

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04229

研究課題名（和文）幾何学的な制約、画面情報、瞳孔径の変化を用いた校正不要な視線計測技術

研究課題名（英文）Gaze measurement technology that does not require calibration using geometric constraints, screen information, and changes in pupil diameter

研究代表者

長松 隆（Nagamatsu, Takashi）

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号：80314251

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：視線計測技術のキャリブレーションフリー化のために、3つの手がかり（幾何学的制約、画面情報、瞳孔径変化）を用いた手法を提案した。(1)幾何学的な制約を用いた方法に必要な眼球の光軸の精度向上の方法として、非球面モデル、偏光カメラ、イベントベースカメラにより眼球の光軸の推定精度を向上させる方法を開発した。(2)画面情報を用いた方法として、最新の顕著性マップを用いたキャリブレーションフリー手法を提案して、1.54°の精度を達成した。(3)瞳孔径変化に基づく方法では、光軸を基準とした座標系において、眼球が動いても常に瞳孔径の変動と相関して明るさが変化する画素を見つけそこを注視点と推定する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、最新の顕著性マップを用いた画面情報に基づく手法が安定して精度よくキャリブレーションを実現できたことである。これにより、視線計測装置の応用範囲が非常に広がると考えられる。例えば、博物館等で展示物との自由なインタラクションが実現でき、乗り物でのドライバー状態の確認にも応用可能である。店舗、自動販売機、広告等での、注目度の解析等にも利用可能である。また、心理学の実験装置として使う場合は、被験者に意識させない計測が可能であり、拘束時間が減少し、大量なデータ取得、コスト削減の効果が期待できる。さらに、キャリブレーションが困難な子供や猿などの動物の計測も容易になる。

研究成果の概要（英文）：In order to make the gaze measurement technology calibration-free, we proposed methods that use three clues (geometric constraints, screen information, and changes in pupil diameter). (1) In order to improve the estimation accuracy of the optical axis of the eye, which is necessary for methods using geometric constraints, we developed three methods to improve the accuracy of estimating the optical axis of the eye using an aspherical model, a polarization camera, and an event-based camera. (2) As a method using screen information, we proposed a calibration-free method using the latest saliency maps and achieved an accuracy of 1.54 degree. (3) As a method based on changes in pupil diameter, we have developed a method to find pixels whose brightness always changes in correlation with changes in pupil diameter even when the eyeball moves, and to estimate that pixel as the fixation point.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：視線計測

1. 研究開始当初の背景

視線計測技術は、次世代のヒューマンインタフェースに重要・不可欠な技術として注目を集めている。視線計測技術をインタフェースとして利用するには、(a) 十分な測定精度、(b) 頭部の自由な移動、(c) 設定の簡素化の 3 つの条件を満たす必要がある。(a)と(b)を満たしたシステムの開発は、眼球の 3 次元モデルを用いて十分実現できる。しかしながら、(a)と(b)を満たし、さらに(c)を満たすには解決すべき点が多い。

(c)は、ハードウェアの設定と個人毎の校正作業(キャリブレーション)の簡素化のことである。ハードウェアの設定は一回やっつけてしまえばその後は必要ないが、個人毎のキャリブレーションは、ユーザが変わるごとに必要である。本研究では、個人毎のキャリブレーションをなくすには、学術的には 3 つの手がかり(幾何学的制約、画面情報、瞳孔径変化)が有効であると考えている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高精度で頭部の自由な移動を許容するキャリブレーションフリー視線計測手法を確立することである。これまでに、図 1 に示す眼球の 3 次元モデルに基づき、ステレオカメラと赤外線光源 2 個を用いることにより、キャリブレーションなしで眼球の光軸を求めることが可能となっていた。人間の視線(眼球の視軸)はこの光軸から少しずれており、このずれ(カップパ角と呼ぶ。水平方向、垂直方向)は個人ごとに異なる。このカップパ角を求めることがキャリブレーションに相当する。直接このカップパ角を計測するには、網膜上の最も解像度の高い中心窩の位置を求める必要があるが、眼球から離れたところに設置したカメラにより中心窩を観察することはほぼ不可能である。これがこの課題がなかなか解決できない理由である。通常は、場所がわかっている点をユーザが見ることにより、間接的にカップパ角を求めている。

