

Kuiper Belt: バーチャルリアリティにおける 極端な視線角度を用いた視線入力手法の検討

崔明根^{†1, a)} 坂本大介^{†1, b)} 小野哲雄^{†1, c)}

概要: 目の水平方向の最大可動範囲は平均45°である。しかし目が左右の限界まで移動することはほとんどなく、視線は基本的に視線と頭部方向が成す角度(視線角度) 25°以内に分布している。我々はこの25°-45°の領域を“Kuiper Belt”と名付けた。ユーザが意図的に目を動かさない限り、当領域に視線が移動することはほとんどない。ゆえに Kuiper Belt 領域を活用することで、VR における視覚探索時の Midas Touch が減少すると考えられる。本稿では Kuiper Belt で視線インタラクションを行うためのパラメータ設計を行う実験と、Kuiper Belt を用いた手法の有用性と負担を検討する実験を行った。実験結果より、Kuiper Belt を活用することで視覚探索時の誤入力の減少が可能であることが示された。

1. はじめに

ヒューマンコンピュータインタラクション(HCI)において Head Mounted Display (HMD) を用いた、Virtual Reality (VR) と Mixed Reality (MR) を対象とした入力手法が盛んに研究されている。HMD における主な入力手法は手を用いた入力手法であり、コントローラ[1]やハンドジェスチャ[2]による選択が代表的である。しかし、長期的なハンドインタラクションは Gorilla Arm Syndrome [3]と呼ばれる手の疲労を生むため、頭[4]や足[5]、視線[6]など様々な手を使わない入力方法が検討されてきた。

特に視線入力、視線の高速性や HMD に自然に視線計測装置を搭載できることから、最も有力な入力手法の一つである。しかしモノモーダル視線入力(視線のみを用いた入力手法)は、ユーザのターゲット注視が意図したものか区別できないために誤入力が生じる問題(Midas Touch 問題)[7]を抱えている。この問題を解決するためにマルチモーダル入力[8, 9, 10, 11, 12]やターゲットとラベルの分離手法[13, 14]などが提案されてきた。我々は「視線と頭部方向が成す角度」(以後、視線角度)が極端に大きな領域を活用することで Midas Touch 問題の解決を目指す。

本研究においては視線角度が25°-45°の領域を Kuiper Belt と呼ぶ。人間の目の水平方向の可動範囲は平均で約±45°であることが知られている [15]。一方で人間の視線はほぼ視線角度25°以内に分布し[16, 17]、視線シフト(視線の方向を移動させること)後の視線角度は平均で20°以内である[15]。すなわち人は意図しない限り25°を超える視線角度に目をほとんど固定しない。つまり、25°以上の視線角度(Kuiper Belt)で行われる視線インタラクションは Midas Touch 問題が生じにくいと考えられる。

本稿の目的は VR・MR 環境での視覚探索タスクにおける

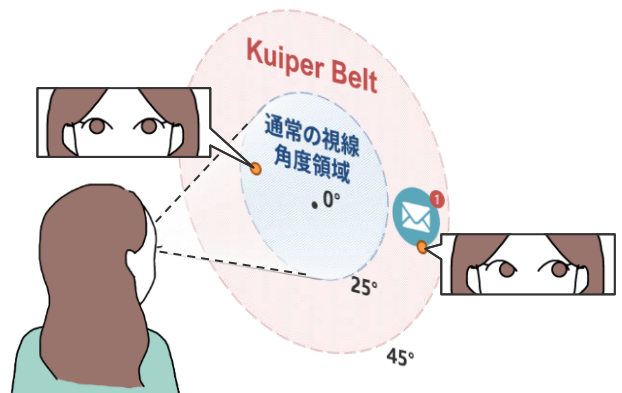


図 1 VR における Kuiper Belt. 通常行われなほど大きな視線シフトを用いることで Midas Touch 問題を軽減する。

Midas Touch 問題を解決することである。そのため Kuiper Belt (図 1) におけるメニューアイテム配置の設計原理を検討し、視線角度が大きい領域内のどこにメニューアイテムを配置すべきか調査する。実験 1 では「極端な視線角度」を活用したメニュー選択手法のデザイン原理を検討するために、Kuiper Belt のどこにメニューアイテムを配置すべきか調査した。実験 2 では Kuiper Belt によるユーザの負荷を考慮しつつ、Midas Touch 問題を解決するために Kuiper Belt をどのように使用すべきか検討した。具体的には他の手法と比較することによって Kuiper Belt を用いたメニューアイテム選択手法の有用性と負荷を計測した。

本研究の貢献を下記に要約する。

- 視線角度が大きい領域である Kuiper Belt のどこにメニューを配置すべきか、という設計原理を検討した。
- Kuiper Belt を用いたメニューアイテム選択手法の有用性をユーザビリティや負荷の側面から検討した。
- Kuiper Belt を用いた視線インタフェースが Midas Touch を減少させることを確認した。

^{†1} 北海道大学

a) helpchoihelp@gmail.com

b) sakamoto@ist.hokudai.ac.jp

c) tono@ist.hokudai.ac.jp

2. 関連研究と本研究の貢献

2.1 Midas Touch 問題を解決する手法

2.1.1 視線と他のモダリティを組み合わせた入力

従来研究では Midas Touch 問題を解決する方法として、視線と他のモダリティを組み合わせる方法が検討されてきた。例えば、視線をターゲットへのポインティングにのみ用い決定操作を他のモダリティが担うことで、意図しない入力を回避することが出来る。他のモダリティとしてマウスクリック[8]やフットジェスチャ[9]など様々なものが検討されてきている。VR・MR 環境においても視線と他の入力を組み合わせた手法が提案されており[10, 11], 特に視線と頭部動作を組み合わせた手法が多数提案されている[11, 12]. 目と頭の動きを組み合わせた入力手法は手を使わないうえ、目と頭の動きの両方を HMD で容易に追跡できるため、VR・MR に適した手法だといえる。

2.1.2 滞留時間を用いた選択手法

モノモーダル視線入力において最も一般的なターゲット選択手法は、視線を一定時間ターゲット上に滞留させることによる選択手法である。この手法は滞留時間を 150 ms に設定するとマウスよりも高速な入力が可能である[18]。一方で短すぎる滞留時間は誤選択 (Midas Touch) を頻発させるため、滞留時間は 450 ms から 1000 ms の間の値に設定されることが一般的である[19]。このように滞留時間を長くすることで Midas Touch を解決することが可能だが、代わりにタスク完了時間が長くなってしまう。

2.1.3 ターゲットとラベルの分離

一般的な研究の実験タスクではターゲットが明確に強調表示されているか、キーボードのようにターゲットが特定の位置に固定されている。しかし実用的で複雑なタスクの場合、ユーザは様々なオブジェクトの中から位置が不明なターゲットオブジェクトを視覚的に検索する必要がある (例: GUI 操作)。このようなタスクを視覚探索 (Visual Search) タスクと呼ぶ。Zhang らは複雑な視覚探索が必要なタスクでは Midas Touch を十分に減らすために必要な滞留時間が長くなることを確認した[20]。Zhang らの実験タスクは、中央にラベルが書かれた 7 つの候補ターゲットから、指定されたラベルを持つターゲットを選択することである。実験の結果、滞留時間が 1100 ms (一般的な滞留時間よりも長い[19]) のとき、高難度の視覚探索タスクのエラー率は 16.9 %であった。ゆえに視覚探索の難易度が高い場合、長い滞留時間の設定のみでは Midas Touch 問題を解決することはできない。

