

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03279

研究課題名（和文）角膜表面上のディスプレイ反射像を用いた可視光視線計測技術

研究課題名（英文）Gaze Estimation without IR-emission using Display Reflection on Corneal Surface

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）：可視光を用いた視線計測技術の高精度化を目指し、リモート(非接触)型の視線計測装置における角膜イメージングを実現した。具体的には、眼球モデルを加えた3次元顔モデルを定義することで、顔追跡結果を利用して眼球の3次元位置・姿勢を正確に求めた。また、ディスプレイから発せられる光が直線偏光されていることを利用して、角膜表面に反射するディスプレイ像を偏光を用いて抽出し、近赤外LEDをディスプレイの四隅に貼り付けることなくCross-Ratio Methodを用いた注視点推定を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

リモート型の視線計測装置は、カメラシステムとして市販されているが、より高精度に注視点を推定するには、近赤外LEDが取り付けられた特殊なディスプレイが必要であった。一方、本研究で実現した手法は、ディスプレイ反射像を歪みなく抽出することや、偏光を用いてディスプレイ反射像の四隅を安定に計測することが可能であり、近赤外LEDをディスプレイに配置する必要がない。これは、一般に普及しているディスプレイをそのまま利用することを可能とし、高度な計測技術の普及に貢献できる成果となっている。

研究成果の概要（英文）：In order to improve the accuracy of eye gaze estimation using visible light, we realized remote corneal imaging by integrating a 3D facial model and a 3D eyeball model. Additionally, we proposed a cross-ratio eye gaze estimation using a polarized camera system, and the point-of-gaze is estimated without installing NIR-LEDs to display corners.

研究分野：視線計測技術

キーワード：視線計測

1. 研究開始当初の背景

視線計測技術のモデルベース手法や Cross-Ratio Method では、近赤外 LED をディスプレイに取り付け照射し、角膜表面上の光源の反射点(グリント)を検出することで、高精度な注視点推定を実現していた。高精度な視線計測には、近赤外の照射が必要不可欠とされてきたが、長時間の利用による眼の負担などが懸念されるため、常時利用するユーザインタフェースへの応用を目指す上で、近赤外の照射が必要のない技術が求められている。しかしながら、従来の可視画像を用いた視線計測技術は、大まかに視線方向を把握するに留まり、ディスプレイ上の注視点推定を正確に計測することは難しかった。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、可視光カメラでの高精度な視線計測を実現するため、可視光 Cross-Ratio Method を確立することである。本研究を通して、「可視光の計測で、近赤外を用いた場合と同等の精度まで、注視点の推定精度を向上させることができるのか」という学術的問いに挑戦する。

3. 研究の方法

角膜表面に反射したディスプレイ像は、角膜球の曲率の影響を受けて歪みが生じるが、眼球の 3 次元モデルを用いて角膜表面の反射像を抽出する角膜イメージングを用いることで、歪みのないディスプレイ像が得られる。しかしながら、角膜イメージングはカメラと眼球の幾何的な位置関係を正確に求める必要があり、従来は装着型の計測装置で行われることが一般的であった。視線計測装置としては、リモート(非接触)型としての利用も期待されることから、図 1 に示す 3 次元顔・眼球モデルを用いてリモート型の角膜イメージングを実現した。

具体的には、顔特徴点のテクスチャと 3 次元位置関係を記録し、モデルベースのアプローチで顔の位置・姿勢を推定する。顔の 3 次元モデルに眼球モデルも組み込まれていることから、推定された顔特徴点の 3 次元位置から眼球中心位置を推定する。眼球中心が定まると、図 2 に示すようにモデルベースの追跡手法で虹彩領域が求まり、眼球姿勢が決定される。角膜球の接平面画像を逆レイトレーシングで生成することで、リモート型の装置を用いた場合も、図 3 のように歪みのない反射像の生成を実現した。

