



固視検出に基づく視線自動較正法における並進速度の影響

井上 想子¹⁾, 浦宗 龍生²⁾, 池田 聖¹⁾

1) 龍谷大学 (〒 520-2123 滋賀県大津市大江町横谷 1-5)

2) LINE ヤフー株式会社 (〒 102-8282 東京都千代田区紀尾井町 1-3)

概要: 本研究は、固視検出に基づく視線計測器の自動較正手法を対象に、利用者の頭部並進速度が較正精度に与える影響を調査する。この自動較正手法は、利用者がマーカを能動的に注視することなく、移動中の視線データから固視を検出し、クラスタの再投影誤差を最小化することで較正する。検証のため、オフィスを模した VR 空間で実験した。実験では、利用者の視点を円軌道に沿って一定の並進速度で自動的に移動させ、その際の頭部回転は計測し反映させた。この並進速度を複数の水準で変化させ、それぞれの速度が固視検出数と較正精度に与える影響を分析することで、較正に最も適した速度域を示す。

キーワード: 視線計測, 視線自動較正, 固視検出, 並進速度

1. はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality, VR) や拡張現実感 (Augmented Reality, AR) 技術の普及に伴い、ヘッドマウントディスプレイ (Head-Mounted Display, HMD) への視線計測器の標準搭載が進んでいる。視線情報は、ユーザの興味や関心の分析、視線入力インタフェースなど、多岐にわたる分野で活用されている。しかし、視線計測器の光軸と視軸間にはオフセット角が存在し、これは個人により異なるため [1], 利用者ごとの較正が不可欠である。

従来の較正は、利用者が特定のマーカを注視する能動的な動作を必要とし、時間と手間が課題となっていた。この課題に対し、顕著性マップを用いた自動較正手法が提案されたが、計算コストが高く、較正精度も不十分であった [2, 3]。

これに対して我々は、固視検出に基づく自動較正手法を提案している [4]。提案手法は、利用者の頭部が移動している最中においても、固視時の注視点が物体表面上で密集するという仮定に基づき、多数の固視時の注視点の分散を最小化するオフセット角を推定する。本手法はシーンモデルを用いるが、顕著性マップのような計算コストの高い画像処理は不要である。原理的に頭部の移動速度は較正精度に影響すると考えられるが、その関係はこれまで明らかにされていなかった。

本稿では、頭部の並進速度が較正精度に与える影響を調査し、最適な速度域の存在を検証した。並進速度が遅い場合は、視差が小さくなるため固視時の注視点の分散最小化が困難となる。一方、並進速度が速い場合は、視差が大きく一点の注視が困難で固視が検出できなくなる。そのため、中間的な速度域で精度が最大化されると仮定し、VR 環境下で複数の速度条件での実験により検証した。

2. 提案手法

2.1 注視点の再投影誤差に基づく視線自動較正

本手法は、頭部移動中の固視において、異なる視点からの注視点が 3 次元物体表面上の一点に密集するという原理に基づく。視線計測器の較正が不十分な場合、この固視時の注視点の分散 (固視クラスタ) は大きくなる。そこで本手法では、この分散を最小化することでオフセット角を推定する。具体的には、まず固視中の複数の視点から、代表となる視野を表す中心カメラを選択する。次に、固視クラスタ内の全ての 3 次元注視点を中心カメラの画像平面に再投影し、2 次元注視点の分散 (再投影誤差) を計算する。全固視クラスタの再投影誤差の総和を評価関数とし、これを最小化することで、マーカを能動的に注視することなくオフセット角を推定することができる。本手法は 3 次元シーンモデルと頭部位置姿勢情報のみで動作するため、VR/AR 環境との親和性が高い。

2.2 視点移動時における固視検出アルゴリズム

提案手法では、移動中の視線データから固視を正確に検出することが重要である。固視検出アルゴリズムは、シーンカメラ座標系での角速度に基づく手法と、オブジェクト座標系での注視点の分散に基づく手法に大別される [5]。前者の代表的手法である I-VT (Velocity-Threshold Identification) 法は、視線の角速度が閾値以下の区間を固視と判定する。物体形状を必要としないが、頭部回転が大きい環境では誤検出が増加する。後者の代表的手法である I-DT (Dispersion-Threshold Identification) 法は、注視点が一定時間、分散閾値内に留まる区間を固視と判定する。物体形状を要するが、一般的に I-VT 法より高精度とされる。特に、3 次元シーンに対応させた 3D I-DT 法は、我々の先行研究において I-VT 法より有意に高い較正精度を達成している [4]。

