

VR空間における3次元同期動作を用いた物体選択手法

鈴木 翔大^{1,a)} 齋藤 圭汰^{2,b)} 志築 文太郎^{3,c)}

概要: 我々は、VR空間において3次元同期動作を用いた物体選択手法を提案する。同期動作とは、周期的に移動するターゲットに合わせて、ユーザが視線、手または物を動かすことを指す。提案手法では、VR空間に選択対象となる物体、およびその周りに同期動作の対象となるターゲットを配置する。ユーザは、各ターゲットに対して、手を用いて同期動作を行い、同期動作が識別されるとターゲットに対応した物体が選択できる。ターゲットは、8分割された初期位相（最小位相差： $\frac{\pi}{4}$ ）、2方向の回転方向（順方向および逆方向）および3軸の回転軸（ x 、 y および z 軸）のうち、それぞれ1つずつを、パラメータとして持つ。したがって、ユーザは8位相 $\times$ 2方向 $\times$ 3軸 = 48個まで物体の選択が可能である。提案手法において、ユーザは、物体の大きさまたは配置密度の影響を受けない物体選択ができる。我々は、提案手法および既存手法を用いた物体選択の実験を行い、選択性能を評価した。

1. はじめに

VR空間における物体の選択手法には、主に仮想手を用いて物体に触れるものまたは仮想ポインティングがある。仮想手とは、現実空間におけるユーザの手または入力デバイスをVR空間に投影した物体である。仮想ポインティングでは、ユーザは仮想手から放射される光線（レイ）、または現実の入力デバイスまたは仮想手を用いてカーソルを操作することにより物体を選択する。仮想ポインティングでは、レイまたはカーソルを用いることから、ユーザは手が届く範囲外の物体も選択できる。一方で、手のぶれにより小さな物体または密な物体配置に対して誤選択が増加する。

我々は、VR空間において3次元方向の同期動作（3次元同期動作）を用いた物体選択手法を提案する。本稿における同期動作とは、周期的に移動するターゲットに合わせて、ユーザが視線、手または物を動かすことを指す [1]。これまで、平面ディスプレイに表示されたターゲットに対して、2次元方向の同期動作を用いたコンピュータの操作が提案されてきた [2, 3]。我々の提案手法は、仮想手を用いて物体に触れるものまたは仮想ポインティングとは異なり、同期動作を用いて物体選択を行う。我々の提案手法では、選択対象となる物体に加えて、その物体の周りを回転するターゲットを表示する。各ターゲットの位相、回転方向および

回転軸は物体と1対1に対応する。ユーザはターゲットに対して同期動作を行うことにより、物体を選択できる。提案手法における同期動作は、運動の大きさに依らない。したがって、提案手法の選択性能は選択物体の大きさまたは配置密度に依らず一定である。

我々は、提案手法および仮想ポインティング手法の主な手法であるレイキャスト手法の物体選択時間および精度を調査し、提案手法の性能を評価した。本稿ではその結果を報告する。

2. 関連研究

本節において、既存のVR空間における物体選択手法を述べ、それらの課題および課題解決のための手法を述べる。また、提案手法にて使用する同期動作に関する研究を述べる。

2.1 VR空間における物体選択手法

VR空間における物体選択手法は、主に仮想手を用いて物体に触れるものまたは仮想ポインティングがある [4]。前者において、物体選択の精度を向上させるために、触覚フィードバックをユーザに与える手法が調査されており、指にて手を押す [5]、グローブ状の装置を装着する [6] または HTC VIVE^{*1}等のVR向けコントローラを用いる手法が挙げられる。仮想ポインティングは、ユーザが、仮想手からレイを放射する [7]、もしくは現実の手、視線または入力デバイスを用いてカーソルを操作する [8] ことによ

¹ 筑波大学情報科学類

² 筑波大学コンピュータサイエンス専攻

³ 筑波大学システム情報系

a) ssuzuki@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

b) ksaito@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

c) shizuki@cs.tsukuba.ac.jp

^{*1} <https://www.vive.com>

り物体を選択する手法である。仮想ポインティングの主な手法として、レイキャスト手法がある。レイキャスト手法は、ユーザが現実にてレーザーポインタを扱うような手法であり、入力デバイスから出るレイを物体に照射して選択する。仮想ポインティングはレイまたはカーソルを用いることから、ユーザは手が届く範囲外の物体も選択可能である。

仮想ポインティングにおいて、ユーザの手のぶれにより小さな物体または密な物体配置に対して誤選択が多くなるという課題が報告されている [4, 9]。この課題を解決するために、これまで様々な手法が提案されてきた。Kopper ら [10] は、一定の選択領域から選択領域を拡大し、目的の物体の選択が容易になるまで選択領域を絞り込む SQUAD 手法を提案した。Grossman ら [11] は、レイキャスト手法を用いて、選択領域に含まれる物体を 2D パイメニューにて選択する Flower Ray、および、レイが照射された物体を、レイが次の物体に照射されるまで選択を保持する Lock Ray を提案した。また、レイキャスト手法において、レイに最も近い物体を自動的に選択するような手法が提案されており、その手法の視覚的フィードフォワードとして、ハイライト [12] や半透明球 [13] 等が提案されている。Baloup ら [14] は、視覚的フィードフォワード、入力コントローラにおける制御関数とともに、ユーザの手のぶれに対するフィルタリングが物体選択におよぼす影響を調査した。