Zhang らの実験タスクで高いエラー率が記録された理由の一つに、ターゲット内にラベルが書かれていることが挙げられる。Penkar らはターゲットとラベルを分離することによって Midas Touch を減らすことが可能であり、かつ短い滞留時間 (200 ms) を用いても Midas Touch が生じない

ことを確認した[13]。このターゲットとラベルの分離を視線入力に活用した事例として Lutteroth らの Actigaze [14]が挙げられる。Actigaze は視線のみでハイパーテキストのリンクを選択する手法である。この手法はハイパーリンクを含んだ文章 (ラベル) と選択ボタン (ターゲット) を分離し、選択するハイパーテキストの決定とリンクのクリックを離散的に行うことでハイパーリンクを選択する。そのため、所与のハイパーリンクを探す (視覚探索) 最中に Midas Touch が生じない。Actigaze の滞留時間は 200 ms と非常に短い値であったが、4 %以下の低いエラー率を達成した。ゆえにターゲットとラベルの分離は視覚探索中の Midas Touch 問題を解決する有効な方法だといえる。我々はこの考えを Kuiper Belt インタフェースの設計原理に用いる。

2.2 人の視線の分布と特徴

日常生活での視線と頭部方向が成す角度 (視線角度) は基本的に 25°以内に収まる。25°以内の視線角度は人間の目にとって快適な領域であり、自然な目の動きでこの角度外に移動することはほとんどない。Hu らは VR シーン視聴時、98.7%の視線データが中央から 17.5°の位置に分布していることを報告し[16]、Foulshama らは歩行中の人の視線データのほとんどが 25°以内に分布することを報告した[17]。ただし、人間の目の最大水平可動範囲は約 45°である[15]。

Stahl らは、目の離心率が大きくなるほどに眼球運動学 (Ocular Kinematics) が悪化するために、極端な視線角度が用いられないと仮定した[15]。例えば、サッケード着地点の離心率が大きくなるほどサッケード精度は低くなり[21]、また 30°を超える視線角度に目を固定し続けると終末位眼振 (振幅 0.2°-2.5°の眼球の揺れ) が健常者の 50 %に生じる[22]。加えて視線角度が大きくなるほどアイトラッカの精度は悪化し、視線インタラクションに必要なターゲットサイズは大きくなる[23]。ゆえに、30°を超える視線角度の視線特徴は通常の視線角度 (< 25°) の視線特徴と異なる。本稿では極端な視線角度における視線インタラクションの特徴を理解し、VR 環境における視線インタラクションの設計原理の発見を目的としている。

2.3 VR・MR における視線インタラクション領域

VR・MR では、選択可能なターゲットは通常 (1) HMD, (2) 周辺情報, (3) 三次元の座標やオブジェクト, に固定されている[24]。視線ポインティング手法の多くは固定されたディスプレイとのインタラクションを前提としているため、周辺情報に固定されたターゲット (つまり 2 と 3) を対象としている。一方で HMD に固定されたターゲットを選択する視線ポインティング手法もわずかではあるが存在する。これらの手法[25, 26, 27, 28]におけるターゲットはユーザの HMD に固定され、ユーザの Field of View (FOV) 内の特定の場所に常に表示される。そのため、ユーザは即



図 2 Kuiper Belt の定義領域.

座にターゲットを見ることが可能である。しかし、既存の HMD にターゲットを固定する手法ではターゲットが頭部方向に対して 20° 以下の位置に固定されている ([25]では 18.5° 未満, [26]は 8° , [27]は 20° 未満, [28]は 20° .)。さらにターゲット自体の大きさも考慮すると、選択に必要な視線移動はより小さくなる。したがって人間の自然な視線角度は 25° 以内であるため、これらの手法は自然な視線移動に伴って Midas Touch が生じることがある [27]。一方で人間の目の最大可動範囲は約 45° である。ゆえに、視線角度が 25° - 45° の領域を利用することで Midas Touch 問題を解決することができると考えた。

2.4 本研究の貢献：Kuiper Belt 領域を活用した選択操作

本稿では、極端な視線角度の領域である Kuiper Belt を活用することによって誤選択 (Midas Touch) を減らすことを目指す。我々は Kuiper Belt を視線角度 25° - 45° の領域と定義する。なぜなら、基本的に視線角度が 25° を超えることはほとんど無く [16, 17]、かつ目の最大可動範囲は約 45° である [15] ためである。この領域における視線インタラクションはほとんど検討されていないが、視線インタラクション研究において有望な研究分野だと考えられる。Saidi らは、頭部正面との角度が Microsoft HoloLens 1 の FOV (垂直方向に 17.5°) から 30° 離れた下方 (約 38.75°) に存在するスマートフォンを、頭を動かさずに快適に見ることが出来ることを確認した [29]。この研究は視線インタフェースに関する研究ではないが、視線角度が大きい領域における視線インタラクションが有用である可能性を示唆している。

本研究では、Kuiper Belt 領域での選択操作が Midas Touch を低減させるかどうかを調査する 2 つの実験を行う。実験 1 では Kuiper Belt のデザインスペースの検討を行う。具体的には、Kuiper Belt 内のメニューアイテムをどこ (距離、方向) に配置すべきか検討する。次に、実験 2 で Kuiper Belt が視覚探索における Midas Touch やユーザの負担 (生理的・心理的な作業負担) をどの程度減少するか調査する。実験 2 では Kuiper Belt を用いたメニュー選択手法と通常の視線角度領域 ($< 25^\circ$) を用いたメニュー選択手法、ベースライン手法の 3 つを比較する。

3. 実験 1

Kuiper Belt 内に配置されたメニューアイテムと視線インタラクションを行う際の適切なターゲット配置を検討することを目的として、ユーザ実験を行った。この実験は COVID-19 の感染拡大前に行われた。

3.1 実験参加者と使用機器

実験参加者として 10 名 (女性 1 名、平均年齢 22.7 歳、標準偏差 1.4 歳) が実験に参加した。全実験参加者の視力は正常範囲内であり、かつアイトラッキングを用いたユーザビリティ実験の参加経験があった。また本実験は極端な視線角度に視線を向ける必要があるため、眼鏡をかけている場合は視線が眼鏡のフレームに妨げられてアイトラッキングが失敗する。ゆえに眼鏡を使用している人は実験に参加しなかった。ただし、5 人はコンタクトレンズを使用していた。実験報酬は 1000 円分の Amazon ギフトカードであった。実験時間は約 30 分であった。

本実験は 2.60Ghz の Intel Core i9-9750H の CPU と NVIDIA GeForce RTX 2070 を搭載したパソコンで行った。実験に用いたソフトウェアは Unity ver. 2018.3.0f2 で作成した。HMD は HTC VIVE Pro Eye を用いた。HTC VIVE PRO Eye の FOV は水平方向に 100° 、垂直方向に 110° であり、搭載されているアイトラッカは 120 Hz のサンプリングレートであった。ただし、HMD のフレームレートが 90 Hz であったため視線データは 90 Hz で収集された。

