



仮想物体の変形による 3DUI 部品の把持操作の安定化

笠井陽太¹⁾, 入山太嗣¹⁾, 小室孝¹⁾

1) 埼玉大学 理工学研究科 (〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

概要: 本研究では, VR/AR 環境において 3D オブジェクトを UI 部品として把持操作する際に, 手指が 3D オブジェクトにめり込むことによって生じる問題を解決するために, 物体の変形を利用した視覚フィードバックを提案する. 提案手法では手指の形に合わせて 3D オブジェクトを変形させて手指に追従させることで安定した把持を実現する. 動作の様子を 3D ディスプレイ上で表示し, 3D オブジェクトをユーザーの手指で把持操作できることを確認した.

キーワード: VR/AR, 3D ユーザーインターフェース, 物体変形, 視覚フィードバック

1. はじめに

ハンドトラッキング技術の進歩に伴い, より高精度でリアルタイム性の高いトラッキングが行えるようになった. これにより, 実空間の手の動きやジェスチャーをより正確に捉えることができ, 自然なインタラクションの実現や, 没入感の向上のために仮想の手を用いて UI (ユーザーインターフェース) の操作を行うことができるようになってきている. しかし, 現在の VR/AR 環境で用いられている UI の多くは, 従来のタッチパネルやキーボードなどの入力デバイスをそのまま仮想空間で操作するものになっている. そのため, 操作の自由度が低く, オブジェクトを直接操作している感覚に乏しいという課題がある. そこで, 仮想環境において用いられる UI 部品の一部に, 3D のオブジェクトを利用することで, 回転や角度の変更など多様な操作が可能かつオブジェクトを直接操作している感覚を持つ UI を実現することができる [1].

3D オブジェクトを仮想の手指で操作するとき, 操作性を向上させるための方法の一つとして, 視覚フィードバックがある. 3D オブジェクトへのインタラクションと視覚フィードバックとの関係はいくつも研究されており, ユーザーが知覚する体性感覚を補助するような視覚フィードバックを提示することで, オブジェクトに対する選択や操作などのインタラクションの性能が向上することが報告されている [2]. また, 3D オブジェクトにおける視覚フィードバックの効果について検証した研究がある [3]. この研究では, 3D オブジェクトの色を変化させたり, 発光させたりする視覚フィードバックを用いることでオブジェクトの選択や操作の性能が向上することが示された. さらに, 手指の表示方法における視覚フィードバックの効果について検証した研究がある [4][5][6]. これらの研究では, 仮想の手指に対して視覚フィードバックを適用することで, 3D オブジェクトの選択や操作の性能が向上することが示された. しかしながら, 3D オブジェクトには実体がなく反力が存在しないため, 仮

想の手を利用して 3D オブジェクトを掴んで操作しようとする際に, 手指が 3D オブジェクトにめり込んでしまうことがある.

視覚フィードバックとインタラクションの関係に関する研究の中で, 3D オブジェクトへの手指のめりこみが, 把持の性能やユーザーの好みにもたらす影響について検証した研究がある [7][8][9]. これらの研究では 3D オブジェクトを把持するにあたって, 手指がめり込む表示方法と手指がめり込まない表示方法での比較を行っている. その結果, 手指がめり込む表示方法の方が, 現実の手と仮想の手の姿勢がずれなく表示されているため, 手指の位置調整がしやすく性能が良いということや, ユーザーは手指の姿勢がずれていたとしても手指がめり込まない表示方法をより好むということが示された. しかし, 従来手法では操作のしやすさと見た目の自然さを両立するような, 視覚フィードバック手法は提案されていない.

そこで, 本研究では VR/AR 環境において 3D オブジェクトを UI 部品として把持操作する際に, 手指が 3D オブジェクトにめり込むことによって生じる問題を解決するために, 物体の変形を利用した視覚フィードバックを提案する. 3D オブジェクトの変形には物理シミュレーションを利用し, 物体に弾性や粘性を与えることで変形を再現する. また, 手指の形に合わせて 3D オブジェクトを変形させて手指に追従させることで安定した把持を実現する.

