

2019年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目

3次元同期動作を用いたVR向け物体選択手法

主専攻 知能情報メディア主専攻

著者 鈴木翔大

指導教員 志築文太郎 高橋伸

要 旨

我々は、VR空間に配置された物体に対する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、周期的に移動する同期対象に合わせて、ユーザが視線、手または物を動かすことを指す。提案手法において、VR空間上の選択対象となるそれぞれの物体（選択対象）に対して、3次元方向に動きかつ同期動作の対象となる物体（同期対象）が1つずつ設けられる。ユーザは、移動する各同期対象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同期対象に対応した選択対象が選択できる。8種類の位相（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）について、各同期対象のパラメータの組み合わせが異なるように設定することにより、8位相×2方向×3軸＝48個まで同期対象を生成することができる。提案手法に用いる同期動作の識別アルゴリズムはユーザの手と各同期対象の移動の大きさに影響せず、またそれぞれの位置に影響しない。したがって、同期動作の識別はユーザの手の運動の大きさに影響されず、また、ユーザは物体の大きさまたは配置密度の影響を受けずに物体を選択できる可能性がある。我々は、提案手法における物体選択性能を評価する実験を行い、また物体の大きさまたは配置密度による影響を調査した。実験の結果から、既存のレイキャスト手法よりも選択性能が低いことがわかった。また、生成できる同期対象の個数または、ユーザの視界が提案手法による選択に影響すると考えられる。したがって、今後は、これらの影響を考慮した提案手法の改善が必要である。

目次

第1章	序論	1
1.1	研究目的とアプローチ	1
1.2	貢献	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	VR空間における物体選択手法	3
2.1.1	接触による物体選択	3
2.1.2	レイキャスト手法による物体選択	4
2.2	同期動作	6
2.3	本研究の位置づけ	8
第3章	提案手法	9
3.1	選択操作	9
3.2	パラメータ設定	10
3.3	同期対象識別	11
第4章	実験	12
4.1	実験環境	12
4.2	実験参加者	16
4.3	タスク	16
4.4	結果	17
4.4.1	選択時間	17
4.4.2	精度	19
4.4.3	ユーザビリティ	22
第5章	議論	24
5.1	物体の大きさによる選択性能への影響	24
5.2	物体の配置による選択性能への影響	24
5.2.1	選択対称または同期対象の移動の形状による選択性能への影響	25
第6章	今後の展望	26
6.1	パラメータによる影響	26

6.2	視界による影響	27
6.3	提案手法の拡張	27
6.4	実験参加者	28
第7章	結論	29
	謝辞	30
	参考文献	31
	著者論文リスト	36
付録A	実験に用いた各種書類および機器	37
A.1	実験手順書：実験全体説明	38
A.2	実験手順書：各手法操作説明	39
A.3	実験後アンケート（SUS）	40

目次

3.1	提案手法を用いた物体選択.	9
3.2	提案手法における同期対象のパラメータ (位相, 回転方向, 回転軸).	10
4.1	実験に用いた:TC社のVIVE (A:HMD, B:コントローラの表面, およびC:コントローラの側面).	13
4.2	参加者の外から見たVR空間における物体配置. 参加者の正面奥に選択対象が配置される.	13
4.3	RCを用いた場合の参加者から見た物体配置.	14
4.4	SMを用いた場合の参加者から見た物体配置.	14
4.5	実験を行う参加者.	15
4.6	実験の手順を示すワークフロー.	15
4.7	各手法ごとの平均選択時間. エラーバーは95%信頼区間である.	17
4.8	各手法における各参加者ごとの平均選択時間. エラーバーは95%信頼区間である.	18
4.9	各手法における各物体サイズごとの平均選択時間. エラーバーは95%信頼区間である.	18
4.10	各手法における各配置密度ごとの平均選択時間. エラーバーは95%信頼区間である.	19
4.11	各手法ごとの平均精度. エラーバーは95%信頼区間である.	20
4.12	各手法における各参加者ごとの平均精度. エラーバーは95%信頼区間である.	20
4.13	各手法における各物体サイズごとの平均精度. エラーバーは95%信頼区間である.	21
4.14	各手法における各配置密度ごとの平均精度. エラーバーは95%信頼区間である.	21
4.15	NASA-TLXにおける各項目ごとの平均スコア.	23
4.16	SUSにおける各手法ごとの平均スコア. エラーバーは95%信頼区間である.	23

表目次

4.1	RCにおける各物体サイズまたは各密度ごとの選択課題への平均照射回数.	22
-----	------------------------------------	----

第1章 序論

仮想現実 (VR) 空間は、空間が投影されたヘッドマウントディスプレイ (HMD) を通じてユーザに知覚され、また、ユーザは VR 空間に対して手、コントローラ、視線等を用いて操作を行う。VR 空間における主な操作の1つとして物体選択がある。物体選択手法には主に仮想手を用いて物体に接触することによる手法およびレイキャスト手法がある [1]。仮想手とは、VR 空間上に投影されたユーザが操作可能である物体 (例として、手、カーソル、コントローラまたはゲームオブジェクト) とする。接触による手法において、ユーザは、まず仮想手を物体に当てるまたは物体の内部に入れる。次に、物体を掴むように手を握る、コントローラのボタンを押す等の決定動作を行うことにより物体を選択することが可能である。レイキャスト手法とは、仮想手から放射される光線 (レイ) または円錐 (コーン) を操作し、決定動作を行うことにより物体を選択する手法である。レイキャスト手法は接触による手法と異なり、レイまたはコーンを用いることからユーザの手の届かない範囲の物体も選択することが可能である。一方で、レイキャスト手法はユーザの手のぶれによる選択性能への影響が大きく、小さい物体または密な物体配置に対して誤選択が増加するという課題がある。この課題に対して、これまで多数の手法が提案されてきた。しかし、これまでに提案されてきた課題解決のための手法は小さい物体または密な物体配置に対して高い精度にて選択できる一方で、大きい物体または疎な物体配置に対して通常のレイキャスト手法よりも選択時間が大きくなるという課題がある。

1.1 研究目的とアプローチ

本研究の目的は、ユーザが物体の大きさまたは物体の配置密度に影響されずに物体を選択することである。そこで、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。本研究における同期動作とは、周期的に移動する同期対象に合わせて、ユーザが視線、手または物を動かすことを指す [2]。提案手法は、仮想手を用いて物体に接触するものまたはレイキャスト手法とは異なり、同期動作を用いた物体選択手法である。提案手法において、VR 空間には選択対象となる物体に加えて、その物体に対応した、3次元方向に移動する、かつ同期動作の対象となる物体 (同期対象) が設けられる。各同期対象の動きは同期対象同士の動きが異なるように設けられる。提案手法において、ユーザは同期対象に対して手を用いて同期動作を行うことにより物体を選択する。今回、我々は提案手法を実装において、同期対象の移動に円移動を用いた。同期対象同士の移動におけるパラメータが異なるように設定することにより、ユーザは同様に円移動する同期対象を同期動作にて識別可能となる。提案手

法における同期動作の識別は運動の大きさに影響しないため、ユーザは、提案手法を用いることにより選択物体の大きさまたは配置密度に影響されない選択が可能になると考えられる。

1.2 貢献

本研究における貢献を以下に示す。

- 物体の大きさまたは配置密度に選択性能が影響されない物体選択手法
- 3次元同期動作を用いた物体選択手法の提案，実装および性能の評価結果

1.3 本論文の構成

最初に，1章では，本研究の背景，目的とアプローチおよび貢献を示した。2章では，本研究の関連研究として，VR空間における物体選択手法に関する研究，および同期動作に関する研究を述べ，本研究の位置づけを行う。3章では，提案手法である3次元同期動作を用いた物体選択手法およびその実装を述べる。4章では，提案手法の物体選択性能を評価する実験について実験設計および実験結果を述べる。この実験において，既存の物体選択手法と比較を行い，また物体の大きさおよび物体の配置密度による影響を調査した。5章では，4章にて述べた実験の結果に対する議論を述べる。6章では，提案手法における今後の展望を述べる。最後に，7章にて本研究の結論を述べる。

第2章 関連研究

我々は、VR空間上の物体を選択するために3次元同期動作を用いる。したがって、本章では、初めに、これまで調査されてきたVR空間における物体選択手法および同期動作について述べる。次にこれまでの調査に対する本研究の位置づけを述べる。

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には、主に仮想手を用いて物体に接触することによる手法またはレイキャスト手法がある [1]。本研究において、仮想手とは、VR空間上に投影されたユーザが操作可能である物体（例として、手、カーソル、コントローラまたはゲームオブジェクト）とする。VR空間に仮想手を投影する手法として、Microsoft社のKinect¹またはLeap Motion²のようなRGBカメラまたは赤外線カメラを用いるもの、グローブ状の装置内のセンサを用いるもの [3]、HTC社のVIVE³またはOculus⁴のVR向けコントローラを使用するものなどがある。また、指を用いて手を押す [4]、グローブ状の装置を用いる [3] またはVR向けコントローラを用いて物体選択を行うことは選択による触覚フィードバックが得られるという利点がある。

本節では、VR空間における主な物体選択手法である物体に接触することによる手法およびレイキャスト手法による物体選択について述べる。また、レイキャスト手法における課題および課題解決のための手法を述べる。

2.1.1 接触による物体選択

接触による手法において、ユーザは仮想手を物体に当てるまたは物体の内部に入れ、物体を掴むように手を握るまたはコントローラのボタンを押す等の決定動作を行うことにより物体が選択できる。Yanagiharaら [5] は、VR空間上の一般的な平面的に設計されたユーザインタフェースに対して、ユーザの腕または手は肩または肘を中心にして湾曲に動くことから、球面的な物体配置による接触を用いた物体選択への影響を調査した。実験の結果から、平面的な物体配置に対して、実験参加者の選択間の手の移動は湾曲していたと報告している。湾曲した物体配置に対して、ユーザごとの調整（ユーザの肩または肘から手までの距離にて物体

¹<https://azure.microsoft.com/ja-jp/services/kinect-dk>（最終閲覧日：2020年01月22日）

²<https://www.leapmotion.com>（最終閲覧日：2020年01月22日）

³<https://www.vive.com>（最終閲覧日：2020年01月22日）

⁴<https://www.oculus.com>（最終閲覧日：2020年01月22日）

を配置すること)を行うことにより, さらに選択性能が向上する可能性があるとしており, また, 実験参加者も「3次元的に配置されたことにより, 物体の位置把握がより容易であった。」とコメントしたと報告した. また, Yanagiharaら [6] は, VR空間における一般的な平面キーボードはユーザへの視野占有率が高いこと, およびレイキャスト手法による入力の困難さを課題に挙げており, キーレイアウトが3次元的な配置となり, かつユーザがキーに接触した軌跡をもとに予測された単語にて入力を行う単語ジェスチャタイピング手法を取り入れることにより課題解決を考えた. そのキーボードの実装として, 球面的に湾曲したキーボードを提案した. Portal-ble [7] は, スマートフォンの背面に装着した Leap Motion により手を認識し, スマートフォンの画面にて表示される拡張現実上の物体に触れること, 物体を掴むことまたは投げることのような操作を可能とするシステムである. スマートフォンを用いることにより, ユーザが手軽に移動してシステムを使用することが可能である. ユーザのスマートフォンに表示される物体との距離感覚または接触感覚が不十分であることが課題であったが, 距離および操作に対して視覚および聴覚的フィードバックを行うことにより操作性を向上させた. Wolfgang と Joris [8] は, CAD (Computer Aided Design) をもとに格子上の頂点をもとに立体を描画するような手法を提案した. この手法においてユーザは平面上の格子状に配置された頂点を結ぶように描画し, それぞれの頂点が好きな高さになるように押し出すことにより立体を描画することができる. この手法を用いることにより, 手のぶれまたはトラッキングの不備, ユーザの描画力による影響が小さくなるとされる.

