



VR 空間におけるダイナミックテクスチャと 動作同期による物体選択法

Object Selection with Dynamic Texture and Synchronous Motion in Virtual Reality

Qingtao CHENG¹⁾, 安藤潤人¹⁾, 野間春生¹⁾

Qingtao CHENG, Mitsuhiro ANDO and Haruo NOMA

1) 1) 立命館大学 情報理工研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1, is0595rk@ed.ritsumei.ac.jp, anmitsu@fc.ritsumei.ac.jp, hanoma@fc.ritsumei.ac.jp)

概要: 我々は物体のテクスチャの変化とユーザーの手の動きの同期を利用した, VR 空間における物体選択手法を提案する. ここでは方向, 速度, 位相が異なるダイナミックテクスチャを複数の物体に貼り付け, ユーザーは選択したい対象物のテクスチャの動きに合わせて手先を動かすことで対象物を選択できる. 比較実験により, 提案手法は従来のレーザーポインティング方式に比べて遮蔽された物体の選択に優勢があることを確認した.

キーワード: バーチャルリアリティ, 物体選択, ユーザインタフェース, メタバース

1. はじめに

バーチャルリアリティにおける基本的なユーザーインタラクションのタスクは, ナビゲーション, 選択・操作, システム制御の 3 つに分類される. その 1 つである物体選択技術は VR が発明されて以来, 50 年以上にわたって盛んに研究され, 数多くのアプローチが提案されてきた. 現在, VR アプリケーションで主に使われている物体選択方法は, 仮想手やハンドルから光線を発射する RayCast 法である. RayCast 法では, ユーザーの手の届かないところにある物体も選択することができますが, 小さい物体を選択することが難しく, 手ブレによるエラーも起こりやすいという問題がある. また, 腕を動かすことに伴う疲労をいかに軽減するかという課題もある.

本研究の目的は, 既存の物体選択手法の限界を克服し, 誰でもすぐに使いこなすことができる新たな物体選択手法を提案することである. そこで, 我々はダイナミックテクスチャと動作同期を用いた物体選択法を提案する. また, 提案手法の選択性能を, 距離の異なると, 遮蔽度の異なる物体に対して, RayCast 法との比較実験により検証する.

2. 関連研究

2.1 動作同期

同期とは, 内容や情報を一致させることである. 本稿でいう「動作同期」とは, 身体部位の動きとターゲット物体の動きを一致させることである.

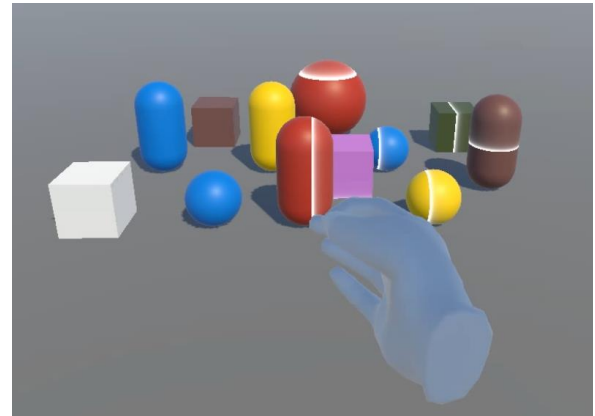


図 1: 提案手法の例

動作同期をユーザインタフェースに用いるというアイデアは, 2004 年の Williamson と Murray-Smith の研究に端を発している [1]. この研究では, ユーザーが画面上の物体の動きを模倣することで, たくさんの物体の中から特定の対象物を選択することができる. Vidal ら [2] はピアソン相関係数を用いてユーザー入力とターゲットの動きの類似度を判定する方法を提案した. Esteves ら [3] は, 円運動する物体をターゲットとした動作同期 Orbits を提案した. 円運動などの周期的な運動はパラメトリックに制御しやすいため, 動作同期の研究に広く用いられている.