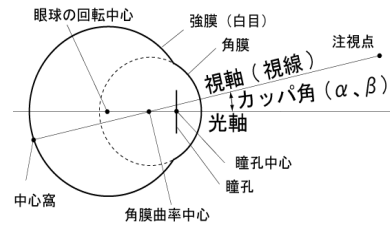


図 1 眼球の 3 次元モデル

3. 研究の方法

カップパ角を求めるための独自で創造的な方法として次の 3 つを提案した。1 つ目は、両眼の光軸を計測して、注視対象物(ディスプレイなど)上で視線が交差することを制約として求める方法である。2 つ目は、ディスプレイに表示されている情報から注目を集めそうな場所について、複数フレームのデータを統合することにより求める方法である。3 つ目は、画面の場所ごとの明るさの変化に応じて瞳孔径が変化することを利用して求める方法である。以下に詳細について述べる。

(1) 幾何学的な制約によるキャリブレーション

前述のように眼球の光軸はキャリブレーションなしで推定ができる。それを前提に、我々は、左右の眼球の視軸(視線)がディスプレイ上で交差するという幾何学的な制約(図 2)を用いることで、キャリブレーションを自動化する研究を行ってきた。それにより、実際には眼球の光軸と視軸のずれを推定する際に、光軸を高い精度で求めることが重要であることが分かってきた。そのため的手法として、以下の 3 つを試みた。

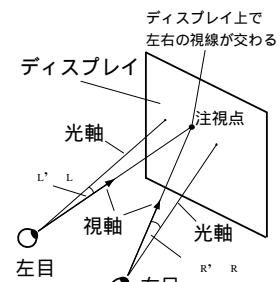


図 2 幾何学的な制約

(a) 非球面モデルによる新たな計算手法

非球面モデル(光軸を中心とした回転モデル)により眼球の光軸を推定する手法について、眼球の光軸の計測可能な範囲を拡大する、即ち広い範囲で精度良く光軸を推定する手法の提案を行った[Nagamatsu 2021]。眼球を大きく回転させた時に、撮影するカメラに取り付けた光源による反射光が撮影できなくなるので従来モデルでは、計算ができない。そこで、これまで利用していなかった他のカメラによる反射光に基づいて、図 3 の n を求め、 n と青い面との交点を利用して、眼球の光軸を求める手法を提案した。

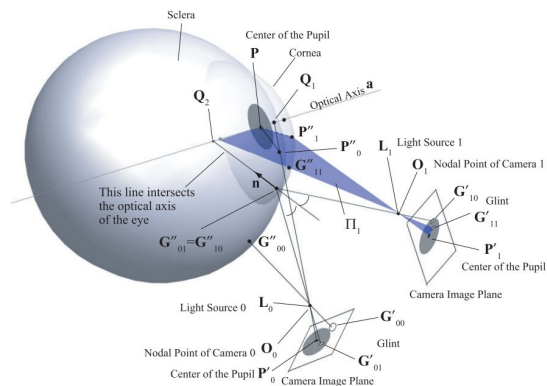


図 3 非球面モデルに基づく新たな計算手法

(b) 偏光による光源の識別

光軸の向きを精度良く求めるには、眼球の向きに応じて、精度が高くなる方向（角膜の中心部で光源による光を反射する方向）から光を当てる方法が考えられる。そのためには、眼球を照らす光源の数を増やす必要があるが、角膜に映った反射光がどの光源から来たものか識別する問題が生じる。そこで、偏光カメラを用いる方法を提案した。

また、偏光を利用した透明マーカーをディスプレイ上に配置し、偏光カメラで撮影する手法の提案も行った。

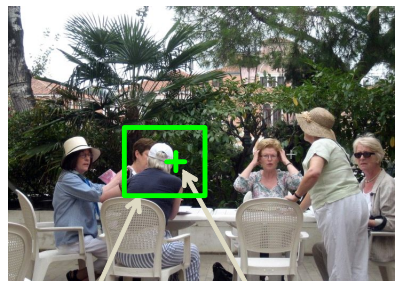
(c) イベントベースカメラによる高速化

イベントベースカメラを導入し、視線の推定のフレームレートの向上に取り組んだ。フレームレートがあがれば、それを平均することで、ブレがなくなり光軸の推定精度を向上させることができる。

(2) 画面情報を用いたキャリブレーション

眼球の光軸と視軸とのずれであるカッパ角は大きくても 7 度程度であるので、眼球の光軸付近に視軸があるのは間違いない。そして、光軸付近にある人の目を引くものを見ている可能性は高い。例えば、図 4 で + が光軸でその周辺の長方形が視軸の探索範囲であるなら、その中の白い帽子を見ている可能性が高い。