3.2 実験デザイン

実験は参加者内実験計画を用いて行った。独立変数は 2 つ存在し (図 3a)、それぞれ以下のように設定されている。

- メニューアイテムの距離 (iDistance) : 12, 22, 32, 37, 42°
- メニューアイテムの方向 (iDirection) : 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315°

実験参加者はそれぞれの iDistance ごとに 3 回ずつ同じ試行を行った。つまり iDistance の値は 5 つであるため、実験参加者は全部で 15 セッション行った。セッションはそれぞれ異なる iDirection に応じたタスクで構成されている。iDistance はラテン方格法を用いた順で、iDirection はセッションごとにランダムに提示された。実験参加者はセッションの合間に自由に休憩することが出来た。ゆえに実験参加者は $5 \text{ iDistance} \times 3 \text{ 回} \times 8 \text{ iDirection} = 120$ 回のメニューアイ

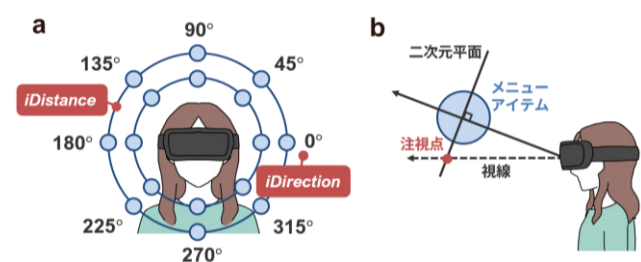


図 3 (a) 独立変数. (b) 注視点の定義.

テム選択を行った。実験参加者は 10 名であるため、合計 1,200 データが収集された。

Kuiper Belt で安定した選択操作に必要なメニューアイテムの大きさを調査するために、ターゲット選択時の視線データを収集した。基本的に視線角度が大きくなるほど視線の精度は悪化し、必要なメニューアイテムサイズも大きくなる[23]。本稿では安定した選択操作に必要なメニューアイテムの大きさを、75%の注視点のうち90%の視線データを包含する球直径と定義した。

3.3 実験手順

実験参加者が実験室に到着後、椅子に座らせ、実験の概要およびタスクの内容を説明した。その後 HMD を装着させ、HTC VIVE Pro Eye で提供されているアイトラッカの 5 点キャリブレーションを行った。そして実験参加者が実験タスクの挙動を理解するまで、実験タスクからパラメータを変更したタスクを練習として行わせた。

実験タスクは HMD に固定されたメニューアイテムを繰り返し選択し続けるタスクである。実験タスクはまず、頭部正面に生成された半径 1.0° (判定領域は半径 1.5°) の白色の球状メニューアイテムを視線滞留によって選択する (滞留時間は 400 ms)。選択後、頭部正面のメニューアイテムが消え、それと同時に新しいメニューアイテムが生成される。頭部正面のメニューアイテムが存在していた位置には新しいメニューアイテムの方向を指す矢印が表示される。新しいメニューアイテムは半径 1.0° の白色の球であり、HMD から 2.0 m 離れた位置に配置されている。実験参加者がこのメニューアイテムの判定領域を注視すると、フィードバックとしてメニューアイテムが白から赤に変わり、ターゲットの周囲に現在の滞留時間に応じた円形スライダーのフィードバックが描かれた (図 4)。実験参加者は出来る限り速く、かつ正確にメニューアイテムを注視するよう指示された。メニューアイテムの判定領域は半径 7.0° の球であり、視線が判定領域に 1 秒間滞留 (滞留時間は 1000 ms) した (選択成功) か、滞留出来ずに 5 秒間経過した (選択失敗) ときにメニューアイテムは消え、再度頭部正面にメニューアイテムが生成された。このメニューアイテム選択を繰り返すことが実験タスクである。

実験参加者は合計 15 セッション行い、iDistance ごとに 3 回同じ試行を繰り返した。3 セッション完了後、実験参加者は生理快適度 (Physical Comfort) と心理快適度 (Mental Comfort) を計測するアンケートに回答した。このアンケートは iDistance (5 回) ごとに繰り返し行った。全 15 回のセッションを終えた後、実験参加者は研究全体に関するアンケートに答えた。

3.4 データ収集と前処理

視線データとして視線ベクトルが記録された。また、以

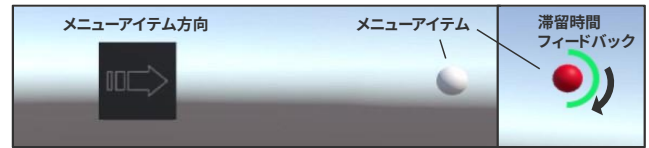


図 4 実験セットアップとフィードバック。

下の 2 つの方法でデータを抽出した[30]。1) 選択に成功した場合、注視データの最初の 200 ms を除いた 800 ms の視線データを抽出した。2) 選択に失敗した場合、記録していた 5 秒間のうち最もメニューアイテムに接近した 800 ms の視線データを抽出した。後者の処理は全体の 7.7%の注視データに対して行われた。また注視時に、瞬きや不十分なアイトラッキングによって視線データが得られないことがある。これが 800 ms のうち 100 ms 以上含まれていた場合、その注視データを分析から除外した。この処理によって 1.1%の注視データが除外された。最終的に分析に用いたデータセットには 1,178 の注視データが含まれていた。視線ベクトルは、[31]を参考に HMD とメニューアイテム中心を結ぶ直線に垂直な 2 次元平面に転写された (図 3b)。

生理および心理快適度に関するアンケートは Xu らのアンケート[5]を参考にしており、ユーザの生理および心理の快適度が iDistance と iDirection の組み合わせごとにどう変化するか調査するために行った。アンケートは 1~5 の五段階尺度 (1: タスク後に疲労を強く感じた, 5: タスク後に疲労を全く感じなかった) が用いられた。

3.5 結果

それぞれの従属変数 (エラー率, 生理快適度, 心理快適度) に対してノンパラメトリックな分散分析手法である整列ランク変換 (ART) [32]を行い、混合モデル REML を用いてデータを評価した。多重比較にはウィルコクソンの符号順位検定を用い、Holm 法による補正を用いた。

3.5.1 エラー率, 生理快適度, 心理快適度

エラー率, 生理快適度, 心理快適度は iDistance と iDirection に有意差が確認され、さらに一部 (エラー率, iDistance 22° - 32°) を除いた iDistance の全ての組み合わせに対して、事後検定にて有意差が確認された。そして 0° - 45° , 0° - 90° , 0° - 135° , 45° - 270° , 45° - 315° , 90° - 180° , 90° - 225° , 90° - 270° , 90° - 315° , 135° - 270° , 135° - 315° の iDirection の組み合わせに対して、事後検定にて有意差が確認された。結果の概要を表 1 に、エラー率・生理快適度・心理快適度の iDistance と iDirection ごとの値を図 5 に示す。

3.5.2 エラー率

メニューアイテムの距離 (iDistance), メニューアイテムの方向 (iDirection) を独立変数とし、エラー率を従属変数として分析を行った。エラー率に対して iDistance ($F_{4,1151}=165.36, p<.01$), iDirection ($F_{7,1151}=31.23, p<.01$) に有意な差が確認された。さらに 1 次の交互作用として

iDistance×iDirection ($F_{28,1151}=11.59, p<.01$) が確認された。図 5a にエラー率の iDistance と iDirection ごとの値を示す。