次に、角膜反射像からディスプレイ像の抽出に取り組んだ。抽出は、ソフトウェアとハードウェアの両面から試みたが、安定した抽出は偏光を用いたアプローチが有効であることが確認できた。図 4 は、試作した偏光を用いたカメラシステムであり、2つのカメラには偏光フィルタが互いに直交する向きで取り付けられている。ディスプレイから照射される光は直線偏光されているため、片方のカメラではスクリーンが観測可能であるが、他方では観測ができない。同光軸にカメラを設置していることから、図 5 に示すように差分を計算することで、容易にディスプレイ領域の検出が可能である。

検出されたディスプレイ領域の四隅を検出し、画像平面、角膜表面、ディスプレイ面のホモグラフィ行列を計算し、Cross-Ratio Method を用いて注視点を推定した。検出された虹彩中心または瞳孔中心を基準として、ディスプレイ上の注視点を算出する。しかしながら、ユーザが見ている方向である視軸は、虹彩(瞳孔)の中心を通らないため、誤差が生じる。これを補正するために、ディスプレイ上に表示した基準点を注視するユーザキャリブレーションを行い、補正用のホモグラフィ行列を算出した。補正用の行列を乗算することで、精度の高い注視点の推定を実現した。偏光カメラシステムによって可視光 Cross-Ratio Method を実現したが、偏光子が On-Chip 化されたイメージセンサが開発されたことから、ソフトウェアを移植し、小型化も実現した。

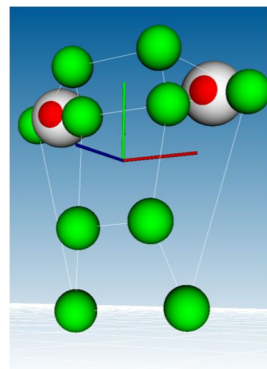


図 1 3次元顔・眼球モデル

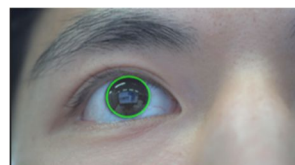


図 2 虹彩領域の推定結果



図 3 接平面画像

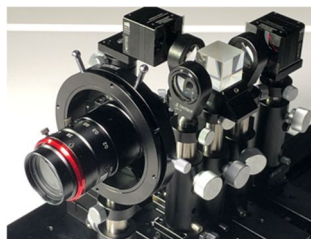


図 4 偏光カメラシステム

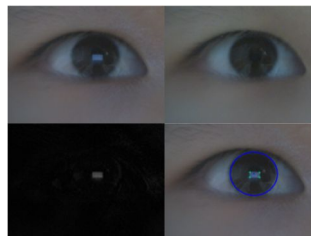


図 5 ディスプレイの四隅検出

4. 研究成果

(1) 3次元顔モデルを用いた頭部位置推定

顔に再起反射性マーカを取り付け、モーションキャプチャで位置を計測すると同時に、提案手法で頭部の位置推定を行った。結果は、**図 6** に示す通りであり、高精度に頭部の位置推定が実現できており、リモート型の角膜イメージング手法に利用可能な顔の位置・姿勢推定を実現した。

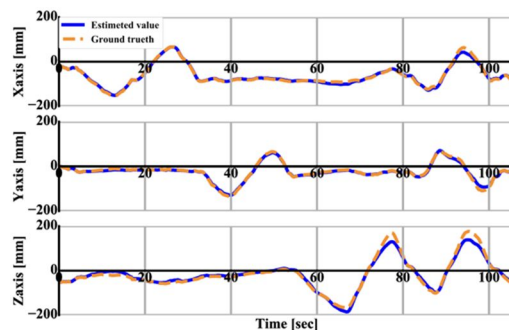


図 6 頭部位置の推定結果

(2) 角膜イメージングによるマーカ認識

接平面画像が歪みのない反射像の抽出に有効であるか評価するため、ディスプレイ上に ArUco マーカを表示し、反射像を用いたマーカの認識率を評価した。10 名の実験協力者の接平面画像を生成し、評価を行ったところ 90.2% の認識率となった。この結果からディスプレイの検出に有効な反射像の抽出手法であることが確認できた。

