VR 上の軟体物体と硬さの異なるタンジブルオブジェクトとの対応付け調査

臼井 義人[†1,a)]　高橋 治輝[†1,b)]　松村 耕平[†1,c)]

概要：VR（Virtual reality）技術の発展とヘッドマウントディスプレイの普及に伴い，多くの人が VR を活用するようになった．しかし，現状の VR では触覚の要素が不十分であり，多くの研究において，硬さや柔らかさといった表現を簡潔にする手法が議論されている．本研究では，こうした硬さを簡潔に表現できるようにするため，VR 上の変形度合いの異なる軟体物体に対して，硬さの異なるタンジブルオブジェクトを用いて触覚提示を行う方法を提案する．タンジブルオブジェクトは単純な円柱形状をしており，3D プリンタのパラメータである壁の厚みを調整するだけで硬さの変更が可能なものとなっている．異なる 2 つの直径のタンジブルオブジェクトに対して実験を行ったところ，VR 上の軟体物体の硬度に合わせた近似曲線が得られた．この結果を用いて，VR 上で硬さの異なる同形状の物体に合わせた触覚提示コンテンツを作成した．

1. はじめに

1.1 背景

私たちの日々の生活のなかでは，視覚や聴覚だけでなく，触覚を活用する場面も数多く存在する．2023 年現在の VR では，技術の発展に伴い，VR 空間内で実世界に近い空間を表現できるようになった．また，Meta Quest をはじめとする安価で軽量なヘッドマウントディスプレイ (以下 HMD) が市場に出回ったことで，幅広い分野の人々にとって VR 体験が身近なものとなった．これらの結果，さまざまな産業や研究分野において VR が活用され，その有効性についても議論されている [1], [2].

現状の VR で特に注目されている技術として触覚の再現があり，VR 体験の没入感や，仮想物体とユーザの相互作用といったものを高める要素として，多くの研究でその重要性が示されている [3], [4]．VR において触覚を提示する手法はさまざまであるが，なかでも，VR 上のオブジェクトに合わせたタンジブルオブジェクトを使用するパッシブハプティクスにより，ユーザ体験が向上することが示されている [5]．さらに，忠実度の高いタンジブルオブジェクトを使用することができれば，VR 空間におけるユーザの現実感や没入感がより向上する [6], [7].

しかし，VR 上の仮想物体とタンジブルオブジェクトとの物性に関する適合性が課題となっており [8]，硬さや柔らかさといった表現を簡潔に行える手法は確立できていない．そのため VR 上で触覚を十分に考慮できず，実世界における基本的な体験が失われ，没入感や臨場感が損なわれている [9]．VR 上で，オブジェクトの変形度合いに合わせた触覚を再現することができれば，デザイナーが個々の VR 設計において，多様な触覚フィードバックを実装することのみならず，従来は固有のものであった触覚フィードバックを多面的に得ることが可能となる．

そこで本研究では，VR 上の変形度合いの異なる軟体物体に対して，硬さの異なるタンジブルオブジェクトを用いて触覚を提示する手法を提案する．ユーザは，タンジブルオブジェクトを片手に持ちながら，VR コンテンツを体験することができ，軟体物体の変形具合に合わせた触覚を得ることができる．タンジブルオブジェクトは 3D プリンタとフレキシブルフィラメントを用いて制作された単純な円柱形状であり，硬さを変更するパラメータとしてスライサソフトウェアで設定可能な Wall（外周）の厚みにのみ注目した．充填率を 0%とすることで，インフィル構造に依らず，Wall の数を変更するだけで硬さを変更することができる．このタンジブルオブジェクトを触覚提示に用いるために，Wall の数と VR 上の軟体物体との関係性を明らかにする必要がある．そこで，本稿では調整法を用いてユーザに軟体物体のシミュレーションのパラメータを調査させた．

[†1] 立命館大学
a) is0547rx@ed.ritsumei.ac.jp
b) haruki@fc.ritsumei.ac.jp
c) matsumur@fc.ritsumei.ac.jp