これまでの物体選択手法では、領域の絞り込みまたはメニュー選択のように、ユーザは複数ステップの操作にて選択する。これにより、小さい物体または密な物体配置に対して正確な選択が可能となる。一方で、これらの操作はユーザにとって手間であり、大きい物体または疎な物体配置に対して選択時間が通常の選択手法よりも遅くなるという課題がある。

提案手法では接触またはポインティングによる物体選択とは異なり、ユーザは同期動作を用いて物体選択を行う。また、提案手法は、手の円運動の大きさに依らない同期動作の識別が可能であるため、ユーザは物体の大きさまたは物体の配置密度の影響を受けない物体選択が可能となる。

2.2 同期動作

Vidal ら [1] は、動く物体を視線にて追跡する運動が、人間の自然な運動であることから、画面上の物体の動きに、ユーザが視線の動きを同期させるという同期動作を提案した。他の視線による同期動作を用いた研究として、Esteves ら [2] は、円移動する物体に対して視線による同期動作を用いた。物体が移動する円の大きさ、移動する方向または移動速度を変化させることにより、ユーザは視線の円運動のみにて多数の物体識別が可能である。同期動作は視線だけでなく、手を用いたものも提案されている。Clake ら [3, 15, 16] は、Esteves らと同様に、円移動する物体に対して同期動作を用いたが、ユーザの視線ではなく、ユーザ

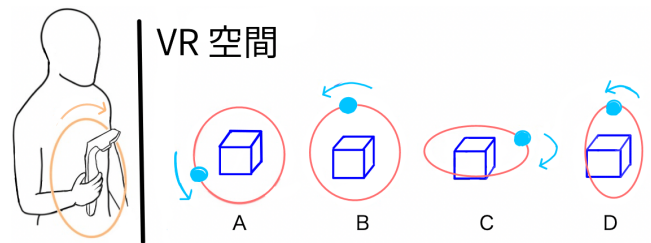


図 1 提案手法の操作方法。左図：ユーザはコントローラにて同期動作を行うことにより物体を選択する。右図：VR 空間に配置された選択物体（青立方体）、物体周りを円移動するターゲット（水色球）およびターゲットの移動経路（赤線）（A-D）。A：順 z 軸回転，B：順 x 軸回転，C：逆 y 軸回転，D：順 x 軸回転，A と B において、回転方向と回転軸が同じであるが位相が異なる。A と C において、回転方向および回転軸が異なる。A と D において、回転方向は同じであるが回転軸が異なる。したがって、本例において B が選択される。

の手、またはユーザが動かす物体による同期動作を用いた。Esteves らと同様に、円移動に対する同期動作を用いて、かつ物体が移動する円の方向および初期位相を変化させて、最大 8 個の同期動作の識別性能を調査した。Carter ら [17] は、円形移動する物体だけでなく、四角形、ひし形、不定形に対する手を用いた同期動作の調査を行い、円形とは異なる移動経路に対する識別処理を行った。Verweij ら [18, 19] はスマートウォッチの IMU センサを用いて、手の位置を取得し、同期動作を行った。

これまでの同期動作に関する調査は、平面のディスプレイに向かって同期動作を行うものであり、物体の配置、移動およびユーザの同期動作はどれも 2 次元方向である。我々の提案手法は、VR 空間上の物体選択に 3 次元方向の同期動作を用いる。

3. 提案手法

我々の提案手法は、3 次元方向への同期動作を用いて物体を選択する手法である。VR 空間に選択対象となる物体（選択物体）、およびその周りを円移動する同期動作の対象となるターゲットが配置される。ユーザは、各ターゲットに対して、手を用いて同期動作を行い、同期動作が識別されるとターゲットに対応した物体が選択できる（図 1）。

ユーザの手の動きと各ターゲットの動きの類似度は、一定時間 w に取得したそれぞれの位置座標時系列によるピアソンの積率相関係数である。以下に、各ターゲット $T_i (i = 1, 2, \dots, n)$ (n は選択物体の総数) と、ユーザの手 H の類似度 $sim(i)$ を測定する式を示す。

$$sim(i) = \min(corr_x(i), corr_y(i), corr_z(i)) \quad (1)$$

$$corr_x(i) = \frac{E[(H_x - \overline{H_x})(T_{i,x} - \overline{T_{i,x}})]}{\sigma_{H_x} \sigma_{T_{i,x}}} \quad (2)$$

上式において、 $E[\cdot]$ は期待値を表す。 $H_x, \overline{H_x}$ および σ_{H_x} は、ユーザの手の x 軸における位置座標とその平均および