2.1.2 レイキャスト手法による物体選択

レイキャスト手法とは, 仮想手から放射されたレイ [9] またはコーン [10] を物体当ててコントローラのボタンを押す等の決定動作を行うことにより選択する手法である. レイキャスト手法において単一直線のレイを使用する手法のみならず様々な手法が提案されており, Depth Ray または Lock Ray [11], または RayCursor [12] は, 通常のレイキャスト手法のレイ上にユーザが手動で動かすカーソルを追加して両方を操作することにより物体を選択する手法である. iSith [13] では2つの仮想手から放射されたレイの交点から計算された奥行に存在する物体が選択される. Flexible Pointing [14] において, ユーザはレイを曲げることにより意図した物体を選択できる. レイキャスト手法は接触することによる手法と異なり, レイまたはコーンを用いることからユーザの手の届かない範囲の物体も選択することが可能である. 一方で, 接触することによる手法よりも手のぶれによる選択性能への影響が大きく, 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 [15].

課題解決のための手法

手のぶれによる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. 一定の選択領域を持つ太いレイまたは広い頂角をもつコーンを用いた選択は, 選択領域が大きくなり手のぶれによる選択性能への影響が小さくなる一方で, 複数の物体が領域に含まれやすく, また, 含まれた場合に自分の意図した物体のみを選択することが困難である. SQUAD [16] は,

象限メニューへの物体の再配置を用いて選択する手法である。SQUADにおいて、初めにユーザは一定の選択域をもつレイを選択したい物体が含まれるように照射すると、選択領域内に含まれる物体は全て象限メニューに再配置される。ユーザがメニューに対して選択したい物体が存在するメニュー領域を再度選択することにより、選択されたメニュー領域内に存在する物体全てが再度象限メニューに配置される。ユーザは選択したい物体が唯一選択できるまでメニュー領域を選択し、物体の数を絞り込むことにより、物体が選択できる。通常のレイキャスト手法と比較して、ユーザはSQUAD手法を用いることにより、選択時間は遅くなる一方で手のぶれを気にすることなく高い精度にて選択が可能である。またBacimら[17]は、SQUADに対して選択領域への視覚的拡大手法または視点切り替え手法を用いる改良することにより、より精度が高くかつ入力しやすいZoomを提案した。Expand[18]はSQUADにおける象限メニューへの再配置が元の物体同士の位置関係によらない、または物体の密度が高くなった場合に選択時間が指数関数的に増加するという課題を解決するための手法である。Expandは、一定の選択領域をもつレイのに含まれる全ての物体を画面全体に拡散するようにまた格子状になるように再配置し、ユーザは再配置された物体から選択したい物体を選択する。この再配置は物体の位置関係を基に行われるため、ユーザは元の位置関係を基に物体を選択することができる。また、Expand手法は選択領域を絞り込むものではなく、1回の再配置された状況にて物体を選択するため、選択操作回数は高々2回である。Flower Ray[11]は、レイキャスト手法にて選択領域に含まれる物体を2Dパイメニューに再配置し、メニューに対してレイキャスト手法を用いて物体を選択する手法である。距離が近いために誤選択し得る物体同士が2Dパイメニューにて広がることにより、選択が容易になることが考えられた一方で、パイメニューに再配置することにより元々の物体位置関係がなくなり、ユーザの再度物体を探す手間が増えることを懸念していた。実験の結果、パイメニューにて物体を再度選択することはユーザにとって手間がかかることが確認された。一方で、選択性能は通常のレイキャスト手法よりも向上し、また入力（コントローラ）の移動相距離が短く疲労度が少ないことから、よりユーザに好まれる手法であると考察した。Schmidtら[19]は、コーン内に含まれる複数の物体を確率に基づいて選択する手法を提案した。コーン内に含まれる物体の体積またはコーン中心からの物体への距離等を考慮することにより物体を絞りこむ手法である。IntenSelectは[20]は、コントローラからの距離、コーン中心からの物体への距離またはコーン内含まれていた時間等の選択行動に基づいたスコアリングを用いて物体を選択する手法である。Delamareら[21]は、スマートフォンを用いた物体選択P2ROLLおよびP2SLIDEを提案した。Delamareらの提案手法において、ユーザは一定領域をもつコーンを選択したい物体が領域に含まれるように照射し、その時点で一度コーンを固定する。P2ROLLは、選択領域に含まれる物体群から手首の捻り度合いによって物体を選択する手法であり、P2SLIDEは、同様の物体群から複数領域に分けられたスマートフォン画面にてスライドジェスチャすることにより物体を選択する手法である。選択領域内の物体をリストメニューにて選択する従来手法と比較した性能評価実験の結果から、P2ROLLおよびP2SLIDEが従来手法よりも選択性能が高く、またユーザに好まれる手法であったと報告した。

また、手のぶれによる誤選択を減少させる手法として、レイに最も近い物体を自動的に選

択するような手法も提案されている。Guillon ら [22] は選択できる物体をハイライトすることにより視覚的フィードフォワードを行い自動選択を容易にしている。Vanacken ら [23] は、2次元空間上にて使用されていた Bubble Cursor [24] を VR 空間に半透明球を用いて適応した 3DBubble を提案している。Gullion ら [22] は、2次元空間に対する自動選択において、ハイライトおよび Bubble Cursor を含む 6 手法の視覚的フィードフォワードの性能比較調査を行っており、この調査に対して、Baloup ら [12] は 3次元空間に対する視覚的フィードフォワードの性能比較調査を行った。両調査ともに単純に物体をハイライトすることが視覚的フィードフォワードとして最も優れた手法だと報告した。

これまでの物体選択手法の SQUAD または Flower Ray 等は、物体を選択するために複数回の操作が必要である。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が、複数回の操作はユーザにとって手間である。また、大きい物体または疎な物体配置に対しても複数回の操作が必要であるため、選択時間が通常の実手法よりも長くなるという課題がある。

2.2 同期動作

円滑性眼球運動 [25] (人間は $20^\circ/s$ までの速度にて動く物体を視線を用いて円滑に追跡することが可能であるということ) に基づき、Vidal ら [2] は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同期動作を提案しており、また同期動作を用いたコンピュータの操作手法 Pursuits を提案した。注視を用いたコンピュータの操作と異なる Pursuits の利点として、目の相対的な動きを用いることおよび識別アルゴリズムにピアソン相関係数を用いることから、一定時間中に頭部または視線を固定する必要がないことおよびキャリブレーションの必要無しに使用できることを挙げている。

Vidal らの同期動作および Pursuits を基に多数の同期動作に関する調査が行われてきた。本節にて、Pursuits のように視線を用いた同期動作ならびに手を用いた同期動作に関する研究を述べる。

視線を用いた同期動作 Esteves ら [26] は円移動するターゲットに対して視線による同期動作 Orbits を提案した。ターゲット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り、最大 16 個のターゲットについて Orbits の性能調査を行った。ターゲットを表示せずに日常の動作を想定したタスク (文字を読む、映像を見るまたはゲームをすること) を行った場合において、同期動作の発生は 1% 未満であったと報告した。AmbiGaze [27] では、通常のディスプレイのみならず音楽スピーカーに投影した物体または風車の物体の羽根の動きに対する同期動作が用いられた。また、部屋中の様々な位置にある物体に対して同期動作を用いられることから、同期動作を用いている物体の識別およびその物体に対しての動作の識別が行われた。SmoothMoves [28] は頭部に装着した IMU (Inertial Measurement Unit) センサにより取得した頭部の動きを用いた同期動作である。視線を用いた同期動作との性能比較実験を行った結果から、視線よりも

頭部を用いた同期動作の方がより高い性能をもつことが分かったと報告されている。一方で、同期動作に用いる部位を指示しない場合において、実験参加者は視線を頻繁に用いたため、視線を用いた同期動作がより好まれるとも報告されている。Dhuliawala ら [29] は EOG (Electro Oculo Graphy) センサの搭載された眼鏡型機器を用いて視線および頭部の動きを取得することにより、視線または頭部の動きによる同期動作を可能としており、また両方の動きを組み合わせた同期動作も可能とした。Delamare ら [30] は、ユーザにとって視線移動ジェスチャの理解および入力容易になるシステム Gaze Gesture Guiding system (G3) を提案した。従来手法は、中心点（注視点）から複数の経路が広がり、経路の終端に表示されたコマンドラベルに合わせて、視線にて経路をなぞる手法であった。この手法に対して、Delamare らの手法では、一度終端に表示がされたコマンドラベルが再度中心点に戻り、経路に沿ってラベルが動く。Delamare らの手法において、ユーザは、ラベルを注視点にて確認できるため、コマンドを識別するために終端に視線を移すことがなく、また、コマンドが経路に沿って動くため、円滑性追跡運動にて精度高く経路をなぞることが可能である。また、Delamare らは経路の表示方法（移動するターゲットに対してどの程度経路表示を補助するか）、経路の複雑さ（簡潔または複雑）または経路の形状（直線的または曲線的）による性能への影響も調査した。

手を用いた同期動作 Clarke ら [31, 32] は、Web カメラを用いて手の位置座標を取得し、手を用いた同期動作を可能とした。Clarke らは、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（2 つの移動方向および 4 つの位相）の同期動作の識別性能を調査した。Web カメラで取得した画像中の FAST 特徴量を基に同期動作を識別するため、一方の手のみならず、反対の手、頭部、物をもった状態の手を用いた同期動作の識別を可能にしており、各部位を用いた同期動作の性能評価も調査した。さらに、同期動作を行う人を識別することによる複数人操作、身体部位を識別することによる両手の同時動作または手と頭部を組み合わせた操作、または複数の物体に操作を割り当てることなどを提案した。PathSync [33] には、円形に移動する物体だけでなく、四角形、ひし形または不定形に移動する物体に対する手を用いた同期動作が可能である。円形に移動する物体に用いる識別処理とは異なる処理を行うこと、またはユーザの動作を主成分分析することにより、円形以外の経路にて移動するターゲットに対する同期動作にも適応した。また、2 段階の識別（選択開始および選択決定）を用いることにより、より高い精度にて同期動作を実装している。WaveTrace [34] では、スマートウォッチの IMU センサを用いて手の位置を取得することにより同期動作を可能としており、最大 16 個（2 つの移動方向および 8 つの位相）の物体に対する同期動作の識別性能が調査された。画像またはスマートウォッチを用いるものは、ユーザおよびユーザの手を識別することにより、多人数による同一ディスプレイへの操作を可能とする。SelfSync [35] は自分の 1 つの動作（例として頭部の上下運動）に合わせて、もう 1 つ別の動作（例として手首の捻り運動）を行う同期動作である。頭部のスマートグラス、手首のスマートウォッチおよびボトムスのポケットに入れたスマートフォンにてそれぞれ頭部、手首および脚部の運動を取得した。SelfSync は、外部から同期動作対象が提示される手法と異なり、動作を行う度に同期動作およびその周期をユーザが設定でき

