

Moving Pursuits：MR空間における視線を用いた 遮蔽オブジェクトの選択手法

林田 望海^{1,a)} 片山 晋¹ 浦野 健太¹ 米澤 拓郎¹ 河口 信夫^{1,2}

受付日 2024年9月11日, 採録日 2025年3月5日

概要：本研究では、Mixed Reality(MR) 空間における視線を用いたオブジェクト選択の課題に取り組む。MR 空間のような動的オブジェクト (仮想ウィンドウやポップアップ通知など) と固定オブジェクト (掲示物やモニターなど) が重なり合う環境では、システムによるユーザの選択意図の正確な判断が難しくなる。この課題を解決するために、視線選択手法 Moving Pursuits を提案する。本手法は、視線追跡と動的オブジェクト操作を統合し、オブジェクトの移動によってユーザの視線を誘導し、注目対象を判断する。実験では、視線によるオブジェクト追従時間の違いが選択精度に与える影響と、固定オブジェクトの選択精度を検証した。また、提案手法を視線ベースの既存選択手法と比較し、動的オブジェクトの選択精度やユーザ体験の違いについて評価を行った。Moving Pursuits は、オブジェクトが重なる複雑な環境でも有効であり、ユーザの操作負担を軽減しながら、正確かつ迅速に選択できると確認された。

キーワード：仮想現実, 複合現実, 視線追跡, オブジェクト選択

Moving Pursuits: A Gaze-Based Selection Method for Occluded Objects in MR Environments

NOZOMI HAYASHIDA^{1,a)} SHIN KATAYAMA¹ KENTA URANO¹ TAKURO YONEZAWA¹
NOBUO KAWAGUCHI^{1,2}

Received: September 11, 2024, Accepted: March 5, 2025

Abstract: This study addresses the challenge of object selection using the gaze in Mixed Reality (MR) spaces. In an environment such as MR space, where dynamic objects (e.g. virtual windows and pop-up notifications) and fixed objects (e.g. postings and monitors) overlap, it is difficult for the system to accurately detect the user's selection intentions. To resolve this problem, we propose the Moving Pursuits object selection method. This method integrates eye tracking and dynamic object manipulation, and aims to encourage the user to move the eye by moving objects to determine which object the user is paying attention to. Experiments verified the effect of different object tracking times on selection accuracy and the selection accuracy of fixed objects. We also compared the proposed method with existing gaze-based selection methods and evaluated the differences in selection accuracy and user experience for dynamic objects. It was confirmed that the Moving Pursuits method is effective even in complex environments with overlapping objects, and that it enables accurate and rapid selection while reducing the user's operational burden.

Keywords: Virtual Reality, Mixed Reality, Eye Tracking, Object Selection

1. はじめに

近年、Mixed Reality (MR) 技術の普及に伴い、物理空間と仮想空間がシームレスに融合した環境でのインタラクションが一般的になりつつある。その中でも選択タス

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

² 名古屋大学 未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society,
Nagoya University

^{a)} linda@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

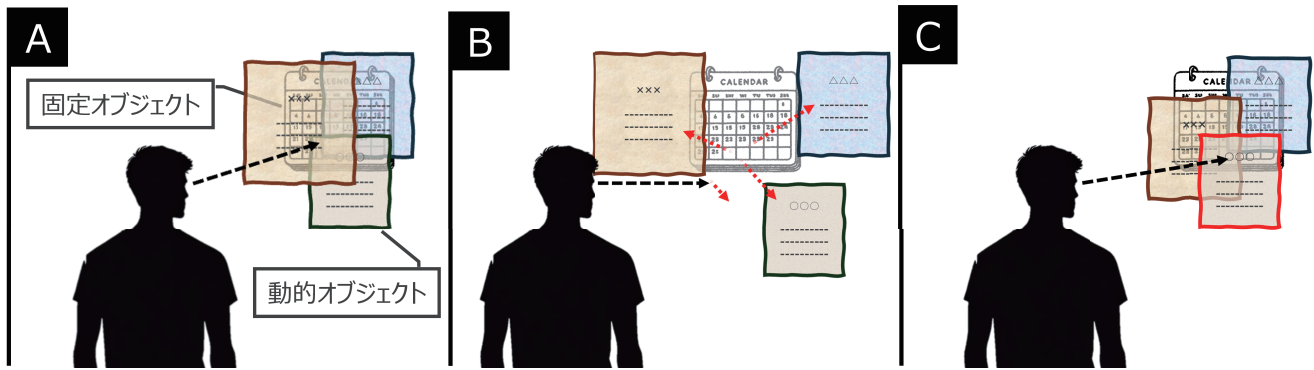


図 1 Moving Pursuits の概要. A: ユーザが関心のあるオブジェクトを見ようとするが、他のオブジェクトと重なり選択が困難になる. B: 視線を向けると動的オブジェクトが広がり、関心のあるオブジェクトを視線で追う. C: オブジェクトの動きとユーザの視線運動の一致により選択が完了し一番手前のレイヤに表示される.

クは、ユーザがコンピュータを操作する基本的な動作で、MR 空間においても重要であり、通常コントローラやハンドトラッキング、レイキャストを用いて行われる [1], [2], [3].

また、MR 空間では視線追跡技術を活用したインターフェースに関心が高まっている [4], [5]. ヘッドセット型デバイスに搭載された視線追跡技術の活用により、ハンズフリーによるオブジェクト選択ができるため、従来のコントローラやハンドトラッキングによる操作が不要となる. 特に医療現場や作業現場など、他の作業で手が塞がる状況でも、効率的な操作を実現できる.

しかし、図 1: A に示すように、MR 空間ではシステムによって制御できない物理的・環境的な固定オブジェクト (掲示物やモニター) と、仮想的な動的オブジェクト (仮想ウィンドウやポップアップ通知) が同時に存在する. このような環境では、従来の 2D ディスプレイを前提とした環境における選択タスクとは異なり、オブジェクトが 3D 空間で重なるため、ユーザは奥行きを考慮しながら選択操作を行う必要がある. その結果、選択タスクが大幅に複雑化する.

選択タスクには、対象を指し示すポインティングと、最終的に選択を完了する確定の 2 つのフェーズで構成されている. しかし、オブジェクトが別のオブジェクトに視覚的に覆われると、隠れたオブジェクトをポインティングできなくなり、ユーザがどのオブジェクトを選びたいのかという選択意図の正確な判断が難しくなる. 加えて、固定オブジェクトは表示レイヤや配置を容易に変更できないため、一度隠れるとポインティング精度が低下し、誤選択の原因となる. 例えば、ユーザが掲示板の情報を読もうとしているときに、ヘルプメッセージやアラートが表示され、意図せず固定オブジェクトを覆い隠してしまう. また、作業中に新しい通知ウィンドウが開かれた際、元の作業対象が完全に隠れてしまい、ユーザの認知負荷が増大する. このよ

うな場面の発生により、ユーザは隠れたオブジェクトの迅速な認識・選択が難しくなる. しかし、現状ではこのような課題に対処する選択手法は限られており、特に動的オブジェクトと固定オブジェクトが完全に重なるシナリオに特化した研究はほとんど行われていない.