2.2 VR 空間での動作同期

近年では, VR で動作同期を利用する研究も行われている. Khamis ら [4] は, VR 空間内に常に回転する立方体を置

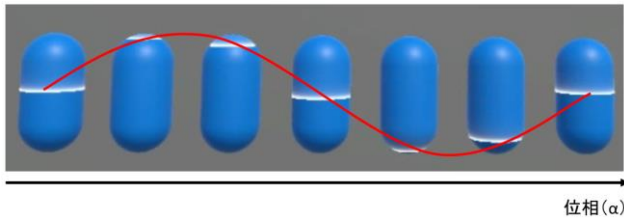


図 2: ダイナミックテクスチャ

き、立方体の表面には数字が表示されるようにした。ユーザーの視線が立方体とともに移動することを検知すると、立方体が表す数字が入力される。鈴木ら[5]は、VR空間内の各物体に対して、その物体を中心に回転する同期対象を設ける。ユーザーは、同期対象の動きに合わせて同期動作を行うことで、同期対象に対応する物体を選択できる。Sidenmarkら[6]は、選択対象のエッジを検出し、エッジに沿って移動する同期対象を設ける。ユーザーの視線軌跡と同期対象の移動軌跡をマッチングすることにより、物体選択を行う。これらの手法では、物体が密集している場合、同期対象と対象物の対応関係を見分けることが困難である。また、常に動いている物体や追加生成された同期対象は、シーンを混乱させる可能性がある。

3. 提案手法

提案手法は、VR空間におけるダイナミックテクスチャ動と作同期を用いた物体選択手法である。提案手法において、同期の対象は移動している物体ではなく、ダイナミックテクスチャと呼ばれる物体表面にある常に変化するテクスチャである(図2)。方向、速度、位相が異なるダイナミックテクスチャをユーザーの頭部方向から一定の角度内にある物体に貼り付ける(図3)。この角度は、範囲内の物体数が5つ程度になるように、ユーザーの視点周りの物体数に応じて自動的に調整される。この角度の値の範囲は、 $10^\circ \sim 25^\circ$ である。ユーザーは選択したい物体のテクスチャの変化に合わせて同期動作を行い、システムはテクスチャの変化とユーザーの動きの相関関係から、選択する物体を決定する。

3.1 ダイナミックテクスチャ

図2に示すように、時間とともに式(1)の三角関数に従って物体の表面を周期的にスキャンするダイナミックテクスチャが描かれる。このテクスチャの変化方向は、左右と上下の間でランダムに生成される。そして、周期($T = 2\pi/\omega$)を左右する三角関数の ω [s^{-1}]は、3~7の範囲でランダムに生成される。つまり、周期は1~2秒である。位相を左右する α [rad]は、 ω の値に応じて、5つの値の中からランダムに生成される。ダイナミックテクスチャの生成後、すでに生成されている他のテクスチャとの重複をチェックする。したがって、ユーザーは最大2方向 × 5周期 × 5位相差 = 50個の物体から選択することができる。

$$y = \sin(\omega \cdot t + \alpha) \quad (1)$$

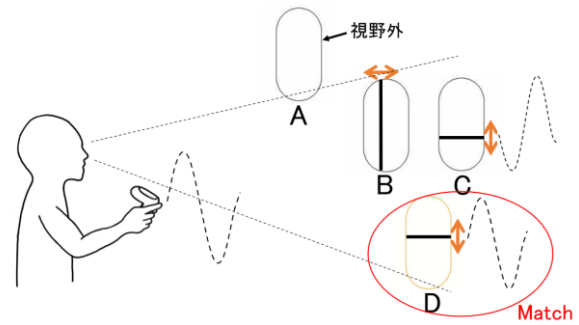


図 3: 提案手法の操作方法

3.2 相関関係の計算

各ダイナミックテクスチャに対応する \sin 関数の値とユーザーの手の三次元座標を記録し、ピアソン相関係数を計算することで両者の類似度を算出する。相関係数は、100個の手の座標を用い、更新間隔が0.02秒なので、直近の2秒間のデータを用いて算出した。

$$\text{corr}(a) = \frac{\sum_{i=1}^{100} (x_{a,i} - \bar{x}_a)(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{100} (x_{a,i} - \bar{x}_a)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{100} (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

相関係数の算出手順は上式に示す。上式において、 x_a と \bar{x}_a は物体aのダイナミックテクスチャの \sin 関数の値とその平均値である。また y と \bar{y} は、物体aのダイナミックテクスチャの変化方向におけるユーザーの手の位置座標とその平均値である。視野内の全物体の相関係数が算出されると、閾値0.8を超え、かつ相関係数が最も大きい物体が、ユーザーが選択した物体として記録され、色が変わる。上記のパラメータは、予備実験で決定された。

