

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03486

研究課題名（和文）偏光を用いた視線計測技術の確立と多様なディスプレイ環境への応用

研究課題名（英文）Eye-tracking technology using polarization and its application to various display environments

研究代表者

竹村 憲太郎（Takemura, Kentaro）

東海大学・情報理工学部・教授

研究者番号：30435440

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）：本研究では、ディスプレイから照射される光が偏光していることに注目し、多様なディスプレイ環境で使用可能な、グリントフリーな視線計測手法を実現した。半波長板や液晶を用いることで、スクリーン上に不可視なマーカを配置し、偏光の角度を特徴量として特徴点を識別した。眼球運動が大きくなるとグリントをロストするため、大型のディスプレイではこれまで視線計測は困難であったが、偏光を用いてスクリーン上に基準点を配置したことで、眼球運動が大きな場合も、基準点の追跡が可能となった。実験を通して、大型のディスプレイ環境での視線計測に偏光を用いて基準点をスクリーン上に提示することが有効であることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、これまで従来の視線計測装置では利用が困難であった大型のディスプレイ環境等においても、視線計測の利用を可能にするものである。視線計測装置を用いたヒューマンコンピュータインタラクション技術は、今後利用の拡大が期待されている技術であることから、近接に配置された大型ディスプレイや複数のディスプレイなど、様々な環境で利用できるように技術開発を行った本研究の成果には社会的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：This research proposes an eye-tracking method using polarization emitted from the display instead of glints, which is suitable for various display environments. Half-wave plates and liquid crystals are utilized to indicate imperceptible markers on the screen, and the marker IDs are identified using the angle of linear polarization. When the eyeball rotates significantly on a large display, traditional eye tracking fails due to the loss of glints. However, the eye-tracking method using imperceptible polarization markers on the screen works stably. We confirmed the feasibility of the proposed method through several experiments.

研究分野：知覚情報処理

キーワード：視線計測 偏光

1. 研究開始当初の背景

従来の視線計測技術では、近赤外光源の角膜上の反射点(以下、グリント)を特徴点として用いることで、視線方向および注視点の算出が行われてきた。そのため、グリントが常に角膜上に反射する必要があるが、ディスプレイの大型化によって眼球運動がこれまでより大きくなり、グリントが角膜ではなく強膜に反射するため視線計測・注視点推定が困難となっている。そこで、近接に大型ディスプレイを設置するなど多様化するディスプレイ環境においても安定して視線を計測できる技術の研究開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、ディスプレイから照射される光が偏光していることに注目し、大型・近接・複数など多様なディスプレイ環境において、グリントを用いることなく高精度に注視点の推定が可能な視線計測手法の確立を目指す。

従来採用されてきた近赤外光源は、ディスプレイのコーナやエッジ等に設置する必要があったため、ディスプレイが大型化するとグリントの観測が困難であった。そのため、これに代わる特徴点として、画面の領域内に配置が可能な特徴点・特徴量が必要である。そこで、本研究では、偏光を用いて角膜に反射するディスプレイ像の画面領域内に特徴点・特徴量を付加し、注視点を推定する。大型のディスプレイ環境で視線計測を行った際には、ディスプレイ反射像の一部が欠ける場合があるが、内部に観測される特徴点を用いて計測を実現する等、多様化するディスプレイ環境においても利用できる視線計測技術を確立する。

3. 研究の方法

(1) 半波長板による偏光マーカを用いた視線計測

液晶ディスプレイから照射される光は偏光していることから、図1のように偏光カメラと半波長板を用いて、視線を計測する。図2左上は、偏光カメラを用いて撮像した眼画像であり、偏光度を用いて角膜表面に反射しているディスプレイの反射像を図2右上のように抽出することができる。しかしながら、単に液晶から照射される光を観測するだけでは、ディスプレイ領域内に特徴量は観測されず、液晶のコーナを用いた視線計測技術となり、従来の近赤外光源をディスプレイのコーナに設置した手法と同様の性能となってしまふ。そこで、スクリーン表面に貼付した半波長板を用いて、ディスプレイから照射されている光の偏光角度を部分的に変化させる。半波長板の向きによって偏光角度が変化するため、偏光角度を用いた基準点の識別が可能となる。また、複数枚の半波長板を組み合わせることでマーカを構成することも可能である。単一の半波長板を用いた場合は角度情報を用いて識別するため、種類は7種類程度に限定されるが、4枚の半波長板を組み合わせると35種類まで用意することが可能である。図2左下は、ディスプレイ反射像の領域内で偏光角度を用いて提示したマーカを検出した様子であり、マーカIDを特定した結果は図2右下に示す。座標が既知である基準点の反射が観測されたことから、その反射座標を用いて視線計測を行う。