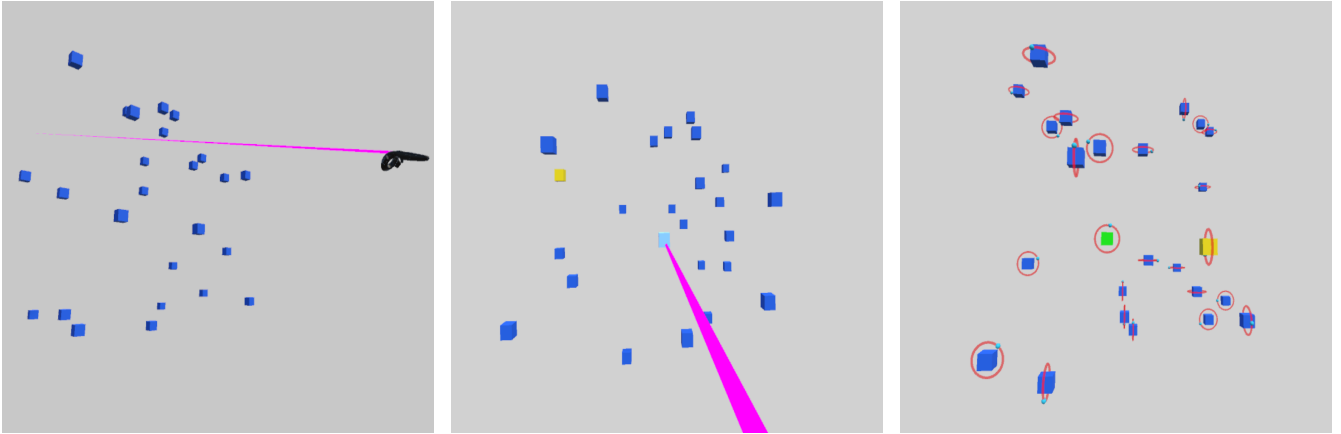


図 2 実験における物体配置 (左・中央: RC , 右: SM , 物体サイズ: S_{Mid} , 物体密度: D_{Mid}).
左図: ユーザの外から見た物体配置. ユーザ (コントローラ位置) の先に物体が配置される. RC においてコントローラからレイが放射される. 中央図: RC による物体選択. 選択課題 (図左) が黄色に表示され, レイが照射された物体は色が明るくなる. 選択物体はユーザの正面奥に配置される. 右図: SM による物体選択, 選択物体に加えて, ターゲット (水色) およびその移動経路が表示される. 選択課題 (図右) に対して誤選択すると, 選択された物体 (図中央) が緑色に変化する.

標準偏差を表しており, ターゲット (T) についても同様である. また $T_{i,x}$ は T_i における x 座標を示す. 式 (2) は T_i における, x 軸の相関係数を示しており, したがって, y 軸 ($corr_y(i)$) および z 軸 ($corr_z(i)$) についても同様式にて測定される. 測定された類似度 $sim(i)$ のうち, 閾値 th_{sim} を超え, かつ最大のターゲット 1 つを, ユーザが対象としたターゲットとして識別する. つまり,

$$\arg \max_i sim(i) > th_{sim} \quad (3)$$

となるような i 番目のターゲットを識別する.

我々は, 各ターゲットを初期位相, 回転方向および回転軸が異なるように設定した. ユーザは, ターゲットに合わせて手を回転運動することにより, 円移動の同期動作のみを用いて多数の物体選択が可能である. 今回の実装において, ターゲットは, 8 分割された初期位相 (最小位相差: $\frac{2\pi}{8} = \frac{\pi}{4}$), 2 方向の回転方向 (順方向および逆方向) および 3 軸の回転軸 (x , y および z 軸) のうち, それぞれ 1 つずつを, パラメータとして持つ. したがって, ユーザは $8 \text{ 位相} \times 2 \text{ 方向} \times 3 \text{ 軸} = 48 \text{ 個}$ まで物体を選択できる.

提案手法は, 接触またはポインティングによる物体選択とは異なり, 同期動作を用いた物体選択である. また, 用いる同期動作の識別アルゴリズムは, ユーザの手と各ターゲットの位置座標時系列を正規化する. したがって, ユーザの同期動作は手の回転運動の大きさに依らず, 物体の大きさまたは配置密度の影響を受けない物体選択ができる.

4. 実験

我々は, 提案手法における性能を評価する比較実験を行った. 提案手法 (SM : *Synchronous Motion*) 性能を比較する対象として, 既存の VR 空間における物体選択手法



図 3 実験を行う参加者. HMD を頭部に装着し, 利き手 (右手) に把持したコントローラにて物体選択を行う.

であるレイキャスト手法 (RC : *Raycasting*) を用いた. RC において, 参加者は物体にレイを照射した後, コントローラのボタンまたはトリガを押下することにより物体を選択できる. 実験において評価する性能は, 物体選択時間, 精度およびユーザビリティである.

本節にて, 実験環境, 実験参加者およびタスクを述べ, 最後に結果を述べる.

4.1 実験環境

本実験における VR 環境およびアプリケーションは, HTC VIVE の HMD および付属コントローラ, および NVIDIA GeForce GTX 1060 が搭載された CPU 2.80 GHz の Windows PC にて構築された. また, アプリケーションの実装には Unity 2018.3.11f1 および SteamVR 1.2.2 を使用した.