本研究では、MR 空間において動的オブジェクトが固定オブジェクトを視覚的に完全に遮る場面における効率性と正確性を向上させるため、視線選択手法 Moving Pursuits を提案する. 本手法では、重なったオブジェクト群内で動的オブジェクトを適切に移動させ、動的・固定オブジェクト双方の視認性を確保する (図 1: B). さらに、ユーザの視線を用いて動的オブジェクトの動きを追跡し、ユーザが意図するオブジェクトを最前面に配置する (図 1: C).

本研究の主な貢献は以下の通りである.

- 動的オブジェクトと固定オブジェクトが重なる MR 空間特有の環境において、選択タスクを円滑に進めるための視線選択手法 Moving Pursuits を提案する.
- Moving Pursuits におけるオブジェクト追従時間と選択精度の関係の検証と固定オブジェクトの選択精度を評価する.
- 提案手法と既存の視線ベースの選択手法 (Dwell, Outline Pursuits) を比較し、選択精度およびユーザ体験への影響を調査する.

2. 課題と目的

本章では、本研究が対象とする環境・条件を整理し、視線を用いたインターフェースにおける選択タスクの課題を提示した上で、本研究の目的を明確化する.

2.1 研究対象とする環境・条件

本研究における、VR (Virtual Reality), AR (Augmented Reality), MR 空間の定義を明確にする. VR 空間は完全にデジタル情報で作られた環境を指し、物理空間との関係を

持たない没入型の体験を特徴とする。これに対し、AR 空間は物理空間にデジタル情報を重ね合わせ、ユーザは物理空間を視覚しつつ、追加された動的オブジェクトを認識する。MR 空間はこれらの概念を統合し、物理空間と仮想空間が相互に影響し合う環境である。MR 空間においては、ユーザは物理的な環境と仮想的なオブジェクトの両方に対してリアルタイムにインタラクションできる。

また、MR 空間におけるユーザが注目する対象のオブジェクトを動的オブジェクトと固定オブジェクトの2つに分類する。動的オブジェクトは、ユーザが直接的に操作し、位置や形状がリアルタイムで変化する仮想オブジェクトを指し、ウィンドウやポップアップ通知、バーチャルキーボードなどが該当する。一方、固定オブジェクトは物理空間または仮想空間内で一定の位置に配置され、移動しないオブジェクトを指し、物理的な時計やモニター、または仮想空間内に固定された背景の要素などが該当する。MR 空間では、これら複数のオブジェクトがユーザの視覚領域内に同時に配置され、オブジェクトが重なり合う状況がしばしば発生する。これにより、ユーザがどのオブジェクトを選択しているのかの正確な判断が困難になり、選択の曖昧さが生じる。この問題を解決するためには、システムがユーザの注目対象を正確に把握し、動的オブジェクトや固定オブジェクト間の選択を明確にする技術が求められる [6], [7]。VR 空間においても、同様の問題が発生するが、完全にデジタル情報で構成されているため、オブジェクトの配置やレイヤの制御が比較的容易である。したがって、本研究では物理空間の固定オブジェクトと動的オブジェクトが同時に存在するより複雑な MR 空間を本研究の対象とする。

本研究では、以下のような具体的な使用シーンを想定し、提案手法の適用可能性を評価する。まず、オフィス環境でのデスクワークを例に挙げる。固定モニターを中心に、タスクウィンドウや通知ウィンドウ、データ表示ウィンドウなど、複数の仮想ウィンドウが配置される状況を対象とする。従来の環境では、仮想ウィンドウがモニターと重なり、視覚的干渉が発生して必要な情報が見えにくくなり、作業に支障をきたす問題があった。この環境において提案手法を導入すると、仮想ウィンドウを適切なレイヤに配置できるようになり、視覚的干渉の解消や情報管理の効率化が期待される。以上の使用シーンは、従来の方法では解決が難しかった視覚的干渉や選択操作の課題に対応できると示しており、提案手法の適用可能性や意義を具体的に検証する上で重要である。

2.2 視線インターフェースの課題

視線を用いたインターフェースは、ユーザに直感的な操作を提供する一方で、いくつかの課題が存在する。現在の多くのシステムでは、視線のみでポインティングまではできるが、選択の確定には依然としてコントローラや指の

タップ操作が必要であり、これが特にハンズフリーでの操作が求められる場面では大きな負担となる。このため、視線のみで選択のポインティングから確定までを完結できる技術が求められる。

さらに、複数のオブジェクトが視覚的に重なり合った状態では、ユーザ自身が移動して視覚的な重なりを解消するか、あるいはオブジェクト自体を意図的に移動させて解消する必要がある。しかし、これらの動作はユーザにとって操作の負担になり、視線インターフェースとしての直感的な操作性を損なう。

MR 技術の普及に伴い、物理空間および仮想空間に無数のオブジェクトが配置されるようなシナリオが想定される。このような状況では、現在の技術の選択精度や操作性の課題が一層顕著になると予想される。特に、オブジェクト間の重なりや配置の問題が頻発し、従来の選択手法では十分な精度の維持は難しい。

また、動的オブジェクトの配置問題として様々な研究が行われている [8], [9], [10] が、オブジェクトの数が増えると処理負荷や操作精度に限界が生じるだけでなく、オブジェクトの自由な配置が制限される。このような制限は、ユーザがインタラクティブに扱えるオブジェクトの選択自由度を削いでしまうため、オブジェクトの自由な配置と選択の精度を両立できる新たな技術の開発が必要である。

2.3 本研究の目的

本研究は、MR 空間における視線選択インターフェースの課題、特に視覚的に重なるオブジェクトの選択の曖昧さを解消し、操作性の向上を目的とする。

本研究では、動的オブジェクトと固定オブジェクトの両方が存在するシナリオにおいて、ユーザがどちらのオブジェクトを選択しているかを正確に判断するための手法 Moving Pursuits を提案する。本手法は、オブジェクト群内の固定オブジェクトを基準に動的オブジェクトを互いに重ならないように移動させ、オブジェクト間の視覚的な重なりを解消する。これにより、動的オブジェクトが完全に固定オブジェクトを覆い隠す状況であっても、ユーザが意図するオブジェクトを正確に選択可能にする。

さらに、本手法は、視線を用いた選択から確定までのプロセスを統合し、コントローラや手のタップ操作を必要とせず、視線のみで選択操作を完了できる環境を提供する。このプロセスにより、従来の手法における操作の複雑さを解消し、ハンズフリーによる直感的な操作性を実現する。