© 2024 Information Processing Society of Japan

2. 関連研究

2.1 触覚提示のための 3D プリンティング

Kim ら [10] は，3D プリンタの造形物の硬さをデザインするためのツールを提案している．この手法では，インフィル密度の変化を硬さの制御に用いており，この密度が柔らかさを制御するための最も有望な変数であると主張している．本研究において，インフィル密度とは，オブジェクト全容積に占める内部固形体積の割合であると定義している．インフィル密度は，内部構造と構造壁の両方によって決定される．三好ら [11] は，印刷面のインフィル構造を操作することで、柔らかさを制御できることを調査した．インフィル構造とは，造形物の内側を埋めるために使われる構造体である．この研究では，心理物理学的実験を通し，ピンの密度と印刷面のインフィル密度から知覚される柔らかさを推定する計算モデルを導出した．

これらの研究のように，従来の 3D プリンティングを用いた硬さ制御の研究では，インフィル構造と造形物の壁の厚みといった複数のパラメータ制御を行っている．そのため，個々のパラメータがどの程度触覚に影響を与えたのか考察されていない．

2.2 パッシブハプティクス

Bouzbib ら [12] は，擬似触覚技術 [13] を用いて，ユーザが変形可能な物体の擬似剛性を感知できる閾値を調査した．この研究によって，VR 内での触覚体験の向上と，変形可能な物体のリアルな操作に関する洞察が提供された．Fang ら [14] は，家庭内の日常的な物体を再利用し，カジュアルでオンデマンドな触覚体験を提供する手法を提案した．この手法は，様々な家庭や環境に適用可能であり，複雑な設定プロセスを必要とせず，より魅力的な VR 体験を可能にすることが示された．Muender ら [6] は，VR 環境で忠実度の異なるタンジブルオブジェクトを使用して，VR 上でのユーザの没入感，パフォーマンス、直感的なインタラクションの影響を調査した．その結果，忠実度の最も高い 3D プリントされたタンジブルオブジェクトが最も良いパフォーマンスを示した．しかし，忠実度の低いレゴが，タンジブルオブジェクトの高速な作成と十分な忠実度の間の良いトレードオフを提供した．

これらの研究から，さまざまな触覚体験が VR 体験を向上させることが示されている．本研究も，こうした VR 環境における触覚提示の研究分野に貢献するものである．

3. 実装環境

本研究では，3D プリンタを用いてタンジブルオブジェクトを作成し，ゲームエンジンである Unity を用いて VR 環境を構築する．

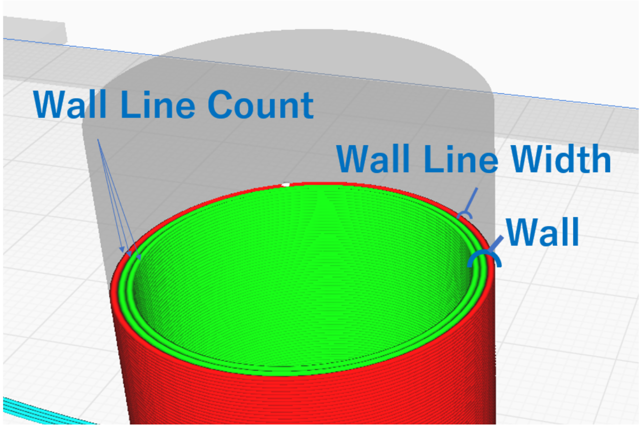

図 1 スライサーの設定画面

3.1 3D プリンタおよび造形材料

本実験では，直径 0.4 mm 口径のノズルを搭載した熱溶解積層方式 3D プリンタ（FDM: Fused deposition modeling）の KINGROON*1 KP3S を使用した．今回使用する 3D プリンタは，後述するフレキシブルフィラメントの造形しやすさの観点で採用したが，他の機種であっても同様に造形できることを確認している．使用するフィラメントは弾性樹脂の eSun*2 TPU を採用した．このフィラメントのショア硬度は 95A であり，アクセシビリティの観点から選択した．

スライサは UltiMaker Cura 5.2.2 *3を使用した．図 1 にスライサの設定画面を示す．タンジブルオブジェクトの硬さを制御するのは，この円柱の壁に相当する Wall の厚みであり，この厚みは Wall Line Width（壁 1 枚あたりの厚み）と Wall Line Count（壁の枚数）によって決まる．3D プリンタのノズル口径が 0.4 mm であることから，Wall Line Width は 0.4，Wall Line Count は個々のタンジブルオブジェクトで変更した．上面と底面の影響を防ぐため，上面と底面の層の枚数である Top Layer と Bottom Layer の値は 0 に設定した．なお，スライサで設定したプリント速度は 60 mm/s であり，ノズル温度は 200 ℃，ベット温度は 60 ℃である．