(2) 液晶を用いた偏光マーカの動的配置

半波長板を用いた偏光マーカは、スクリーン上に貼付する必要があるため、マーカの提示位置は静的であった。また、偏光角度を利用して提示したマーカには種類に制限があるため、眼球姿勢に合わせて動的に偏光マーカを配置する手法に取り組んだ。具体的には、図3に示すように液晶ディスプレイの前面に液晶パネルを取り付け、ディスプレイから出力された光の偏光角度を部分的に再調整する。これにより、半波長板を用いずに偏光を用いた基準点の提示が可能となる。また、液晶を用いて基準点を提示していることから、基準点を動的に再配置することが可能である。ディスプレイが大型化した際にも基準点をロストすることが無いように提示するため、前フレームで推定された眼球姿勢に基づいて基準点の提示位置を決定する。また、基準点の位置はスクリ

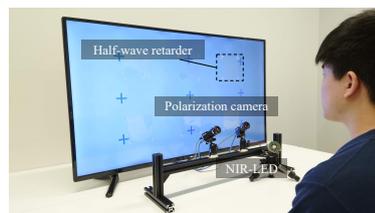


図1 偏光カメラを用いた視線計測

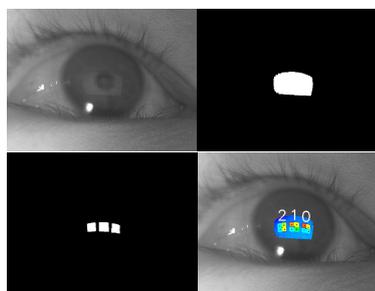


図2 偏光マーカの識別結果

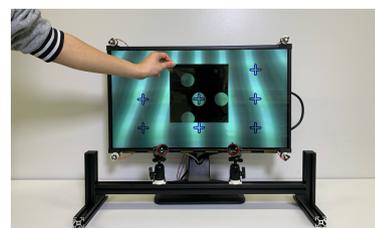


図3 動的マーカ提示装置

ーン座標系で定義されるため、動的に変化しても既知の座標として取り扱うことが可能であり、モデルベース手法など様々な視線計測技術に利用が可能となっている。

(3) 偏光情報を用いた瞳孔検出

視線計測では、角膜に反射する基準点に加えて、瞳孔中心の座標が一般に必要な。しかしながら、図4左に示すように、ディスプレイ像の反射は瞳孔領域の検出性能を低下させる。そこで、ディスプレイから照射される光が偏光していることに注目し、偏光情報を抑制したImin画像を図4右に示すように生成した。Imin画像ではスクリーンの反射像が観測されないため、瞳孔中心を安定して計測することが可能となっており、この座標と前述した基準点の座標を用いて視線計測を行った。瞳孔検出手法は、偏光マーカの提示に関係がないことから、近赤外光源を用いた視線計測でも利用が可能である。

(4) 高速ディスプレイを用いた不知覚なマーカ提示

偏光を用いた不知覚なマーカの提示に加えて、高速ディスプレイを用いたマーカの提示についても取り組んだ。近年、eSportsの普及により、300 Hzを超えるリフレッシュレートを持ったディスプレイが登場している。これを利用し、図5のように高速ディスプレイとハイスピードカメラを用いたシステム構成で、臨界融合頻度を考慮したマーカの提示を行い、ディスプレイ上に不知覚なマーカを提示する。マーカとその補色で構成されたマーカを臨界融合頻度の範囲内で表示すると、2つのマーカは融合してグレー画像となり、基準点が知覚されない。一方で、ハイスピードカメラで観測された画像は、図6左上、右上のように基準点が観測される。これら2枚の画像の差分を計算することで、図6左下のように特徴点の検出が可能となる。また、高速ディスプレイを用いた手法では、2枚の画像を加算することで、スクリーンの反射像が観測されない画像を生成することが可能であり、図6右下のようにスクリーン上に表示したマーカの影響を受けない瞳孔追跡を実現した。

