した。また、横方向の呈示位置による t_1 を比較す

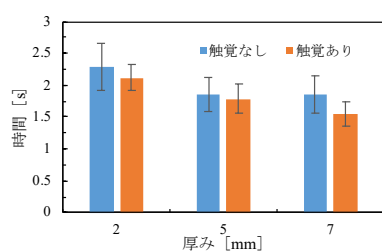
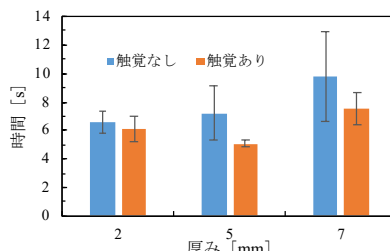
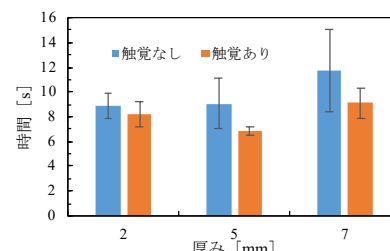
 t_1 (キューブ生成から触れるまで) t_2 (触れてから仮想ポイント到達まで) t_3 ($t_1 + t_2$)

図4 仮想キューブの厚みごとの所要時間の平均値

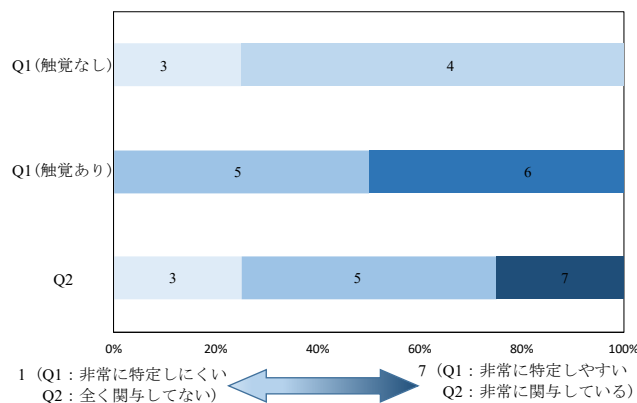


図5 ユーザー評価

ると、触覚ありの場合、中央に呈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、呈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、呈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. 考察

図4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6で横方向の呈示位置について比較すると、呈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 軸からはずれ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 mm 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

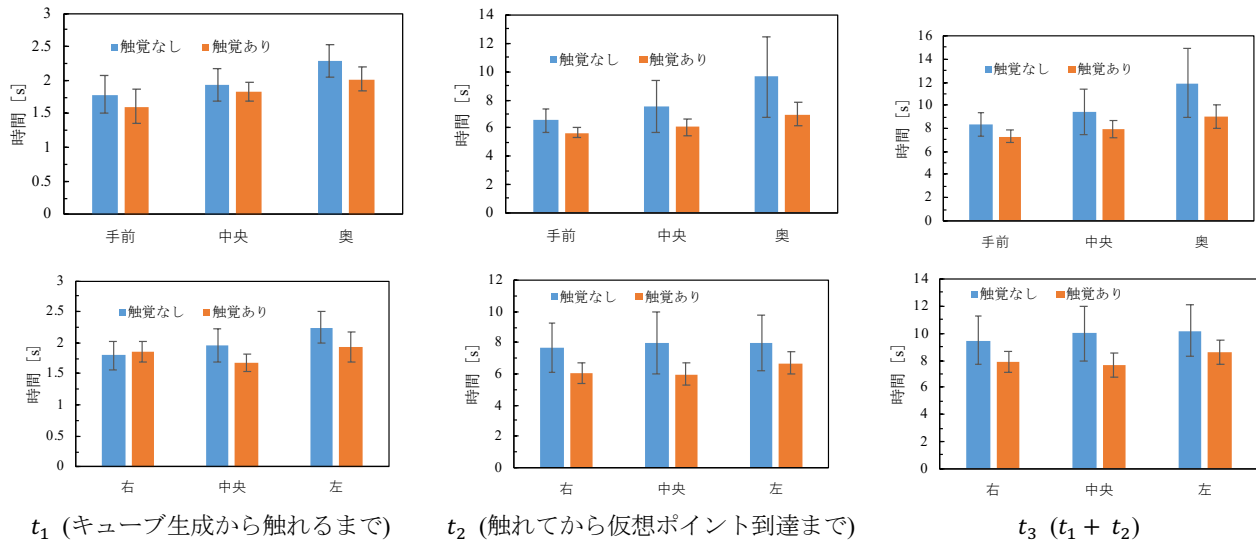


図6 仮想キューブの呈示位置ごとの所要時間の平均値

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。さらに、Realsense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。本研究では、触覚情報が補える視覚情報について検討したが、将来的には、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、より高い没入感をユーザーに提供できるシステムを構築したい。

最後に、図6に示した通り、物体の呈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、奥行き方向の呈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。

5. 結論

本研究では、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ため、仮想物体の厚みや呈示位置に着目して被験者実験を行った。被験者実験の結果を通して、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た。また、奥行き方向には、ユーザーから遠い位置に呈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。今後は、外付けのセンサ等を利用し、トラッキング精度を上げた上でさらに触覚情報が補うことのできる視覚情報についての検討を行い、将来研究では、高い没入感と現実感でユーザーに仮想現実を提供できるシステムを構築したい。

参考文献

- [1] Atsushi Matsubayashi, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda, "Direct Finger Manipulation of 3D Object Imagewith Ultrasound Haptic Feedback", CHI 2019 May 4-9, 2019
- [2] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, Hiroyuki Shinoda, "Noncontact Tactile Display Based on Radiation Pressure of Airborne Ultrasound", IEEE Trans. on Haptics, 3-3, 155-165, 2010
- [3] 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, 11-1, 77-86, 2006
- [4] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda, "AUTD3: Scalable Airborne Ultrasound Tactile Display", IEEE Transactions on Haptics, 2021
- [5] 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, 3A2-2, 2008
- [6] Keisuke Hasegawa and Hiroyuki Shinoda, "Aerial vibrotactile display based on multiunit ultra- sound phased array" IEEE transactions on haptics, 11-3, 367-377, 2018
- [7] Frier, William, et al., "Using spatiotemporal modulation to draw tactile patterns in mid-air.", International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, Springer, Cham, 2018
- [8] Ryoko Takahashi, et al., "Tactile Stimulation by Repetitive Lateral Movement of Midair Ultrasound Focus", IEEE Transactions on Haptics, 2019
- [9] Copyright 2021 PTC, "https://developer.vuforia.com", 2021