3.3 操作方法

提案手法の操作方法は図3に示す。ユーザーがハンドルのトリガーを押すと、頭部方向から一定の角度内にある物体にダイナミックテクスチャを貼り付ける。そして、ユーザーは、選択したい物体のテクスチャの動きに合わせて、ハンドルを動かす。物体の色が変わるのを確認したら、トリガーを離し、選択を完了させる。図3では、ユーザーがハンドルを上下に動かしている。物体Aは認識範囲外であり、物体Bのテクスチャの変化方向はユーザーの動きの方向と一致しない。位相の異なる物体CとDの中では、物体Dのテクスチャとユーザーの動きの相関係数が大きいので、この時点で物体Dが選択される。

4. 評価実験

提案手法の選択性能を、距離の異なると、隠蔽度の異なる物体に対して、RayCast法との比較実験により検証する。

4.1 実験概要

実験参加者は11名とし、参加者にはHMDを装着したまま坐位状態で選択タスクを行わせた。実験に用いるVR空間は、Unityにて作成した。図4に示すように、 $10m \times 10m$ の空間に20個のカプセル状の物体をユーザーの前方に一定の距離で配置した。この実験では、物体の中心部の見え方を、物体が隠されているかどうかの判断基準とした。こ

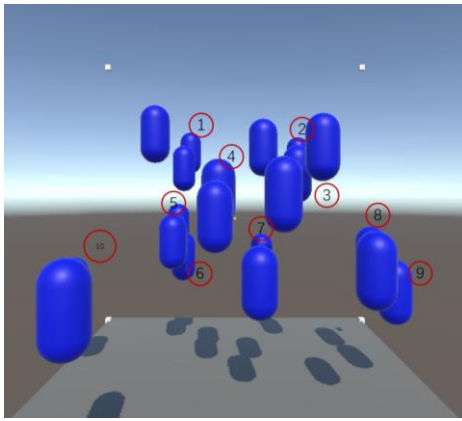


図 4: 実験の物体配置

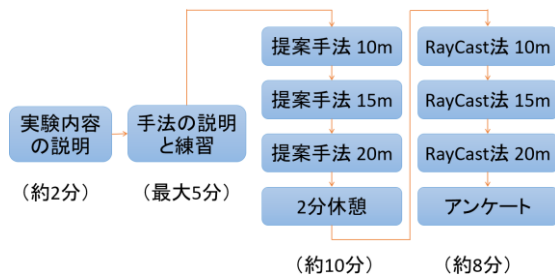


図 5: 実験手順

の基準に基づき、図 4 で印をつけた 10 個の物体は他の物体に隠されていると考えられ、残りの 10 個の物体は遮蔽は遮蔽されていないと判断される。

4.2 実験手続き

実験手順を図 5 に示す。まず参加者は実験と手法の説明を受け、最大 5 分間の手法の練習を行った。その後、参加者は 2 つの手法（提案手法、RayCast 法）、および、3 つの距離（10 m、15 m、20 m）の組み合わせについて選択タスクを行った。各選択タスクでは、図 4 の 20 個の物体がランダムな順序で選択課題として提示される。選択課題は緑色で表示され、参加者が選択した物体は赤色になる。また、SUS(System Usability Scale)アンケートは、すべての選択タスクが終了した後に実施された。各参加者について、2 つの選択手法 × 3 つの距離 × 20 個の物体 = 120 回の選択課題を行った。参加者ごとの実験時間は約 25 分であった。今回の実験では、11 人の参加者から合計 1320 回の選択データを収集し、そのうち 12 回のデータは異常値として削除された。

5. 結果

各手法における、距離または遮蔽の影響を調査するために、選択手法、距離、遮蔽の有無を独立変数として、選択時間と精度に関する三元配置分散分析 (ANOVA) を実施した。実験において、選択時間は、選択対象が提示されてから、選択を完了するまでの時間である。精度は、選択課題が正しく選択された回数/全選択試行数である。