これまでの研究では、Itti らによる顕著性マップ、顔検出領域によるマップを用いて計算を行っていた。本研究では、MIT saliency benchmark で評価の高いトップダウンのアプローチを取り入れている最新の顕著性マップ（UNISAL、MSI-Net、DeepGazeII）を導入した。また、光軸を基準とした座標系を導入することにより、動画にも対応させることができる手法を提案した。



探索範囲 光軸

図 4 光軸と視軸の探索範囲(右目)

(3) 瞳孔径変化に基づくキャリブレーション

瞳孔径は見ているものの明るさに敏感に反応して変化する。画面上の光軸周辺を視軸を求める範囲として、この範囲で瞳孔径の変化に常に連動している点を探するというのが、基本的なアイデアである。光軸を基準とした座標系において、眼球が動いても、常に瞳孔径の変動と相関して明るさが変化する画素を見つけ、そこを注視点と推定する（図 5）。その際、瞳孔径の変化は、暗いところから明るいところに視線が移動したときの方が速い（瞳孔径が急に小さくなる）ので、特にそのような変化に注目する。

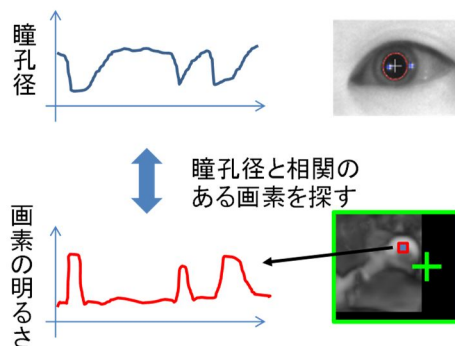


図 5 瞳孔径に基づくキャリブレーション手法

4. 研究成果

(1) 幾何学的な制約によるキャリブレーション

(a) 非球面モデルによる新たな計算手法

図6は、20人の被験者に対して、プロジェクタに42の基準点を等間隔に表示して、視線を推定した結果を示している。各基準点について精度(横軸)と累積人数(縦軸)を示している。球面モデル(グレー)、従来の非球面モデル(青)、提案した非球面モデル(赤)を利用した結果を示している。右側に行くにつれて速く20人に到達した手法が精度がいいことを示している。3,4,5,10,11,12,17,18,19が一般的な19インチディスプレイの範囲である。周辺部において、赤い線が上に表示されており、提案手法が周辺部の視線の推定において精度が高くなった。

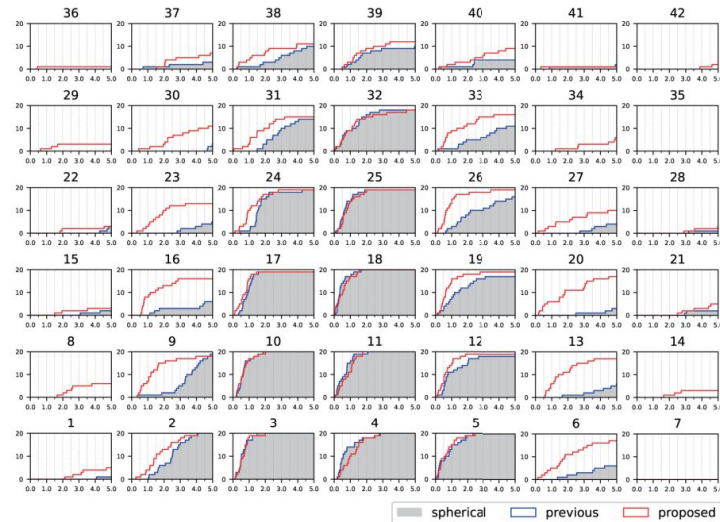


図6 非球面モデルによる精度ごとの累積被験者数

(b) 偏光による光源の識別

図7に示すように、AoLP (Angle of Linear Polarization) 画像を計算することで、8方向の光源を識別することができた。また、透明マーカーをディスプレイに貼り付けた手法については、図8のように6つのマーカーを識別できた[Koshikawa 2022]。