SM および *RC* に共通して、選択物体は、VR 空間上の参加者の正面方向 2m 奥を中心とした半径 1m の球内にランダムに配置された。物体の配置および色を図 2 に示す。選択物体の色は青色であり、選択を指示される物体（選択課題）は黄色に表示された。参加者が選択課題以外の選択物体を選択した場合、その選択を誤選択とし、選択された物体は青色から緑色に色が変わった。次に *SM*, *RC* それぞれの実験環境について述べる。*SM* において、同期動作の対象となる各ターゲットおよびその移動経路は常に表示されていた。ターゲットは水色であり、移動経路は赤色であった。*RC* において、レイが照射された物体は他の物体よりも明るく表示された。*RC* において、ユーザはコントローラのトリガを人差し指にて押下することにより物体を選択することができた。参加者が正しく物体を選択すると、コントローラは短く振動し、誤選択をすると長く振動した。今回の実験において、ターゲットおよびコントローラの位置座標は 60FPS にて取得され、同期動作の識別に使用する位置座標時系列数（ウィンドウサイズ）は $w = 100$ であった。ターゲットの選択物体周囲を回転する速度は 2s/cycle であった。

4.2 実験参加者

実験参加者は、研究室の大学生 6 人 (P_1 – P_6 , 全員男性) であり、年齢は 22 歳から 24 歳 (平均 22.5 歳, $SD = 0.84$) であった。参加者のうち、1 人が眼鏡を着用し、1 人が左利きであった。5 人が VR-HMD の使用経験があり、うち 2 人が日常的に使用していた。参加者は、HMD を頭部に装着し、利き手に把持したコントローラのみを用いて立位状態にて物体選択を行った (図 3)。

4.3 タスク

実験には被験者内計画を用いており、条件は、手法、ブロック、物体サイズおよび配置密度である。実験は各手法ごとに、練習タスク、本番タスクおよびアンケートで構成された。練習タスクでは、参加者は手法の操作説明を受けて、約 3 分間の練習を行った。本番タスクは、9 回のタスクからなる 1 ブロックが計 3 ブロックと、各ブロック後の休憩で構成された。参加者が正しい物体選択を計 10 回行うことを 1 タスクとした。参加者は 3 つの物体サイズ ($S_{Big} = 10\text{ cm}$, $S_{Big} = 6\text{ cm}$, $S_{Small} = 3\text{ cm}$)、および、3 つの配置密度 ($D_{High} = 40$ 個, $D_{Mid} = 25$ 個, $D_{Low} = 15$ 個) のそれぞれの組み合わせに対して 1 タスクを行い、1 ブロックにて計 9 タスクを行った。参加者が誤選択を連続して 10 回行うと次の選択課題へ移った。参加者は 1 ブロックを終えるごとに最低 1 分の休憩をした。参加者は本番タスクとして計 3 ブロック分のタスクを行った後、NASA Task Load Index (NASA-TLX) および System Usability Scale (SUS) を用いたアンケートの記入を指示された。参加者

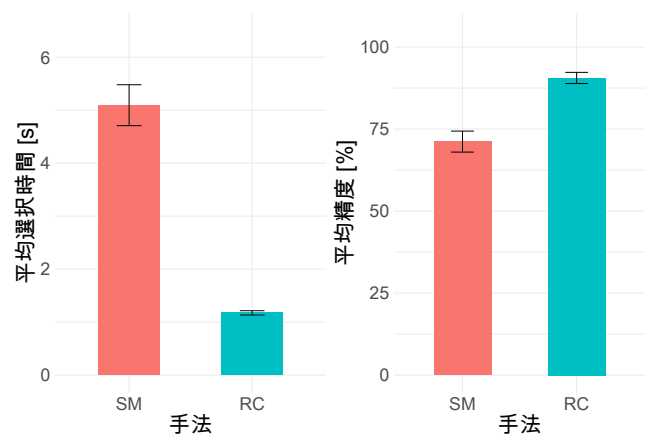


図 4 各手法における、平均選択時間 (左図) および平均精度 (右図) (95%信頼区間)。

は、一方の手法の実験を終えると、もう一方の手法の実験に移り、練習タスク、本番タスクおよびアンケートを行った。ユーザが誤選択を連続して 10 回すると、次の選択課題へ移った。6 人の参加者のうち、3 人が *SM* から実験を行い、もう 3 人が *RC* から実験を行った。参加者ごとの実験時間は約 90 分であった。合計して、6 参加者 $\times$ 2 手法 $\times$ 3 ブロック $\times$ 3 物体サイズ $\times$ 3 配置密度 $\times$ 10 個 = 3240 試行が得られた。

4.4 結果

選択時間

実験において、選択時間は 2 つの成功した選択間の時間である。各タスクにおける最初の選択時間のみ、コントローラのタッチパッドを押下した時間から最初の正しい選択までの時間である。