2. 変形を利用した視覚フィードバック

提案する視覚フィードバックでは, 手や壁などのオブジェクトと仮想物体が接触すると, その勢いや接触範囲に応じて変形の度合いが変化する. また, 外からの力が加わっていないとき仮想物体は初期の形状を維持しており, 加えられていた力がなくなったあとも初期の形状に戻る. よって見た目の自然さを考慮しつつ, 手指で仮想物体をへこませたり, 手の上で弾ませたり, 掴んで持ち上げて動かしたりすることができる.

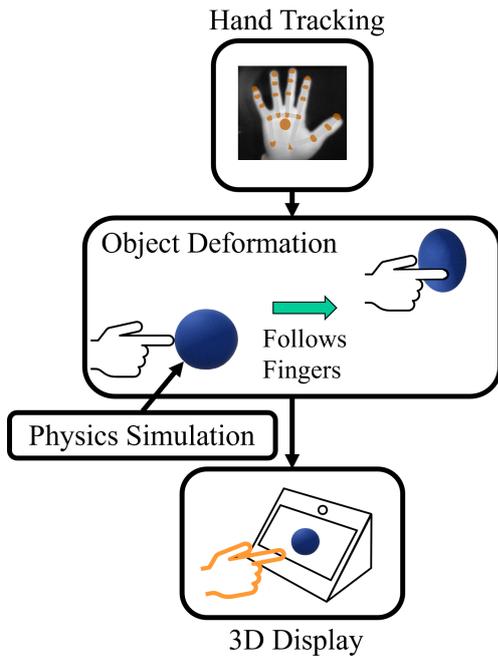


図 1: 提案手法の概要

仮想の手指と 3D オブジェクトを 3 次元表示するまでの処理の概要を図 1 に示す。本システムでは現実の手指と同期した仮想の手指によって、システム上に配置されている変形する 3D オブジェクトを、動かしたり把持したりすることができる。ハンドトラッキングで手指の位置姿勢を取得し、提案する視覚フィードバックの表示、3D オブジェクトの把持や衝突の判定および、変形の再現は物理シミュレーションにより実現される。また 3D オブジェクトを手指に追従させることにより、把持操作の安定化を図る。仮想の手指の動きに合わせてオブジェクトが変形する様子は 3 次元で提示し、仮想の手指とオブジェクトを 3 次元表示するとき、仮想の手指を透明にすることで、ユーザーはオブジェクトのみを視認することができる。

2.1 変形の再現

仮想環境での体験においてユーザーは見た目の自然さを重要視している。そのため、ただの変形ではなく、現実存在している物体かのように変形をすることが重要である。見た目の自然さを考慮しつつ、オブジェクトとの接触に応じて変形を再現するため、物理シミュレーションにおける 3D オブジェクトの持つ特性を設定する。特に提案手法を実現するうえで重要な特性は、弾性、粘性、および物体同士のめり込みを防ぐ衝突の堅牢性である。これらの特性は、変形する 3D オブジェクトを構成する粒子間に、制約条件を追加することで設定する。弾性は、粒子間の距離をできる限り一定に保つ距離の制約とオブジェクトが静止しているときの位置をできる限り維持しようとする形状記憶の制約を追加することで再現する。粘性は、形状記憶の制約によって再現する。衝突の堅牢性は、粒子間の衝突を判定する粒子の衝突制約と仮想の手指などの外部のオブジェクトとの衝突を判定する衝突制約を追加することで再現する。また

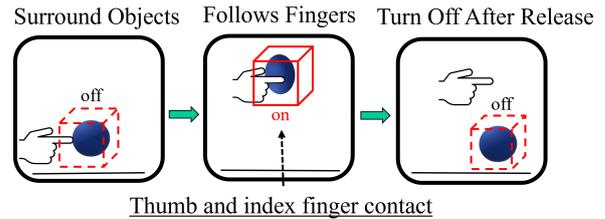


図 2: 把持操作安定化手法の概要

摩擦の制約を追加することで把持をしやすくする。

2.2 把持操作の安定化

現在の物理シミュレーションでは、変形する 3D オブジェクトを把持して操作することは難しい。そのため、変形の再現に物理シミュレーション、3D オブジェクトの操作に手指への追従を利用し、変形と操作で機能を分けることで把持操作の安定化を目指す。