提案する Moving Pursuits は、MR 空間における視線インターフェースの選択精度と操作性の向上を目的としており、特にオブジェクトの重なりによる課題を解消する点で、新たな貢献を目指す。

3. 関連研究

3.1 MR 空間におけるターゲット選択技術

VR や AR を含む MR 空間では、仮想オブジェクトや物理オブジェクトが重なり合う状況においてのターゲット選択技術が重要な研究課題とされてきた。特に、選択タスクにおける影響が大きく、精度向上が求められる。これまでの研究では、オクルージョン (物体の重なりによる視界の遮り) が選択タスクの精度や速度に与える影響が広く議論されている。例えば、Yu ら [6] は、VR 環境におけるオブジェクトのオクルージョン問題に対する 7 つの手法を提案し、特にオクルージョンレイヤーやオブジェクト密度などの要因が選択精度にどのように影響を与えるかを分析した。Sidenmark ら [11] は、Outline Pursuits という手法を開発し、視線追跡を用いてオクルージョンされたオブジェクトの選択精度と選択時間を改善した。しかし、これらの手法では、オブジェクトの重なりが増えるほど選択精度が低下する傾向があり、特に動的オブジェクトと固定オブジェクトが混在する MR 空間において十分な対応がなされていない。また、MR 空間における動的オブジェクトと固定オブジェクトが重なるシナリオは想定されていない。

これらの先行研究は、視線を活用した選択の精度向上やオクルージョン問題への対処において重要な役割を果たしているが、完全な解決には至っていない。本研究では、MR 空間におけるオブジェクトの重なり問題に対処し、視線を用いたターゲット選択の精度向上と直感的な操作性の両立を目指す新たな手法を提案する。

3.2 視線を用いた入力技術

視線を用いたインターフェース技術は、特に VR や AR 技術の普及に伴い、さまざまな操作タスクにおいて注目を集めている。視線はコントローラやハンドトラッキングよりも速く、特に遠くのオブジェクトに対して速く選択できる [12]。また、視線と頭の向きによるポインティングを比較したさまざまな研究があり、視線によるポインティングは速く、頭の向きによるポインティングは安定で正確であるとして好まれる [13], [14]。Dwell 手法 [15], [16] は、ユーザーが一定時間対象オブジェクトを凝視し選択を行うが、凝視時間が長いと操作が煩雑になる。さらに、視線と他の入力手法を組み合わせたマルチモーダルアプローチも提案されている。Schweigert ら [5] は、視線をポインティングに使い、ジェスチャでトリガ操作を行うハイブリッド手法を提案し、従来の手法と比較して操作の精度と使い勝手を向上させた。しかし、視線ベースの操作は、長時間にわたる使用時にユーザーに疲労をもたらす可能性があるため、視線の安定性や精度の向上が求められる。

また、Pursuits 手法 [17], [18] は、視線でオブジェクト

を追うと、直感的かつ迅速な選択が可能となり、特にオブジェクトが多い環境で有効とされている。

本研究では、既存の Pursuits 手法を拡張し、複雑な MR 空間においてユーザーが自然に視線操作を行い、オブジェクトの重なりを考慮した選択精度を向上させる新たなアプローチを提案する。また、視線操作の負荷を軽減する設計を導入し、長時間にわたる使用でも快適に利用できるようにする。

4. 提案手法

4.1 Moving Pursuits の概要

Moving Pursuits のインタラクション原理は、視線とオブジェクトの動きの連携により、ユーザーが選択タスクを正確に行う手法である。選択タスクとは、ユーザーが重なり合ったオブジェクト群の中から特定のオブジェクトを選ぶ操作を指す。このタスクは、ユーザーが意図的に特定のオブジェクトに注目し、それを選択するために行われる。しかし、視線追跡のみによるこの操作は、特にオブジェクトが重なっている場合に困難である。本手法は、選択タスクのプロセスを以下のステップに分ける。

- (1) 視線と頭の向きの抽出: システムは、ユーザーの視線の向きと頭の向きをリアルタイムで追跡し、選択する候補となるオブジェクト群を特定する。つまり、ユーザーが向いている方向を基準に選択の範囲を決定する。
- (2) 動的オブジェクトの動き: 選択候補となるオブジェクト群内の各オブジェクトは固定オブジェクトを基準に異なる方向に動き始める。これにより、ユーザーが視覚的にオブジェクトを区別しやすくなり、選択の曖昧さを解消し、選択を容易にする。
- (3) ユーザーによる選択の伝達: ユーザーは視線で特定のオブジェクトを追いつけると、選択の意図をシステムに伝える。このステップでは、ユーザーの視線が特定のオブジェクトの動きと一致すると、そのオブジェクトがユーザーの選択対象として明確に識別される。
- (4) システムによる検出: システムは、視線の動きとオブジェクトの動きとの位置関係をもとに、ユーザーがどのオブジェクトを追っているかを検出する。これはオブジェクトの動きに対するユーザーの視線の角度の計測により判断される。
- (5) 選択の確定: 視線が一定時間オブジェクトを追従し続けた場合、選択が確定する。この確定は、追従時間が閾値を超えた場合に行われる。確定されたオブジェクトが最も手前のレイヤに表示される。固定オブジェクトが選択された場合は広がったオブジェクトはその場にとどまる。

本手法は、視線のみで選択と確定を実現する点で、従来の手法 (例えば、ポインティングは視線、確定はコントローラやジェスチャを用いる方法) とは異なる。また、本手法

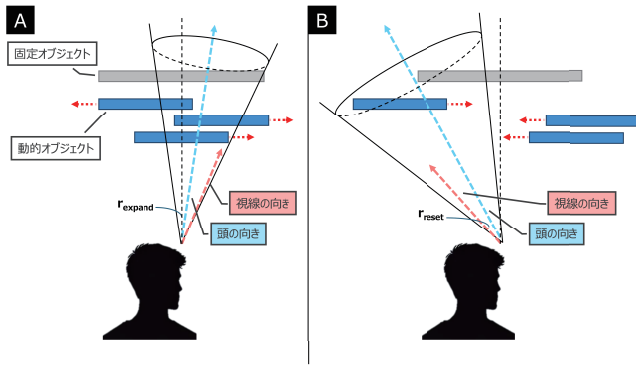


図 2 Cone Casting を用いた頭の向きによるオブジェクト群選択

は、動的オブジェクトが固定オブジェクトを完全に隠してしまうような視覚的干渉を解消し、固定オブジェクトの視認性の確保により、誤選択のリスクを低減する。

4.2 オブジェクト群選択

オブジェクト群は、ユーザが視覚的注意を1つのまとまりとして認識する近接するオブジェクトのまとまりとして定義される。Moving Pursuits は、Cone Casting[11] を基にした視覚的な範囲を用いてオブジェクト群を定義する。具体的には、ユーザの視線方向を中心とした視角 r_{expand} の範囲内に位置する動的および固定オブジェクトの両方を含むオブジェクト群を一つのオブジェクト群とみなす。このオブジェクト群は、複数の仮想ウィンドウやポップアップ通知など、動的オブジェクトを含む場合が多く、物理的な固定オブジェクトもその場に存在する可能性がある。この範囲内にあるオブジェクトの座標を基にその重心を計算し、それをオブジェクト群の中心として扱う。視角 r_{expand} の範囲内にオブジェクト群の中心が入ると、そのオブジェクト群が選択候補として認識されると同時に、動的オブジェクトの動きの生成プロセスに移行する(図2: A)。また、視角 r_{reset} の範囲内からオブジェクト群の中心が出ると、そのオブジェクト群が選択候補から外れ、動的オブジェクトは元の位置に戻る(図2: B)。