3.5.3 生理快適度

メニューアイテムの距離 (iDistance), メニューアイテムの方向 (iDirection) を独立変数とし, 生理快適度を従属変数として分析を行った。生理快適度に対して iDistance ($F_{4,351}=111.94, p<.01$), iDirection ($F_{7,351}=20.18, p<.01$) に有意な差が確認された。さらに 1 次の交互作用として iDistance×iDirection ($F_{28,351}=2.84, p<.01$) が確認された。図 5b に生理快適度の iDistance と iDirection ごとの値を示す。

3.5.4 心理快適度

メニューアイテムの距離 (iDistance), メニューアイテムの方向 (iDirection) を独立変数とし, 心理快適度を従属変数として分析を行った。心理快適度に対して iDistance ($F_{4,351}=59.95, p<.01$), iDirection ($F_{7,351}=10.77, p<.01$) に有意な差が確認された。さらに 1 次の交互作用として iDistance×iDirection ($F_{28,351}=2.11, p<.01$) が確認された。図 5c に心理快適度の iDistance と iDirection ごとの値を示す。

表 1 iDistance と iDirection ごとのエラー率, 生理快適度, 心理快適度。iDirection ごとの値は iDistance=32°, 37°, 42° の平均である。

	エラー率	生理快適度	心理快適度
iDistance			
12°	0.0 %	4.96	4.98
22°	0.8 %	4.85	4.89
32°	7.5 %	4.43	4.30
37°	10.0 %	3.99	4.21
42°	20.0 %	3.41	3.58
iDirection			
0°	4.4 %	4.20	4.30
45°	11.3 %	3.65	3.77
90°	28.9 %	3.05	3.23
135°	17.8 %	3.50	3.67
180°	4.4 %	4.10	4.27
225°	11.1 %	4.25	4.27
270°	11.1 %	4.40	4.37
315°	8.9 %	4.20	4.37

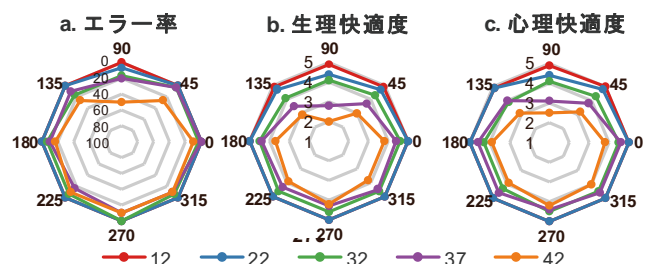


図 5 iDirection ごとの (a) エラー率, (b) 生理快適度, (c) 心理快適度。

3.5.5 Kuiper Belt における安定した選択操作に必要なメニューアイテムの大きさ

メニューアイテムの iDistance が大きくなるほど, 視線精度の悪化によってメニューアイテム選択のエラー率が高くなる。ゆえに Kuiper Belt で通常の視線角度と同じエラー率を維持しつつ安定した選択操作を実現するためには, メニューアイテムをより大きくする必要がある。そのため Kuiper Belt で安定した選択操作を達成するために必要な球直径を注視点の包含率から計算した (表 2)。このパラメータは実験 2 で用いた。

表 2 iDistance ごとの, 安定した選択操作のために推奨されるメニューアイテム (球) の直径 (°)。

	包含率			
	25%	50%	75%	90%
iDistance				
12°	1.40	2.33	3.72	5.20
22°	2.58	3.89	5.84	7.82
32°	2.90	4.83	7.45	11.68
37°	3.09	5.25	8.54	12.02
42°	4.15	7.17	11.12	16.27

3.6 実験 1 のまとめ

iDistance=32°, 37°のエラー率は 10 %以下だった。一方, iDistance=37°では全体のエラー率が 20 %となり, 選択が困難な方向が存在することから, Kuiper Belt におけるメニューアイテム配置領域の候補は iDistance=32°, 37°である。また, iDistance が大きくなるほどエラー率, 生理快適度, 心理快適度の指標は悪化した。特に上方向のメニューアイテム選択負荷は大きく, iDistance=42°かつ iDirection=90°のときエラー率は 50 %であった。

iDistance が大きくなるほど安定した選択操作に必要なメニューアイテムは大きくなった。この結果は以前の研究結果[23]と一致している。ゆえに Kuiper Belt で安定した選択操作を行うためには, 通常の視線角度に配置する場合よりメニューアイテムを大きくする必要がある。

実験結果より iDistance が大きくなるほどエラー率, 生理快適度, 心理快適度の指標は悪化した。これは, メニューアイテムの位置が人間の眼球可動域の限界に近く, 眼球を固定するための努力が必要になるためだと考えられる。特にメニューアイテムの配置が上向き (上, 右上, 左上) になるほど指標の悪化は顕著であった。これは, 上方向の方が下方向よりも目の可動域が狭いことに起因すると考えられる。ゆえに, メニューアイテムは横向きか下向きに配置するのが好ましい。結果として, iDirection=45°, 90°, 135°のとき iDistance=32°, 37°が, iDirection=180°-360°のとき iDistance=32°, 37°, 42°が好ましいインタラクション領域だといえる。

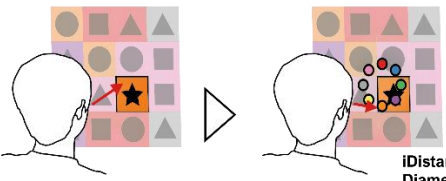
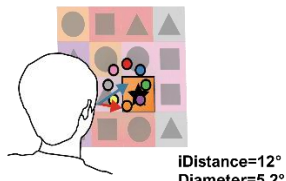
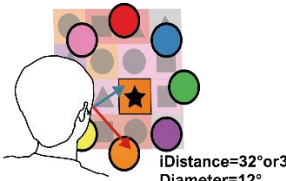
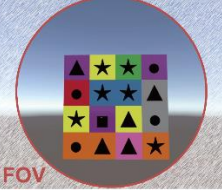
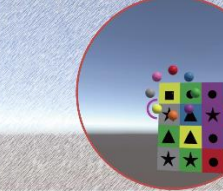
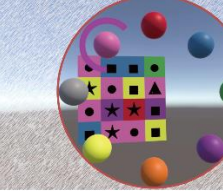
	Two-step Selection (2SS)	Head-Gaze (HG)	Head-Gaze with Kuiper Belt (KB)
Method	1. 視線でパネル選択 2. 視線でメニューアイテム選択  <i>iDistance</i> =12° Diameter=5.2°	頭部方向でパネル選択し、 視線でメニューアイテム選択  <i>iDistance</i> =12° Diameter=5.2°	頭部方向でパネル選択し、 視線でメニューアイテム選択  <i>iDistance</i> =32°or37° Diameter=12°
Camera View	 FOV		

図 6 3つの手法の概要と、対応する FOV. カメラビューの赤い円が FOV を表している.

4. 実験 2

Midas Touch が頻発する視覚探索時のメニューアイテム選択タスクにおいて、Kuiper Belt が Midas Touch 問題の解決に有効であるか調査した. 本実験では、Kuiper Belt を用いたメニュー選択手法と他の 2 つの手法(Two-step selection, Head-gaze)を比較した. 実験の使用機器は実験 1 と共通である. また本実験は 2021 年の 1, 2 月に行った.

