



歩行時の前庭動眼反射が光学透過型 HMD 上の テキスト可読性に与える影響

The Effect of the Vestibulo-Ocular Reflex on the Text Readability of AR Glasses While Walking

谷中健介¹⁾, 中村優吾¹⁾, 崔 赫秦²⁾, 福嶋 政期³⁾

Kensuke TANINAKA, Yugo NAKAMURA, Hyuckjin CHOI and Shogo FUKUSHIMA

1) 九州大学大学院システム情報科学府 (〒 819-0395 福岡市西区元岡 744 番地, taninaka.kensuke.304@s.kyushu-u.ac.jp, y-nakamura@ait.kyushu-u.ac.jp, choi@ait.kyushu-u.ac.jp, shogo@ait.kyushu-u.ac.jp)

概要:

光学透過型 HMD (OSTHMD) を用いることで歩きながらもテキストを読むことができるが、テキストの提示距離により可読性が変わることが示唆されている。この現象には、歩行に伴う視界や視野の変化など様々な要因が考えられるが、本研究では、前庭動眼反射 (VOR) に注目する。VOR とは、頭部が動いたときに目を自動的に反対方向へ動かし、視界を安定させる生理的な反射である。しかし、OSTHMD を使用時は、実世界での歩行時とは異なり、頭部の動きに連動して表示されるテキストが動くため、VOR による調整が逆効果となり、可読性が低下する可能性が考えられる。この仮説を検証するべく、本研究では、OSTHMD において画面座標系でさまざまな奥行きにテキストを提示し、視線情報を計測することでテキストの可読性への VOR の影響を調査した。

キーワード: AR, テキスト可読性, 前庭動眼反射, 歩行

1. はじめに

拡張現実 (AR) 技術の発展に伴い、光学型ヘッドマウントディスプレイ (OSTHMD) が屋外でも利用される機会が増えることが予想される。OSTHMD はハンズフリーでバーチャルコンテンツを視聴できるため、スマートフォンのように手に持ってテキストを読む必要がない。

OSTHMD は大きく二つに分類される。AR を目的とし、空間認識を行うハードウェア (Hololens など) と、AR を目的とせず軽量で空間認識を行わないもの (Google Glass など) である。前者は HMD のフロントカメラで環境を認識し、バーチャルオブジェクトを表示するためにテキストが世界座標系 (World anchor) に固定される。一方、後者ではテキストが画面座標系 (Screen anchor) に固定される。後者の画面座標系でテキストを表示する場合、歩行中に利用するとテキストの可読性が著しく低下することが報告されている [1, 6]。また、Screen anchor の座標系において、テキストを表示する奥行きを変えるだけで可読性のスコアが変わることも報告されている [2]。山内らはこの要因として前庭動眼反射 (Vestibulo-Ocular Reflex: VOR) の影響を示唆している。

人が歩きながら看板などの文字を読む際は、複数の反射機能の連携により眼球が文字を自動的に追従する。人が歩いているとき、顔は常に身体前方の一定の点、すなわち頭部固定点 (Head Fixation Point: HFP) を中心に回転運動を行う [3]。この HFP はおおそ 1m 前方とされており、こ

の距離は固定であると考えられている。この際に、人の前庭器官と視覚への入力情報に基づく動眼反射機能 (前者が VOR であり後者が視運動性眼振である) も協調して機能することで、歩きながら World anchor のテキストを読むことが可能になる (図 1)。

しかし、Screen anchor の場合、World anchor のテキストを読む際に働く反射機能が逆に読みにくさを引き起こす可能性がある。Screen anchor の場合、HFP の位置にあるテキストには特に影響を受けないが、HFP から奥行きが離れると、テキストが頭部に連動して動き、元の位置からずれて表示されてしまう。VOR がもし World anchor の状況で自動的に眼球を動かしているとすると、VOR による視野の自動調整が逆効果となり、テキストの可読性を低下させる可能性が高い (図 2)。

本研究では、光学透過型ヘッドマウントディスプレイ (OSTHMD) である HoloLens 2 の視線追跡機能を活用し、歩行時の AR コンテンツ内でのテキスト読解時の網膜滑り¹⁾の発生を詳細に分析する。この研究を通じて、AR コンテンツのテキスト可読性向上に向けた新たな知見を得ることを目指す。さらに、この研究成果は、より使いやすく効果的な AR 体験の設計に貢献し、AR 技術を用いるスマートグラスの機能改善と普及を加速させる可能性を持つ。