把持操作の安定化手法の概要を図 2 に示す。提案手法では、変形する 3D オブジェクトを 3D バウンディングボックスで囲み、オブジェクトを把持している間、3D バウンディングボックスをオンとする。オブジェクトはバウンディングボックスの外に出ることができないので、手指に追従することになる。オブジェクトの把持判定は、親指と人差し指がオブジェクトに接触している間とし、指が離れると 3D バウンディングボックスもオフとなる。3D バウンディングボックスは把持操作が行われている間、変形物体とのみ衝突できるようにすることで、他のオブジェクトとの干渉を防ぐ。

3. 実装

提案手法を実現するためのインタラクティブシステムを実装した。本システムでは、ハンドトラッキングに光学ハンドトラッキングモジュールである LeapMotion、3D ディスプレイには Sony の裸眼立体視可能な 3D ディスプレイである ELF-SR1¹ を使用し、デスクトップの PC で動作させた。また開発環境として Unity を利用し、3D オブジェクトの変形を実現するための物理シミュレーションに Unity のアセットである ObiSoftbody² を使用した。このアセットは Unity 内で PBD (Position Based Dynamics) [10] による物理シミュレーションを行うことができるようになるものである。PBD は従来の物理計算と比べて、即時性が高く多彩な物理シミュレーションが可能だという利点がある。そのため 3D オブジェクトの変形に本アセットを利用した。

本システム全体の外観を図 3 に示す。3D ディスプレイの前方下部分に LeapMotion を設置する。黄色く半透明に表示されている部分が描画範囲となり、その範囲内でユーザーは表示されているオブジェクトを 3D で見ることができる。また 3D ディスプレイの前に座っているユーザー 1 人が 3D

¹<https://www.sony.jp/spatial-reality-display/>

²<https://assetstore.unity.com/packages/tools/physics/obi-softbody-130029>

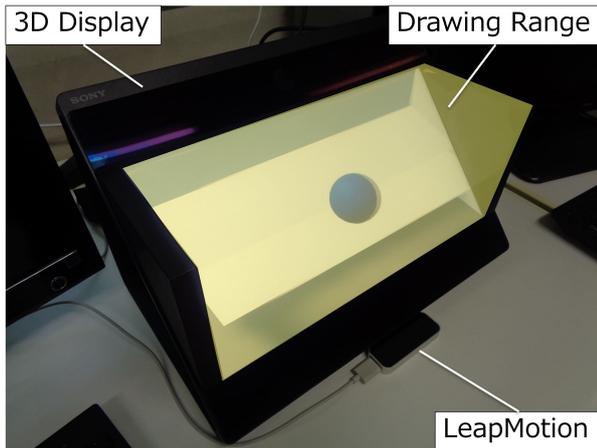


図 3: インタラクティブシステムの外観

で映像を見ることができる。

3.1 変形する 3D オブジェクト

変形する 3D オブジェクトとして、プリミティブなオブジェクトと UI 部品として用いられるオブジェクトの例としてチェスの駒を実装した。3D オブジェクトのモデルは外部から Unity にインポートし、アセットの機能を利用してモデルの表面をいくつかの小さな球体で置き換えた。これらの球体は互いに相互作用し、他のオブジェクトに影響を与えたり、他のオブジェクトの影響を受けたりすることができる。そのため球体間に、アセットの機能を利用して距離などの制約条件を追加することで、変形の再現に重要な、弾性、粘性、および物体同士のめり込みを防ぐ衝突の堅牢さを設定した。

3.2 仮想の手指

手指のモデルは LeapMotion で用意されているモデルを使用した。3D オブジェクトと手指のインタラクションを実現するために、LeapMotion によって入力されている手指にプリミティブなコライダーを設定した。また 3D ディスプレイと LeapMotion の位置を固定して、Unity のシステム内で手の表示位置を調整することで、現実の手指と仮想の手指の姿勢を同期させた。また 3D ディスプレイでの表示時は、仮想の手指を透明にし、3D オブジェクトのみを 3D ディスプレイに表示させることで、ユーザーに自身の手指と仮想の手指が二重に表示されることを防ぐ。