4.3 オブジェクト動き生成

Moving Pursuits の中心的なプロセスは、動的オブジェクトの動き生成である。選択候補となる動的オブジェクトがユーザの視線の向きに連動して動き出し、ユーザの関心のあるオブジェクトを選択しやすくする。動き生成の具体的な手順は以下の通りである。ユーザの視線方向とオブジェクト群の中心方向の角度が視角 r_{expand} 以内に入ると、動き生成が開始される。動きの方法は、各動的オブジェクトが互いに重ならないように分散する方向に設定される。また、固定オブジェクトがオブジェクト群内に存在する場合は、それから離れる方向に動かし、固定オブジェクトの視認性を確保する。この動作により、選択可能なオブジェ

クトが視覚的に明確になり、誤選択を防げる。動き出した動的オブジェクトは選択されるか、オブジェクトの重なりが解消された時点で広がり停止する。

4.4 フォーカス状態検出

フォーカス状態検出は、ユーザが視線を向けたオブジェクトをシステムが正確に特定し、選択を確定するためのプロセスである。図3にそのアルゴリズムを示す。まず、視線追跡システムによってリアルタイムでユーザの視線方向がベクトル形式で取得される。次に、Find Closest Target アルゴリズム (Algorithm 2) を用いて、視線方向に最も近いオブジェクトを特定する。このアルゴリズムでは、各オブジェクトの中心座標と視線ベクトルとの間の角度を計算し、最小角度を持つオブジェクトを選択する。特定されたオブジェクトに対して、ユーザの視線が一定時間以上固定されているかを確認する。この視線固定時間が定められた閾値 *selectionTime* を超えた場合、そのオブジェクトが選択されたとみなされ、選択が確定する (Algorithm 1)。一方、視線がオブジェクトに一定時間固定されない場合、選択状態はリセットされ、再度視線の方向に最も近いオブジェクトが特定される。このプロセスにより、システムはユーザの注目しているオブジェクトを正確に判断し、スムーズかつ直感的な視線インタラクションを実現する。

5. 評価実験

提案手法を評価するために、2つのユーザ実験を実施した。まず、ユーザ実験1で提案手法における確定時間(オブジェクト選択に必要な追従時間)がユーザの選択性能や嗜好にどのような影響を与えるかを検証するとともに、動的オブジェクトと固定オブジェクトが重なるシナリオにおいて本手法が有効であるかを調査した。次に、ユーザ実験2では、提案手法である Moving Pursuits と既存の視線選択技術 (Dwell および Outline Pursuits) を比較し、その有効性を評価した。

本研究では、視線追跡機能を搭載した MR デバイスである Meta の Quest Pro を使用した。Quest Pro はユーザの視線を正確に追跡し、MR 空間内での視線インターフェースを実現する。また、提案手法の基礎的な性能を評価するため、パススルー機能は使用せず、仮想空間で実験を行った。これは、物理環境の影響を最小限に抑えつつ固定オブジェクトを仮想的に用意でき、視線データの記録や実験条件の統制を容易にするためである。

5.1 ユーザ実験 1: 確定時間

5.1.1 実験設定

ユーザ実験1は、Moving Pursuits における確定時間がユーザの選択性能および嗜好にどのような影響を与えるかを評価する。また、Moving Pursuits によって、動的オブ

Algorithm 1 Gaze Selection Algorithm

```

1:  $gazeDirection \leftarrow getGazeDirection()$ 
2:  $closestObject, closestTarget \leftarrow$ 
    $findClosestTarget(gazeDirection)$ 
3: if  $isFacing(gazeDirection, closestTarget)$  then
4:    $gazeDuration \leftarrow gazeDuration + \Delta t$ 
5:   if  $gazeDuration \geq selectionTime$  then
6:      $selectedObject \leftarrow closestObject$ 
7:      $confirmSelection(selectedObject)$ 
8:   end if
9: else
10:   $gazeDuration \leftarrow 0$ 
11:   $currentTarget \leftarrow null$ 
12: end if

```

Algorithm 2 Find Closest Target

```

1:  $closestTarget \leftarrow null$ 
2:  $minAngle \leftarrow \infty$ 
3: for each  $target$  in  $targets$  do
4:    $angle \leftarrow computeAngle(gazeDirection, target)$ 
5:   if  $angle < minAngle$  then
6:      $closestTarget \leftarrow target$ 
7:      $minAngle \leftarrow angle$ 
8:   end if
9: end for
10:
11: return  $closestTarget$ 

```

図3 フォーカス状態検出アルゴリズム

ジェクトに隠れた固定オブジェクトを自然に選択できるのかも検証する。実験には7名(平均年齢27.5歳)の被験者が参加し、異なる確定時間(0.5秒, 1.0秒, 2.0秒)での選択タスクを行った。各条件下での選択精度や操作の快適さを比較し、最適な確定時間を検討する。なお、これらの確定時間の設定は、既存の視線追跡を用いた選択手法を参考にしたものであり、本研究では短い確定時間(0.5秒)から詳細な確認に適した長い確定時間(2.0秒)までをカバーし、幅広い操作状況での適用性を確認するために設定した。

本実験環境を図4に示す。固定オブジェクト1つと動的オブジェクト3つから構成される2つのオブジェクト群を用意した。固定オブジェクトは36インチモニターを模した大きさとし、動的オブジェクトはA3サイズの仮想ウィンドウを想定して設定している。オブジェクトまでの距離は約1mに設定したが、これは一般的な仮想コンテンツやモニターが配置される距離を参考にした値である。動的オブジェクトの広がり距離は0.5mとし、移動速度は各確定時間に基づいて決定した。さらに、選択候補となるオブジェクト群の認識範囲を定めるため、視角 r_{expand} を27度、 r_{reset} を45度に設定した。被験者は、これらの条件下で複数のオブジェクトが重なった状況において、動的オブ