5.1 選択時間

選択時間に関する結果を図 6 (a) (手法間)、図 7 (各距

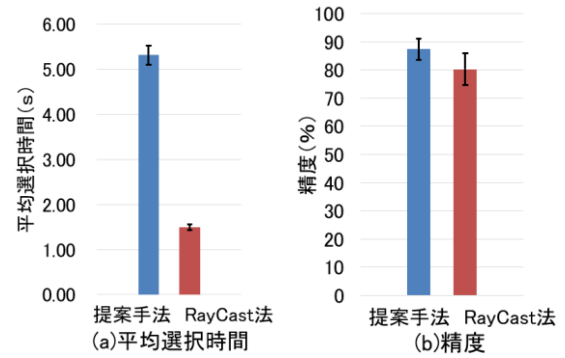


図 6: 各手法における選択時間および精度の全体平均 (エラーバーは 95%信頼区間)

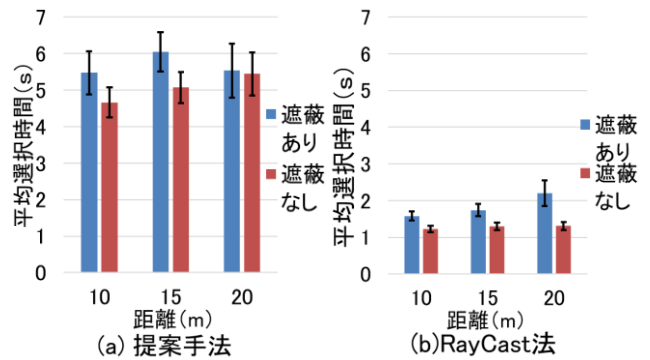


図 7: 各距離、遮蔽度における各手法の平均選択時間

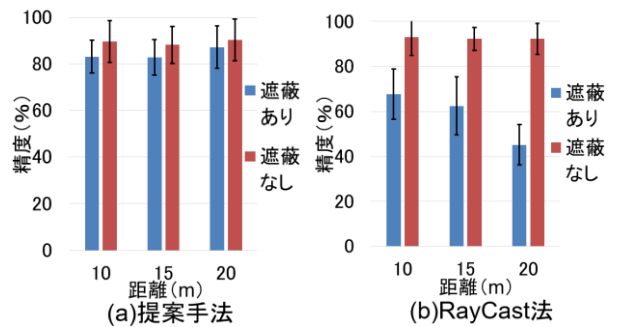


図 8: 各距離、遮蔽度における各手法の精度

離、遮蔽度における各手法間) に示す。分散分析の結果から手法に有意な主効果が検出され ($p < .001$)、提案手法は RayCast 法よりも選択に時間がかかることがわかった。なお各手法における選択時間は提案手法 : 5.32 s、RayCast 法 : 1.50 s である。また手法×距離×遮蔽の有無の有意な交互作用は検出された ($p < 0.01$)。

下位検定として Bonferroni 法による距離について多重比較を行ったところ、RayCast 法は遮蔽がある場合、異なる距離での選択時間に有意差が検出された ($p < .01$)。それ以外のケースでは、距離の違いによる選択時間に有意差はない。また、遮蔽度について多重比較を行ったところ、提案手法は 20m の場合、異なる遮蔽度の選択時間に有意差は検出されなかった ($p > .05$)。それ以外のケースでは、遮蔽がある方がない場合よりも選択時間が長くなっていることがわかる。

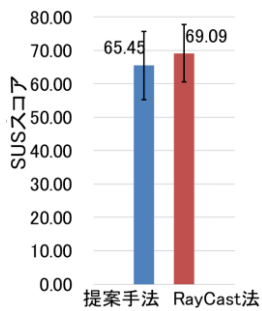


図 9: SUS の結果 (エラーバーは 95%信頼区間)

5.2 精度

精度に関する結果を図 6 (b) (手法間), 図 8 (各距離, 遮蔽度における各手法間) に示す. 分散分析の結果から精度に対して手法に有意差が確認され ($p < .01$), 提案手法は RayCast 法よりも選択精度が高いということが分かった. なお, 各手法における精度は提案手法 : 87%, RayCast 法: 80%である. 手法 \times 距離 \times 遮蔽度の有意な交互作用は検出されなかった ($p > .1$). 手法 \times 遮蔽度の有意な交互作用が検出された ($p < .01$). 下位検定として一対比較を行ったところ, RayCast 法において異なる遮蔽度での精度に有意差が検出され, 遮蔽がある場合は遮蔽がなし場合よりも精度が低いことがわかった ($p < .01$). 一方, 提案手法の選択精度は, 遮蔽の影響を受けない ($p > .05$). また, Bonferroni 法による距離について多重比較を行ったところ, 遮蔽がある場合の RayCast 法の精度に有意差が検出され ($p < .05$), RayCast 法の精度は距離の増加とともに明らかに低下することが分かった.