る点に利点がある。FingOrbits [36] は、各指の関節間に定義されたスライドジェスチャを識別することによりジェスチャに割り当てられたコンピュータ操作を行うことができる手法である。片手の親指以外の指を行列に見立て（行：指，列：関節間），3つの関節間に対して異なる周期を定義する。ユーザは各指の各関節間に定義された周期に合わせて同期動作となるスライドジェスチャを行うことによりコンピュータを操作できる。FingOrbits は親指以外の4指の3関節間を用いることにより4指×3周期＝計12個のジェスチャを識別している。

2.3 本研究の位置づけ

提案手法は仮想手を用いた接触による物体選択手法またはレイキャスト手法とは異なり，ユーザの同期動作を用いた物体選択である。また，提案手法は手の運動の大きさに影響されずに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と考えられる。Orbits または TraceMatch のように，同期動作を用いることにより複数の同様の動作を識別することが可能である。一方で同期動作の識別は，これまで2次元方向の同期動作のみが調査されてきた。本研究では3次元方向に拡張した同期動作を用いて VR 空間上の物体選択を行う。

第3章 提案手法

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。我々は、VR空間上の選択対象となるそれぞれの物体（選択対象）に対して、3次元方向に動きかつ同期動作の対象となる物体（同期対象）を1つずつ設ける。同期対象は、同期対象同士の移動が異なるように設けられる。ユーザは、選択対象に対応する同期対象に対して同期動作を行う（すなわち、同期対象の動きと同様の動きを行う）。システムがユーザの同期動作に対して各同期対象の異なる動きを識別することにより、物体が選択できる。

提案手法は接触による物体選択手法またはレイキャスト手法と異なり、同期動作を用いた物体選択である。提案手法に用いる同期動作の識別アルゴリズムはユーザの手と各同期対象の移動の大きさに影響せず、またそれぞれの位置に影響しない。したがって、同期動作の識別はユーザの手の運動の大きさに影響されず、また、ユーザは物体の大きさまたは配置密度の影響を受けずに物体を選択できる可能性がある。

本章にて、実装した提案手法を用いた選択操作を述べた後、同期対象のパラメータおよび同期対象の識別アルゴリズムを述べる。

3.1 選択操作

提案手法を用いて物体を選択する例を図3.1に示す。我々は、提案手法の実装にあたり、全同期対象の移動には円移動を用いた。VR空間には選択対象となる物体（図3.1の青立方体）

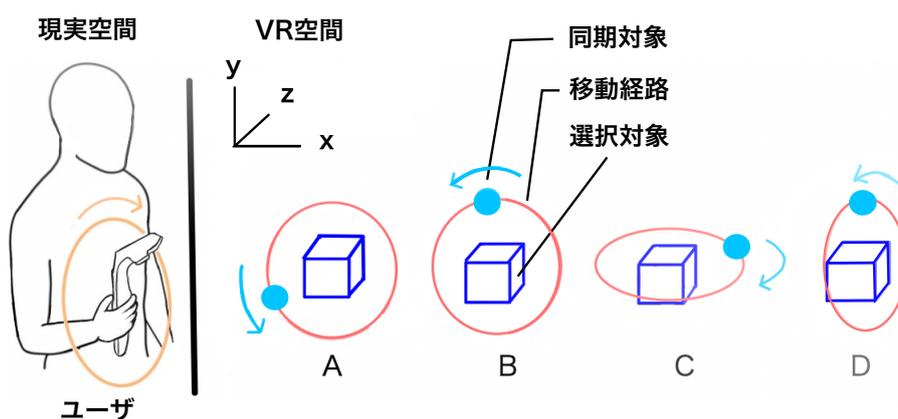


図 3.1: 提案手法を用いた物体選択。

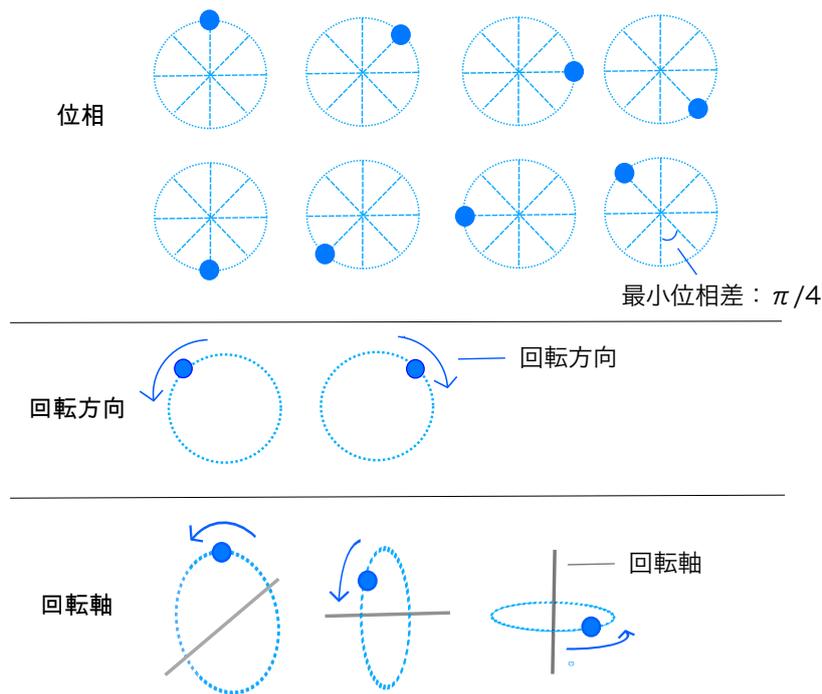


図 3.2: 提案手法における同期対象のパラメータ（位相，回転方向，回転軸）。

に加えて，各選択対象に対応する同期対象（図 3.1 の水色球）の 1 つずつが物体の周囲を円移動する．ユーザは選択したい選択対象に対応する同期対象に対して手を用いて同期動作を行う（図 3.1）．同期動作が識別されると，識別された同期対象に対応した物体が選択される．

3.2 パラメータ設定

我々は，同期対象のパラメータとして，8 種類の位相（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（グローバル座標系の x ， y および z 軸）を用いた（図 3.2）．各同期対象同士のパラメータの組み合わせが異なるようにパラメータを設定することにより，8 位相 \times 2 方向 \times 3 軸 = 48 パターンの同期対象を生成することが可能であり，また，ユーザは，同様に円移動する同期対象を提案手法を用いて識別が可能となると考えられる．

図 3.1 において，各同期対象は A：順 z 軸回転，B：逆 z 軸回転，C：逆 y 軸回転，D：順 x 軸回転である．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り，A と C において，回転方向および回転軸が異なり，また，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ため，提案手法を用いて A-D を識別することが可能である．

3.3 同期対象識別

提案手法における，システムがユーザの同期動作により同期対象を識別するアルゴリズムを示す．提案手法において，識別される同期対象は，各同期対象のうち，ユーザの手 H の動きと各同期対象 T_i ($i = 1, 2, \dots, n$: n は選択対象の総数) の動きの類似度 $sim(i)$ が閾値 th_{sim} を超え，かつ最大となる同期対象である．すなわち，

$$\arg \max_i sim(i) > th_{sim} \quad (3.1)$$

となるような i 番目の同期対象が識別される．なお，式 3.1 にて全同期対象の類似度が閾値を超えないときは，同期動作が行われていないとして，どの同期対象も識別されない．

ユーザの手の動きと各同期対象の動きの類似度 $sim(i)$ を考えるとき， x ， y および z 軸ごとの相関値 $corr_x(i)$ ， $corr_y(i)$ および $corr_z(i)$ のうち最高の値 1 つとすると，1 軸方向のみの動き（左右，上下，前後）を同期動作として識別してしまう．また，最小の値 1 つとすることにより，他 2 軸方向の動きの類似性が保証される．したがって， $sim(i)$ は $corr_x(i)$ ， $corr_y(i)$ および $corr_z(i)$ のうち最小の値 1 つとする．すなわち，

$$sim(i) = \min(corr_x(i), corr_y(i), corr_z(i)) \quad (3.2)$$

である．

各軸の相関値 $corr(i)$ はピアソンの積率相関係数を用いて，以下の式にて測定される．

$$corr_x(i) = \frac{E[(H_x - \overline{H_x})(T_{i,x} - \overline{T_{i,x}})]}{\sigma_{H_x} \sigma_{T_{i,x}}} \quad (3.3)$$

式 3.3 は T_i における x 軸の相関値を示しており， y 軸の相関値 ($corr_y(i)$) および z 軸の相関値 ($corr_z(i)$) についても同様に測定される．また各軸の相関値は $-1 \leq corr(i) \leq 1$ である．式 3.3 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 H の x 軸における位置座標とその平均および標準偏差を表しており，同期対象 T についても同様である．また， $T_{i,x}$ は T_i における x 座標を表す．

提案手法における識別アルゴリズムは，位置座標取得頻度（ウィンドウサイズ） f 回/s にて取得された位置座標時系列 w 個を用いて処理される．すなわち， $\frac{w}{f}$ s 分のユーザの手および各同期対象の動きの類似度により同期対象が識別され，また同期対象同士の $\frac{w}{f}$ s 中の移動軌跡が異なっている場合において提案手法を用いて物体選択が可能となる．

第4章 実験

我々は提案手法の選択性能を評価する実験を行った。提案手法 (*SM*: *Synchronous Motion*) の性能を比較する対象として、既存の物体選択手法であるレイキャスト手法 (*RC*: *Raycasting*) を用いた。*RC* は、参加者がコントローラから放たれたレイを物体に当たった後、コントローラのトリガを押下する (決定動作をする) ことにより物体を選択できる手法である。また、本実験にて、提案手法における物体の大きさまたは物体の配置密度による選択への影響を検証した。

本章において、実験設計である実験環境、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

実験において、VR システムには HTC 社の VIVE の HMD (解像度: 1080×1200 px (片目), 視野角: 110° , リフレッシュレート: 90 Hz および自由度: 6DoF), 付属の片手持持可能なコントローラ (図 4.1A), ならびに、HMD およびコントローラの位置座標を検出するためのベースステーションを使用した (図 4.5)。コントローラの表面にはタッチパッドがあり、また背面にはトリガがある。HMD を用いて参加者の位置座標を取得し、コントローラを用いて参加者の手の位置および動きを取得した。実験アプリケーションは Windows PC (OS: Windows 10, GPU: NVIDIA GeForce GTX 1060, CPU: Intel Core i7-7700HQ, メモリ: 16 GB), Unity 2018.3.11f1 および SteamVR 1.2.2 を使用して実装された。

実験中の VR 空間における物体の配置および色を図 4.2, 図 4.3 および図 4.4 に示す。*SM* および *RC* に共通して、選択対象は、VR 空間にて、参加者の正面方向 2 m 奥を中心とした直径 1 m の球の内部座標となるようにランダムに配置された (図 4.2)。選択対象はすべて青色の立方体であり、各選択にてタスクの対象となる物体 (選択課題) は黄色に表示された (図 4.3A, 図 4.4B)。参加者が選択課題以外の選択対象を選択した場合、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化した (図 4.4B)。また参加者が正しく物体を選択するとコントローラは 10 ms 振動し、誤選択をすると 200 ms 振動した。

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、各同期対象は水色の球にて表示され、また、各同期対象の移動経路は赤色にて常に表示された (図 4.4)。 *RC* において、レイが照射された選択対象は他の物体よりも明るく表示された (図 4.3B)。参加者がどの物体にもレイを当てず決定動作を行った場合、その選択を誤選択とした。

実験において、同期対象が選択対象の周囲を回転する速度は 2 s/周 とした。同期対象およ

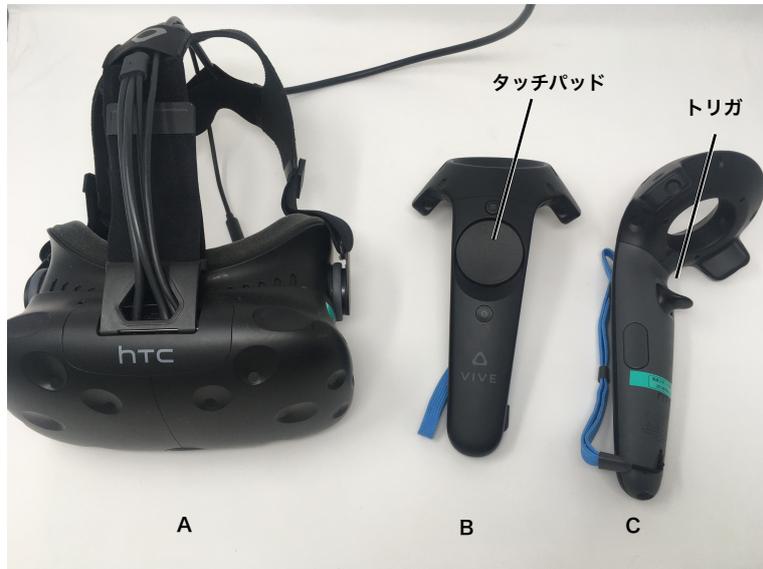


図 4.1: 実験に用いた:TC 社の VIVE (A : HMD, B : コントローラの表面, および C : コントローラの側面).