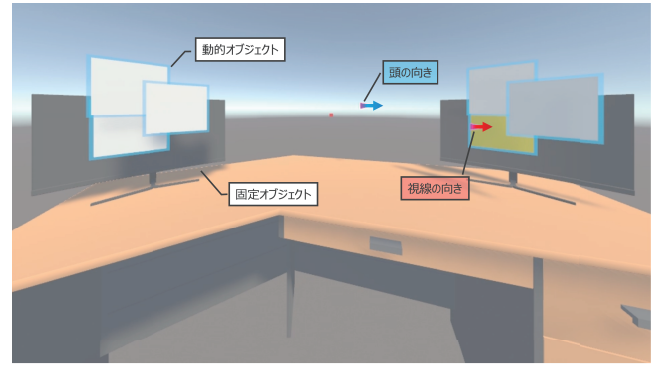


図4 ユーザ実験で用いるシーン。ユーザは黄色いオブジェクトを選択するように指示された。

ジェクトまたは固定オブジェクトを選択するタスクに取り組んだ。各設定で10回の試行を繰り返し、そのうち3回はランダムに固定オブジェクトを選択するように指示された。

選択精度は、正しくオブジェクトが選択された数を基に評価し、ユーザ嗜好に関しては、タスク終了後に一般的なユーザビリティ要因に基づく7つの5段階リッカート尺度からなるアンケートを実施し、どの確定時間設定が最も自然で快適だと感じられたかを調査した。このアンケートでは次の指標について評価を行った。精度は、本手法を利用して意図したオブジェクトを正しく選択できた割合を評価する。使いやすさは、本手法がどの程度直感的かつ簡便に操作可能かを評価する。満足感、本手法の全体的な使用感に基づいて評価する。誤認識率は、意図しないオブジェクトが選択されたと感じた割合を評価する。疲労感、特に視線操作に伴う身体的・精神的な負担を評価する。直感性は、操作がどれほど自然で直感的に操作できるかを評価する。最後に好みは、本手法の各設定の中でユーザが最も好む選択肢を示しており、主観的な評価が反映される。さらに、固定オブジェクトの選択に関しても6つの5段階リッカート尺度からなるアンケートを実施し、どの程度自然な選択ができたか調査した。

5.1.2 実験結果

図5に、各確定時間における選択タスクの誤選択率を比較した結果を示す。フリードマン検定を行ったところ、有意水準 $p < 0.05$ で統計的に有意差は認められなかった。しかし、確定時間が長いほど選択精度が向上する傾向が見られ、特に2.0秒の確定時間で最も低い誤選択率が得られた。これは、確定時間が十分に確保され、ユーザが対象のオブジェクトに集中しやすくなったためと考えられる。

同様に図6に、各確定時間におけるアンケート結果を示す。フリードマン検定では有意差は認められなかったが、使いやすさ、満足度、疲労感、好みといった項目では1.0秒の確定時間が最も高い評価を得た。選択精度においては2.0秒の確定時間が優れていたが、操作性や使いやすさを考慮すると1.0秒の確定時間が最適なバランスである可能

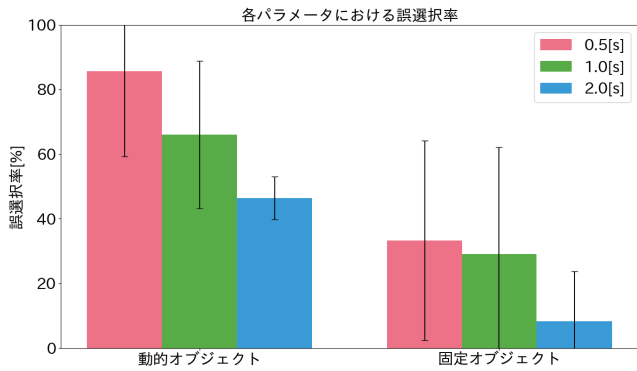


図5 各確定時間に対する誤選択率と固定オブジェクト誤選択率

性が示唆された。

固定オブジェクトの選択に関しても、確定時間が長いほど選択精度が向上する傾向が確認された(図5)。特に、満足度と疲労感の項目では、1.0秒の確定時間が最も好まれ、ユーザにとって自然でストレスの少ない選択が可能であると示唆された(図7)。一方、精度や使いやすさ、誤選択率の観点では2.0秒の確定時間が最も高く評価され、慎重に選択できるだけの余裕が反映された結果と考えられる。これに対して0.5秒の確定時間では、精度や満足度の面で特に低評価が多く、短すぎる確定時間が選択ミスやストレスを生む一因になった可能性がある。実際、被験者からは「操作に焦りを感じ、正確な選択が難しい」という声が挙げられた。

誤選択率やアンケート結果などのデータを総合的に評価すると、Moving Pursuitsは1.0秒の確定時間において使いやすさと疲労感の低さの面でユーザから好評を得た。一方で、2.0秒の確定時間は正確な選択が可能となり、選択精度の面で優れているとが示された。固定オブジェクトの選択においても、1.0秒の確定時間が最も自然かつ快適な選択体験を提供し、精度を重視する場面では2.0秒が優位であると確認できた。

これらの結果から、Moving Pursuitsによる選択は1.0秒の確定時間が操作性と快適さの点で最適であると考えられる。また、Moving Pursuitsによる固定オブジェクト選択の有効性が確認された。今後の改良としては、精度と操作性のバランスの最適化が重要であると考えられる。

5.2 ユーザ実験 2: 比較評価

5.2.1 実験設定

ユーザ実験2では、Moving Pursuitsと既存の視線選択技術(DwellおよびOutline Pursuits)を比較して評価した。視角 r_{expand} と r_{reset} は実験1と同様の値に設定し、実験には9名(平均年齢28.7歳)の被験者が参加し、各手法の選択精度とユーザ満足度を測定した。