3.2 タンジブルオブジェクト

本実験で使用するタンジブルオブジェクトは 2 種類あり，高さ 40 mm，直径 20 mm のものと高さ 120 mm，直径 60 mm のものを準備した．前者は指先でつまめるサイズ，後者は手で掴めるサイズという観点でこれらの値に設定した．これらを造形する際，それぞれの Wall Line Count を変更し，壁の枚数を 1〜8 と 1 つずつ変化させたものを 8 個ずつ，合計で 16 個制作した．タンジブルオブジェクトは，VR 環境内の軟体物体の比率に合わせて高さと直径の比率

*1 https://kingroon.com/
*2 https://www.esun3d.com/
*3 https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/

© 2024 Information Processing Society of Japan

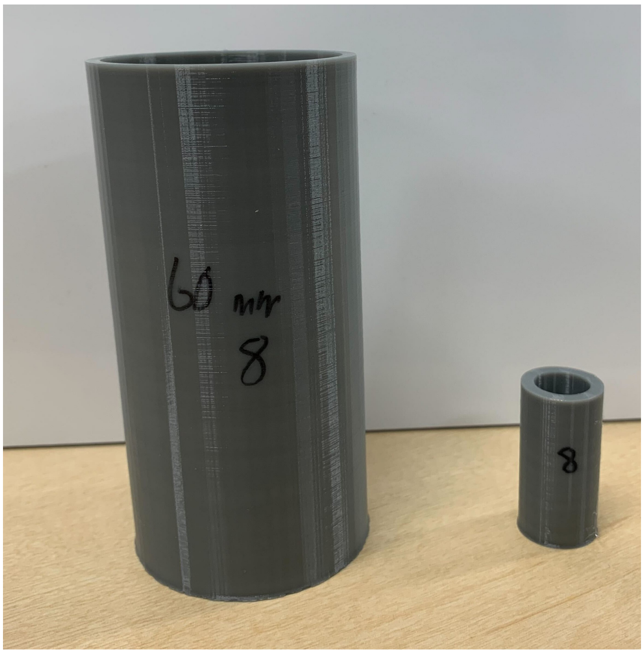

図 2　作成したタンジブルオブジェクトの例

のみを一定とした．図 2 に作成したタンジブルオブジェクトの例を示す．

3.3　VR 環境

本実験で使用する HMD は Meta Quest2*4である．Unity のエディタバージョンは 2021.3.23f である．本実験では，軟体物理演算を行うアセットである Obi Softbody[15] を用いて VR 上の軟体物体を作成する．Obi Softbody は VR 上の軟体物体を作成する際のアクセシビリティの観点から採用した．作成した VR 環境は HMD にダウンロードし，スタンドアロン環境で実行することができる．

3.3.1　Obi Softbody の概要

Obi Softbody は Unity のプラグインであり，物理粒子の集合体で形成されている．パーティクルは互いに干渉することができ，制約を設けることで互いに影響を及ぼしあう．Obi Softbody のコンポーネントは，パーティクルや拘束データを取得するためにソフトボディのブループリントを必要とする．ブループリントはメッシュのサーフェス，ボリューム，スケルトンにパーティクルを生成し，それぞれのパーティクルを互いに保持するためにクラスターを形状整合する．本実験で作成した軟体物体の大きさは高さ 2，直径 1 の比率となっている円柱である．これは Unity 上の標準的な円柱の比率となっており，本実験における軟体物体の大きさの基準とした．

本実験では，作成した軟体物体の柔らかさを制御するため，Obi Softbody の deformationResistance 値を変化させる．この値は，軟体物体が静止形状からの逸脱にどの程度強く抵抗するかを制御する値である．低い値では，軟体物体は非常に弾性的であり大きく変形し，結果として柔らかい挙動をする．高い値は軟体物体の剛性を高めるため，見た目は硬いオブジェクトとなる．抵抗値の最大値は 1，最小値は 0.01 となっている．この値を 0.01 刻みで変更するように設計した．図 3,4 にそれぞれの deformationResistance 値の際の，軟体物体の状態推移を示す．