4.1 実験参加者

19 名の実験参加者を募ったが、1 名はキャリブレーションのエラーで除外した. このため実験参加者として 18 名(女性 3 名, 平均年齢 22.7 歳, 標準偏差 1.7 歳)が実験に参加した. 全ての実験参加者は正常な視力の範囲内であり、1 人のみアイトラッキングを用いた経験があった. また実験 1 と同様の理由で、実験参加者は全員眼鏡を着用していなかった. 実験参加者は全員実験 1 を経験していなかった. 実験報酬は 1000 円分の Amazon ギフトカードであった. 実験時間は約 60 分であった.

4.2 比較手法

Two-step selection (2SS)と Head-gaze (HG), Head-gaze with Kuiper Belt (KB)の比較を行った. 図 6 にそれぞれの手法の概観と主観的な光景を示す. 本実験のタスクは視覚探索タスクである. 具体的にはプレートの中からターゲットパネルを探索し、メニューアイテムを選択するタスクである. メニューアイテムは実験 1 の *iDirection* と同じ 8 方向に配置された.

4.2.1 Two-step selection method (2SS)

2SS はベースラインとなる視線メニュー選択手法である. 2SS による選択は以下の二段階の操作で構成される.

1. ターゲットパネルを X ms (X は独立変数の値) の間注視することで選択する.
2. ターゲットパネル選択後、メニューアイテムがユーザの視線の先に 3D 空間に固定された状態で表示される.

このメニューアイテムを X ms (X は独立変数の値) の間注視することで選択する.

ターゲットパネルとメニューアイテムは滞留時間を用いた選択手法で選択される. 滞留時間は独立変数であり、ターゲットパネルとメニューアイテムの選択に必要な滞留時間は同じである. メニューアイテムは *iDistance* = 12°に配置されている. メニューアイテムの直径は 5.2°である. この直径は *iDistance* = 12°における安定した選択操作に必要なメニューアイテムの直径(表 2)である.

4.2.2 Head-gaze method (HG)

我々はメニューアイテムを通常の視線角度領域に配置した手法 HG と、メニューアイテムを Kuiper Belt に配置した手法 KB の 2 つの Head-Gaze 手法を設計した.

HG はターゲットパネルとメニューアイテムの選択を同時に行う手法である. HG による選択は以下の二段階の操作で構成される.

1. ユーザは自身の頭部をターゲットパネルに向ける.
2. ターゲットパネルに頭部を向けたまま、メニューアイテムを X ms (X は独立変数の値) の間注視することで選択する.

2SS と異なり、HG のターゲットパネル選択は頭部方向によって行われる. HG のメニューアイテムは HMD に固定されており、かつ自然な視線角度である *iDistance* = 12°に配置されている. メニューアイテムの直径は 2SS と同様に 5.2°である.

4.2.3 Head-gaze with Kuiper Belt (KB)

KB におけるメニューアイテムの選択方法は HG と同じである. しかし、メニューアイテムの配置位置と大きさは異なる. KB のメニューアイテムは実験 1 の結果を参考に、上部 (*iDirection* = 45°, 90°, 135°) は *iDistance* = 32°, そのほかの方向 (*iDirection* = 0°, 180°, 225°, 270°, 315°) は *iDistance* = 37°に配置されている. メニューアイテムの直径は 12°である. この直径は *iDistance* = 37°における安定した選択操作に必要なメニューアイテムの直径(表 2)であ

る。ゆえに、メニューアイテムは 2SS や HG よりも KB の方が大きい、視線選択の難易度は KB とその他で同じだといえる。

4.3 実験デザイン

実験は参加者内実験計画で行った。独立変数は 2 つ存在し、それぞれ以下のように設定されている。

- 手法 (Method) : 2SS, HG, KB
- 滞留時間 (Dwell Time : DT) : 200, 400, 600 ms

メニューアイテムの数は 8 であり、実験 1 の iDirection と同様の方向に配置されている。メニューアイテムの色は [33] から選ばれた色であり、8 方向ごと (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315°) にそれぞれ 8 色 (緑, 青, 赤, ピンク, 灰, 黄, 橙, 紫) の異なる色が割り当てられている。

Method はラテン方格法を考慮した順番で提示された。実験参加者は Method ごとに DT $\times$ 2 セッション $\times$ 16 試行 (実験 1 の 8 方向 $\times$ 2) の選択タスクを行った。DT の提示順はラテン方格法に準じている。ゆえに実験参加者は 3 Method $\times$ 3 DT $\times$ 2 セッション $\times$ 16 試行 (実験 1 の 8 方向 $\times$ 2) = 288 回のメニューアイテム選択を行った。また実験参加者は 18 名であるため、合計 5,184 データが収集された。

従属変数は試行時間とエラー率である。間違っただターゲットパネルかメニューアイテムが選択された場合、エラーと扱った。実験参加者は Method ごとに、ユーザビリティと精神的負荷を計測することを目的とした System Usability Scale (SUS) [34] と NASA Task Load Index (NASA-TLX) [35] のアンケートに回答した。

4.4 実験手順

実験開始前に使用機器 (実験 1 と共通) や実験監督者の手指を消毒した。実験参加者が実験室に到着後、椅子に座らせ、実験の概要およびタスクの内容を説明した。その後 HMD を装着させ、HTC VIVE Pro Eye で提供されているアイトラッカの 5 点キャリブレーションを行った。そして実験参加者が実験タスクの挙動を理解するまで、実験タスクからパラメータを変更したタスクを練習として行わせた。

実験タスクは視覚探索タスクであり、VR 環境に存在するパネル (ターゲット) と色 (メニューアイテム) を探索し、視線インタフェースで選択するタスクである。VR 環境には、実験参加者から 2.0 m 離れた位置に 16 枚のパネルで構成されたプレートが存在しており、プレートの大きさは縦横 50.0° であった。実験参加者はプレートの中からパネルと、メニューの中からそのパネルと同じ色を選択することが求められた。パネルは中央に記号 (円, 四角, 三角, 星のいずれか) が描かれており、メニューアイテムの色からランダムに選ばれた色をしていた。ターゲットパネルは他のパネルに描かれていない記号を有しており、その他の 3 つの記号は残りの 15 枚のパネルに均等に割り振られてい

た。本実験のタスクはプレートの中で唯一描かれた記号を有したパネルの選択と、3D 環境に配置された 8 つのメニューアイテムから対象パネルと同じ色のメニューアイテムを選択することである。2SS のメニューはパネル選択後に表示され、HG と KB のメニューは常に表示されていた。メニューは HMD から 1.8 m の位置に配置されていた。選択が行われるとプレートは再生成された。ただし間違っただ選択が行われると 500 ms のポーズが生じ、その後プレートが再生成された。さらに、選択の正誤に応じた音声フィードバックが与えられた。また、プレート再生成に伴う状況認知時に選択が行われないよう、プレート生成後の 200 ms は滞留時間を含めなかった。現在選択しているパネルはハイライトされ、滞留時間のフィードバックとして実験 1 と同様の円形スライダーがメニューアイテムの周囲に描かれた。HG か KB を使用している場合は頭部方向を示す頭部カーソルが、2SS を使用している場合は視線カーソルが表示された。これらのカーソルは直径 1.0° である。視線データは Outlier filter [36] with a triangular kernel filter [37] によって平滑化された。

実験参加者は全部で 18 セッション行った。1 セッションは 16 試行 (実験 1 の iDirection 8×2) で構成されている。つまり実験参加者は Method $\times$ DT の組み合わせを 2 回経験する。実験参加者は Method ごとに 3 つの DT を経験し、その後 SUS と NASA-TLX に回答した。この手順を 3 つの Method に対して繰り返す。