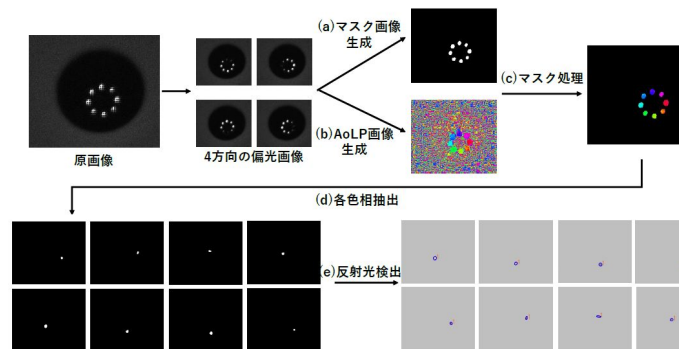


図7 偏光カメラによる光源の識別

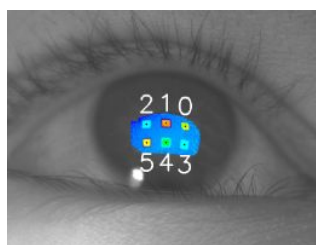


図8 偏光カメラによる透明マーカーの検出

(c) イベントベースカメラによる高速化

イベントカメラで取得したデータをアキュムレーション画像に変換し、そこから瞳孔等の特徴量を抽出するというアプローチで特徴点の抽出を行った(図9,10)。

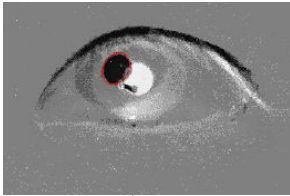


図9 イベントデータから瞳孔抽出

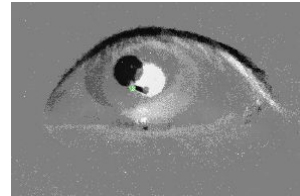


図10 イベントカメラからグリント抽出

(2) 画面情報を用いたキャリブレーション

開発したシステムで、7人分の計測データを用いて評価実験を行った結果、1点を注視したキャリブレーションに匹敵する1.54度で視線の推定ができた(図11)。発表した論文[廣江2021]は、ヒューマンインタフェース学会で、若手卓越研究賞と論文賞を受賞するなど高く評価された。また、本テーマの研究に従事していた学生が博士号を取得したことから若手育成にも貢献した。

さらに、これまでは顕著性マップの計算に多くの時間がかかっていた問題について、視線の動きの速度がある閾値以下の場合、もしくは、視線が1度以内の範囲に0.3秒以上留まっている場合のデータに限定して処理することで、大幅に計算時間を削減することを可能とした。精度は同程度であった。これについて国内会議[廣江2023]、国際会議(2023 Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA2023)) [Hiroe 2023]で発表を行った。

これに関連して、知識と顕著性との関係性についての検討も行った[篠田2021]。

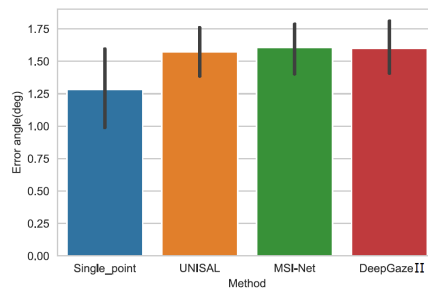


図11 1点キャリブレーション手法による精度と利用した顕著性マップごとの精度の比較

(3) 瞳孔径変化に基づくキャリブレーション

提案手法を実装し、3名による被験者実験を実施した[満永2020]。提案手法の有効性は被験者が見た刺激に依存するため、3種類の刺激を用いて実験を行った。被験者Aの場合、角の推定値は1点キャリブレーション時の値と近いものになった。被験者Bの推定値は、まばらなものになった。これは、被験者Bがソフトコンタクトレンズを着用していたことが影響しているのではないかと考えている。被験者Cの場合、推定値のばらつきは小さいが、1点キャリブレーション時の値とは異なるものになった。いずれの推定値も1点キャリブレーション時の値から約3度以内であり、平均値は1点キャリブレーション時の値から2.5度以内に存在した。したがって、瞳孔の大きさの変化を用いてカップ角を推定できることが示唆された。これについて特許出願を行い、研究期間中に特許取得に至った。