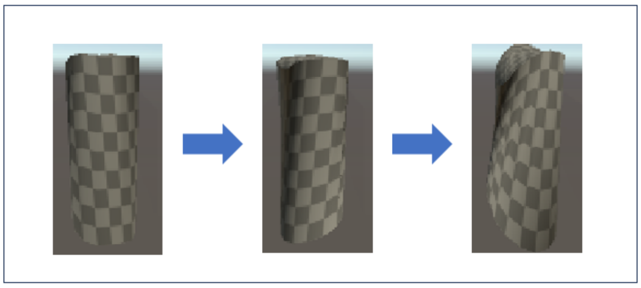

図 3　deformationResistance 値が 0.01 の軟体物体の状態推移

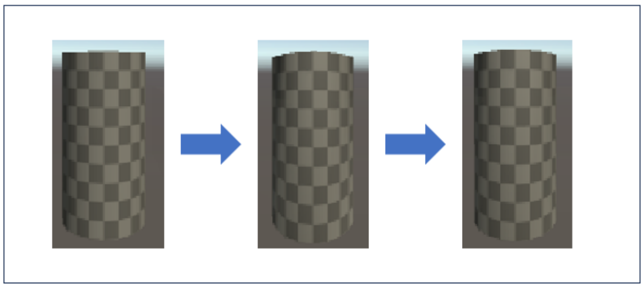

図 4　deformationResistance 値が 1 の軟体物体の状態推移

なお，Obi Softbody の挙動を Unity 上で表示する際に，作成する軟体物体の頂点の量に合わせて，Obi Softbody Skinner（レンダリングを行うコンポーネント）の Skinning Max Distance 値を変更する必要がある．このパラメータは各頂点をスキニングするときに考慮する最大距離である．この距離よりも遠いパーティクルは，演算において考慮されない．そのため，通常は，メッシュ内のすべての頂点が最も近いパーティクルからこの距離内に収まるように，コンピュータの性能を考慮しながら十分な大きさの値を使用する必要がある．

3.3.2　その他のゲームオブジェクト

図 5 に HMD 装着時に見える VR 環境を示す．本実験では，VR 環境上に，円柱形状の軟体物体以外に，硬さの数値を示すパネル，無色透明な Box を 2 つ設置してある．軟体物体の両サイドにある Box は，物理演算の影響を受けず，一様な速度で移動する．VR 上の軟体物体は，Box によって左右から押し付けられるように変形する．硬さを表示するパネルは軟体物体の上に配置してあり，軟体物体の deformationResistance 値を取得し，常にユーザに対して表示している．なお，論文中の図 5 では Box の配置位置を示すために有色の状態で図示している．

*4　https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/

© 2024 Information Processing Society of Japan

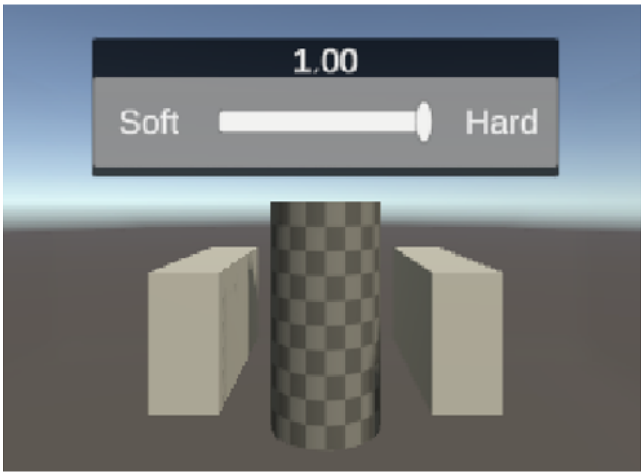

図 5　VR 環境上の実験システム

4. 実験

前章で述べた実装環境を用いて実験を実施した．本実験の目的は，VR 上の軟体物体を制御するパラメータ（deformationResistance）と硬さ（Wall Line Count）の異なるタンジブルオブジェクトとの対応付けである．

4.1 手順

本実験の目的を説明し，同意が得られた後，被験者は HMD を装着し，利き手とは逆の手でコントローラを持つ．タスクの内容は，利き手に渡されるタンジブルオブジェクトと，VR 上に表示される仮想物体の硬さの対応付けである．対応付けの方法として，VR 上に表示される軟体物体に合わせて握る・つまむの動作で力を加えてみること，VR 上の仮想物体がコントローラ上のボタンで硬さを変更できることの 2 点を伝えている．図 6 に実験の様子を示す．実験参加者は 8 名 (男性 6 名，女性 2 名，平均年齢 20.6 歳，左利き内 1 名) である．実験の所要時間は 1 人あたり 10 分であった．