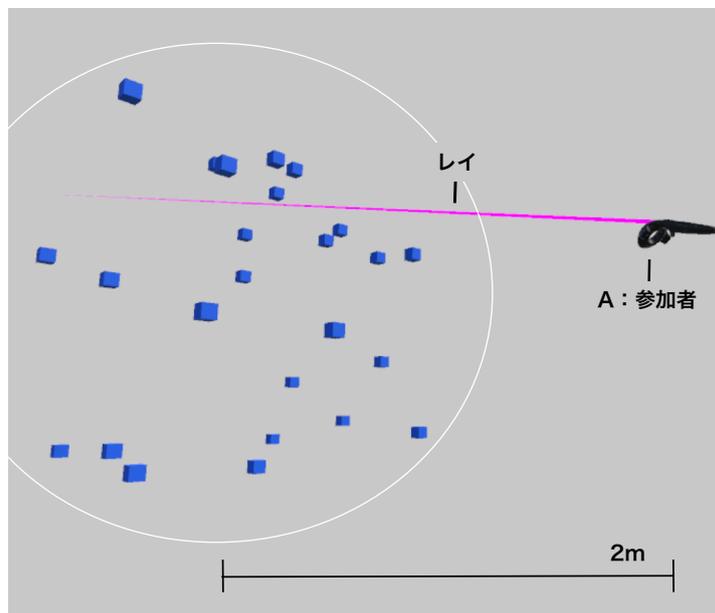


図 4.2: 参加者の外から見た VR 空間における物体配置. 参加者の正面奥に選択対象が配置される.

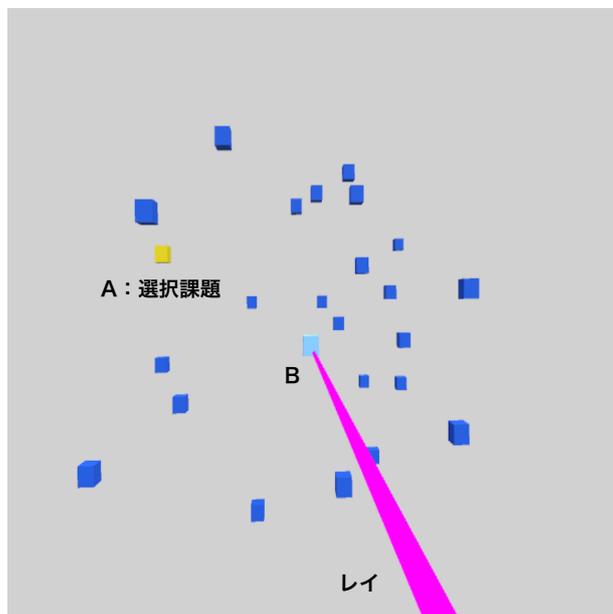


図 4.3: RC を用いた場合の参加者から見た物体配置.

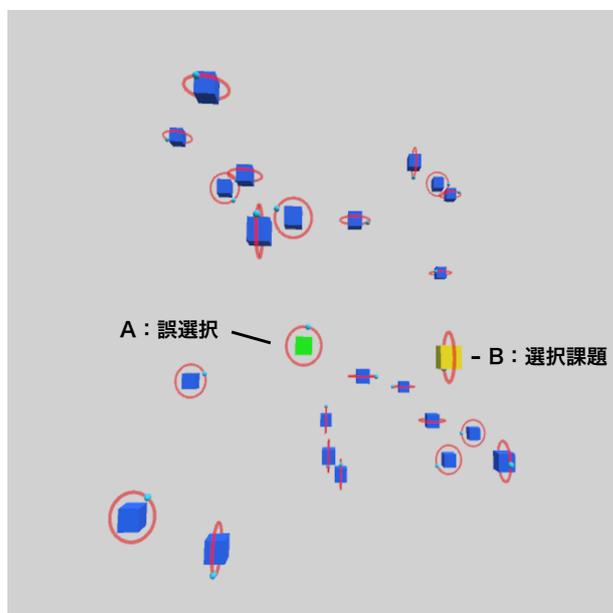


図 4.4: SM を用いた場合の参加者から見た物体配置.



図 4.5: 実験を行う参加者.

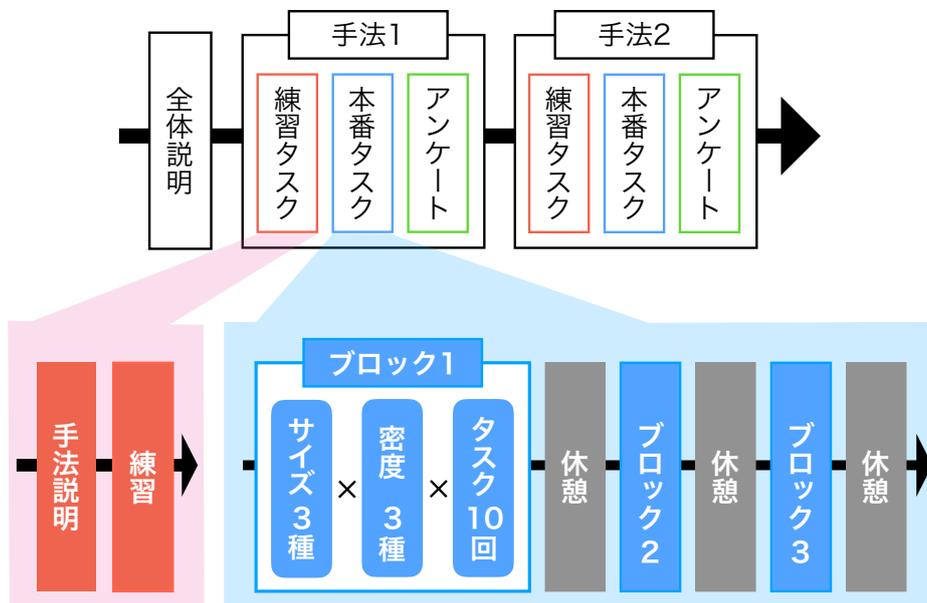


図 4.6: 実験の手順を示すワークフロー.

びコントローラの位置座標を取得する頻度は $f = 60$ 回/s とし、同期動作の識別に使用するウィンドウサイズは $w = 100$ 個とした。したがって、提案手法において $\frac{w}{f} = 1.67$ s 分の手および同期対象の移動軌跡を用いて識別が行われた。実装した識別アルゴリズムにおける閾値は $th_{sim} = 0.85$ とした。

4.2 実験参加者

実験参加者は、研究室内の大学生および大学院生 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、5 人 (P_1 – P_4 および P_6) が裸眼にて、1 人 (P_5) が眼鏡を着用して実験を行った。また 5 人 (P_1 – P_5) が右利きであり、1 人 (P_6) が左利きであった。5 人 (P_1, P_2 および P_4 – P_6) が VR システムの使用経験があり、うち 2 人 (P_5 および P_6) が日常的に使用していた。実験中、参加者は立位状態にて 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物体選択を行った (図 4.5)。

4.3 タスク

実験において、1 タスクは 10 個の選択課題を正しく選択することとした。参加者は、各選択を素早くかつ正確に行うように指示された。また手法ごとの物体サイズおよび物体配置密度の影響を調査するために、3 つの物体サイズ ($S_{Big} = 10$ cm, $S_{Mid} = 6$ cm および $S_{Small} = 3$ cm) および 3 つの配置密度 ($D_{High} = 40$ 個, $D_{Mid} = 25$ 個 および $D_{Low} = 15$ 個) の組み合わせからなる $3 \times 3 = 9$ 条件を用いて参加者にタスクを行わせた。

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った。実験の手順を図 4.6 に示す。参加者は、実験の初めに実験全体の説明として、実験予定時間、実験手順および使用する VR システム (VIVE) の操作の説明を受けた後、各手法ごとに、練習タスク、本番タスクおよびアンケートの順にて実験を行った。練習タスクにおいて、参加者は手法の操作説明を受けた後、物体選択の練習を最大 3 分間行った。本番タスクにおいて、参加者は 1 ブロックとして上記の 9 条件分のタスクを行い、その後に最低 1 分間の休憩をした。各タスクにおいて、参加者が誤選択を連続して 10 回行くと次の選択課題へ移った。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、手法の作業負担度を測定する NASA Task Load Index (NASA-TLX) [37] および手法の使いやすさを測定する System Usability Scale (SUS) [38] を用いたアンケートの記入を指示された。参加者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。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。