¹⁾網膜滑り (Retinal Slip) : 前庭動眼反射が誘発された時に外界がぶれて見える現象

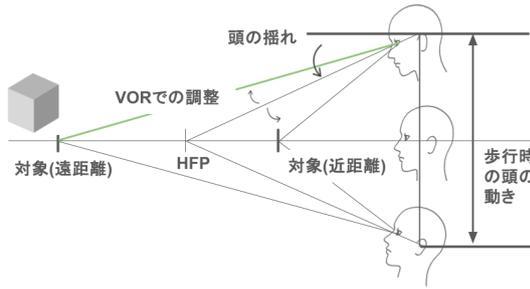


図 1: 実世界での歩行時の頭の動きと前庭動眼反射 (VOR) の関係。頭部の回転中心は HFP であるが、VOR での視野の調整により、頭部の揺れの影響を受けずに対象を見続けることが可能となっている。

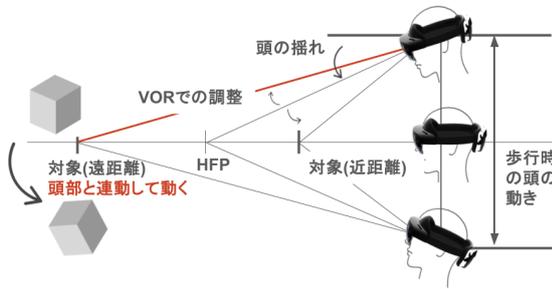


図 2: OSTHMD コンテンツ内での歩行時の頭の動きと前庭動眼反射 (VOR) の関係。実世界と異なり、対象は頭部の動きに連動して動くため VOR による調整が逆効果となり、可読性が低下しているという仮説が立てられる。

2. 実験

本研究では、歩行中の AR コンテンツ内のテキスト読み取り時の網膜滑り現象を調査するため、実験を実施した。実験環境の構築には Unity を使用し、OSTHMD である HoloLens 2 を用いて AR コンテンツを表示した。さらに、HoloLens 2 の視線計測機能を活用してデータ収集を行った。

実験内容として、被験者は時速 4km/h で歩行しながら、視界に表示されるテキストを音読する。また、テキストの表示深度は 5 パターンあり、各環境での視線情報を収集した。深度は 0.5m, 1m, 2m, 5m, 10m の 5 段階の深度を設定した。これらの深度は以下の理由で選択した。

- 0.5m: パソコンのモニター上の文章を読む距離
- 1m: 先行研究で前庭動眼反射の抑制が報告されている距離 [4]
- 2m: HoloLens2 で推奨されているテキスト表示距離
- 5m, 10m: より遠方での表示効果を検証する距離

表示されるテキストの視認性を均一に保つため、視力検査で用いられる The Sloan Letter set から選択された 10 文字 (C, D, H, K, N, O, R, S, V, Z) を使用した [5]。実験コンテンツではこれらのアルファベットからランダムに選択さ

れた 4 文字を 3 秒ごとに計 20 回表示を行った (図 3)。また、各文字は先行研究と同様に視野角が 1.5° となるように、深度に応じてフォントサイズを調整し、テキストの視認の一貫性を持たせた。テキストは Unity 内での Screen Anchor として常にユーザの前方に深度の値だけ離れて表示される。

また、実験開始時に HoloLens2 のキャリブレーションを行い、被験者ごとに最適な環境となるように調整を行った。実験環境は、前方に広い空間を用いて行った (図 4)。被験者は 1 名であり、それぞれの深度で 2 回ずつ実験を実施した。被験者は 20 代の男性で構成された。視力は実験時に両目で 0.8 であった。