4.2 結果

直径 20 mm の結果を図 7, 直径 60 mm の結果を図 8 に示す．どちらも横軸が Wall Line Count の数値であり，縦軸が deformationResistance 値である．それぞれの値は実験被験者の平均をとったものである．deformationResistance 値は 0.01 刻みで変更しているため，平均値も有効数字を 3 桁として求めた．

それぞれの対数近似を出すと，直径が 20 mm の場合は，$y = 0.4144log(x) + 0.2412$ で $R^2 = 0.9103$ となる．直径が 60 mm の場合は，$y = 0.4224log(x) - 0.0521$ で $R^2 = 0.9097$ となる．

図 7 に注目すると，Wall Line Count が 1 の時，deformationResistance 値が約 0.2 から始まり，Wall Line Count が 5

図 6　実験の様子

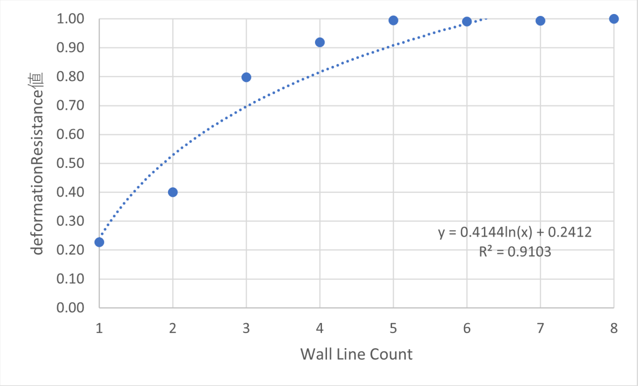

図 7　直径 20mm の結果

になると deformationResitance 値は上限である 1 へ収束していることがわかる．図 8 に注目すると，Wall Line Count が増加することで deformationResitance 値は増加するが，Wall Line Count が 8 の段階では deformationResitance 値は 1 に収束していないことがわかる．

4.3 考察

図 7 と図 8 より，Wall Line Count と deformationResistance 値の関係を示す曲線に差がある．これは作成したタンジブルオブジェクトの直径の差が影響していると考えられる．直径が掴めるサイズのものであれば，ユーザの手とタンジブルオブジェクトとの接地面が大きくなり，力を加えやすくなる．その結果が，この曲線に差を出していると考えられる．

また，図 7 の Wall Line Count の 6〜8 の deformResistance 値に注目すると，差がほとんどないことがわかる．

© 2024 Information Processing Society of Japan

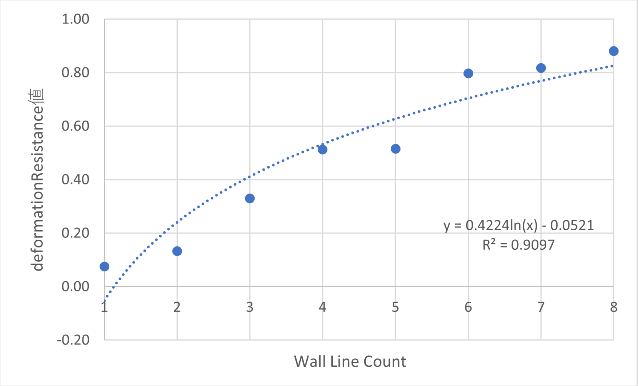

図 8 直径 60mm の結果

このことから，直径 20 mm のタンジブルオブジェクトを作成する場合，Wall Line Count の値を 5 以上に増やしてもそれ以上に硬く知覚させることはできない．そのため，これ以上の厚みの造形は不用にできると考えることができるため，3D プリンタを用いてタンジブルオブジェクトを造形する際の，時間的，材料的コスト削減につながる．

図 8 に注目すると，Wall Line Count が 4, 5 の deformationResistance 値に変化がほとんどないことがわかる．これは，Wall Line Count が 6, 7 の時も同様の結果が見られる．図 7 には，deformationResistance 値が 1 に収束していない箇所でそのような結果が見られないことから，直径が大きくなることで，隣接する硬さの変化が知覚しにくいことが予想される．