この研究は、瞳孔径の変動の時系列を分析することにより、実際に見ている場所を推測しようとするものであるが、さらに研究を進めると、キャリブレーションに利用するには、瞳孔径の変動は非常に不安定であることが分かった。これの解決方法を見出すため、瞳孔や視線の分析に関連する手法の研究[Dubiel 2023, Okano 2022, Nakayama 2022, Niitsu 2021]も進めた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Koshikawa Koki, Nagamatsu Takashi, Takemura Kentaro	4. 巻 6
2. 論文標題 Model-based Gaze Estimation with Transparent Markers on Large Screens	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction	6. 最初と最後の頁 1~16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3530888	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 廣江 葵、山本 倫也、長松 隆	4. 巻 23
2. 論文標題 眼球の光軸周辺の顕著性マップを用いた視線計測装置のインプリシットキャリブレーション手法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ヒューマンインタフェース学会論文誌	6. 最初と最後の頁 431~442
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11184/his.23.4_431	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 NAGAMATSU Takashi, HIROE Mamoru, ARAI Hisashi	4. 巻 E104.D
2. 論文標題 Extending the Measurement Angle of a Gaze Estimation Method Using an Eye Model Expressed by a Revolution about the Optical Axis of the Eye	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 729~740
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2020EDP7072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 長松 隆、菅野 裕介、竹村 憲太郎	4. 巻 23
2. 論文標題 キャリブレーションフリー視線計測手法の研究動向	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ヒューマンインタフェース学会論文誌	6. 最初と最後の頁 73~88
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11184/his.23.1_73	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 篠田 瑞生、中山 実、伊藤 泉	4. 巻 23
2. 論文標題 サッカーの経験による試合映像への注視行動に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ヒューマンインタフェース学会論文誌	6. 最初と最後の頁 47～50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11184/his.23.1_47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Mamoru Hiroe, Michiya Yamamoto, Takashi Nagamatsu
2. 発表標題 Implicit User Calibration for Gaze-tracking Systems Using Saliency Maps Filtered by Eye Movements
3. 学会等名 2023 Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mateusz Dubiel, Minoru Nakayama, Xin Wang
2. 発表標題 Modelling Attention Levels with Ocular Responses in a Speech-in-Noise Recall Task
3. 学会等名 2023 Symposium on Eye Tracking Research and Applications (ETRA2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Okano Tomomi, Nakayama Minoru
2. 発表標題 Research on Time Series Evaluation of Cognitive Load Factors using Features of Eye Movement
3. 学会等名 Symposium on Eye Tracking Research and Applications 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nakayama Minoru, Sun Qian Chayn, Xia Jianhong Cecilia
2. 発表標題 Estimation of Older Driver's Cognitive Performance and Workload Using Features of Eye movement and Pupil Response on Test Routes
3. 学会等名 26th International Conference Information Visualisation (IV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 廣江 葵, 山本 倫也, 長松 隆
2. 発表標題 モデルベース視線計測装置のインプリシットキャリブレーション手法の改良
3. 学会等名 インタラクシオン2023 (2023.3)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yudai Niitsu, Minoru Nakayama
2. 発表標題 Effects of measurement time and presentation size conditions on biometric identification using eye movements
3. 学会等名 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 満永彰吾, 廣江葵, 陳昌昊, 長松隆
2. 発表標題 モデルベースの視線計測装置における瞳孔径の変化を用いたインプリシットなキャリブレーション手法
3. 学会等名 第175回ヒューマンインタフェース学会研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 長松 隆 他62名	4. 発行年 2024年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 559
3. 書名 生体センシング技術の開発とヘルスケア、遠隔診断への応用	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 瞳孔径変化を用いた視線計測用キャリブレーション方法及び装置、並びに視線計測装置及びカメラ装置	発明者 長松隆, 満永彰吾, 廣江葵, 梅田民樹, 陳昌昊, 中山 実	権利者 神戸大学、東京 工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-084816	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 瞳孔径変化を用いた視線計測用キャリブレーション方法及び装置、並びに視線計測装置及びカメラ装置	発明者 長松隆, 満永彰吾, 廣江葵, 梅田民樹, 陳昌昊, 中山 実	権利者 神戸大学、東京 工業大学
産業財産権の種類、番号 特許、7423005	取得年 2024年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	竹村 憲太郎 (Takemura Kentaro) (30435440)	東海大学・情報理工学部・教授 (32644)	
研究分担者	中山 実 (Nakayama Minoru) (40221460)	東京工業大学・工学院・教授 (12608)	
研究分担者	鎌原 淳三 (Kamahara Junzo) (60283917)	大阪成蹊大学・データサイエンス学部・教授 (34437)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山本 倫也 (Yamamoto Michiya) (60347606)	関西学院大学・工学部・教授 (34504)	
研究分担者	田中 直樹 (Tanaka Naoki) (90188318)	神戸大学・海事科学研究科・教授 (14501)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関