

アイトラッカー搭載 VRHMD を寝ながら 使用した場合の視線入力パフォーマンス

阿部 広河^{1,a)} 石川 博規² 真鍋 宏幸^{1,b)}

概要: VR (Virtual Reality) 向け HMD (Head Mounted Display) は、立ちながら、あるいは座りながらのだけでなく、寝ながら使用することが可能である。寝ている姿勢で VRHMD を利用することができれば、障がい等で寝たきりの生活を送る人が快適に VR コンテンツに触れられるようになるだけでなく、VRHMD をスマートフォンのようにどのような姿勢でも使用できる身近なデバイスへと進化させる。VR 用インタラクション手法として期待されている中に視線入力がある。既存の VR 向けインタラクション手法は寝ながらの使用を想定して設計されているわけではないが、視線入力には頭を動かす必要や手を動かす必要がないことにも特徴があり、寝ながらの使用に適している可能性がある。そこで本研究では、VRHMD に搭載されたアイトラッカーを用いて行う視線入力手法に対し、ユーザの姿勢が与える影響についての調査を行った。その結果、VRHMD での視線入力手法は、座った状態と比較して寝ながら使用した場合、そのパフォーマンスは同等あるいは優れていることを確認することができた。

1. はじめに

VR やメタバースなどのコンテンツに対する知名度が上昇している。それに伴い、VR コンテンツに触れるためのデバイスである HMD の普及も進んでおり、VRHMD 製品の一つである Oculus Quest 2 は、2022 年 6 月には 1500 万台を売り上げているという調査結果^{*1}がある。

今後、HMD のユーザが増えることにより、従来ではあまり一般的とは言えない用途で使用するユーザも増えると予想される。具体的には、HMD は様々な姿勢で使用することができるため、寝ながら使用することも一般的な用途に含まれるようになる可能性がある。すでに、VRSNS と呼ばれる VR 空間内でのコミュニケーションを主としたサービスでは、座りながらあるいは寝ながら利用しているユーザが存在しており、頭の動きによって VR 動画の再生位置などを操作する PillowVR という研究 [1] なども存在する。また、ICU などに入院している、体を自由に動かすことができない患者に対して、VRHMD による視覚的な刺激はリラックス効果などがあり有用であることが示されている [2]。このように、寝ている姿勢での VRHMD 利用が注目されつつあり、そのためのインタラクション手法が求め

られている。しかし、現在一般的に用いられている、モーションコントローラを用いた VR 向けインタラクション手法は、立ったあるいは座った姿勢での利用が想定されており、寝ながらでは使いづらいという問題が存在する。一部の VRHMD ではアイトラッカーが搭載されており、VR 向け入力手法の一つに視線入力がある。このアイトラッカーを用いた手法は、ユーザの姿勢によらず利用可能であると考えられ、寝ながら VR 体験を行う際の有力な手段となりえる。そこで本研究では、座った状態と寝た状態における、VRHMD のアイトラッカーを用いた視線入力のパフォーマンスに関する比較調査を行う。

2. 関連研究

2.1 アイトラッキング手法とデバイス製品例

アイトラッキングを行う手法には、サーチコイル法 [3] や EOG 法 [4][5] などの侵襲型、非侵襲型の角膜反射法や強膜反射法 [6] が存在するが、製品として実用化されているものは非侵襲型の IR カメラや赤外線センサーを用いているものがほとんどである。その中には、デスクなどに置いて使用する設置型のデバイスと、メガネのように身体に着用して使用する着用型のデバイスが存在する。前者は Tobii Eye Tracker^{*2}、後者は Pupil Invisible^{*3}や VIVE