Dwellは動かないオブジェクトを一定時間見つめると選択を確定する手法である(図8:A)。Outline Pursuitsはオ

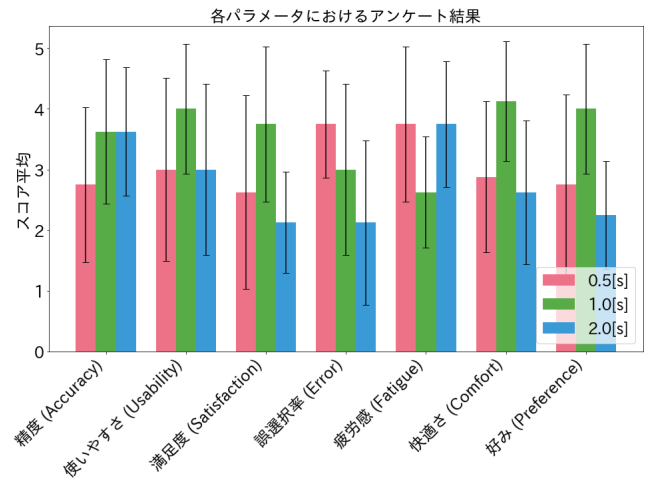


図6 オブジェクト選択における各確定時間に対するユーザ嗜好のアンケート結果

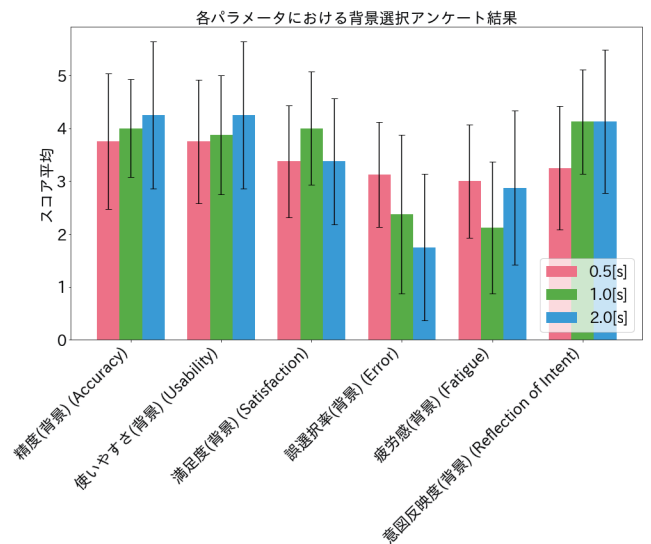


図7 固定オブジェクト選択における各確定時間に対するユーザ嗜好のアンケート結果

ブジェクトの輪郭上を移動するターゲットを視線で追うと選択を確定する(図8:B)。各手法の確定時間は、実験1の結果を踏まえ1.0秒に統一した。

実験では、ユーザ実験1と同様に複数の動的オブジェクトが重なった状況下で選択対象を選ぶタスクを行った。ただし、本研究では動的オブジェクトが固定オブジェクトを完全に隠すケースを想定しており、既存手法ではこのような場面での固定オブジェクトの選択は困難である。そのため、動的オブジェクトのみを選択対象とし、選択精度への影響を検証した。また、オブジェクトの重なり度合いを3段階に分け、各段階で10回の試行を行った(図9)。選択精度は、正しく選択された回数の割合を指標とし、ユーザ嗜好はタスク終了後に行った7つの5段階リッカート尺度(一般的なユーザビリティ要因に基づく)によるアンケートでどの手法が最も使いやすいと感じたか評価した。

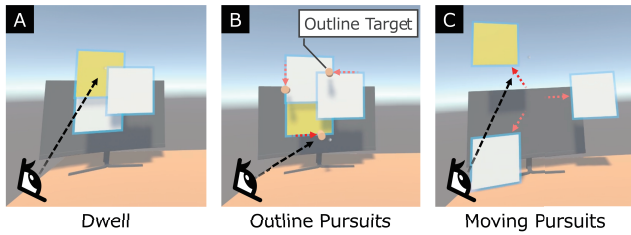


図 8 ユーザ実験 2 で用いる視線ベースの選択手法. A: 一定時間見つけて選択を確定する. B: オブジェクトの輪郭上を動くターゲットを視線で追うと選択を確定する. C: 広がるオブジェクトを視線で追うと選択を確定する.

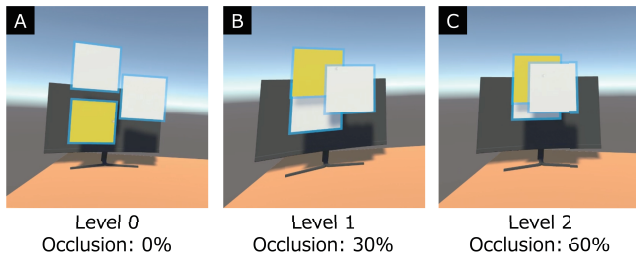


図 9 ユーザ実験 2 における動的オブジェクトの重なり具合

5.2.2 実験結果

図 10 に各手法の選択タスクの誤選択率を示す. フリードマン検定 (有意水準 $p < 0.05$) では有意差は確認されなかったが, 選択精度の面では Moving Pursuits と Outline Pursuits が Dwell よりも高い傾向が見られた. 特に Moving Pursuits は, 動的オブジェクトが重なる複雑な状況でも最も高い選択精度を示し, 本研究の想定シナリオに適していると確認された. Outline Pursuits も Dwell に比べて高い選択精度を示したものの, ユーザ間でばらつきが生じた. 一方, Dwell は動的オブジェクトが重ならない単純な場面では最も正確に選択されたが, 重なりが増すにつれて選択精度が著しく低下した. この結果から, Dwell は本研究の対象シナリオにおいて十分な精度を発揮できない可能性が示唆される.

アンケート結果から, Moving Pursuits が全体的に最も高い評価を得た (図 11). 特に精度, 使いやすさ, 満足度, 誤選択率の各項目で, 他の 2 つの手法を上回る評価となった. Dwell は, 疲労感や直感性の面で簡便な操作が可能と評価される一方, オブジェクトが重なる場面で精度が低下し, 多くのユーザが使いにくい印象を持った. Outline Pursuits は選択精度が高いものの, 対象を視線で追いつける負担が大きいため, 全体的な評価は劣る結果となった.

誤選択率およびアンケート結果の総合評価では, Moving Pursuits は使いやすさと直感的な操作性でユーザから最も支持され, 選択精度も優れていた. Outline Pursuits は精度面では非常に効果的だったが, 操作に伴う負担が大きく, 特に長時間のタスクには適さないと判断される. 一方, Dwell は操作が簡便であったものの, オブジェクトが重な