3. 実験

3.1 実験環境

実験には、HMD として HTC VIVE Pro Eye を用いた。図 1 に示す VR 環境は、Unity Asset Store で入手可能な 3 次元アセット [6] を一部編集して構築した。被験者は著者である成人 1 名（視力：右 1.5, 左 1.2）であり、実験中は椅子に着座した状態を保持した。VR 環境内での視点移動は、半径 $r = 4.3$ の円軌道に沿って自動並進させることで実現した。この際、被験者の頭部回転は継続的に計測され、視点に反映される。



図 1: オフィスを模した VR 環境

3.2 視点並進速度の条件

視点の並進速度は 4 つの水準（0.5, 1.5, 3.0, 4.0 km/h）を設けた。各条件での記録時間は 60 s で、各水準 10 回試行した。各条件は、0.5, 1.5, 3.0, 4.0 km/h の順に、同一水準が連続しないように実施した。このとき、視点の円軌道上での並進速度 v (km/h) は、半径 r (m) と角速度 ω (deg/s) から次式により算出した。

$$v = 3.6 \cdot r \cdot \frac{\omega \pi}{180} \quad (1)$$

ここで、3.6 は単位変換係数 (m/s $\rightarrow$ km/h) である。この換算により、シミュレーションで設定する角速度を日常的な速度尺度に対応付け、平均歩行速度（約 4 km/h）や既存研究との比較が容易となる。

3.3 校正精度の評価

HMD 内蔵の視線計測器では、使用者ごとの光軸を得ることができず、システムによる共通の初期校正を経た視線のみが利用可能である。そのため本実験では、提案手法の評価基準として、マーカを用いた校正タスクにより、被験者の視軸と光軸を推定した。校正タスクでは、被験者の前方 1 m の平面に、25 個のマーカ 3 s 間隔で順次表示し、視線データを取得した。図 2 の黒色 16 点を視軸推定に、赤色 9 点を精度評価に使用した。評価のベースラインとなる視軸の推定には、被験者の校正パラメータを 1 次多項式モデルを用いて推定した。また、初期値となる光軸には、視軸に平均オフセット角を加えた値を設定した。この平均オフセット角は、1020 名を対象とした先行研究 [1] に基づく。本タスクで得た被験者の視線データを図 3 に示す。

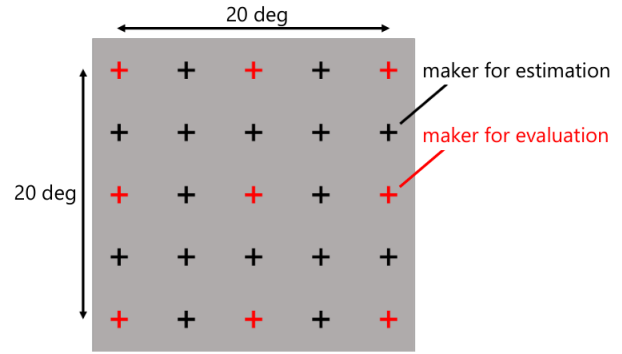


図 2: 校正に利用したマーカ位置

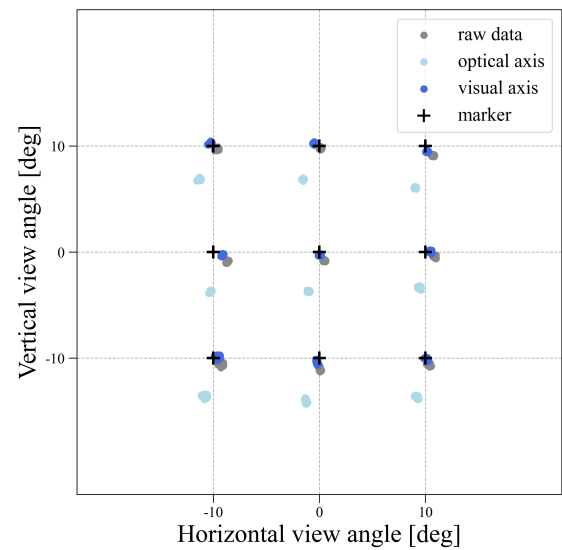


図 3: 校正タスクで得た視線データ

3.4 I-DT 法による固視検出

本実験では、過去の研究 [4] で有効性が確認されている I-DT 法を固視検出アルゴリズムとして採用した。I-DT 法の閾値は、Startsev らの研究 [7] に基づき、分散閾値 0.7 deg, 最小固視時間閾値 160 ms とした。なお、本実験では、平均オフセット角を用いて生成した光軸データから固視検出を行った。

3.5 実験結果

図 4 に各並進速度における平均絶対誤差を示す。図中のエラーバーは、標準誤差を表す。提案手法を適用した 4 つの速度条件において、光軸（Optical）の初期誤差よりも大幅に誤差が減少し、3.0 km/h で最小値を示した。各速度条件は光軸の誤差と比較して有意に小さい誤差を示したが（t 検定、 $p < 0.01$ ）、速度条件間では有意差は認められなかった（Steel-Dwass 検定、 $p > 0.05$ ）。