5. 応用例

本研究で得られた知見の応用として，前章までの実験で得られた結果を活用して，軟体物体の変形具合とタンジブルオブジェクトを対応付けた例を示す．図 9 は，ペットボトル形状の軟体物体を用いた応用例である（3D モデルは Thingiverse よりダウンロード [16]）．deformationResistance 値は，画面上のペットボトルの変形具合を確認しながら 0.5 と実験的に設定した．実験結果（図 8）に注目すると，直径 60 mm のタンジブルオブジェクトを用いてこの軟体物体を握る触覚を再現したい場合，Wall Line Count が 5 のものを使用すると良いことがわかる．使用した感覚として，視覚と触覚の整合性が取れており，硬さの感覚としては違和感なく再現できた．

一方で，図 10 のような比較的硬質なワインボトル形状の物体（3D モデルは Thingiverse よりダウンロード [17]）を再現したいという状況もあるだろう．こうしたとき，3D プリンタを用いてインフィル密度を 100%にしたタンジブルオブジェクトを造形するという方法が考えられるが，本研究の結果を見ると必ずしも密度を 100%にせずとも，十分に硬さを表現できることがわかる．たとえば，図 7 で示したように，直径 20 mm のオブジェクトは Wall Line Count が 6 程度で deformationResistance 値が 1 に達している．これ以上，内部の密度を上げたとしても硬さに変化はなく，材料と造形時間の浪費にしかならない．

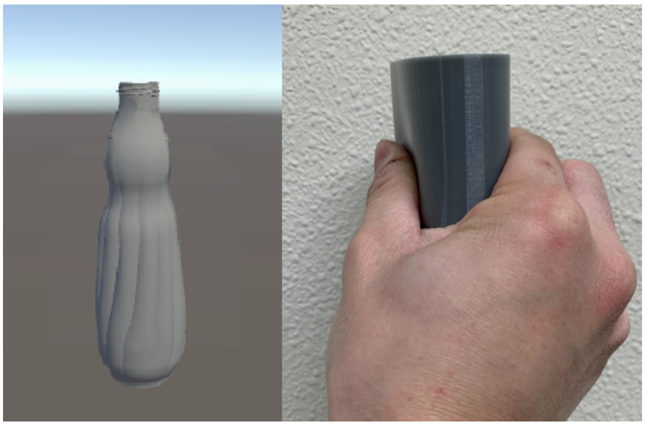

図 9 ペットボトル形状の軟体物体と対応するタンジブルオブジェクトの変形度合い

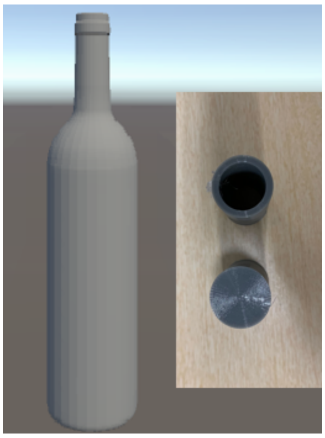

図 10 ワインボトル形状の物体と Wall Line Count が 6(上) とインフィル密度 100%(下) のタンジブルオブジェクト

6. 議論

本研究では，VR 上の変形度合いの異なる軟体物体に対して，硬さの異なるタンジブルオブジェクトを用いて触覚提示を行うことが目的であった．本研究で用いたタンジブルオブジェクトは円柱のみであり，その他の図形は考慮していない．また本実験では，直径が変化したことで，ユーザが知覚する硬さにも変化が生じた．そのため，大きさと形状の 2 条件を考慮した研究も行うべきである．

今回示した応用例では，重さを考慮できていない．壁が薄いとそれだけで重さに変化が生じる，それが広い意味で触覚に影響を与えることを考慮する必要がある．また応用例で示した，ペットボトルの凹凸形状や押し込んだときの音など，硬さ以外の要素に関しても検討できてない．これらを考慮することで，より忠実度の高い触覚提示が可能になると考える．

本研究で作成したタンジブルオブジェクトは，接触する

© 2024 Information Processing Society of Japan

箇所の全てにおいて知覚する硬さが一定である．そのため，接触する箇所によって硬さの変化があるような物体に対して対応できない．部分的に硬さを変化させるようなタンジブルオブジェクトの作成も必要になると考える．

本実験では，ユーザの力を加えること動作として，つまむ，握るの 2 点を行った．そのため，押す，引くといった VR における他の基本的な動作を除外している．本研究では，VR における触覚提示に焦点を当てているため，さまざまな動作に合わせた硬さの触覚提示も行うべきであると考える．

本研究において，部分的であるものの，目的は達成されたと思われる．

参考文献

[1] Boletsis, C., Karahasanovic, A. and Fjuk, A.: Virtual Bodystorming: Utilizing Virtual Reality for Prototyping in Service Design, *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics* (De Paolis, L. T., Bourdot, P. and Mongelli, A., eds.), Cham, Springer International Publishing, pp. 279–288 (2017).