選択時間に関する結果を図 4 左 (手法間)、図 5 左 (各物体サイズにおける各手法間)、図 6 左 (各密度における各手法間) に示す。各手法における、物体サイズまたは配置密度の影響を調査するために、手法、物体サイズおよび配置密度の三元配置分散分析を行った。その結果、手法に有意な主効果が検出され、*SM* は *RC* よりも選択に時間がかかることがわかった ($p < 0.01$)。なお各手法における選択時間は $SM: 5.09\text{ s}$, $RC: 1.17\text{ s}$ である。また、密度にも有意な主効果が検出された ($p < 0.05$)。手法 $\times$ 物体サイズ $\times$ 配置密度の有意な交互作用は検出されなかった ($p > 0.1$)。手法 $\times$ 物体サイズの有意な交互作用が検出された ($p < 0.05$)。なお、各手法の各物体サイズにおける選択時間は $SM_{Big}: 5.48\text{ s}$, $SM_{Mid}: 5.01\text{ s}$, $SM_{Small}: 4.73\text{ s}$, $RC_{Big}: 1.01\text{ s}$, $RC_{Mid}: 1.10\text{ s}$, $RC_{Small}: 1.42\text{ s}$ である。密度および手法 $\times$ 密度の有意な交互作用が検出された ($p < 0.05$)。なお、各手法の各配置密度における選択時間は $SM_{High}: 5.72\text{ s}$, $SM_{Mid}: 4.83\text{ s}$, $SM_{Small}: 4.72\text{ s}$, $RC_{High}: 1.22\text{ s}$, $RC_{Mid}: 1.17\text{ s}$, $RC_{Low}: 1.12\text{ s}$ である。

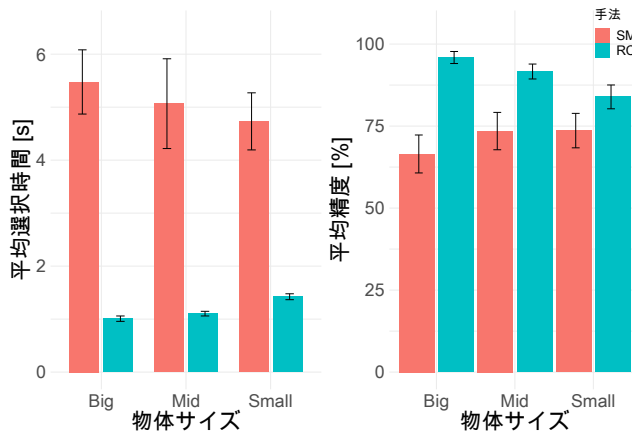


図5 各物体サイズにおける各手法の平均選択時間（左図）および平均精度（右図）（95%信頼区間）。

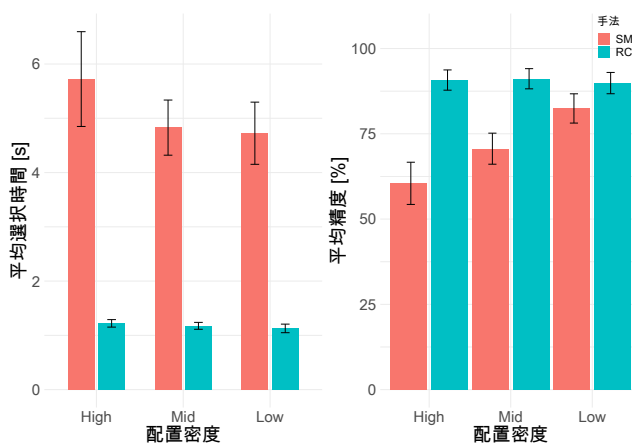


図6 各密度における各手法の平均選択時間（左図）および平均精度（右図）（95%信頼区間）。

精度

実験において、精度は、成功した選択数/全選択試行数である。

精度に関する結果を図4右（手法間）、図5右（各物体サイズにおける各手法間）、図6右（各密度における各手法間）に示す。各手法における、物体サイズまたは配置密度の影響を調査するために、手法、物体サイズおよび配置密度の三元配置分散分析を行った。その結果、手法に有意な主効果が検出され、SMはRCよりも選択精度が低いということがわかった（ $p < 0.01$ ）。なお、各手法の精度はSM: 71.2%, RC: 90.6%である。また、密度にも有意な主効果が検出された（ $p < 0.05$ ）。手法×物体サイズ×配置密度の有意な交互作用は検出されなかった（ $p > 0.1$ ）。手法×物体サイズの有意な交互作用が検出された（ $p < 0.05$ ）。一対比較を行ったところ、RCにおいて S_{Big} は S_{Small} よりも有意に精度が低いものとなった（ $p < 0.01$ ）。なお、各手法の各物体サイズにおける精度は SM_{Big} : 66.5%, SM_{Mid} : 73.5%, SM_{Small} : 73.6%, RC_{Big} : 95.9%, RC_{Mid} : 91.6%, RC_{Small} : 83.9%である。密度および手法×密度の有意な交互作用が検出された

表1 RCの、各物体サイズまたは各密度における選択課題への平均照射回数。括弧内は標準偏差（SD）。

	照射回数（回）
S_{Big}	5.14 (SD = 1.30)
S_{Mid}	5.01 (SD = 0.89)
S_{Small}	5.42 (SD = 1.17)
D_{High}	5.79 (SD = 1.30)
D_{Mid}	5.01 (SD = 0.87)
D_{Low}	4.65 (SD = 1.05)