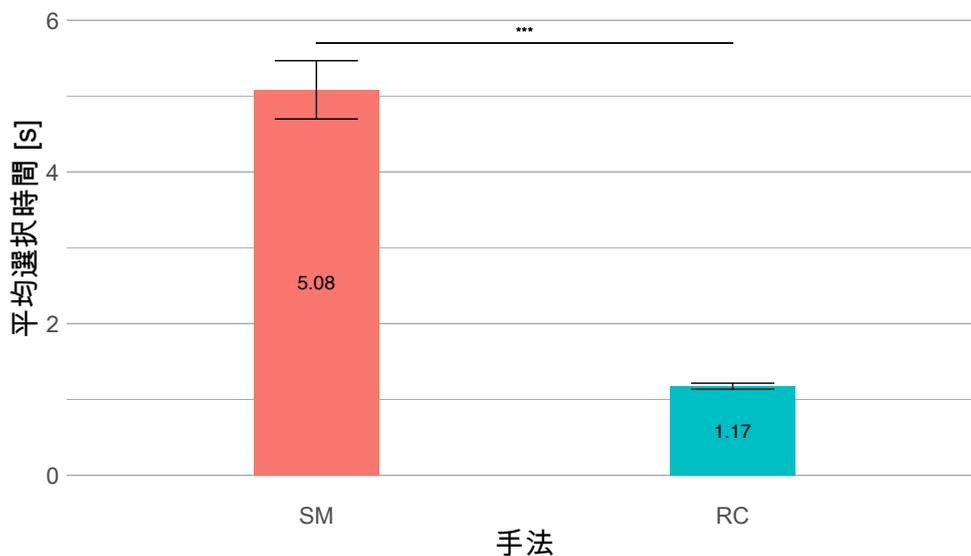


図 4.7: 各手法ごとの平均選択時間。エラーバーは 95%信頼区間である。

4.4 結果

実験において評価する選択性能は、選択時間、精度およびユーザビリティである。また、選択時間および精度について、物体の大きさおよび配置密度による影響を分析する。

4.4.1 選択時間

実験において選択時間は 2 つの正しい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 4.7 (手法間)、図 4.8 (各手法における参加者間)、図 4.9 (各手法における各物体サイズ間) および図 4.10 (各手法における各密度間) 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反復測定三元配置分散分析を行った。分析の結果から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 ($p < 0.01$)。なお各手法ごとの選択時間は SM: 5.09s, RC: 1.17s であった。また、参加者ごとの選択時間は SM について、 P_1 : 6.22s, P_2 : 4.06s, P_3 : 6.18s, P_4 : 4.69s, P_5 : 6.10s および P_6 : 3.25s であり、RC について、 P_1 : 1.05s, P_2 : 1.20s, P_3 : 1.19s, P_4 : 1.26s, P_5 : 1.19s および P_6 : 1.13s であった。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 ($p > 0.1$)。一方で手法 × 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、各手法における各物体サイズ間について有意差は検出されなかった。なお各手法の各物体サイズにおける選択時間は、SM

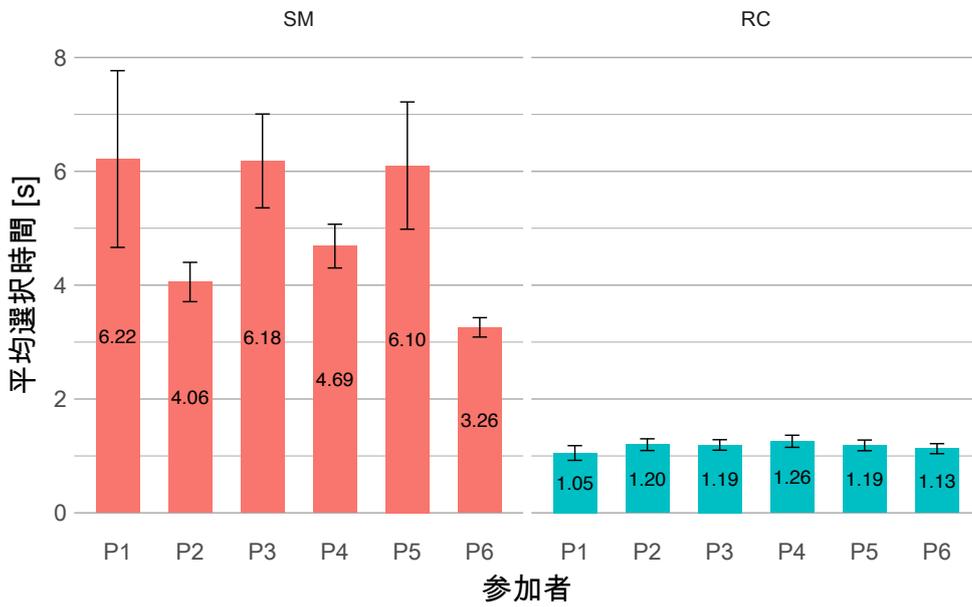


図 4.8: 各手法における各参加者ごとの平均選択時間。エラーバーは 95%信頼区間である。

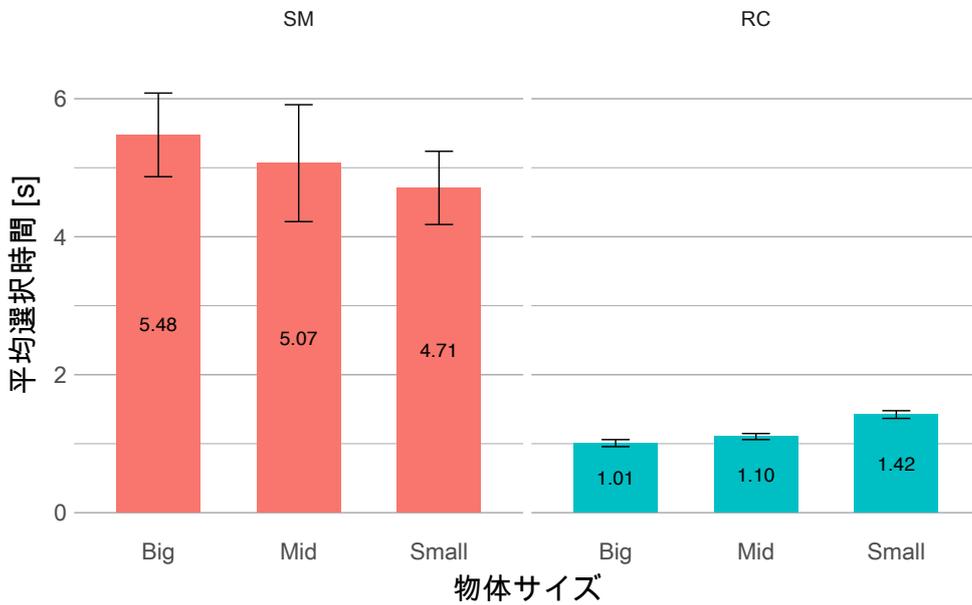


図 4.9: 各手法における各物体サイズごとの平均選択時間。エラーバーは 95%信頼区間である。

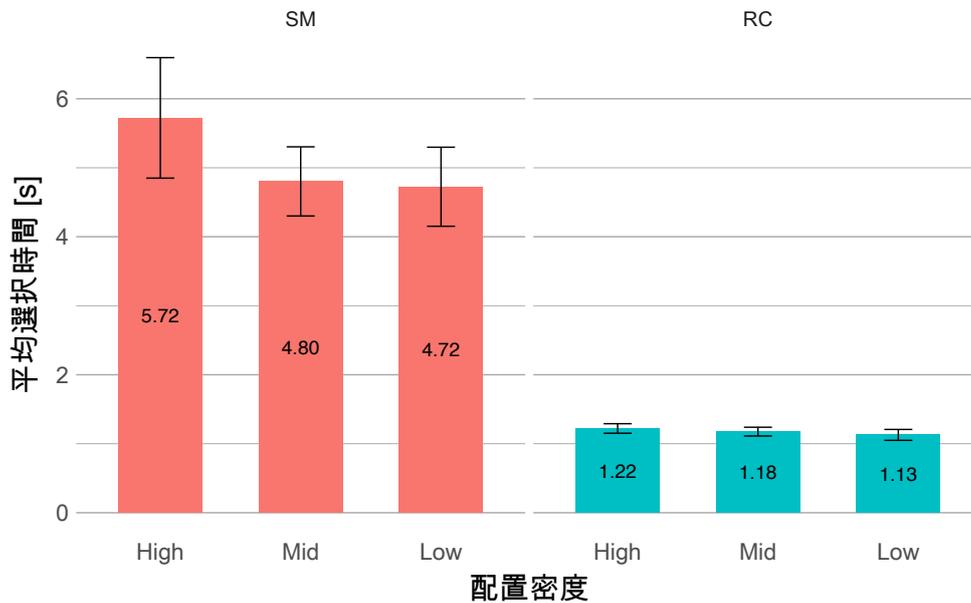


図 4.10: 各手法における各配置密度ごとの平均選択時間。エラーバーは 95%信頼区間である。

について, S_{Big} : 5.48 s, S_{Mid} : 5.01 s および S_{Small} : 4.73 s であり, RC について, S_{Big} : 1.01 s, S_{Mid} : 1.10 s および S_{Small} : 1.42 s であった。密度および 手法 × 密度 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, 各手法における各配置密度について有意差は検出されなかった。なお各手法の各配置密度における選択時間は SM について, D_{High} : 5.72 s, D_{Mid} : 4.83 s および D_{Low} : 4.72 s であり, RC について, D_{High} : 1.22 s, D_{Mid} : 1.17 s および D_{Low} : 1.12 s であった。

4.4.2 精度

実験において精度は $\frac{\text{正しい選択数}}{\text{全選択試行数}}$ である。精度に関する結果を図 4.11 (手法間), 図 4.12 (各手法における参加者間), 図 4.13 (各手法における各物体サイズ間) および図 4.14 (各手法における各密度間) 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反復測定三元配置分散分析を行った。分析の結果から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% であった。また参加者ごとの精度は SM について, P_1 : 64.3%, P_2 : 78.0%, P_3 : 62.4%, P_4 : 70.3%, P_5 : 65.5% および P_6 : 87.0% であり, RC について, P_1 : 96.0%, P_2 : 88.6%, P_3 : 80.8%, P_4 : 92.1%, P_5 : 93.5% および P_6 : 94.5% であった。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} , S_{Small} 間に有意差が検出され, S_{Big} は S_{Small} よりも精度が低いことがわかった ($p < 0.01$)。

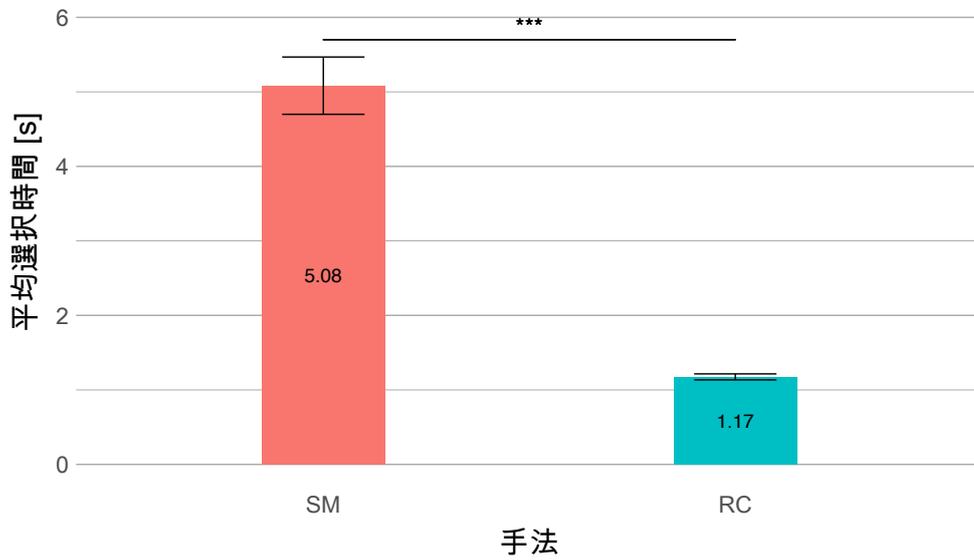


図 4.11: 各手法ごとの平均精度. エラーバーは 95%信頼区間である.