[2] Jin, Q., Liu, Y., Yarosh, S., Han, B. and Qian, F.: How Will VR Enter University Classrooms? Multi-Stakeholders Investigation of VR in Higher Education, *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3491102.3517542 (2022).

[3] Schulz, P., Alexandrovsky, D., Putze, F., Malaka, R. and Schöning, J.: The Role of Physical Props in VR Climbing Environments, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–13 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300413 (2019).

[4] Harley, D., Verni, A., Willis, M., Ng, A., Bozzo, L. and Mazalek, A.: Sensory VR: Smelling, Touching, and Eating Virtual Reality, *Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI ’18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 386–397 (online), DOI: 10.1145/3173225.3173241 (2018).

[5] Insko, B. E.: Passive Haptics Significantly Enhances Virtual Environments, PhD Thesis (2001). AAI3007820.

[6] Muender, T., Reinschluessel, A. V., Drewes, S., Wenig, D., Döring, T. and Malaka, R.: Does It Feel Real? Using Tangibles with Different Fidelities to Build and Explore Scenes in Virtual Reality, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 1–12 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300903 (2019).

[7] Muender, T., Reinschluessel, A. V., Salzmann, D., Lück, T., Schenk, A., Weyhe, D., Döring, T. and Malaka, R.: Evaluating Soft Organ-Shaped Tangibles for Medical Virtual Reality, *Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA ’22, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3491101.3519715 (2022).

[8] Rock, I. and Victor, J.: Vision and Touch: An Experimentally Created Conflict between the Two Senses, *Science*, Vol. 143, No. 3606, pp. 594–596 (online), DOI: 10.1126/science.143.3606.594 (1964).

[9] Weiss, Y., Villa, S., Schmidt, A., Mayer, S. and Müller, F.: Using Pseudo-Stiffness to Enrich the Haptic Experience in Virtual Reality, *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3544548.3581223 (2023).

[10] Kim, J., Zhou, Q., Ghassaei, A. and Chen, X. A.: OmniSoft: A Design Tool for Soft Objects by Example, *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI ’21, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3430524.3440634 (2021).

[11] Miyoshi, M., Punpongsanon, P., Iwai, D. and Sato, K.: SoftPrint: Investigating Haptic Softness Perception of 3D Printed Soft Object in FDM 3D Printers, *Journal of Imaging Science and Technology*, (online), DOI: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2021.65.4.040406 (2021).

[12] Bouzbib, E., Pacchierotti, C. and Lécuyer, A.: When Tangibles Become Deformable: Studying Pseudo-Stiffness Perceptual Thresholds in a VR Grasping Task, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 29, No. 5, pp. 2743–2752 (online), DOI: 10.1109/TVCG.2023.3247083 (2023).

[13] Pusch, A. and Lécuyer, A.: Pseudo-Haptics: From the Theoretical Foundations to Practical System Design Guidelines, *Proceedings of the 13th International Conference on Multimodal Interfaces*, ICMI ’11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, p. 57–64 (online), DOI: 10.1145/2070481.2070494 (2011).

[14] Fang, C. M., Suzuki, R. and Leithinger, D.: VR Haptics at Home: Repurposing Everyday Objects and Environment for Casual and On-Demand VR Haptic Experiences, *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA ’23, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, (online), DOI: 10.1145/3544549.3585871 (2023).

[15] VirtualMethod: ObiSoftbody, `https://assetstore.unity.com/packages/tools/physics/obi-softbody-130029?locale=ja-JP#publisher` (2023).

[16] Ocram: Drinking Bottle concept study 0.5l, `https://www.thingiverse.com/thing:639614` (2023).

[17] Alexi: ARCHIBASE PLANET, `https://archibaseplanet.com/download/4716a8fd.html#google_vignette` (2023).

© 2024 Information Processing Society of Japan