（ $p < 0.05$ ）。一対比較を行ったところ、SMにおいて D_{High} は D_{Mid} および D_{Low} よりも有意に精度が低いものとなった（ $p < 0.01$ ）。なお、各手法の各配置密度における精度は SM_{High} : 60.5%, SM_{Mid} : 70.6%, SM_{Low} : 82.4%, RC_{High} : 90.8%, RC_{Mid} : 91.1%, RC_{Low} : 89.9%である。

また、RCについて、レイが一度選択課題に照射された後、再度レイが照射される回数を調査した。結果を表1に示す。分散分析を行ったところ、物体サイズ間に有意差は検出されなかった。一方で、密度間に有意差が検出され（ $p < 0.01$ ）、一対比較を行ったところ、 D_{High} は、 D_{Mid} 、 D_{Low} よりも有意に回数が多くなった。

ユーザビリティ

NASA-TLXの結果を図7に示し、SUSの結果を図8に示す。NASA-TLXはスコアが低いほど、SUSはスコアが高いほど優れていることを表す。NASA-TLXにおいて分散分析を行ったところ、手法間に有意な主効果が検出され、RCがSMよりも優れていることがわかった（ $p < 0.01$ ）。SUSにおいて分散分析を行ったところ、手法間に有意差はなかった（ $p > 0.05$ ）。なお、SUSのスコアはSM: 69.2, RC: 67.5である。

5. 議論

実験の結果から、提案手法において、物体のサイズが選択時間および精度に影響はしないことがわかる。一方で、物体が大きくなるにつれ、選択時間には増加の傾向がみられる。提案手法では、選択物体の周囲に新たなターゲットが追加され、さらにターゲットが移動する。また、実験においてターゲットの移動経路も空間に表示され、選択物体が大きくなることに比例して経路は大きくなる。したがって、選択物体が大きくなるにつれ、選択物体、ターゲットおよびターゲットの経路の視界を覆う領域が大きくなり、ターゲットの移動の視認および同期動作が難しくなると考えられる。

レイキャスト手法は、物体が小さくなるにつれ選択時間が増加し、精度が低下した。また、配置密度が高くなるにつれ、レイの照射回数が増加した。この結果から、レイキャスト手法には手のぶれの発生が考えられるものの、選択時間および精度への配置密度の影響は確認できなかった。本

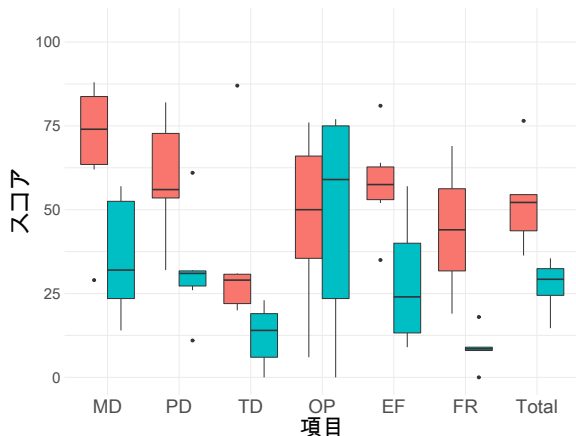


図 7 NASA-TLX の結果. MD : 精神的要求, PD : 身体的要求, OP : 時間的圧迫感, OP : 作業達成度, EF : 作業達成度, FR : 不満. スコアが低いほど優れている.

実験において、手ブレによる選択への影響が起こりうる状況の再現できなかったと考えられる。

提案手法において、誤選択は同軸回転し、かつ選択課題に対して位相差が最小位相 ($\frac{\pi}{4}$) である物体に対して多発した。また、参加者が誤選択し、再度誤選択したとき、同様の物体が誤選択の対象となることが多かったことから、参加者にとって選択課題に合わせて位相差を修正することは困難であったと考えられる。

提案手法における配置密度について、識別対象となる物体数が、最大識別数に近づくにつれ、位相差が最小位相である物体が増える。そのため、参加者は誤選択の頻度が高い、かつ誤選択からの修正が難しいものとなり、物体数が最大識別数 48 に近い D_{High} において、選択時間が増加し、精度が低下したと考えられる。一方で、物体数が最大識別数の半分程度または半分以下である場合 (D_{Low}, D_{Mid}) において、選択時間および精度に有意差はなかったため、堅牢な選択が可能であったと考えられる。

実験において、選択物体の形状には、球ではなく立方体を用いた。これは、予備実験を行った結果、提案手法において、立方体を用いるとユーザがターゲットの移動経路を把握しやすくなるという結果に基づく。ただし、選択物体の 1 面は四角形であることに対し、ターゲットの移動経路は円であり、2 つの図形的な差が選択に影響していると考えられる。 P_1 は「手を円形に動かすよりも、物体の形状に合った動き（今回であれば四角形）のほうが、選択しやすく、かつ物体を選択しているという意識が強くなる」とコメントした。

P_5, P_6 は「提案手法において、物体配置の中心からより外側に配置された選択物体に対して、正しく選択することが難しかった」とコメントしている。これは、参加者が物体配置の中心から離れた物体について、物体とターゲットの位置関係を見誤る、またはターゲットの一部の移動が物体に遮蔽されることによると考えられる。