¹ 芝浦工業大学

² NTT ドコモ

a) ma22009@shibaura-it.ac.jp

b) manabe@shibaura-it.ac.jp

*1 <https://uploadvr.com/quest-2-sold-almost-15-million-idx/>

*2 Tobii Eye Tracker 5 — Tobii Gaming

<https://gaming.tobii.com/product/eye-tracker-5/>

*3 Pupil Invisible — Pupil Labs

<https://pupil-labs.com/products/invisible/>

Pro Eye*⁴などが挙げられる。

HMD にアイトラッキング機能を組み込んだものがいくつか存在する。前述した VIVE Pro Eye や, Hololens 2*⁵などの製品が例として挙げられる。これらは、設置型のアイトラッカーとは異なり、注視先のディスプレイとアイトラッカーが一体となっている。また、装着型のデバイスであり、ディスプレイと眼球の相対的な位置がズレにくい。そのため、設置型のデバイスと比較してキャリブレーション時の状態を維持しやすいため、キャリブレーションの頻度も減らすことができ、利用の手間も少ない。アイトラッカーを備えた XR デバイスは、他のものと比較して高価であるという問題は存在するが、それが解消できれば視線入力は XR において主流な入力手法となりえる。

2.2 注視型選択手法を用いた視線入力

アイトラッキングデバイスを用いたインタラクション手法の研究は昔から数多く存在している。Thomas ら [7] は、Erica と呼ばれる視線応答インターフェースを備えたコンピューターについて紹介している。Erica では画面上に等間隔で 9 つのメニューボックスが表示されている。その表示されているメニューボックスを、2~3 秒の間注視することにより選択を行う。このような視線のみを入力に用いたデバイスでは、注視により選択を行うことが一般的である。しかしこの手法は、Midas Touch 問題 [8] と呼ばれる、ただ対象物を見ているだけなのか、選択を行うために注視しているのかが判別できない問題が存在する。そこで Pallavi ら [9] は、視線入力のみでこの Midas Touch 問題を解決する DualGaze を提案している。この手法では、“フラグ” と呼ばれる選択確定用の小さなボタンを、現在見ているボタンの横に表示する。このフラグボタンは、本来のボタンの上下左右いずれか一箇所に表示される。この際、視線がボタンに侵入した方向にフラグボタンが表示されるため、ユーザーは現在の視線の移動方向とは逆の方向に切り替えす必要があり、この動作が選択の正確性を向上させている。また、注視型と比較した実験も行っており、入力速度は実験後半になるにつれて注視型より DualGaze の方が早く選択できるようになり、入力精度は全体において DualGaze が優れていると報告している。ほかにも、サッカド運動と呼ばれる、眼球が瞬時に動くような運動を活用し、Midas Touch 問題を解決使用とした手法も存在する。Thammathip らは、視線の動きに完全に追従するレティクル (ER) と、それにゆっくりと追従するレティクル (IR) の二つのレティクルを使用した手法 [10] を提案して

いる。ユーザが選択したい対象を瞬時に見た際、ER は瞬時に対象物へと移動し、IR がそれに追従する形でゆっくりと対象物へと重なる。そして、重なっている状態が一定時間維持されていると対象物が選択される。注視型選択手法には前述したように、注視時間が短い場合は意図しない対象物を注視しないようにユーザー側が意識を向ける必要があり、それがプレッシャーになるという問題と、注視時間が長い場合はユーザーのストレスになるという問題を抱えている。これらの問題を、Thammathip らの手法では視覚的效果により解決している。また、崔らは、VR 向け視線入力手法として Kuiper Belt を提案している [11]。極端な視線角度を用いることで、Midas Touch 問題を解決している。

2.3 マウスの入力と視線入力を同時に用いた手法

前述した Midas Touch 問題を解決するための手段の一つとして、コントローラなどの別の入力ソースを用いた解決方法が存在する。Shumin らは、視線による入力と、マウスなどの手動入力装置を併用した手法である MAGIC (Manual and gaze input cascaded) を提案した [12]。この手法は、視線入力はサッカド運動による大まかなポインティングのみを行い、大まかなポインティングを行った後のポインタの微調整にマウスなどの入力装置を用いるという手法である。MAGIC 法は、純粋なジョイスティックによるポインタの移動を行う手法よりも速い速度でポインティングを行うことができたことが示されている。