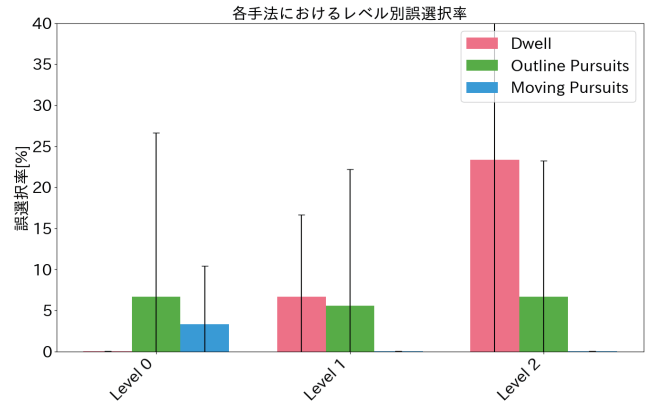


図 10 各選択手法に対するレベルごとの誤選択率

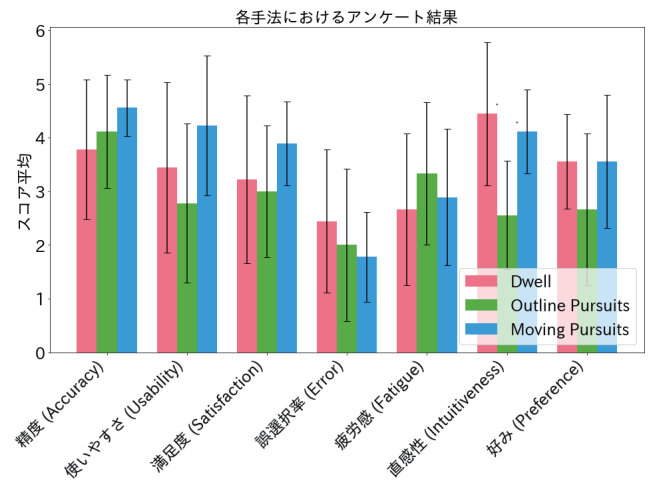


図 11 オブジェクト選択における各選択手法に対するユーザ嗜好のアンケート結果

る状況では選択精度が他の手法に比べ低い結果となった. これらの結果から, Moving Pursuits はオブジェクトが重なる状況下において全体的に最もバランスの取れた手法と評価できる. 精度および操作性のさらなる向上により, より快適なユーザ体験の実現が期待される.

6. 考察

選択精度の評価では, 実験結果を基に, 本研究で提案する Moving Pursuits が他の既存手法と比較して選択精度においてどのように優位性を持つかを確認した. その結果, Moving Pursuits はオブジェクトの重なりの有無を問わず有効であり, 動的オブジェクトが広がった状態で統一した見え方を保持するため, 重なり度合いを意識せずに直感的な選択が可能であると考えられる. 一方, Outline Pursuits も重なり度合いに依存しない点では有効であるが, 視線操作に慣れていないユーザにとっては操作難易度が高い傾向が見られた. 対照的に, Dwell はオブジェクトが重ならない場面では最も直感的で使いやすい手法であるものの, 重なりが増すにつれて精細な視線操作が求められ, オブジェクトが完全に重なる状況では選択が困難であった. 操作性

の評価では、ユーザアンケートの結果から、提案手法の操作の優位性を確認した。Moving Pursuits はオブジェクトの動きが大きく、視線だけでなく頭の動きでもオブジェクトを追従できるため、視線だけに頼った繊細な操作が不要となり、疲労感が少ないという利点がある。この点はDwellと共通する要素があるものの、Moving Pursuitsはオブジェクトの重なりによる選択問題も解消しているため、より高い評価を得た。一方で、DwellやOutline Pursuitsは、重なりが大きい場合に見つめる動作や追従そのものを中心となり、選択感覚が希薄になるという意見も示された。

精度と時間のトレードオフに関しては、提案手法が他の手法より正確な選択を可能にする一方、選択に要する時間が長くなる傾向が課題として指摘された。そのため、精度向上のためには選択時間が増加する場合があります、操作のスピードと正確さのバランスが重要であると考えられる。さらに、本研究の実験設定では、実際のオフィス環境や一般的なVR/ARの利用シーンを参考に動的オブジェクトのサイズ、位置、移動速度が統一されていたが、これらのパラメータの変化が選択精度やユーザ体験に与える影響については十分に検討されていない。例えば、動的オブジェクトの数が増えたり、オブジェクトまでの距離が変化したりした場合に、ユーザの視線操作がどのように影響を受けるかを評価する必要がある。特に移動速度については、追従が無理なく行える速度の範囲を詳細に分析し、最適な値の検討が重要である。また、ユーザ間のばらつきも確認されており、スキルレベルや年齢、経験の差によって選択精度や操作性が異なる可能性が示唆された。特に視線操作への慣れが、手法の使いやすさに大きく影響していると考えられるため、今後はユーザ特性の違いを踏まえた分析が求められる。

本研究では、固定オブジェクトと動的オブジェクトの視覚的干渉が完全に生じる状況に焦点を当てたが、部分的な重なりや複数の固定オブジェクトが存在する環境での既存手法との比較評価はまだ行っていない。これらのシナリオを対象とした拡張的な実験設計を行い、提案手法の汎用性を検証する必要がある。今後の改良点としては、オブジェクトの広がり方や広がり具合の調整が挙げられる。広がりすぎるとユーザがオブジェクトを追従しにくくなり、逆に広がり不足すると固定オブジェクトが選択しづらい可能性があるため、この点の最適化が必要である。また、動的オブジェクトの広がり方向に柔軟性を持たせ、異なる空間配置や状況に適応できる設計も検討すべきである。さらに、提案手法の他のVR/ARアプリケーションや異なるシナリオへの適用可能性についても議論が求められる。異なるデバイスやアプリケーションへの拡張性と汎用性を分析し、より広範な環境で活用できるかどうかの検討が今後の重要な課題である。

提案手法の意義は、MR空間でオブジェクトが重なった

際の実験結果、ユーザ体験の向上や正確な選択、操作負担の軽減など、従来手法を上回る貢献が確認された。特にMoving Pursuitsの選択手法は、オブジェクトが重なる状況下でも正確かつ直感的な選択を可能にし、ユーザにとって快適なインタラクションを実現している。

7. まとめ

本研究では、MR空間における動的オブジェクトと固定オブジェクトが重なり合う状況において、視線を用いたオブジェクト選択の課題を解決するためのMoving Pursuitsを提案した。従来の視線選択手法であるDwellおよびOutline Pursuitsと比較し、選択精度、操作性、ユーザ負担に関する評価を実施した。

実験結果、Moving Pursuitsは特にオブジェクトが重なる状況下でも高い選択精度を維持し、重なり度合いにかかわらず直感的な操作ができた。一方、Dwellはオブジェクトが重ならない場面では直感的かつ使いやすいものの、重なりが増えると視線操作の精度が低下するという問題が見られた。また、Outline Pursuitsは視線でオブジェクトを追う動作において高い選択精度を示したが、視線操作に伴う負担が大きく、特に長時間の操作では疲労感が増加するという問題が指摘された。

Moving Pursuitsの貢献は、従来の手法に比べて操作負担を軽減し、ユーザにとって直感的で快適な操作を可能にした点である。また、オブジェクトが広がって表示されるため、重なりによる選択の難しさが解消され、選択精度が保たれるだけでなく、視覚的な直感性も向上した。これにより、ユーザが多様な状況でオブジェクトを正確かつ迅速に選択できる環境が実現した。

提案手法の意義として、MR空間におけるオブジェクトの重なりによる選択問題を効果的に解決できる点が挙げられる。これにより、ユーザ体験が向上し、操作における疲労感が軽減されるという実用的な効果が確認された。特に、複数のオブジェクトが重なり合う複雑なシナリオでも、提案手法の有効性が示され、他のVR/ARアプリケーションにも応用可能性が高いと考えられる。