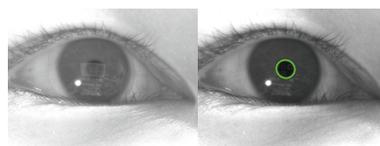


図4 Imin画像を用いた瞳孔検出

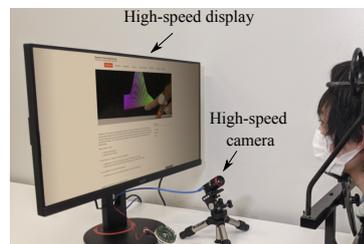


図5 高速ディスプレイおよび高速カメラを用いた視線計測

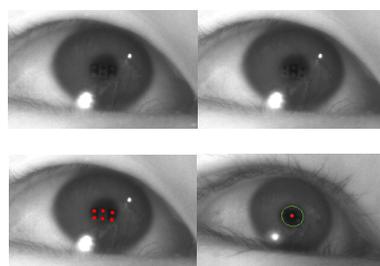


図6 不知覚なマーカの検出結果

4. 研究成果

(1) 半波長板による偏光マーカを用いた視線計測の精度評価

半波長板を用いたマーカを基準点として視線計測の精度評価を行った。視線計測手法には、モデルベース手法を採用し、1点キャリブレーションで視軸を算出したところ、推定精度は単一の半波長板で構成されたマーカと複数枚で構成されたマーカで共に、2度程度の精度を実現した。また、実験環境は55インチのディスプレイをユーザの前方700 mmの位置に設置した環境であり、大きな眼球運動が生じたがマーカの認識率は99%とかなり高く、近接大型ディスプレイ環境での視線計測の実現可能性を示した。

(2) 液晶パネルを用いたマーカの動的提示による視線計測の精度評価

動的なマーカ提示では、ディスプレイの大きさは実験装置製作の都合から27インチとなったが、ユーザ前方500 mmに設置し、精度評価実験を行った。静的にマーカを表示した場合と動的に配置した場合の比較実験を行ったが、動的に配置したことで基準点の認識率が向上したことを確認した。また、精度では近赤外光源をディスプレイコーナに設置した場合と比較したところ、提案手法が精度向上に寄与することが確認できた。これは、コーナに設置した光源がロストし、精度が低下したためであり、27インチ程度のディスプレイでもディスプレイ上に基準点を配置することが精度および安定性の向上に有効であることが確認できた。

(3) 高速ディスプレイを用いて提示した不知覚なマーカによる視線計測の精度評価

27インチのディスプレイを実験協力者前方750 mmに配置し、評価実験として6点の評価点を提示して注視点推定を行った。視線計測手法はCross-Ratio Gaze Estimationを採用した。ホモグラフィ行列を用いてスクリーン上の注視点を推定する手法であるが、精度は約1.6度となった。マーカおよび瞳孔検出にタイミングが異なる2枚の画像を必要とするため、大きな誤差が生じる可能性があったが、高精度な計測が可能であることが確認できた。サッカーなどを計測する場合には問題がある可能性があるが、注視点の計測には有効な手法であることが確認できた。

以上より、偏光および高速ディスプレイを用いてスクリーン上に配置した基準点は、大型化の傾向にあるディスプレイ環境においても視線計測を実現する上で有効であると言える。近赤外光源の照射は、瞳孔を観測するために必要なものとなっているが、グリントフリーの視線計測となったことから、配置への大きな制約は無くなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Gai Tanaka and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Eye gaze estimation using iris segmentation trained by semi-automated annotation work
3. 学会等名 Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Natsuki Kawakami and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Error metric using correlation between binocular corneal images
3. 学会等名 Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tatsuya Kagemoto and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Event-Based Pupil Tracking Using Bright and Dark Pupil Effect
3. 学会等名 Adjunct Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河上奈月, 竹村憲太郎
2. 発表標題 両眼の角膜反射像による3次元注視点の評価
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中凱, 竹村憲太郎
2. 発表標題 照明変化に頑健な虹彩を基準としたモデルベース視線計測
3. 学会等名 第24回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河上奈月, 竹村憲太郎
2. 発表標題 両眼角膜イメージングによる3次元注視点の誤差評価
3. 学会等名 第24回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 影本竜也, 竹村憲太郎
2. 発表標題 イベントベースによる明・暗瞳孔法を用いた瞳孔追跡
3. 学会等名 第24回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Inoue Yutaro, Koshikawa Koki, Takemura Kentaro
2. 発表標題 Gaze Estimation with Imperceptible Marker Displayed Dynamically Using Polarization
3. 学会等名 Proceedings of the 13th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Wattanaparinton Ratchanon, Takemura Kentaro
2. 発表標題 Vision-based tactile sensing using multiple contact images generated by re-propagated frustrated total internal reflections
3. 学会等名 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井上勇太郎、竹村憲太郎
2. 発表標題 視線計測のための液晶を用いた不可視マーカの動的再配置
3. 学会等名 第23回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuto Ito and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Estimating Focused Pedestrian using Smooth-Pursuits Eye Movements and Point Cloud toward Assistive System for Wheelchair
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kento Seida and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Eye Gaze Estimation using Imperceptible Marker Presented on High-Speed Display
3. 学会等名 13th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清田健登, 竹村憲太郎
2. 発表標題 高速液晶ディスプレイを用いた不可視な基準点の提示による注視点推定
3. 学会等名 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤雄仁, 竹村憲太郎
2. 発表標題 視線計測装置とLIDAR 間の幾何的な拘束が不要な歩行者に対する注視判定手法
3. 学会等名 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室HP https://takemura-lab.org/wordpress/
--

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	長松 隆 (Nagamatsu Takashi) (80314251)	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