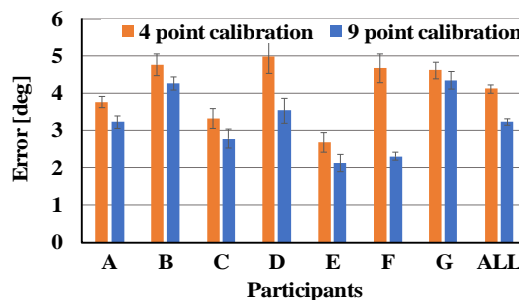


図 7 可視光 Cross-Ratio Method での

注視点推定結果

(3) 可視光 Cross-Ratio Method

図 7 は、7 名の実験協力者を対象に、ディスプレイ上に表示した基準点を注視する実験を行った結果である。偏光カメラシステムを用いた手法では、4 点のユーザキャリブレーションで約 4.11 度、9 点のユーザキャリブレーションで約 3.22 度の精度で注視点の推定が可能であることが確認できた。

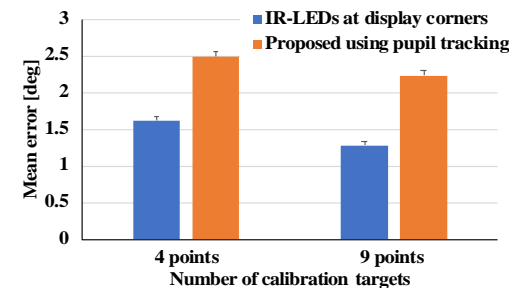


図 8 近赤外と偏光の比較結果

(4) 偏光カメラを用いた Cross-Ratio Method

偏光子が On-chip 化されたイメージセンサの登場によって、瞳孔追跡のみに近赤外線の照射を利用するという選択が可能となった。完全な近赤外線レスの計測技術とはならないが、ディスプレイの四隅に近赤外 LED を取り付けることなく、Cross-Ratio Method が利用可能であり、瞳孔検出によって精度が向上することが期待される。**図 8** は、4 名の実験協力者にディスプレイ上の基準点を注視してもらった際の、注視点の推定結果である。ディスプレイに LED を取り付けた場合と偏光を用いた場合では、近赤外 LED を取り付けた方が高精度であるが、偏光を用いた場合も 3 度を切る精度で推定が可能であることが確認できた。近赤外 LED を四隅に取り付けた特殊なディスプレイが不要となる利点があることから、アプリケーションによっては有効な手法となる。

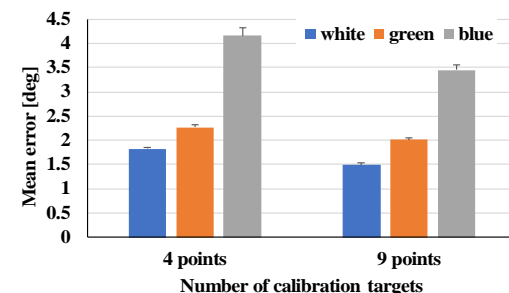


図 9 ディスプレイの背景色と

注視点推定精度の関係

また、完全な可視光計測で高精度な注視点推定を実現するためには、虹彩追跡手法の改善が必要であることが確認された。

(5) ディスプレイ背景の影響

偏光を用いてディスプレイ領域を検出した場合、ディスプレイの表示内容が注視点の推定精度に影響を与えるか評価実験を行った。**図 9** は、ディスプレイの背景として白、緑、青の 3 パターンを用意し、注視点推定を行った結果である。4 名の実験協力者が 9 つの点を注視した際の精度を比較すると白、緑に比べて青色の背景の場合には大きな精度低下が確認された。これは、明るい背景色は偏光度が高く安定して計測できることを示しており、今後の課題が明らかとなった。