今後の展望としては、精度と選択速度のバランスを最適化し、オブジェクトの広がり方を調整する。そして、さまざまなユーザの操作ニーズに対応したカスタマイズが可能にする。実際、広がりが大きすぎると追従が難しくなる一方で、広がり不足だと固定オブジェクトの選択が難しくなる可能性があり、これらの要素の適切な制御が今後の改良において重要な方向性となる。また、提案手法の拡張性も今後の研究課題であり、異なるデバイスやシステムへの応用、さらには他のVR/ARアプリケーションへの適用を通じ、より汎用的な手法への発展が期待される。

謝辞 本研究はJST CREST(JPMJCR22M4)、内閣府総

合科学技術・イノベーション会議の「SIP/バーチャルエコノミー拡大に向けた基盤技術・ルールの整備」(JPJ012495)(研究推進法人：国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)によって実施されました。

参考文献

- [1] Argelaguet, F. and Andujar, C.: A survey of 3D object selection techniques for virtual environments, *Computers & Graphics*, Vol. 37, No. 3, pp. 121-136 (2013).
- [2] Baloup, M., Pietrzak, T. and Casiez, G.: Raycursor: A 3d pointing facilitation technique based on raycasting, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1-12 (2019).
- [3] Jamalian, N., Gillies, M., Leymarie, F. F. and Pan, X.: The effects of hand tracking on user performance: an experimental study of an object selection based memory game, *2022 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, IEEE, pp. 768-776 (2022).
- [4] Adhanom, I. B., MacNeilage, P. and Folmer, E.: Eye Tracking in virtual reality: A broad review of applications and challenges, *Virtual Reality*, pp. 1-25 (2023).
- [5] Schweigert, R., Schwind, V. and Mayer, S.: Eyepointing: A gaze-based selection technique, *Proceedings of Mensch und Computer 2019*, pp. 719-723 (2019).
- [6] Yu, D., Zhou, Q., Newn, J., Dingler, T., Velloso, E. and Goncalves, J.: Fully-occluded target selection in virtual reality, *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 26, No. 12, pp. 3402-3413 (2020).
- [7] Maslych, M., Hmaiti, Y., Ghamandi, R., Leber, P., Kattoju, R. K., Belga, J. and LaViola, J. J.: Toward intuitive acquisition of occluded vr objects through an interactive disocclusion mini-map, *2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, IEEE, pp. 460-470 (2023).
- [8] Yoffe, L., Sharma, A. and Höllerer, T.: Octopus: Open-vocabulary content tracking and object placement using semantic understanding in mixed reality, *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, IEEE, pp. 587-588 (2023).
- [9] Ellenberg, M. O., Satkowski, M., Luo, W. and Dachsel, R.: Spatiality and Semantics-Towards Understanding Content Placement in Mixed Reality, *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1-8 (2023).
- [10] Lang, Y., Liang, W. and Yu, L.-F.: Virtual agent positioning driven by scene semantics in mixed reality, *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, IEEE, pp. 767-775 (2019).
- [11] Sidenmark, L., Clarke, C., Zhang, X., Phu, J. and Gellersen, H.: Outline pursuits: Gaze-assisted selection of occluded objects in virtual reality, *Proceedings of the 2020 chi conference on human factors in computing systems*, pp. 1-13 (2020).
- [12] Tanriverdi, V. and Jacob, R. J.: Interacting with eye movements in virtual environments, *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 265-272 (2000).
- [13] Blattgerste, J., Renner, P. and Pfeiffer, T.: Advantages of eye-gaze over head-gaze-based selection in virtual and augmented reality under varying field of views, *Proceedings of the Workshop on Communication by Gaze Interaction*, pp. 1-9 (2018).
- [14] Hansen, J. P., Rajanna, V., MacKenzie, I. S. and Bækgard, P.: A Fitts' law study of click and dwell interaction by gaze, head and mouse with a head-mounted display, *Proceedings of the Workshop on Communication by Gaze Interaction*, pp. 1-5 (2018).
- [15] Lohr, D. J. and Komogortsev, O. V.: A comparison of smooth pursuit-and dwell-based selection at multiple levels of spatial accuracy, *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2760-2766 (2017).
- [16] Mutasim, A. K., Batmaz, A. U. and Stuerzlinger, W.: Pinch, click, or dwell: Comparing different selection techniques for eye-gaze-based pointing in virtual reality, *Acm symposium on eye tracking research and applications*, pp. 1-7 (2021).
- [17] 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*, pp. 439-448 (2013).
- [18] 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 & technology*, pp. 457-466 (2015).

林田 望海 (学生会員)

2020 年大阪府立大学工学域卒業, 2022 年名古屋大学大学院工学研究科情報・通信工学専攻修士課程修了。同年より同大学院博士後期課程。主にヒューマンコンピュータインタラクション, VR の研究に従事。

片山 晋 (正会員)

2018 年慶應義塾大学環境情報学部卒業, 2020 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士課程修了。2023 年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。同年より名古屋大学大学院工学研究科特任助教。

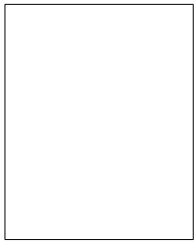
主にヒューマンコンピュータインタラクション, アフェクティブコンピューティングの研究に従事。



浦野 健太 (正会員)

2016 年名古屋大学工学部電気電子・情報工学科卒業。2018 年に同大学大学院修士課程，2021 年に博士課程を修了。同年より同大学院助教。博士(工学)。屋内位置推定，実世界データモデリング，生体信号のエンターテイン

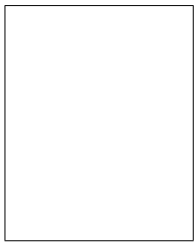
メント利用に関する研究に従事。



米澤 拓郎 (正会員)

2010 年慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期課程博士号取得後，同大学院特任助教，特任講師，特任准教授を経て，2019 年より名古屋大学大学院工学研究科准教授。主に，ユビキタスコンピューティングシステム，

ヒューマンコンピュータインタラクション，センサネットワーク等の研究に従事。ACM, 電子情報通信学会, IEEE 各会員。



河口 信夫 (正会員)

1990 年名古屋大学工学部電気電子工学科卒業。1995 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程満了。同年同大学工学部助手，同大学講師，准教授を経て，2009 年より同大学大学院工学研究科教授。NPO 位置情報サー

ビス研究機構 Lisra 代表理事。モバイルコミュニケーション，ユビキタスコンピューティング，行動センシングの研究に従事。博士(工学)。ACM, IEEE, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 日本音響学会各会員。本会シニア会員。