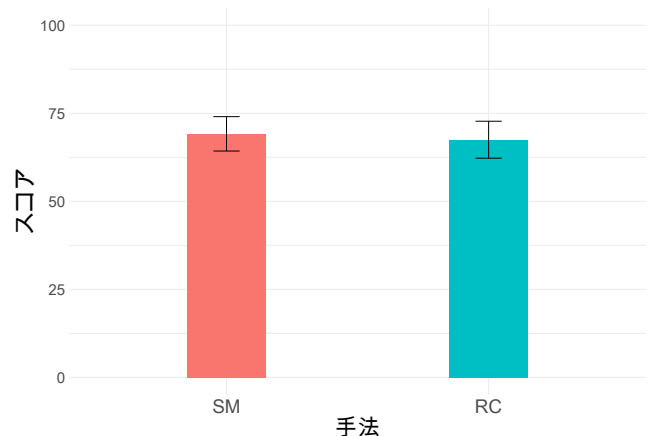


図 8 SUS の結果. 各手法における平均総合スコア. スコアが高いほど優れている.

6. 今後の課題

我々の提案手法において、物体の大きさによるターゲットの視認性の変化が選択性能に関係しているため、物体の大きさに関わらず、ターゲットの動きが認識しやすい表示方法または別のシステムが必要である。物体の数が、同期動作を識別できる最大識別数に近づくにつれ性能が低下するため、より大きな最大識別数または高い識別分解能をアルゴリズムを調査する必要がある。

実験において、レイキャスト手法では、レイが物体に照射されると物体は明るく表示され、参加者は選択中から選択し得る物体が認識できていた。一方で、提案手法では、同期動作中つまり選択中におけるフィードフォワードがなかった。物体が選択される前、つまり同期動作の途中ユーザが選択され得る物体を認識できれば、同期動作の修正を行うことにより精度の高い選択が可能になると考えられる。

我々の提案手法において、選択時間と精度はトレードオフである。実験において、同期動作を識別するウィンドウサイズは $w = 100$ であった。 w を小さくすることにより、識別時間は減少する一方で、識別に使用する位置時系列が減少するため、識別精度が低下する。また、初期位相を 8 分割 (最小位相差: $\frac{\pi}{4}$) とした。分割を減少させること、つまり最小位相差を大きくすることにより、最大識別数および最大選択物体数は減少する一方で、同期動作の識別精度は向上する。

実験において、我々の提案手法を使用する時、誤選択となる物体の位置はユーザの視界または視線に依らない。ユーザが物体を選択する時、視線は選択したい物体の方向に向く。したがって、ユーザの視線からの距離に沿った優先度を各物体に定義することにより、誤選択が減少すると考えられる。ターゲットが絶対座標軸に対して回転するとき、ユーザと選択物体の位置関係から、ターゲットの移動を見誤ることがある。したがって、各ターゲットがユーザの視線に対して垂直な軸を基準に回転すると視線による誤認識

および誤選択が減少すると考えられる。斜行する視線により誤選択が起こる一方で、各回転軸ごとの選択の精度は高いものである。これは、ユーザがターゲットの回転を正しく認識でき、かつ識別システムもユーザの手を正しく認識できていることを表す。今回我々は3次元同期動作に直行し合う3軸(x , y および z 軸)を用いており、ターゲットが回転する軸を増やすと、最大識別数を増加させることができる(例として、 z 軸回転するターゲットに加えて、 z 軸を y 軸中心に 45° 回転させた軸を回転するターゲット)。

提案手法において、同期動作を識別するパラメータは、初期位相、回転方向および回転軸であり、回転速度は一定であった。異なる回転速度をもつターゲット同士は、一定時間において移動軌跡が異なるため、同期動作にて識別が可能である。回転速度をパラメータとして使用することにより、最大識別数が増加させることができると考えられる。

今回の実験において、同期動作の対象となるターゲットの移動経路は円形のみである。一方で、移動経路を円形以外の図形に拡張することにより、多数の物体の選択が可能となる。また、 P_1 のコメントのように、物体の形状に沿った経路を定義することにより、ユーザが提案手法にて物体選択を行う場合に、同期動作をするためのターゲットよりも、レイキャスト手法にてレイを選択物体に照射するように、選択物体へ選択の意識が強くなると考えられる。

我々は3次元同期動作を用いたが、この動作に適当な運動または識別パラメータについて詳細な調査を行っていない。今後、物体選択における、ユーザの視線および視界、またはユーザの運動しやすい移動経路等を調査し、3次元同期動作に適当な運動、識別アルゴリズムまたは識別パラメータを調査したい。

7. おわりに

我々は3次元同期動作を用いてVR空間の物体を選択する手法を提案した。提案手法では、これまで2次元方向のみに用いられていた同期動作を3次元に拡張することにより、動作識別数が増加する。また、ターゲットの位相または方向を変化させることにより、ユーザは円運動の同期動作のみを用いて各物体を識別できる。

提案手法の性能を評価する実験を行ったところ、提案手法はレイキャスト手法よりも性能が低下することがわかった。一方で、提案手法には一部の物体サイズまたは配置密度に影響されないことがわかった。また、提案手法は識別システムの性能の他にも、ユーザの視線または手の運動に性能が依存すると考えられる。