図 3: 実験コンテンツの表示。3 秒ごとに 4 文字ずつテキストを出力させた。

これらの実験で得た視線情報のデータをもとに、実験時の視界での視線のヒートマップを作成した。



図 4: 実験の様子。前方に空間のある環境でテキストを出力し一定速度で実際に歩きながら実験を行った。

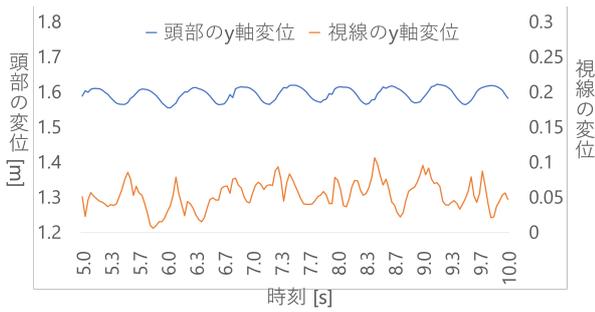


図 5: 歩行時の頭部の変位と視線の上下変位の時間変化量
頭部が負の方向に変位すると視線が正の方向に変位し VOR の現象が起きていることが読み取れる。

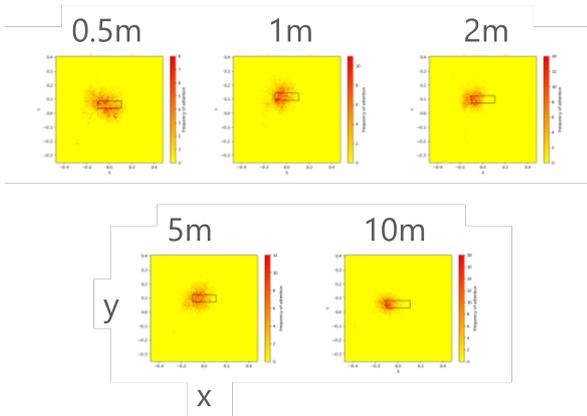


図 6: 深度 (depth) ごとのユーザの視線情報のヒートマップ。ヒートマップ内のテキストの位置を黒枠で示している。

3. 結果と考察

出力された視線情報に関するデータを用いて、頭部の動きとそれに対応する上下方向の視線の動きの関連を調べた。図 5 はそれをグラフ化したものである。歩行での位相により頭部の y 座標が小さくなった時に y 軸の視線の方向が上向きになり、逆に頭部の y 座標が大きくなった時に y 軸の視線の方向が下向きになることがデータから読み取れた。

これは、歩行時の頭部の回転運動を補正する VOR の視線の動き (図 1) がデータとして取得できたことを示しており、歩行時の頭部の回転運動による y 座標のずれと視線の y 軸上のずれが対応しているものであることを示している。

ユーザのテキストの深度ごとに作成した視線情報のヒートマップを比較し、図 6 にその結果を示した。先行研究によると 1m の距離が HFP に最も近い距離であり [2]、この深度 (depth) に近いほど視線情報の y 軸方向のずれが少なくなるという結果が予想された。しかしながら、結果として視線のばらつきは 0.5m の深度の時に最も大きく、1m, 2m, 5m の深度で同様のばらつきとなり、最もばらつきが小さくなったのは 10m の深度であった。また、頻度 (frequency) の値も 10m の深度で最も収束が見られた。