2.4 VR コントローラの入力と視線入力を同時に用いた手法

柿沼は、視線に VR コントローラの角度やタッチパッドの入力を組み合わせて、ポインティングを行う手法の実験結果について述べている [13]。視線入力に VR コントローラを併用することで、ポインティング速度は VR コントローラのみとの結果とほぼ同等な速度を維持しつつも、純粋な視線入力と比較して疲れにくくなることを報告している。また、トリガーボタンを押している間のみ、入力手法が視線入力から VR コントローラの回転を用いた入力に切り替わるような手法 [14] も提案している。しかし、コントローラのトリガーボタンを押しながらコントローラを動かしたり、スティックなどの追加操作を求めることは、操作の複雑性を上げてしまう。我々は、そのような複雑な操作は、指の疲労感を上げてしまい、インタラクション手法の性能低下を招いてしまうという問題を確認している [15]。

3. 実験

本研究では、VR 体験中のユーザの姿勢が視線入力のパフォーマンスに与える影響を調査する。実験では、視線のみを用いたポインティング手法を、寝た状態と座った状態

*⁴ VIVE Pro Eye Overview — VIVE United States
<https://www.vive.com/us/product/vive-pro-eye/overview/>

*⁵ Microsoft HoloLens — Mixed Reality Technology for Business
<https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

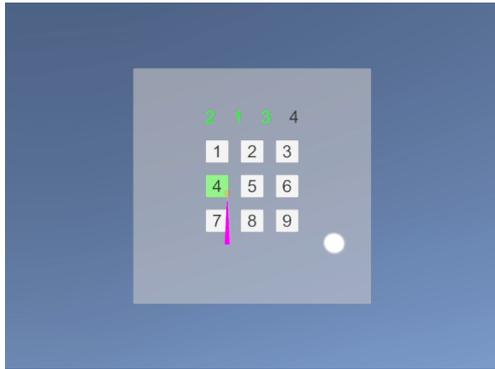


図 1 アプリケーションの動作画面。入力された数字は緑、そうでない数字は黒で表示される（ピンク色の線はデバッグ用の表示であり、HMD 内では見えていない）。

の 2 姿勢において比較する。なお、ポインティングの確定にはコントローラのトリガーボタンを使用する。被験者は 20 代の大学生 5 人であり、実験には VIVE Pro Eye と VIVE Controller を使用した。比較には、実験のために Unity で開発した、図 1 に示す比較用のアプリケーションを用いて、タスクの完了までにかかる時間とタスク中のミス入力の回数を計測し、そのデータを用いた。また、学習効果による結果への影響を考慮し、被験者ごとに寝た状態と座った状態の実験の順番を入れ替えた。

画面上に表示されたランダムな 4 桁の数字を、画面上に表示された 1 から 9 のボタンを用いて入力するタスクを行う。数字を入力すると、表示されている 4 桁の数字が一桁ずつ緑色に点灯していき、4 桁の数字を入力し終わると次の試行へと移行する。なお、入力された数字が間違っている場合も緑色に点灯し、タスク中はミスをしたのかどうかを判別できないようにしている。このタスクを各手法、各姿勢において 50 回ずつ試行した。

実験の手順として、まず Vive Pro Eye に標準で搭載されている、キャリブレーションソフトウェアを用いて、瞳孔間距離の調整とアイトラッカーのキャリブレーションを行った。その後、アイトラッカーを用いたポインティング手法の操作方法を確認するために、練習用のタスクを数回行わせた。その上で、2 つの姿勢において順に実験を行った。また、姿勢を切り替えるタイミングでは 1 分間の休憩を挟んだ。

3.1 比較用アプリケーションの実装

比較用アプリケーションは Unity2019 4.31f1 を用いて開発した。画面上には 1 から 9 の数字が書かれたボタンが表示されている。4 桁の数字と 9 つのボタンは HMD から正面方向に 1.5 メートル移動した位置に表示され、各ボタンは 5 センチメートルの間隔で配置している。ボタンは 10 センチメートル四方の正方形である。視線は ViveSR の SRanipal Eye Framework を用いて、HMD に内蔵されたアイトラッカーからのデータを取得する。生データでは視