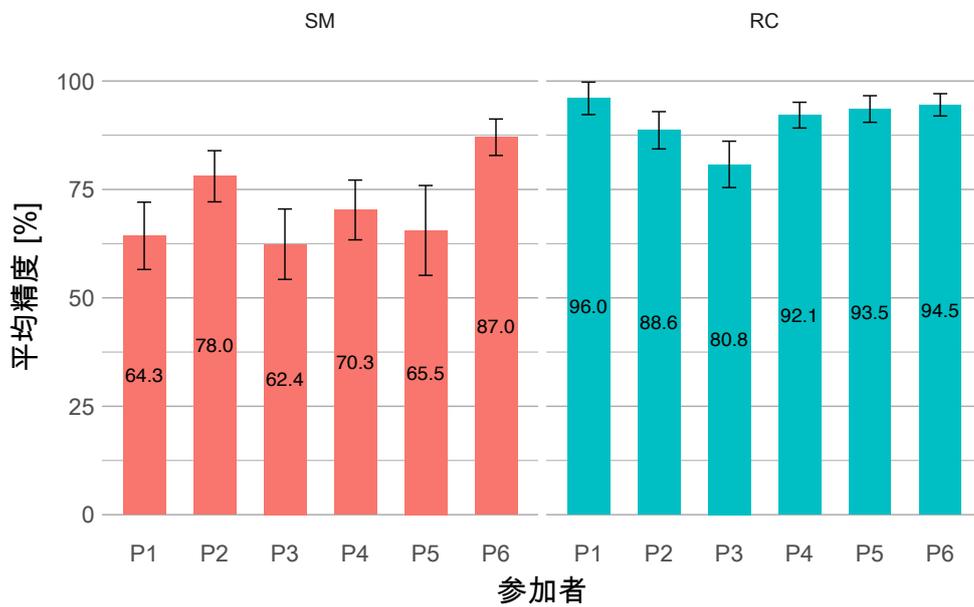


図 4.12: 各手法における各参加者ごとの平均精度. エラーバーは 95%信頼区間である.

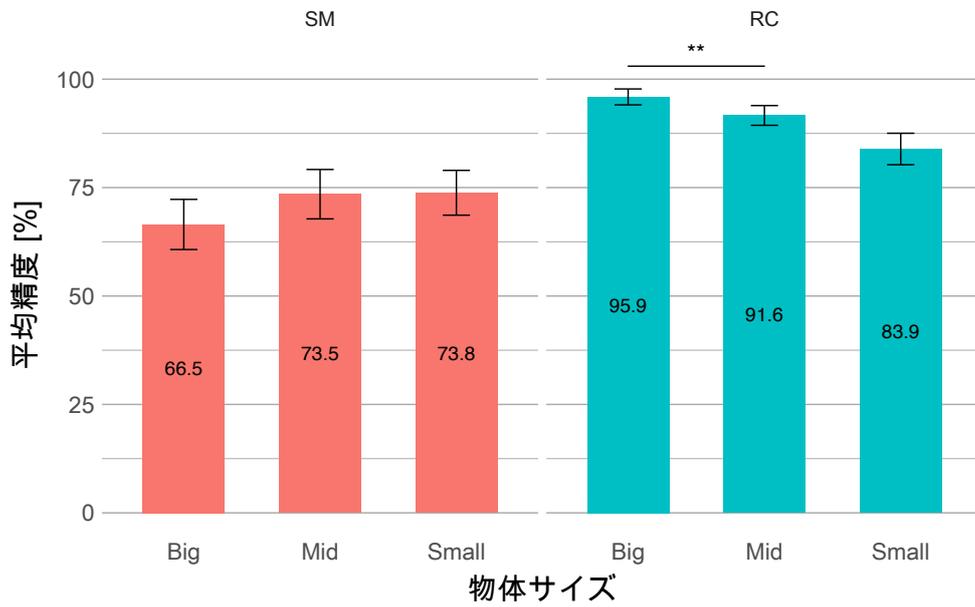


図 4.13: 各手法における各物体サイズごとの平均精度. エラーバーは 95%信頼区間である.

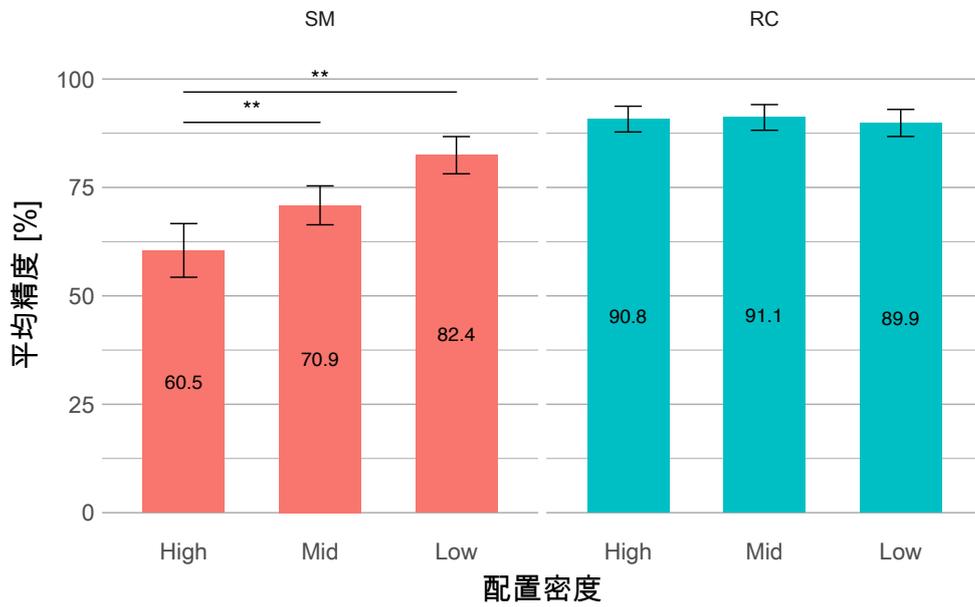


図 4.14: 各手法における各配置密度ごとの平均精度. エラーバーは 95%信頼区間である.

表 4.1: RC における各物体サイズまたは各密度ごとの選択課題への平均照射回数.

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

なお各手法の各物体サイズにおける精度は SM について, S_{Big} : 66.5%, S_{Mid} : 73.5% および S_{Small} : 73.6% であり, RC について, S_{Big} : 95.9%, S_{Mid} : 91.6% および S_{Small} : 83.9% であった. 密度および手法 \times 密度の有意な交互作用が検出された ($p < 0.05$). 一対比較を行ったところ, SM において D_{High} , D_{Mid} 間および D_{High} , D_{Low} 間に有意差が検出され, D_{High} は D_{Mid} および D_{Low} よりも精度が低いことがわかった ($p < 0.01$). なお各手法の各配置密度における精度は SM について, D_{High} : 60.5%, D_{Mid} : 70.6% および D_{Low} : 82.4% であり, RC について, D_{High} : 90.8%, D_{Mid} : 91.1% および D_{Low} : 89.9% であった.

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 4.1 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} , D_{Mid} 間および D_{High} , D_{Low} 間に有意差が検出され, D_{High} は D_{Mid} および D_{Low} よりも回数が多いことがわかった.

4.4.3 ユーザビリティ

NASA-TLX の結果を図 4.15 に示す. NASA-TLX は全 6 項目 (MD: 精神的要求, PD: 身体的要求, TD: 時間的圧迫感, OP: 作業達成度, EF: 努力, FR: 不満) および重み付けによる平均値 (WWL) について, スコアが低いほど精神的作業負担が少ない手法であることを表す. 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 よりも精神的作業負担が少ない手法であることがわかった ($p < 0.01$). なお, NASA-TLX のスコアは, SM について, MD: 68.7, PD: 59.5, TD: 36.0, OP: 47.3, EF: 57.8, FR: 44.0 および WWL: 57.1 であり, RC について, MD: 35.8, PD: 32.0, TD: 12.5, OP: 47.8, EF: 28.2, FR: 8.6 および WWL: 32.9 であった.

SUS の結果を図 4.16 に示す. SUS はスコアが高いほど使いやすい手法であることを表す. 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 ($p > 0.05$). SUS のスコアは SM : 69.2 および RC : 67.5 であった. なお, 一般的な SUS のスコアは 68 [39] であり, SM は一般的なシステムよりも使いやすいシステムの可能性が考えられる.

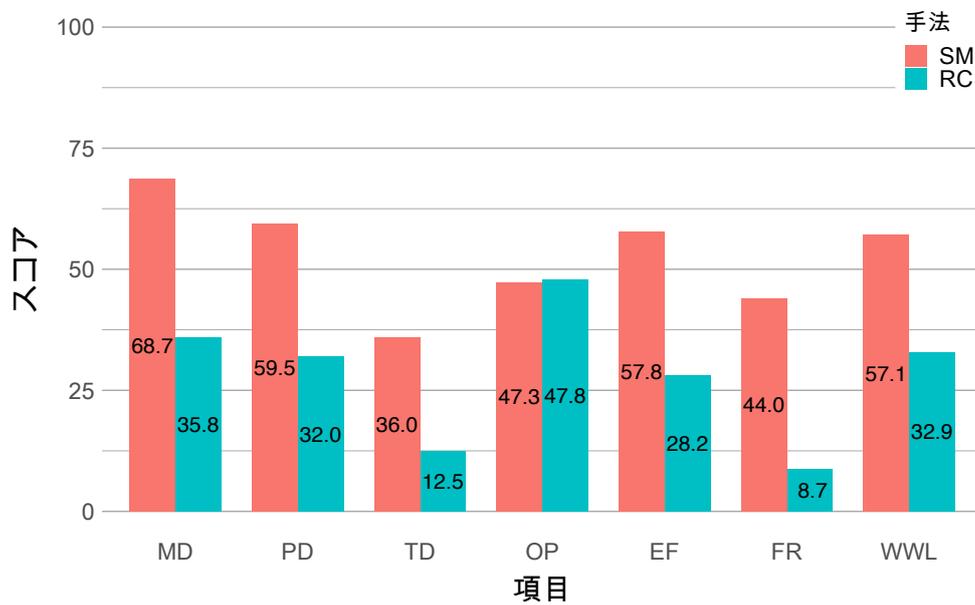


図 4.15: NASA-TLX における各項目ごとの平均スコア。

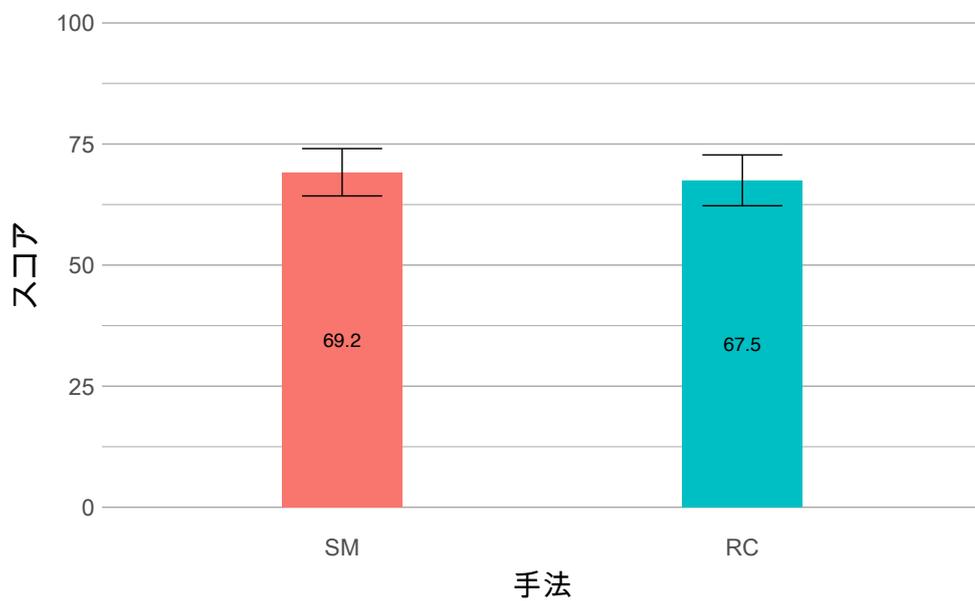


図 4.16: SUS における各手法ごとの平均スコア。エラーバーは 95%信頼区間である。

第5章 議論

実験の結果から，提案手法は既存手法よりも選択性能が低いことがわかった．提案手法において，誤選択は同軸回転しかつ選択課題の同期対象に対して位相差が最小位相 ($\frac{\pi}{4}$) である物体の同期対象に対して多発した．また，参加者が連続して誤選択したとき，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，参加者は選択課題に合わせて位相差を修正することが困難であったと考えられる．一方で，回転方向または回転軸が異なる同期対象に対しては識別精度が高い．これは，参加者が同期対象の回転方向および回転軸を正しく認識でき，かつ識別システムも参加者の手の回転方向および回転軸を正しく認識できたためだと考えられる．