5.3 ユーザビリティ

SUS の結果から算出したスコアを図 9 に示す. SUS では, スコアが高いほど使いやすい手法であることを示す. t 検定を行ったところ, 手法間に有意な主効果が検出されなかった ($p > .05$). SUS の平均は 68 であり, 提案手法がユーザーにとって少し使いにくいものであることがわかった.

6. 考察

選択時間の結果から, 提案手法は RayCast 法よりも平均選択時間が長いものの, 遮蔽や距離の影響を受けにくいことがわかった. また, 精度の結果から, 提案手法は, 遠方の物体や隠れている物体を選択する際に, RayCast 法よりも有意に優れている.

10m と 15m での提案手法における遮蔽度の違いによる選択時間の差は, 選択課題を見つけるまでの時間の差に起因していると思われる. 物体との距離が近い場合は, 視点を移動して空間内に選択課題を見つける必要がある. 視点を移動させる際に, 部分的に隠れている物体を見落としやすいので, 選択課題を見つけるのに時間がかかる. また, 実験中は選択結果がリアルタイムで見えるため, 基本的にすべての誤選択はボタンを押すなどの決定動作によるものである. 提案手法のような動作同期による物体選択手法

は, 他の選択手法と異なり, 一瞬で選択するものではない. その代わりに, 連続した入力に基づく結果が得られる手法である. これにより, 決定動作による手ブレによってエラーを低減することができる. さらに, 提案手法は, 手を単一方向に動かすだけで物体選択を行うため, 手を円運動させる必要がある他の動作同期手法に比べて, 学習コストが低い可能性がある. この点については, 今後調査していく予定である.

7. まとめ

本研究では, 物体のテクスチャの変化とユーザーの手の動きの同期を利用した, VR 空間における新たな物体選択手法を提案し, 提案手法の有効性について実験的に調査した. その結果, 提案手法は RayCast 法よりも選択時間が長いものの, 遠方の物体や隠れた物体を選択のに有効であることがわかった. 実験により, 提案手法の平均選択時間は 5.32 秒, 精度は 87%である. また, 提案手法の選択性能は, 距離と遮蔽度に影響されない. 今後は, ユーザビリティの向上や, 全く見えない物体を選択する方法などを検討していく.

参考文献

- [1] John Williamson and Roderick Murray-Smith. Pointing without a pointer. In CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '04, page 1407–1410, 2004.
- [2] Mélodie Vidal, Andreas Bulling, and Hans Gellersen. Pursuits: Spontaneous interaction with displays based on smooth pursuit eye movement and moving targets. In Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, UbiComp '13, page 439–448, 2013.
- [3] Augusto Esteves, Eduardo Velloso, Andreas Bulling, and Hans Gellersen. Orbits: Gaze interaction for smart watches using smooth pursuit eye movements. In Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '15, page 457–466, 2015.
- [4] Mohamed Khamis, Carl Oechsner, Florian Alt, and Andreas Bulling. Vrpursuits: Interaction in virtual reality using smooth pursuit eye movements. In Proceedings of the 2018 International Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '18, 2018.
- [5] 翔大 鈴木, 圭汰 齋藤, and 文太郎 志築. VR 空間における 3 次元同期動作を用いた物体選択手法. 情報処理学会研究報告. Vol.2019-UBI-64, No.28, 1-8, 2019
- [6] Ludwig Sidenmark, Christopher Clarke, Xuesong Zhang, Jenny Phu, and Hans Gellersen. Outline Pursuits: Gaze-Assisted Selection of Occluded Objects in Virtual Reality, page 1–13. Association for Computing Machinery, 2020.