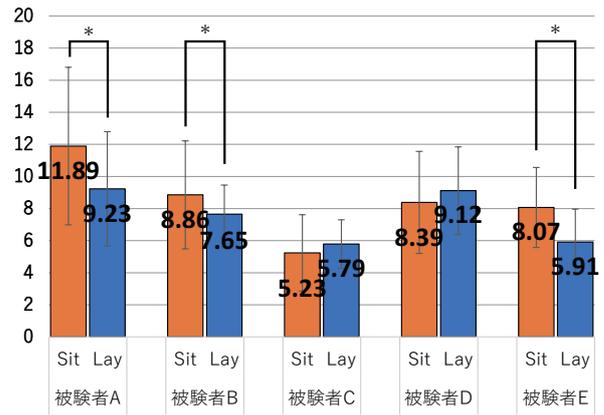


図 2 座り (Sit)、寝 (Lay) の 2 つの状態におけるタスク完了秒数の平均（縦軸は秒数、エラーバーは標準偏差）

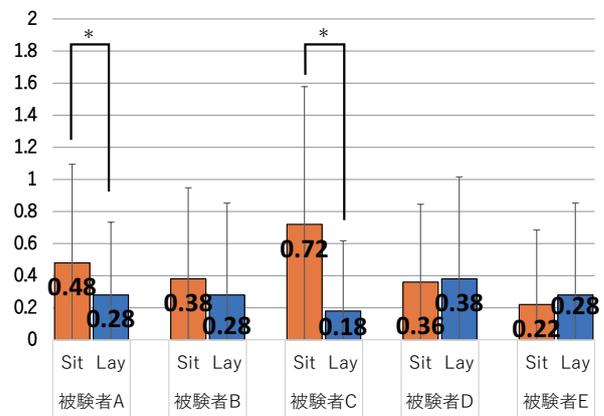


図 3 座り (Sit)、寝 (Lay) の 2 つの状態におけるタスク中ミス入力回数の平均（縦軸は回数、エラーバーは標準偏差）

線の移動時に大きくブレてしまうため、RotateTowards 関数を用いて秒間で最大 67.5° までのみ移動するように制限している。また、視線の細かいブレによって瞬間的にボタンの選択が解除されてしまうことを防止するために、ポインターがボタンから離れてから選択が実際に解除されるまでに 0.5 秒の遅延を設けている。

3.2 実験結果

寝た状態と座った状態の 2 つの姿勢にて、各タスクの完了にかかる時間の平均を表したグラフが図 2 である。被験者 A、被験者 B、被験者 E は座った状態よりも寝た状態においてタスク完了時間が短くなった。また、被験者 C と被験者 D は座った状態のタスク完了時間の方が短いものの、寝た状態のタスク完了時間との有意差を確認することはできなかった。図 3 は、2 つの姿勢にて、各タスクのうちの入力ミスをした回数の平均を表したグラフである。こちらは被験者 A と被験者 C のみ姿勢間の有意差があり、他の被験者では有意差を確認することができなかった。以上の結果から、寝た姿勢での視線入力は、座った姿勢でのそれと同等あるいはそれ以上のパフォーマンスを発揮すると

言える。

4. 議論

まず、ミス回数が多い被験者や、タスク完了時間が長い被験者には共通して、押しづらそうにしているボタンが存在していた。例として、2のボタンを注視している場合のみ視線が少し横にずれてしまい、ボタンが意図通りに選択できないような状況が挙げられる。実験では、座った状態よりも寝た状態におけるタスク完了時間が短い場合には有意差が確認でき、逆の場合でも有意差は確認できなかった。寝た姿勢では、アイトラッキングだけでなく、コントローラのみを使用して入力することもできる。しかし、寝た姿勢ではコントローラの動きの範囲が制限されるため、コントローラによる入力パフォーマンスの低下が懸念される。そのため、コントローラのみを使用する手法と比べ、アイトラッキングを用いた手法は寝ながらの使用において有用である可能性がある。今後、さらなる比較実験を行っていく必要がある。