次に物体の大きさ，物体の配置による選択性能へ影響について議論し，選択対象の形状および同期対象の移動の形状について議論する．

5.1 物体の大きさによる選択性能への影響

提案手法の識別アルゴリズムから，提案手法の物体選択には物体の大きさが影響しない可能性があり，実験に使用した物体の大きさにおいて，提案手法の選択性能には有意差が検出されなかった (図 4.9, 図 4.13)．一方で，物体の大きさが大きくなるにつれ選択時間が増加する傾向が見られた．提案手法では，選択対象のみが配置される状況と異なり，選択対象の周囲には同期対象が追加され，さらに同期対象が移動する状況になる．また，実験において同期対象の移動経路も空間に表示され，選択対象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，選択対象が大きくなるにつれ，選択対象および同期対象の経路による参加者の視界を覆う領域が大きくなり，参加者による同期対象の移動の視認および同期動作が難しくなったことが考えられる．

5.2 物体の配置による選択性能への影響

提案手法において， D_{Low} ， D_{Mid} 間に選択時間に有意差は検出されずおよそ一定であり，かつ選択精度にも有意差が検出されなかった (図 4.10, 図 4.14)．一方で， D_{High} について，選択時間は他の2条件 (D_{Low} および D_{Mid}) よりも約1秒遅く，また他の2条件に対して選択精度の有意差が検出され精度が低いことがわかった．提案手法における配置密度について，選択対象の数が最大識別数に近づくとつれ位相差が最小位相である物体が増える．したがって，物体の数が増加した状況において，参加者は誤選択の頻度が高いかつ誤選択からの修正が困難

な同期動作による最小位相差の区別を強いられたタスクが増加したと考えられ、物体数が最大識別数48に近い場合 (D_{High} :40個)において、精度は D_{Mid} および D_{Low} よりも低下したと考えられる。一方で、 D_{Low} および D_{Mid} は物体数が最大識別数の半分程度 (D_{Mid} :25個) または半分以下 (D_{Small} :15個)であり、配置密度に影響されない物体選択が可能であったと考えられる。以上より、提案手法には配置される物体の個数が選択性能に影響すると考えられる。

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対象に対して正しく選択することが難しかった。」とコメントした。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、物体と同期対象の位置関係を見誤るまたは同期対象の一部の移動が物体に遮蔽されることによるものだと考えられる。

5.2.1 選択対称または同期対象の移動の形状による選択性能への影響

実験において、選択対象の形状には立方体を用いた。これは予備実験を行った結果から、提案手法において立方体を用いることにより、参加者が同期対象の移動経路を把握しやすくなったという結果に基づくものである。ただし、選択対象の1面は四角形であることに対し、同期対象の移動経路および参加者の運動は円形であり、2つの図形における形状は異なるということが選択に影響していると考えられる。 P_6 は「立方体に対して手を円形に動かすよりも、物体の形状に合った動き（実験であれば四角形）のほうが選択しやすく、また同期動作への意識よりも物体を選択しているという意識が強くなるのではないだろうか。」とコメントした。

第6章 今後の展望

提案手法は物体の大きさまたは配置密度に影響されない選択性能の可能性が考えられる。一方で、既存手法であるレイキャスト手法と比較すると選択性能は劣った。したがって、今後は提案手法の利点を残しつつ選択性能を改善する必要がある。また、本論文における実装および実験は限定的であり、拡張された使用が考えられる。

本章では、今後の展望として、提案手法の改善点と考えられるパラメータまたはユーザの視界による影響を述べ、その後、提案手法の拡張またはユーザについて順に述べる。

6.1 パラメータによる影響

提案手法におけるパラメータを変化させることにより選択性能を変化させることができる。提案手法において、同期動作を識別するパラメータには、初期位相、回転方向および回転軸を用いており、回転速度は一定であった。同期対象同士の回転速度が異なるようにすることにより、同期対象同士の動きが異なるため、同期動作にて識別が可能となる。回転速度をパラメータとして用いることにより、最大識別数を増加させることができると考えられる。さらに、今回我々は3次元同期動作における同期対象の円移動の回転軸にはグローバル座標系にて直行し合う3軸 (x , y および z 軸) を用いている。同期対象が回転する軸を増加させると、最大識別数を増加させることができる (例として、 z 軸回転する同期対象に対して、 z 軸を y 軸中心に 45° 回転させた軸を回転する同期対象)。提案手法において識別可能な同期対象の最大識別数が選択性能に影響したと考えられるため、最大識別数を増加させることにより性能の高い物体選択が可能になると考えられる。

また、選択性能同士にトレードオフなパラメータが存在する。実験において、同期動作を識別するウィンドウサイズは $w = 100$ 個であった。 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。 w を大きくすることは識別時間を増加させる一方で、識別精度を向上させる。さらに、8分割した同期対象の位相 (最小位相差: $\frac{\pi}{4}$) について、分割数を減少させること、すなわち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対象数は減少する一方で、同期動作の識別精度は高くなる。より早い選択時間を求める状況またはより高い精度を求める状況のそれぞれに適したパラメータに調整することにより、提案手法の使いやすさが向上すると考えられる。

6.2 視界による影響

今回の実装において、提案手法による物体選択は、ユーザの視界または視線に影響しない。すなわち、参加者は視界に物体全体が映ることまたは視線が物体中心（またはその周囲）を向くことなく選択が可能であった。一方で、実験中の参加者は提案手法による物体選択を行う際に、身体の向き、視界または視線を物体の方向に向けた。したがって、ユーザの視界または視線を考慮し、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。さらに、定義された優先度において、一定の閾値を超えた物体または優先度の高い一定個数の物体のみ選択可能となるように絞りこむことにより、少ない物体個数に対して同期動作を行うことができるため、高い精度の物体選択が可能になると考えられる。また、各同期対象がユーザと物体を結ぶ直線を軸として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。

提案手法には、選択性能が物体の大きさまたは配置密度に影響されないと考えられる。一方で、実験の結果から物体の大きさまたは位置関係、または同期対象の移動の見誤り等の視覚的な影響が見られた。特に、提案手法は、VR空間における物体選択において課題とされる物体同士の遮蔽により困難となった物体選択については改善ができていない。今後は、選択対象の周囲を移動する同期対象の配置または移動等について視覚的な理解および物体選択が容易となる設計が必要である。

6.3 提案手法の拡張

今回の実験において、同期動作の対象となる同期対象の移動経路は円形のみであった。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、ユーザが物体の形状に沿った経路にて提案手法による物体選択を行うことは、同期対象に同期動作を行う意識よりも、レイキャスト手法にてレイを選択対象に照射するように、選択対象へ選択する意識が強くなると考えられる。一方で、奥行き方向をもつ移動経路（例として、実験における x 軸回転および y 軸回転）の予測および同期動作に課題があると考えられる。Mattuschら [40] の研究によると、ユーザは一部が遮蔽された経路およびその経路を動く物体の動きを予測することが可能であるとされ、また、我々の実験においても同期動作による選択が可能であった。一方で、物体による遮蔽は選択精度を減少させる要因の1つであると考えられる。また、実験において、参加者は、全同期対象の移動が同一形状（円形）であることがわかっていたために、同期対象の動きを予測することが可能となり、同期動作を行えたと考えられる。物体の形状に沿った経路を定義する上で、ユーザが既知である物体およびユーザが既知でない物体の形状に対するユーザの形状予測および同期動作の調査を行う必要があると考えられる。

提案手法は手を用いた同期動作による物体選択手法である。実験において、参加者の物体に対する操作および手の位置情報の取得するためにVR向けコントローラを用いた。ただし、2.1節にて述べたように、ユーザの手は様々な機器または手法を用いてVR空間に投影するこ

とが可能である。特に Leap Motion 等を用いることにより素手にて提案手法を行うことが可能となるため、今後は素手による提案手法の選択性能を調査したい。

提案手法は VR 空間向けの物体選択手法である。一方で、ユーザによる同期対象の 3 次元移動の把握およびシステムによるユーザの 3 次元方向の同期動作の識別が可能な場合において、球体型ディスプレイのような立体ディスプレイまたは通常の平面ディスプレイ上に映る物体に対しても提案手法を用いて選択が可能である。今後はそのようなディスプレイに映る物体に対しても提案手法による選択の調査を行いたい。

6.4 実験参加者

実験における参加者は全員が 22 歳から 24 歳の大学生および大学院生の男性であり、限定的であった。提案手法における、より一般的な選択性能を調査するために、実験参加者よりも低い年齢または高い年齢の参加者に対して調査を行うこと、または女性に対して調査を行うことが必要である。また、参加者の VR システムの使用歴または使用頻度による性能への影響も調査もしたい。

第7章 結論

本論文において、我々は VR 空間の物体を選択する手法として、3次元同期動作を用いた物体選択手法を提案した。提案手法は、仮想手を用いて接触する手法またはレイキャスト手法とは異なる手法である。提案手法は、これまで2次元空間に対して用いられていた同期動作を3次元に適応したものであり、またターゲットの位相または移動方向を変化させることにより、ユーザは円形の同期動作のみを用いて各物体を識別できる。提案手法を用いることにより、ユーザは物体の大きさまたはその配置密度に影響されない選択が可能になると考えられる。

提案手法の選択性能を評価する実験を行ったところ、提案手法は既存手法であるレイキャスト手法よりも性能が劣ることがわかった。一方で、提案手法の選択性能は一部の物体の大きさ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に影響すると考えられる。

今後は、提案手法の改善として識別システムまたはユーザに対する最適なパラメータの調査、またはユーザの視界を考慮した識別システムが必要であると考えられる。また、円形以外のターゲット移動経路に対する提案手法を調査し、選択物体の形状に沿った移動経路またはユーザの動作が容易である経路にてユーザが選択できるようにしたい。

謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生には多くのご意見とご指導を頂きました。心から感謝いたします。特に志築文太郎先生には，研究の進め方，論文執筆をはじめとして研究に関することを基礎からご指導いただきました。また，研究に関する相談にも乗っていただき，多くのご助言を頂きました。重ねて感謝いたします。インタラクティブプログラミング研究室の同期，先輩方には様々な面において多くのご助言を頂きました。特に，WAVE チームの皆様には研究に関するご意見だけでなく，様々な相談に乗っていただきました。深く感謝いたします。中でも，斎藤圭汰氏には研究方針，実験の方法，論文執筆など本研究における重要な部分において多くのアドバイスを頂き大変お世話になりました。ここに厚くお礼申し上げます。また，研究生活に限らず，多くの面において支えて頂いた友人，大学生活にてお世話になった皆様に感謝申し上げます。最後に，私を育て，大学生活を支えてくださった両親に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Ferran Argelaguet and Carlos Andujar. 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, May 2013.
- [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*, pp. 439–448, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [3] Paulo Gallotti, Alberto Raposo, and Luciano P. Soares. v-Glove: A 3D Virtual Touch Interface. In *2011 XIII Symposium on Virtual Reality*, pp. 242–251, May 2011.
- [4] 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, 2018.
- [5] Naoki Yanagihara, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. A Comparative Study of Planar Surface and Spherical Surface for 3D Pointing Using Direct Touch. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '19*, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [6] Naoki Yanagihara, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. Text Entry Method for Immersive Virtual Environments Using Curved Keyboard. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST '19*, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [7] Jing Qian, Jiaju Ma, Xiangyu Li, Benjamin Attal, Haoming Lai, James Tompkin, John F. Hughes, and Jeff Huang. Portal-Ble: Intuitive Free-Hand Manipulation in Unbounded Smartphone-Based Augmented Reality. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '19*, p. 133–145, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [8] Wolfgang Hürst and Joris Dekker. Tracking-Based Interaction for Object Creation in Mobile Augmented Reality. In *Proceedings of the 21st ACM International Conference on Multimedia, MM '13*, p. 93–102, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [9] Mark R. Mine. Virtual Environment Interaction Techniques. Technical Report No. TR 90-018, Chapel Hill: University of North Carolina, 1995.