4.5 結果

それぞれの従属変数 (試行時間, エラー率) に対してノンパラメトリックな分散分析手法である整列ランク変換 (ART) [32] を行い、混合モデル REML を用いてデータを評価した。多重比較にはウィルコクソンの符号順位検定を用い、Holm 法による補正を用いた。SUS と NASA-TLX によって得られた値はフリードマン検定とウィルコクソンの符号順位検定を用い、Holm 法による補正を用いた。

4.5.1 試行時間

手法 (Method)、滞留時間 (DT) を独立変数とし、試行時間を従属変数として分析を行った。試行時間に対して Method ($F_{2,4032.4}=9.70$, $p<.01$), DT ($F_{2,4032.5}=75.04$, $p<.01$) に有意な差が確認された。さらに 1 次の交互作用として Method $\times$ DT ($F_{4,4032.0}=11.61$, $p<.01$) が確認された。また事後検定より、DT=600 ms の時に 2SS と KB ($Z=3.57$, $p<.01$) に有意差が確認された。図 7 と表 3 に DT と Method ごとの試行時間を示す。

4.5.2 エラー率

手法 (Method)、滞留時間 (DT) を独立変数とし、エラー率を従属変数として分析を行った。エラー率に対して Method ($F_{2,5158}=2321.23$, $p<.01$), DT ($F_{2,5158}=2519.50$, $p<.01$) に有意な差が確認された。さらに 1 次の交互作用として

Method×DT ($F_{4,5158}=571.56, p<.01$) が確認された。また事後検定より、DT=200 ms の時に 2SS と HG ($Z = 18.11, p <.01$)、2SS と KB ($Z=21.52, p<.01$)、HG と KB ($Z=9.14, p<.01$) に対して、DT=400 ms の時に 2SS と HG ($Z = 11.12, p <.01$)、2SS と KB ($Z = 12.86, p <.01$)、HG と KB ($Z = 3.58, p<.01$) に対して、DT=600 ms の時に 2SS と HG ($Z = 6.58, p<.01$)、2SS と KB ($Z=4.61, p<.01$)、HG と KB ($Z = 2.33, p <.05$) に対して有意差が確認された。図 7 と表 3 に DT と Method ごとのエラー率を示す。

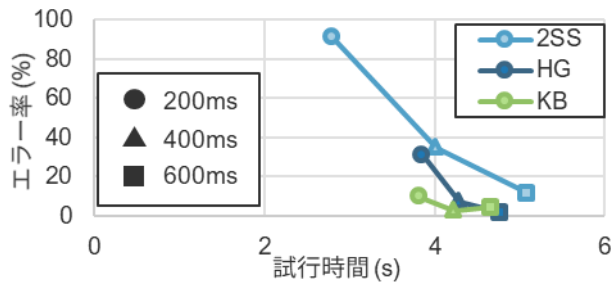


図 7 DT ごとの試行時間（中央値）×エラー率。

表 3 Method×DT の試行時間（中央値）とエラー率。

		滞留時間 (DT)		
		200 ms	400 ms	600 ms
2SS	試行時間	2.79 s	4.01 s	5.05 s
	エラー率	91.15 %	34.90 %	11.81 %
HG	試行時間	3.85 s	4.29 s	4.76 s
	エラー率	31.25 %	7.47 %	1.91 %
KB	試行時間	3.81 s	4.23 s	4.67 s
	エラー率	10.07 %	2.78 %	4.34 %

4.5.3 System Usability Scale (SUS)

2SS, HG, KB の平均 SUS スコアはそれぞれ 49.44, 69.31, 71.94 であった（高いほど良い）。フリードマン検定より、手法 ($\chi^2_{2,N=18}=17.77, p<.01$) に有意差が確認された。また事後検定より、2SS と HG ($Z = -3.34, p<.01$)、2SS と KB ($Z = -3.60, p <.01$) に有意差が確認された（図 8a）。

4.5.4 NASA Task Load Index (NASA-TLX)

2SS, HG, KB の総合的ワークロードスコアはそれぞれ 62.85, 46.28, 37.91 であった（低い方が良い）。NASA-TLX によって得られた 6 つの項目に対するスコアと総合的ワークロードスコアに対してフリードマン検定を用いて分析した結果、Method に対して精神的要求 ($\chi^2_{2,N=18}=16.60, p<.01$)、時間的切迫感 ($\chi^2_{2,N=18}=23.43, p<.01$)、作業達成度 ($\chi^2_{2,N=18}=23.91, p<.01$)、努力 ($\chi^2_{2,N=18}=10.64, p<.01$)、不満 ($\chi^2_{2,N=18}=9.76, p<.01$)、総合的ワークロード ($\chi^2_{2,N=18}=12.76, p<.01$) に有意な差が確認された。また事後検定より総合的ワークロードに対して 2SS と HG ($Z = 2.85, p <.01$)、2SS と KB ($Z = 3.34, p <.01$) に有意差が確認された（図 8b）。

4.6 実験 2 のまとめ

KB は視覚探索タスクにおいてエラー（Midas Touch）が最も少ない手法であった。2SS は最も試行時間の短い手法であったが、エラー率は非常に大きかった（91.15 % @200 ms, 34.90 % @400 ms）。HG は DT=400 ms, 600 ms のときは正確であったが、DT=200 ms のときのエラー率は大きかった（31.25 %）。また、KB, HG, 2SS の順でユーザビリティや精神的負荷の平均スコアが良く、KB と HG は 2SS よりも有意にユーザビリティや精神的負荷の面で優れていた。全体として、Kuiper Belt を用いた手法（KB）は実際の使用に際した改良が必要であるが、研究用のプロトタイプとしては十分に低いエラー率だった。したがって Kuiper Belt は誤入力（Midas Touch）を減らすことができたと言える。

KB は最も正確な手法であり、他の手法よりも時間的切迫感の少ない手法であった。KB は 2SS よりもエラー率、ユーザビリティ、精神的負荷の点で優れていた。加えて、KB は HG よりも DT=200 ms のときのエラー率が有意に低く、NASA-TLX 項目のうち精神的要求、時間的切迫感、作業達成度の項目が有意に優れていた。ゆえに KB は視覚探索タスクにおいて他の 2 手法よりも快適に用いることができる手法だといえる。HG は 2SS よりもエラー率、ユーザビリティ、精神的負荷の点で優れていた。さらに、HG は DT=400 ms までは Midas Touch を減らすことが可能であった。ゆえに HG は 2SS よりも視覚探索タスクに適した手法だといえる。最後に 2SS のエラー率は非常に高く、600 ms を超える滞留時間が必要であった。これは高難度の視覚探索タスクでは必要な滞留時間が長くなるという以前の研究結果と一致している[26]。滞留時間を長くして誤選択を減らすと選択時間が長くなるため、2SS は視覚探索タスクよりも短くて単純な操作に適しているといえる。

5. 議論

我々は Kuiper Belt にメニューアイテムを配置する手法（KB）で Midas Touch 問題を減らすことが出来るかどうか調査するために、2 つの実験を行った。以下に我々の 2 つの実験についてまとめる。