今回は、RotateTowards 関数を用いてポインティング先にある程度のスムージング処理を行っていたが、それでもポインタには細かいブレが存在していた。主観的な感想ではあるものの、寝た場合における利用ではこのポインタのブレが、座った状態と比べて抑えられているように感じられた。これが、寝た場合においてポインティング手法の使いやすさを向上させ、結果としてタスク完了時間の短縮につながった可能性がある。今回の実験では10センチメートル四方の正方形のボタンを用いたが、これを更に小さくすれば恐らくアイトラッキングを用いた手法のみではポインティングが困難になると推測される。よって、小さなポインティングターゲットを用いた場合に、アイトラッキングのみを用いた手法と、コントローラなどを併用した手法の精度の比較などを行う必要がある。また、今回はボタンをHMDの正面に配置していたが、視点の端にあるようなボタンに対する、アイトラッキングを用いた手法のポインティング性能についても、追加で調査をする必要がある。

5. おわりに

本研究では、VR体験中のユーザの姿勢が、VRHMDに搭載されたアイトラッカーを用いた視線入力パフォーマンスに与える影響の調査を行った。実験では、寝た姿勢での視線入力、座った姿勢と比較してより良いパフォーマンスを発揮する場合があることを確認することができた。さらに、VRHMDでのアイトラッキングに関する課題について議論した。

参考文献

[1] Doil Kwon, Hyeonah Choi, Hyung Jun Cho, Juyoung Lee, and Gerard Kim. Pillowvr: Virtual reality in bed.

In *Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '19, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

[2] Stephan M. Gerber, Marie-Madlen Jeitziner, Patric Wyss, Alvin Chesham, Prabitha Urwyler, René M. Müri, Stephan M. Jakob, and Tobias Nef. Visuo-acoustic stimulation that helps you to relax: A virtual reality setup for patients in the intensive care unit. *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, p. 13228, Oct 2017.

[3] Heiko Drewes. Eye gaze tracking for human computer interaction, March 2010.

[4] Hari Singh Dhillon, Rajesh Singla, Navleen Singh Rekhi, and Rameshwar Jha. Eog and emg based virtual keyboard: A brain-computer interface. In *2009 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology*, pp. 259–262, 2009.

[5] Ali Usakli, Serkan Gurkan, Fabio Aloise, Giovanni Vecchiato, and Fabio Babiloni. On the use of electrooculogram for efficient human computer interfaces. *Computational intelligence and neuroscience*, Vol. 2010, p. 135629, 01 2010.

[6] Ioannis Rigas, Hayes Raffle, and Oleg Komogortsev. Photosensor oculography: Survey and parametric analysis of designs using model-based simulation. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. PP, , 07 2017.

[7] T.E. Hutchinson, K.P. White, W.N. Martin, K.C. Reichert, and L.A. Frey. Human-computer interaction using eye-gaze input. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 19, No. 6, pp. 1527–1534, 1989.

[8] Robert J. K. Jacob. What you look at is what you get: Eye movement-based interaction techniques. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '90, p. 11–18, New York, NY, USA, 1990. Association for Computing Machinery.

[9] Pallavi Mohan, Wooi Boon Goh, Chi-Wing Fu, and Sai-Kit Yeung. Dualgaze: Addressing the midas touch problem in gaze mediated vr interaction. In *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, pp. 79–84, 2018.

[10] Thammathip Piumsomboon, Gun Lee, Robert W. Lindeman, and Mark Billingham. Exploring natural eye-gaze-based interaction for immersive virtual reality. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 36–39, 2017.

[11] 崔明根, 坂本大介, 小野哲雄. 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. *インタラクティブ 2022 論文集*, INT22001, p. 1–10, 2022.

[12] Shumin Zhai, Carlos Morimoto, and Steven Ihde. Manual and gaze input cascaded (magic) pointing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '99, p. 246–253, New York, NY, USA, 1999. Association for Computing Machinery.

[13] 柿沼育, 小宮山撰. VR空間における視線とコントローラを用いた2Dポインティング手法の検討. 第18回情報科学技術フォーラム(FIT2019)講演論文集第3分冊, pp. 281–286, 2019.

[14] 柿沼育, 小宮山撰. VR空間における視線ポインティングにコントローラを併用する効果. *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol. 23, No. 1, pp. 89–100, 2021.

[15] 阿部広河, 真鍋宏幸. VRコントローラを用いた寝ながら快適に文字入力が行える手法の提案. *インタラクティブ 2022 論文集*, pp. 497–501, 2022.