- [10] Anthony Steed and Chris Parker. 3D Selection Strategies for Head Tracked and Non-Head Tracked Operation of Spatially Immersive Displays. In *8th International Immersive Projection Technology Workshop*, pp. 13–14, 2004.
- [11] Tovi Grossman and Ravin Balakrishnan. The Design and Evaluation of Selection Techniques for 3D Volumetric Displays. In *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '06, pp. 3–12, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [12] Marc Baloup, Thomas Pietrzak, and Géry Casiez. RayCursor: A 3D Pointing Facilitation Technique Based on Raycasting. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 101:1–101:12, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [13] Hans Peter Wyss, Roland Blach, and Matthias Bues. ISith - Intersection-Based Spatial Interaction for Two Hands. In *Proceedings of the IEEE Conference on Virtual Reality, VR '06*, p. 123, USA, 2006. IEEE Computer Society.
- [14] Alex Olwal and Steven Feiner. The Flexible Pointer: An Interaction Technique for Augmented and Virtual Reality. In *Conference Supplement of UIST '03 (ACM Symposium on User Interface Software and Technology)*, pp. 81–82, 03 2012.
- [15] Andriy Pavlovych and Wolfgang Stuerzlinger. The Tradeoff Between Spatial Jitter and Latency in Pointing Tasks. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, EICS '09, pp. 187–196, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [16] Regis Kopper, Felipe Bacim, and Doug A. Bowman. Rapid and accurate 3d selection by progressive refinement. In *Proceedings of the 2011 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, 3DUI '11*, p. 67–74, USA, 2011. IEEE Computer Society.
- [17] Felipe Bacim, Regis Kopper, and Doug A. Bowman. Design and Evaluation of 3D Selection Techniques Based on Progressive Refinement. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 71, No. 7-8, pp. 785–802, July 2013.
- [18] Jeffrey Cashion, Chadwick Wingrave, and Joseph J. LaViola Jr. Dense and Dynamic 3D Selection for Game-Based Virtual Environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18, No. 4, pp. 634–642, April 2012.
- [19] Greg S. Schmidt, Yohan Baillot, Dennis G. Brown, Erik B. Tomlin, and J. Edward Swan II. Toward disambiguating multiple selections for frustum-based pointing. pp. 87–94. IEEE Computer Society, 2006.
- [20] Gerwin de Haan, Michal Koutek, and Frits H. Post. IntenSelect: Using Dynamic Object Rating for Assisting 3D Object Selection. In *Proceedings of the 11th Eurographics Conference on Virtual Environments*, EGVE '05, pp. 201–209, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2005. Eurographics Association.

- [21] William Delamare, Céline Coutrix, and Laurence Nigay. Mobile Pointing Task in the Physical World: Balancing Focus and Performance While Disambiguating. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '13, pp. 89–98, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [22] Maxime Guillon, François Leitner, and Laurence Nigay. Investigating Visual Feedforward for Target Expansion Techniques. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 2777–2786, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [23] Lode Vanacken, Tovi Grossman, and Karin Coninx. Exploring the Effects of Environment Density and Target Visibility on Object Selection in 3D Virtual Environments. In *2007 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, March 2007.
- [24] Tovi Grossman and Ravin Balakrishnan. The Bubble Cursor: Enhancing Target Acquisition by Dynamic Resizing of the Cursor's Activation Area. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '05, pp. 281–290, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [25] David A. Robinson. The mechanics of human smooth pursuit eye movement. *The Journal of Physiology*, Vol. 180, No. 3, pp. 569–591, 1965.
- [26] 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, pp. 457–466, New York, NY, USA, 2015. ACM.
- [27] Eduardo Velloso, Markus Wirth, Christian Weichel, Augusto Esteves, and Hans Gellersen. AmbiGaze: Direct Control of Ambient Devices by Gaze. In *Proceedings of the 2016 ACM Conference on Designing Interactive Systems*, DIS '16, pp. 812–817, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [28] Augusto Esteves, David Verweij, Liza Suraiya, Rasel Islam, Youryang Lee, and Ian Oakley. SmoothMoves: Smooth Pursuits Head Movements for Augmented Reality. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 167–178, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [29] Murtaza Dhuliawala, Juyoung Lee, Junichi Shimizu, Andreas Bulling, Kai Kunze, Thad Starner, and Woontack Woo. Smooth Eye Movement Interaction Using EOG Glasses. In *Proceedings of the 18th ACM International Conference on Multimodal Interaction*, ICMI '16, pp. 307–311, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [30] William Delamare, Teng Han, and Pourang Irani. Designing a Gaze Gesture Guiding System. In *Proceedings of the 19th International Conference on Human-Computer Interaction with*

- Mobile Devices and Services*, MobileHCI '17, pp. 26:1–26:13, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [31] Christopher Clarke and Hans Gellersen. MatchPoint: Spontaneous Spatial Coupling of Body Movement for Touchless Pointing. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 179–192, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [32] Christopher Clarke, Alessio Bellino, Augusto Esteves, and Hans Gellersen. 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, September 2017.
- [33] Marcus Carter, Eduardo Velloso, John Downs, Abigail Sellen, Kenton O'Hara, and Frank Vetere. PathSync: Multi-User Gestural Interaction with Touchless Rhythmic Path Mimicry. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 3415–3427, New York, NY, USA, 2016. ACM.
- [34] David Verweij, Augusto Esteves, Vassilis-Javed Khan, and Saskia Bakker. WaveTrace: Motion Matching Input Using Wrist-Worn Motion Sensors. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '17, pp. 2180–2186, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [35] Juyoung Lee, Shaurye Aggarwal, Jason Wu, Thad Starner, and Woontack Woo. SelfSync: Exploring Self-synchronous Body-based Hotword Gestures for Initiating Interaction. In *Proceedings of the 23rd International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '19, pp. 123–128, New York, NY, USA, 2019. ACM.
- [36] Cheng Zhang, Xiaoxuan Wang, Anandghan Waghmare, Sumeet Jain, Thomas Ploetz, Omer T. Inan, Thad E. Starner, and Gregory D. Abowd. FingOrbits: Interaction with Wearables Using Synchronized Thumb Movements. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '17, pp. 62–65, New York, NY, USA, 2017. ACM.
- [37] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139 – 183. North-Holland, 1988.
- [38] John Brooke. SUS: A Quick and Dirty Usability Scale. *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194, 1996.
- [39] John Brooke. SUS: A Retrospective. *Journal of Usability Studies*, Vol. 8, No. 2, p. 29–40, February 2013.

- [40] Thomas Mattusch, Mahsa Mirzamohammad, Mohamed Khamis, Andreas Bulling, and Florian Alt. Hidden Pursuits: Evaluating Gaze-selection via Pursuits when the Stimuli's Trajectory is Partially Hidden. In *Proceedings of the 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, ETRA '18, pp. 27:1–27:5, New York, NY, USA, 2018. ACM.

著者論文リスト

参考論文

本論文の主な内容は，下記にて公表済みである．

- 公表済み論文

1. 鈴木翔大，齋藤圭汰，志築文太郎．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-HCI-185，情報処理学会，2019 年 12 月，8 pages.

付録A 実験に用いた各種書類および機器

以下に、第4章において示した評価実験の際に使用した実験手順書および実験後アンケート用紙を示す。

A.1 実験手順書：実験全体説明

実験手順書：VR空間にて物体選実験する実験

文責：鈴木 翔大

実験全体説明

- 実験内容：VR空間で物体を選択する実験
- 実施予定時間：説明**10**分，実験**80**分（練習 + 本番）
- 実験環境
 - システム：HMD + コントローラ（**利き手**）
 - 立位状態にて実験（物体選択）
 - 休憩あり（姿勢&行動は自由）
 - 2操作方法
 - 方法ごとに，練習 → 本番 → アンケート
 - 練習時には操作方法の説明 + 操作練習（最大 **3**分）
- タスク
 - 1タスク：正しい物体選択を**10**回
 - 素早くかつ正確に
 - 1ブロック：**9**タスク → 休憩：1分以上
- 質問：いつでも可
 - 実験への質問
 - システムの不備のとき：コントローラのトラッキング，現実との違和感

A.2 実験手順書：各手法操作説明

各操作説明

全体説明

- 選択対象：青立方体
 - 選択課題：黄立方体
- タスク開始：タッチパッド押下
- フィードバック
 - 正しい選択：コントローラが短く振動 → 次の課題へ
 - 誤った選択：コントローラが長く振動 → 選択された物体が緑色に変化
 - 正誤に関わらず追加の操作なしに、選択を続行
 - 正しい選択 → 次の課題へ
 - 誤った選択 → 再度選択へ

RC

- 表示：コントローラから光線が放射される
- 操作方法
 - 光線を物体に当てる & コントローラのトリガを押下する
 - どの物体にも照射されていないときの選択は誤選択扱い

SM

- 表示
 - 青立方体の周囲を水色球（ターゲット）が円移動する
 - ターゲットの移動経路は赤い線にて表示
- 操作
 - 選択したい物体に対応したターゲットの動きに合わせてコントローラを動かす

A.3 実験後アンケート (SUS)

実験後に行ったアンケートのうち SUS に用いたアンケート用紙を示す。

SUS (Service Usability Scale)

文責：鈴木翔大

このシステムに関する次の記述に同意しますか。最も当てはまるものを選んでください。

1. わたしはこのシステムを頻繁に使いたいと思う
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)
2. このシステムは無駄に複雑であると思った
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)
3. このシステムは簡単に使えると思った
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)
4. このシステムを使えるようになるには、わたしは技術者の支援を必要とするだろうと思う
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)
5. このシステムでは様々な機能がよくまとまっていると思った
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)
6. このシステムにはあまりにも多くの矛盾があると思った
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)
7. ほとんどの人々はこのシステムの使い方をすぐに覚えるだろうと思う
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)
8. このシステムはとても扱いにくいと思った
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)
9. このシステムを使用できる自信があったと感じた
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)
10. わたしはこのシステムを使い始める前に、多くのことを学ぶ必要があった
(全く思わない) 1 ・ 2 ・ 3 ・ 4 ・ 5 (強く思う)