- 実験 1 : Kuiper Belt のどこにメニューアイテムを配置すべきか調査した。その結果、上方向は iDistance=32°, 37°が、それ以外の方向は iDistance=32°, 37°, 42°が好ましいことが明らかとなった。
- 実験 2 : KB は最も正確かつ短い滞留時間（400 ms）でも機能する手法であった。KB の精神的負荷は三つの手法の中で最も低く、特に精神的要求、時間的切迫感、作業達成度が有意に低かった。Kuiper Belt を用いたメニュー選択手法は、通常の視線領域における視線インタフェースと同様の精神的負荷レベルだといえる。

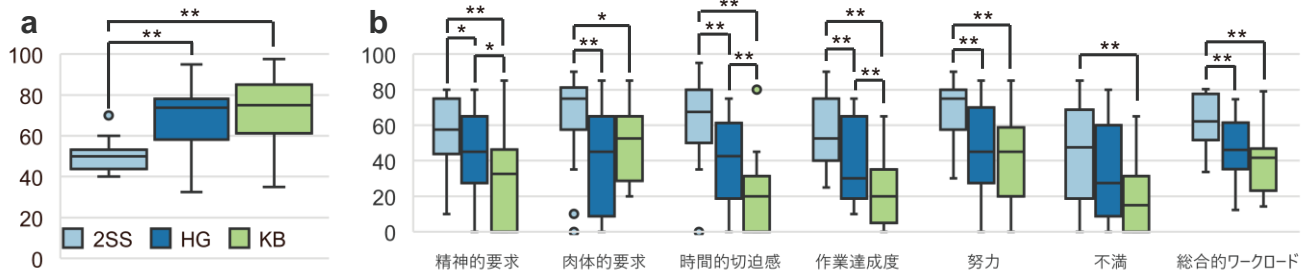


図 8 (a) SUS, (b) NASA-TLX の結果. エラーバーは標準誤差. 有意差は $*p < .05$, $**p < .01$.

実験 2 のエラー率より, KB は視覚探索中の Midas Touch を減らすことが出来ることが示された. また KB における肉体的要求やその他の負荷指標は通常の視線領域のインタフェースと同様の傾向を示した. よって Kuiper Belt を用いたメニュー選択手法は視覚探索タスクに適していると考えられる.

5.1 Kuiper Belt 使用時のユーザ負荷

実験 2 では「極端な視線角度」に対する視線移動に起因するユーザ負荷を調査した. Kuiper Belt を用いた手法がユーザに負担をかける要因として, 極端な視線角度への視線移動が考えられる. そこで極端な視線角度 (KB) と一般的な視線角度 (HG) の領域にメニューアイテムを配置した手法を比較することで, 極端な視線角度がどの程度ユーザに負担をかけるのかを調査した. 実験 2 の結果, NASA-TLX の肉体的要求では, HG と KB のスコアが 2SS のスコアよりも有意に優れており, HG と KB には有意な差がなかった. したがって, Kuiper Belt による肉体的疲労は短期的な使用には問題ないといえる. しかし本研究では Kuiper Belt 手法を長期的に使用した際のユーザ負荷は調査していない. Sidenmark らは平均的なユーザの視線領域範囲外に UI 要素を配置することは可能であるが, ユーザに長期的な負担を与える可能性がある」と指摘した[38]. 実験 2 より, ユーザが Kuiper Belt 領域を使用した視線インタフェースを約 15 分間(実験 2 の 144 タスク)使用できることを確認したが, さらに長時間使用した場合の影響については調査していない. ゆえに長時間の Kuiper Belt 領域の使用がユーザに与える影響を調査するには更なる研究が必要だといえる.

5.2 Kuiper Belt に残された Midas Touch 問題

本実験より, Kuiper Belt は視覚探索中の Midas Touch を減らすことが出来ることが明らかになった. しかし, これで Midas Touch 問題が完全に解決したわけではない. 例えば Kuiper Belt 内でメニューアイテムを探索する場合, 視界探索領域とインタラクション領域が一致し Midas Touch が生じる. この Midas Touch 問題を軽減するためには, Kuiper Belt に配置するメニューやアイテムのデザインを慎重に行う必要がある. 例えばユーザがよく知っているメニューアイテムだけを配置することで, ユーザは Kuiper Belt

上のメニューアイテムを探すことなく選択を完了することができる. そのため, ショートカットのように繰り返し使うアイテムを Kuiper Belt に配置することが好ましい.

5.3 制限

本研究で実装した Kuiper Belt は研究用のプロトタイプであり, 実用面でいくつか制限がある. まず眼鏡着用者は Kuiper Belt 領域を使用できない. なぜなら Kuiper Belt 領域を見つめるときの視線は眼鏡のレンズを超えて眼鏡のフレームに阻まれ, 視線計測が難しいためである. したがって現状の Kuiper Belt 手法の利用は, コンタクトレンズを除いた視覚補助を必要としないユーザに制限される. しかし今後コンタクトレンズ型の MR 装置が開発されればこの問題は解消されると期待される. 第二に Kuiper Belt は汎用的な設計原理ではなく, 全ての視線インタフェースに使用することはできない. 例えばアイタイピング[19]は, Kuiper Belt 上で正確に視線選択するためには通常よりも大きなメニューアイテムが必要であるため, アイタイピングに必要なだけのメニューアイテムを Kuiper Belt に全て配置することは難しい.

6. おわりに

我々は VR 環境での視線入力において Kuiper Belt と呼ばれる「極端な視線角度の領域」にどのようにメニューアイテムを配置するべきか, という設計原理を検討した. 本研究の目的は Kuiper Belt 領域を用いることで視線入力における Midas Touch 問題 (誤入力) を減少させることができるかどうかを調査することであった. 調査にあたっては Kuiper Belt を利用したメニューアイテム選択タスクと視覚探索タスクのユーザビリティと作業負荷を把握するための 2 つの実験を行った. その結果, Kuiper Belt におけるメニューアイテムを配置すべき位置 (実験 1) と VR 環境での Kuiper Belt を利用したメニュー項目選択の有効性 (実験 2) が明らかになり, Kuiper Belt が誤入力 (Midas touch) を低減できることが示された. 実用化に向けては更なる検討が必要であるが, 本研究は Kuiper Belt 領域を用いたメニュー選択の可能性を示すことができたと考えている.