3.3 把持安定化機能

変形する 3D オブジェクトの把持操作を安定させるため、変形するオブジェクトを把持している間、3D バウンディングボックスで囲む機能を実装した。オブジェクトに、仮想の手指の親指と人差し指が触れたとき把持と判定し、両指先間の midpoint の位置にバウンディングボックスの中心を移動させる。バウンディングボックスは変形物体とのみ衝突するように当たり判定を設定することで、変形する 3D オブジェクトを手指で把持操作しつつ、バウンディングボックスと一緒に 3D オブジェクトを追従させることができる。

3.4 変形を適用したときのインタラクション

提案する視覚フィードバックを用いて、3D オブジェクトと手指でインタラクションができる機能を実装した。変形の無いオブジェクトは、同サイズの衝突判定のないオブジェクトを用意し、オブジェクトの位置をトラッキングして重ねて表示することで実装している。その際、変形オブジェクトは透明にしているだけなので把持の条件は変わっていない。また、仮想の手指は把持していることを分かりやすくするために表示している。手指がめり込む場合には 3D オブジェクトが変形しないようにし、手指がめり込まない場合には 3D オブジェクトが変形するようにすることで、変形の有無による比較を行った。

変形を適用し、Unity 内で 3D オブジェクトに対して把持を行っている様子を図 4a と図 4b に示す。図 4a、図 4b では、変形しない球体を赤色、変形する球体を青色で表示して把持を行っている。図 4c、図 4d では、変形しない駒を白色、変形する駒を黒色で表示して把持を行っている。それぞれ変形しない 3D オブジェクトの把持では、手指が 3D オブジェクトにめり込んでしまっているが、変形する 3D オブジェクトの把持では、手指の位置に対応して 3D オブジェクトが変形していることが分かる。

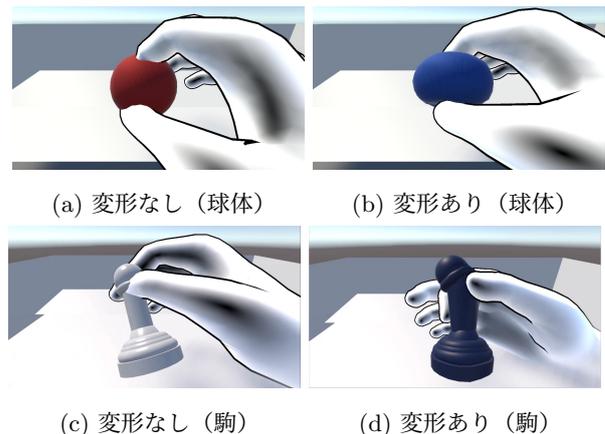


図 4: 変形を用いた視覚フィードバックの適用

3.5 3D ディスプレイでの立体表示

PC と 3D ディスプレイを接続し、Unity 内に構築した 3D オブジェクトの操作環境をディスプレイ上に表示した。3D オブジェクトが存在しているかのように見える位置で手指を動かすことで、把持や操作をすることができる。また、3D ディスプレイの表示は指の動きに従ってリアルタイムで動作する。

システムを使用し、ユーザーが自身の手指で変形する 3D オブジェクトとインタラクションしている様子を図 5 に示す。実際の指を使って、ディスプレイに表示されている 3D オブジェクトを操作できていることが分かる。また把持操作の間、オブジェクトは変形を保ったままで、手を離すともとの形状に戻っていることが分かる。今回のシステムでは、3D ディスプレイでオブジェクトを表示しているため、手指によってオクルージョンが発生する。そのため、周りこ