この結果はテキストの深度が近くなるほどコンテンツを見る視線の角度が大きくなり、取得された視線情報のばらつきも大きくなると考えられる。

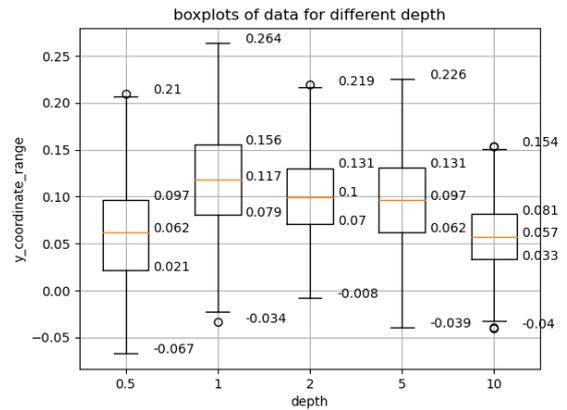


図 7: テキストの深度ごとの視線情報の y 軸方向の変位の箱ひげ図

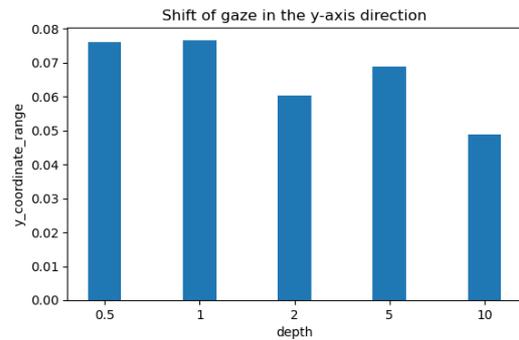


図 8: テキストの深度ごとの y 軸方向の変位の四分位範囲の大きさ

次にデータの y 軸のばらつきのみに着目しヒートマップ上の視線位置の y 座標について、四分位範囲内のデータを抽出し、深度を変化させた場合のスクリーン座標内での y 軸の位置の範囲について箱ひげ図を作成した (図 7)。また、得られた y 軸方向の視線の方向データの四分位範囲の値を棒グラフとしてプロットした (図 8)。

これらの分析から、視線情報の四分位範囲内のデータは、テキストの深度が大きくなるほどばらつきが小さくなることが考えられる。

本研究では実験データの収集後、被験者からのフィードバックを得るためにアンケート調査を実施した。アンケート回答の一つに「実験の後半になるにつれて、無意識のうちに頭の動きを抑制するように歩行していた」という報告があった。先行研究でのトレッドミル上での歩行と異なり、本実験では実際の歩行による自然な視線状態のデータを収集したが、実験環境に適応することで無意識的に歩行が変化することが示唆された。

また、「装着時や実験時の Hololens2 の水平方向が分かりづらい」という意見が挙げられた。Hololens2 の詳細な傾きのデータが得られないという問題点が生じた。

さらに、環境の影響として収集されたデータに左右の非対称性が見られた。これは実験に使用した空間が湾曲していたことで生じたものであり、視線計測において空間の湾

曲が影響を与えることが示唆された。

4. おわりに

本研究では、OSTHMDであるHololens2において画面座標系でさまざまな奥行きにテキストを提示し、歩行時の視線情報を計測することでテキストの可読性へのVORの影響を調査した。具体的には、5つのパターンでのテキストの深度について、時速4km/hで歩行しながら4文字のテキストを20回表示しリアルタイムの視線情報を計測した。その結果、歩行中のARテキスト読み取り時に頭部の上下の動きと視線の上下の動きが対応していることを示すことができた。また、ユーザの視線情報のy軸方向のずれについてヒートマップと箱ひげ図を用いて分析を行い、テキストの深度距離が大きくなるほどユーザの視線情報のy軸方向のばらつきが大きくなることを示すデータが得られた。

今後は、実験のサンプル数を増やすことで視線情報データを増やすことが課題として挙げられる。また、今回の実験ではHololens2のy軸情報のデータのみを用いて歩行時の位相と視線情報の関係を示したが、今後は歩行時に取得できる情報量を増やすことでより詳細な関係を示すことが重要である。また、本実験では実際に歩行を行うことでのテキスト可読性を調査したが、先行研究で用いられたトレッドミルを利用も視野に入れていきたい。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費JP24834281の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 福嶋政期, 濱田健夫, ハウタサーリアリ: Ar用ヘッドマウントディスプレイでのテキストの提示座標系が可読性に与える影響, 電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報, vol. 119, no. 414, pp. 7-10, 2020.
- [2] 山内孔貴, 福嶋政期, 苗村健: 光学透過型HMDにおける歩行の周期運動を考慮したテキスト提示手法の検討, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 28, no. 3, pp. 199-210, 2023.
- [3] 平崎鋭矢: 円周歩行中の頭部と眼球の協調運動, バイオメカニズム学会誌, vol. 28, no. 1, pp. 34-40, 2004.
- [4] S. T. Moore, E. Hirasaki, B. Cohen, and T. Raphan: Effect of viewing distance on the generation of vertical eye movements during locomotion, *Experimental brain research*, vol. 129, pp. 347-361, 1999.
- [5] F. Ricci, C. Cedrone, and L. Cerulli: Standardized measurement of visual acuity, *Ophthalmic epidemiology*, vol. 5, no. 1, pp. 41-53, 1998.
- [6] Yuki Matsuura, Tsutomu Terada, Tomohiro Aoki, Susumu Sonoda, Naoya Isoyama, and Masahiko Tsukamoto: Readability and legibility of fonts considering shakiness of head mounted displays, In *Proceedings of the 2019 ACM International Symposium on Wearable Computers (ISWC '19)*, pp.150-159, 2019.