以上のように本研究課題では、可視光 Cross-Ratio Method や、偏光 Cross-Ratio Method によって視線計測手法における近赤外照射の制約を大きく減らすことができた。精度は未だ近赤外に及ばないため、引き続き改良に取り組む予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 佐々木政人, 長松隆, 竹村憲太郎	4. 巻 50
2. 論文標題 偏光カメラシステムを用いた可視光Cross-Ratio Methodによる注視点推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 画像電子学会誌	6. 最初と最後の頁 180 ~ 186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 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 山岸健太, 竹村憲太郎	4. 巻 55
2. 論文標題 RGB-IRカメラを用いたハイブリッドな瞳孔・虹彩同時追跡	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 491 ~ 498
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.55.491	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19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Kouki Koshikawa, Masato Sasaki, Takamasa Utsu, and Kentaro Takemura,
2. 発表標題 Polarized Near-Infrared Light Emission for Eye Gaze Estimation
3. 学会等名 Proceedings of the 12th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuto Tamura and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Estimating Point-of-Gaze using Smooth Pursuit Eye Movements without Implicit and Explicit User-Calibration
3. 学会等名 Proceedings of the 12th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 越川洸希, 佐々木政人, 宇都貴将, 竹村憲太郎
2. 発表標題 視線計測のための偏光近赤外線照射による角膜反射像の識別
3. 学会等名 第21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 2020年

1. 発表者名 佐々木政人, 長松隆, 竹村憲太郎
2. 発表標題 角膜表面に反射したディスプレイ像の偏光情報を用いたモデルベースの注視点推定
3. 学会等名 第21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 2020年

1. 発表者名 佐々木政人, 長松隆, 竹村憲太郎
2. 発表標題 偏光Cross-Ratio Methodによる複数画面に対する注視点推定
3. 学会等名 第38回 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato Sasaki, Takashi Nagamatsu, and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Screen corner detection using polarization camera for cross-ratio based gaze estimation
3. 学会等名 Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takamasa Utsu and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Remote corneal imaging by integrating a 3D face model and an eyeball model
3. 学会等名 Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenji Numakura and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Indoor human localization based on the corneal reflection of illumination
3. 学会等名 Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryusei Matsumoto and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Semantic 3D gaze mapping for estimating focused objects
3. 学会等名 Proceedings of the 21st International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masato Sasaki, Takashi Nagamatsu, and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Cross-Ratio Based Gaze Estimation for Multiple Displays using a Polarization Camera
3. 学会等名 The Adjunct Publication of the 32nd Annual Symposium on User Interface Software and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuto Tamura and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Estimating Focused Object using Smooth Pursuit Eye Movements and Interest Points in the Real World
3. 学会等名 The Adjunct Publication of the 32nd Annual Symposium on User Interface Software and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木政人, 長松隆, 竹村憲太郎
2. 発表標題 偏光カメラシステムによるディスプレイ反射領域検出を用いた可視光 Cross-Ratio Method
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本龍晟, 竹村憲太郎
2. 発表標題 複数人の注視行動理解に向けたセマンティックマップによる三次元注視点推定
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沼倉健二, 竹村憲太郎
2. 発表標題 角膜上に映る照明情報を用いた人の位置推定
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木政人, 長松隆, 竹村憲太郎
2. 発表標題 偏光カメラを用いた Cross-Ratio Method による注視点推定
3. 学会等名 第20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 2019年

1. 発表者名 田村祐人, 竹村憲太郎
2. 発表標題 滑動性眼球運動を用いた実空間での注視対象推定
3. 学会等名 第20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 2019年

1. 発表者名 佐々木政人, 竹村憲太郎
2. 発表標題 ディスプレイ反射像を用いた可視光Cross-Ratio Methodによる注視点推定
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇都貴将, 竹村憲太郎
2. 発表標題 3次元顔モデルを用いた非装着型角膜イメージング法
3. 学会等名 第19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 2018年

1. 発表者名 Masato Sasaki, Takashi Nagamatsu, and Kentaro Takemura
2. 発表標題 Cross-Ratio Based Gaze Estimation using Polarization Camera System
3. 学会等名 Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東海大学 情報理工学部 竹村研究室 https://takemura-lab.org/wordpress/</p>

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	松本 吉央 (Matsumoto Yoshiho) (00314534)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究チーム長 (82626)	

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	長松 隆 (Nagamatsu Takashi) (80314251)	神戸大学・海事科学研究科・准教授 (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