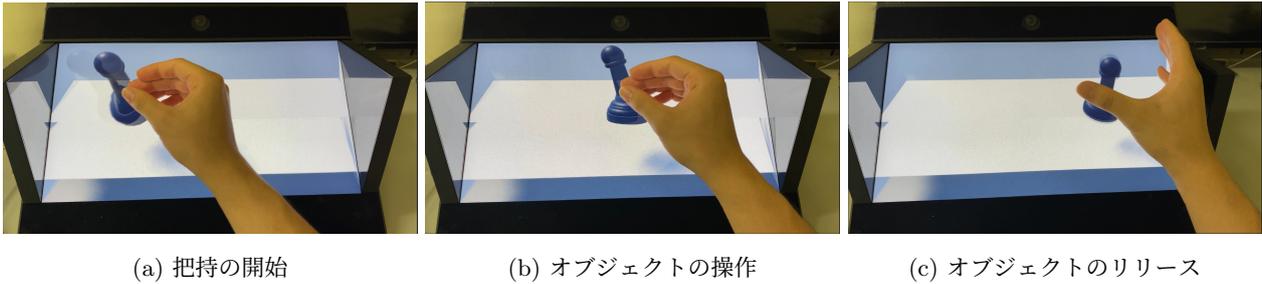


図 5: 3D ディスプレイでの 3D オブジェクトと手指のインタラクション

んで物体を掴もうとすると手指によって画面が隠れるため、行えるインタラクションは前方からに限定される。

4. おわりに

本研究では、VR/AR 環境において 3D オブジェクトを UI 部品として把持操作する際に、手指が 3D オブジェクトにめり込むことによって生じる問題を解決するために、物体の変形を利用した視覚フィードバックを提案した。ハンドトラッキングによって手指の位置姿勢を取得し、手指の形に合わせて 3D オブジェクトを変形させて手指に追従させることで、安定した把持を実現した。オブジェクトの変形は物理シミュレーションにより実現し、変形する 3D オブジェクトと手指でのインタラクションを可能にした。複数の形状の 3D オブジェクトを実装し、手指の操作で変形している様子を示した。3D ディスプレイ上に表示されている変形する仮想物体を、現実の手指で実際にへ把持操作を行っている様子を示した。

今後の課題として、3D オブジェクトの変形や把持操作を安定化させる機能の有効性を検証することがある。現状では、提案手法である物体の変形を利用した視覚フィードバックの有用性が示されていないので、実験を行うことでその効果を示す必要がある。また、3DUI 部品を用いた具体例の提案と、その応用のためのデザイン空間の提案をすることで、3DUI の可能性を広げることも目指す必要がある。

参考文献

- [1] Takumi Kusano and Takashi Komuro: “3D Tabletop User Interface with High Synchronization Accuracy using a High-speed Stereo Camera”, Proc. the 2015 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS 2015), pp. 39–42, (2015).
- [2] Ferran Argelaguet and Carlos Andujar: “A survey of 3D object selection techniques for virtual environments”, Computers and Graphics 37, pp. 121–136, (2013).
- [3] Spyros Vosinakis and Panayiotis Koutsabasis: “Evaluation of Visual Feedback Techniques for Virtual Grasping with Bare Hands Using Leap Motion and Oculus Rift”, Virtual Reality 22, pp. 47–62, (2018).
- [4] Pascal Knierim, et al.: “Physical keyboards in virtual reality: Analysis of typing performance and effects of avatar hands”, Proc. the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1–9, (2018)
- [5] Michiel Van Veldhuizen and Xubo Yang: “The Effect of Semi-Transparent and Interpenetrable Hands on Object Manipulation in Virtual Reality”, IEEE Access vol.9, pp. 17572–17583, (2021).
- [6] Xizi Wang, et al.: “Exploring Visualizations for Precisely Guiding Bare Hand Gestures in Virtual Reality”, Proc. the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1–19, (2024).
- [7] Mores Prachyabrued and Christoph W. Borst: “Visual interpenetration tradeoffs in whole-hand virtual grasping”, Proc. 2012 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), pp. 39–42, (2012).
- [8] Mores Prachyabrued and Christoph W. Borst: “Visual Feedback for Virtual Grasping”, Proc. 2014 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI), pp. 19–26, (2014).
- [9] Ryan Canales, et al.: “Virtual Grasping Feedback and Virtual Hand Ownership”, Proc. the ACM Symposium on Applied Perception 2019, pp. 1–9, (2019).
- [10] Matthias Müller, et al.: “Position Based Dynamics”, Journal of Visual Communication and Image Representation, 18(2), pp. 109–118, (2007).