今後は、提案手法の識別システムまたはユーザに対する最適なパラメータを調査する必要がある。また、円形以外のターゲット移動経路に対して提案手法を調査し、選択物体の形状に最適な運動経路にてユーザが選択できるようにしたいと考える。

参考文献

- [1] Vidal, M., Bulling, A. and Gellersen, H.: Pursuits: Spontaneous Interaction with Displays Based on Smooth Pursuit Eye Movement and Moving Targets, *Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 439–448 (online), DOI: 10.1145/2493432.2493477 (2013).
- [2] Esteves, A., Velloso, E., Bulling, A. and Gellersen, H.: Orbits: Gaze Interaction for Smart Watches Using Smooth Pursuit Eye Movements, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 457–466 (online), DOI: 10.1145/2807442.2807499 (2015).
- [3] Clarke, C. and Gellersen, H.: MatchPoint: Spontaneous Spatial Coupling of Body Movement for Touchless Pointing, *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 179–192 (online), DOI: 10.1145/3126594.3126626 (2017).
- [4] Argelaguet, F. and Andujar, C.: Special Section on Touching the 3rd Dimension: A Survey of 3D Object Selection Techniques for Virtual Environments, *Computers and Graphics*, Vol. 37, No. 3, pp. 121–136 (online), DOI: 10.1016/j.cag.2012.12.003 (2013).
- [5] 石井 晃, 阿達拓也, 島 佳吾, 中前秀太, 志築文太郎, 高橋伸: カードボード VR のための空中操作を用いたターゲット選択手法, コンピュータソフトウェア, Vol. 35, No. 2, pp. 64–78 (オンライン), DOI: 10.11309/jssst.35.2.64 (2018).
- [6] Gallotti, P., Raposo, A. and Soares, L.: v-Glove: A 3D Virtual Touch Interface, *2011 XIII Symposium on Virtual Reality*, pp. 242–251 (online), DOI: 10.1109/SVR.2011.21 (2011).
- [7] Mine, M. R.: Virtual Environment Interaction Techniques, Technical Report No. TR 90-018, Chapel Hill: University of North Carolina (1995).
- [8] Chen, K.-Y., Lyons, K., White, S. and Patel, S.: uTrack: 3D Input Using Two Magnetic Sensors, *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, New York, NY, USA, ACM, pp. 237–244 (online), DOI: 10.1145/2501988.2502035 (2013).
- [9] Pavlovych, A. and Stuerzlinger, W.: The Tradeoff Between Spatial Jitter and Latency in Pointing Tasks, *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, EICS '09, New York, NY, USA, ACM, pp. 187–196 (online), DOI: 10.1145/1570433.1570469 (2009).
- [10] Kopper, R., Bacim, F. and Bowman, D. A.: Rapid and accurate 3D selection by progressive refinement, *2011 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 67–74 (online), DOI: 10.1109/3DUI.2011.5759219 (2011).
- [11] Grossman, T. and Balakrishnan, R.: The Design and Evaluation of Selection Techniques for 3D Volumetric Displays, *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '06, New York, NY, USA, ACM, pp. 3–12 (online), DOI: 10.1145/1166253.1166257 (2006).
- [12] Guillon, M., Leitner, F. and Nigay, L.: Investigating Visual Feedforward for Target Expansion Techniques, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, New

- York, NY, USA, ACM, pp. 2777–2786 (online), DOI: 10.1145/2702123.2702375 (2015).
- [13] Vanacken, L., Grossman, T. and Coninx, K.: Exploring the Effects of Environment Density and Target Visibility on Object Selection in 3D Virtual Environments, *2007 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, (online), DOI: 10.1109/3DUI.2007.340783 (2007).
- [14] Baloup, M., Pietrzak, T. and Casiez, G.: RayCursor: A 3D Pointing Facilitation Technique Based on Ray-casting, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 101:1–101:12 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300331 (2019).
- [15] Clarke, C., Bellino, A., Esteves, A., Velloso, E. and Gellersen, H.: TraceMatch: A Computer Vision Technique for User Input by Tracing of Animated Controls, *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, UbiComp '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 298–303 (online), DOI: 10.1145/2971648.2971714 (2016).
- [16] Clarke, C., Bellino, A., Esteves, A. and Gellersen, H.: Remote Control by Body Movement in Synchrony with Orbiting Widgets: An Evaluation of TraceMatch, *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 1, No. 3, pp. 45:1–45:22 (online), DOI: 10.1145/3130910 (2017).
- [17] Carter, M., Velloso, E., Downs, J., Sellen, A., O'Hara, K. and Vetere, F.: PathSync: Multi-User Gestural Interaction with Touchless Rhythmic Path Mimicry, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 3415–3427 (online), DOI: 10.1145/2858036.2858284 (2016).
- [18] Verweij, D., Esteves, A., Khan, V.-J. and Bakker, S.: WaveTrace: Motion Matching Input Using Wrist-Worn Motion Sensors, *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 2180–2186 (online), DOI: 10.1145/3027063.3053161 (2017).
- [19] Verweij, D., Esteves, A., Bakker, S. and Khan, V.-J.: Designing Motion Matching for Real-World Applications: Lessons from Realistic Deployments, *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 645–656 (online), DOI: 10.1145/3294109.3295628 (2019).