図 5 に、各並進速度における固視検出数を示す。固視検出数は 0.5 km/h で最小（平均 95.2 回）、1.5 km/h で最大（平均 119.9 回）となり、それ以降の速度では増加せず同程度の値で推移した。

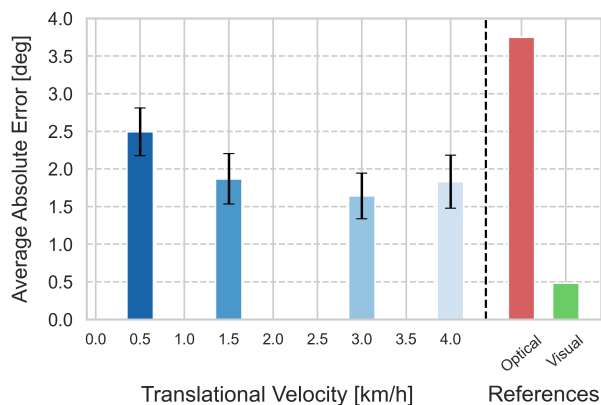


図 4: 並進速度と絶対誤差

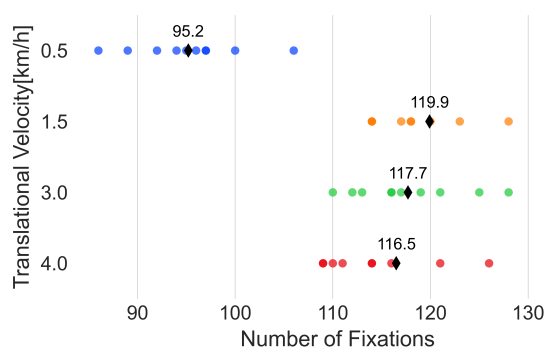


図 5: 並進速度と固視検出数

3.6 考察

実験結果から、全ての速度条件で提案手法の有効性が確認されたが、統計的に最適な速度域の特定には至らなかった。較正精度は 0.5 km/h で最も低く、1.5 km/h から 4.0 km/h では同程度の高精度を維持した。この傾向は固視検出数と対応しており、固視検出数が一定以上確保できることが高精度な較正の前提条件であることを示している。本結果は、VR 空間での歩行実験において移動距離の増加が固視検出数と較正精度の向上をもたらすことを示した先行研究 [4] と一致する。0.5 km/h では固視クラスタ数の不足により精度が低下したと考えられ、高精度較正には (1) 十分な視差を生む速度、(2) 安定した固視検出数の確保、の両条件が必要である。

4. おわりに

本稿では、固視検出に基づく視線自動較正手法において、頭部の並進速度が較正精度に与える影響を調査した。実験の結果、全ての速度条件 (0.5-4.0 km/h) で光軸より有意に高い精度を達成し、並進速度が固視検出数と較正精度に影響することを確認した。ただし、本実験は被験者 1 名による予備的検証に留まる。今後は被験者数を増やして結果の一般性を検証するとともに、より高速域や自由探索行動下での評価を通じて実用的な最適条件を明らかにする必要がある。

参考文献

- [1] A. Abass, R. Vinciguerra, B. T. Lopes, F. Bao, P. Vinciguerra, R. Ambrósio, Jr., and A. Elsheikh. Positions of ocular geometrical and visual axes in Brazilian, Chinese and Italian populations. *Current Eye Research*, Vol. 43, No. 11, pp. 1404–1414, 2018.
- [2] M. Liu, Y. F. Li, and H. Liu. Towards robust auto-calibration for head-mounted gaze tracking systems. In *Proceedings of the 2020 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 588–593, 2020.
- [3] P. Shi, M. Billeter, and E. Eisemann. SalientGaze: Saliency-based gaze correction in virtual reality. *Computers & Graphics*, Vol. 91, pp. 83–94, 2020.
- [4] Ryusei Uramune, Sei Ikeda, Hiroki Ishizuka, and Osamu Oshiro. Fixation-based self-calibration for eye tracking in VR headsets, 2024. <https://arxiv.org/abs/2311.00391>.
- [5] D. D. Salvucci and J. H. Goldberg. Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols. In *Proceedings of the 2000 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, pp. 71–78, 2000.
- [6] Office interior archiviz. <https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/urban/office-interior-archviz-155701>. 2021-01-13.
- [7] M. Startsev, I. Agtzidis, and M. Dorr. 1d CNN with BLSTM for automated classification of fixations. *Behavior Research Methods*, Vol. 51, No. 2, pp. 556–572, 2019.