謝辞 本研究は JSPS 科研費 21H03472, 大川情報通信基金, 成和記念財団「研究奨励 B」, 北海道大学アンビシャス博士人材フェローシップの助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Ferran Argelaguet and Carlos Andujar. A survey of 3D object selection techniques for virtual environments. *Computers & Graphics*. vol. 37, issue 3, pp. 121–136 (2013).
- [2] Pranav Mistry and Pattie Maes. 2009. SixthSense: a wearable gestural interface. In *ACM SIGGRAPH ASIA '09*. Article 11, p. 1.
- [3] Juan David Hincapié-Ramos, Xiang Guo, Paymahn Moghadasian, and Pourang Irani. Consumed endurance: a metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proc. CHI '14*. pp. 1063–1072 (2014).
- [4] Kasim Özacar, Juan David Hincapié-Ramos, Kazuki Takashima, Yoshifumi Kitamura, 3D Selection Techniques for Mobile Augmented Reality Head-Mounted Displays, *Interacting with Computers*, vol. 29, issue 4, pp. 579–591 (2017).
- [5] Wenge Xu, Hai-Ning Liang, Yuxuan Zhao, Difeng Yu, and Diego Monteiro. DMove: Directional Motion-based Interaction for Augmented Reality Head-Mounted Displays. In *Proc. CHI '19*. Paper 444, pp. 1–14 (2019).
- [6] Vildan Tanriverdi and Robert J. K. Jacob. Interacting with eye movements in virtual environments. In *Proc. CHI '00*. pp. 265–272 (2000).
- [7] Robert J. K. Jacob. What you look at is what you get: eye movement-based interaction techniques. In *Proc. CHI '90*. pp. 11–18 (1990).
- [8] Shumin Zhai, Carlos Morimoto, and Steven Ihde. Manual and gaze input cascaded (MAGIC) pointing. In *Proc. CHI '99*. pp. 246–253 (1999).
- [9] Vijay Rajanna and Tracy Hammond. GAWSCHL: gaze-augmented, wearable-supplemented computer-human interaction. In *Proc. ETRA '16*. pp. 233–236 (2016).
- [10] Ken Pfeuffer, Benedikt Mayer, Diako Mardanbegi, and Hans Gellersen. Gaze + pinch interaction in virtual reality. In *Proc. SUI '17*. pp. 99–108 (2017).
- [11] Mikko Kytö, Barrett Ens, Thammathip Piumsomboon, Gun A. Lee, and Mark Billinghurst. Pinpointing: Precise Head- and Eye-Based Target Selection for Augmented Reality. In *Proc. CHI '18*. Paper 81, pp. 1–14 (2018).
- [12] Ludwig Sidenmark and Hans Gellersen. Eye&Head: Synergetic Eye and Head Movement for Gaze Pointing and Selection. In *Proc. UIST '19*. pp. 1161–1174 (2019).
- [13] Abdul Moiz Penkar, Christof Lutteroth, and Gerald Weber. Designing for the eye: design parameters for dwell in gaze interaction. In *Proc. OzCHI '12*. pp. 479–488 (2012).
- [14] Christof Lutteroth, Moiz Penkar, and Gerald Weber. Gaze vs. Mouse: A Fast and Accurate Gaze-Only Click Alternative. In *Proc. UIST '15*. pp. 385–394 (2015).
- [15] John S. Stahl. Amplitude of human head movements associated with horizontal saccades. *Experimental brain research*. vol. 126, issue 1, pp. 41–54 (1999).
- [16] Zhiming Hu, Sheng Li, Congyi Zhang, Kangrui Y, Guoping Wang, and Dinesh Manocha. DGaze. CNN-Based Gaze Prediction in Dynamic Scenes. In *IEEE TVCG*. vol. 26, no. 5, pp. 1902–1911 (2020).
- [17] Tom Foulsham, Esther Walker, and Alan Kingstone. The where, what and when of gaze allocation in the lab and the natural environment. *Vision Research*. vol. 51, issue 17, pp. 1920–1931 (2011).
- [18] Linda E. Sibert and Robert J. K. Jacob. Evaluation of eye gaze interaction. In *Proc. CHI '00*. pp. 281–288 (2000).
- [19] Majaranta, Päivi and RiihÄ, Kari-Jouko. Text Entry by Gaze: Utilizing Eye-Tracking. *Text entry systems: Mobility, accessibility, universality*. pp. 175–187 (2007).
- [20] Xinyong Zhang, Pianpian Xu, Qing Zhang, and Hongbin Zha. Speed-accuracy trade-off in dwell-based eye pointing tasks at different cognitive levels. In *Proc. PETMEI '11*. pp. 37–42 (2011).
- [21] Lijing Yao, and C. K. Peck. Saccadic eye movements to visual and auditory targets. *Experimental brain research*, vol. 115, issue 1, pp. 25–34 (1997).
- [22] Richard V Abadi, and Columba J Scallan. Ocular oscillations on eccentric gaze. *Vision research*. vol. 41, issue 22, pp. 2895–2907 (2001).
- [23] Tobii xr sdk. Hardware Accuracy. Retrieved 2021 from <https://vr.tobii.com/sdk/learn/eye-behavior/hardware-accuracy/>
- [24] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Marcus Haupt, and Eliot Solomon. Windows on the world: 2D windows for 3D augmented reality. In *Proc. UIST '93*. pp. 145–155 (1993).
- [25] Yoshio Ishiguro and Jun Rekimoto. Peripheral vision annotation: noninterference information presentation method for mobile augmented reality. In *Proc. AH '11*. Article 8, pp. 1–5 (2011).
- [26] Marcus Tönnis and Gudrun Klinker. Boundary conditions for information visualization with respect to the user's gaze. In *Proc. AH '14*. Article 44, pp. 1–8 (2014).
- [27] Feiyu Lu, Shakiba Davari, Lee Lisle, Yuan Li, and Doug A. Bowman. Glanceable AR: Evaluating Information Access Methods for Head-Worn Augmented Reality. In *2020 IEEE VR*, pp. 930–939 (2020).
- [28] Diako Mardanbegi, Benedikt Mayer, Ken Pfeuffer, Shahram Jalaliniya, Hans Gellersen, and Alexander Perzl. EyeSeeThrough: Unifying Tool Selection and Application in Virtual Environments. In *2019 IEEE VR*, pp. 474–483 (2019).
- [29] Houssein Saidi, Emmanuel Dubois, and Marcos Serrano. HoloBar: Rapid Command Execution for Head-Worn AR Exploiting Around the Field-of-View Interaction. In *Proc. CHI '21*. Article 745, pp. 1–17 (2021).
- [30] Anna Maria Feit, Shane Williams, Arturo Toledo, Ann Paradiso, Harish Kulkarni, Shaun Kane, and Meredith Ringel Morris. Toward Everyday Gaze Input: Accuracy and Precision of Eye Tracking and Implications for Design. In *Proc. CHI '17*. pp. 1118–1130 (2017).
- [31] Difeng Yu, Hai-Ning Liang, Xueshi Lu, Kaixuan Fan, and Barrett Ens. Modeling endpoint distribution of pointing selection tasks in virtual reality environments. *ACM TOG*. vol. 38, issue 6, Article 218, pp. 1–13 (2019).
- [32] Jacob O. Wobbrock, Leah Findlater, Darren Gergle, and James J. Higgins. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proc. CHI '11*. pp. 143–146 (2011).
- [33] COLORBREW 2.0. Retrieved 2021 from <https://colorbrewer2.org/#type=qualitative&scheme=Set1&n=9>
- [34] John Brooke. SUS- A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*. pp. 189–194 (1996).
- [35] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Advances in Psychology*. vol. 52, pp. 139–183 (1988).
- [36] Manu Kumar, Jeff Klingner, Rohan Puranik, Terry Winograd, and Andreas Paepcke. Improving the accuracy of gaze input for interaction. In *Proc. ETRA '08*. pp. 65–68 (2008).
- [37] Jimenez, Jorge, Diego Gutierrez and Pedro Latorre. Gaze-based Interaction for Virtual Environments. *Journal of Universal Computer Science*. vol. 14, no. 19, pp. 3085–3098 (2008).
- [38] Ludwig Sidenmark and Hans Gellersen. Eye, Head and Torso Coordination During Gaze Shifts in Virtual Reality. *ACM TOCHI*. vol. 27, issue 1, Article 4, pp. 1–40 (2019).