

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02860

研究課題名（和文）高精度ランタイムキャリブレーション視線計測手法とその応用

研究課題名（英文）High accuracy gaze estimation method with runtime calibration, and its application

研究代表者

長松 隆（Takashi, Nagamatsu）

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：80314251

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：視線を利用したヒューマンインタフェースの研究開発は、今後、急速に進展すると予想される。しかしながら、利用前にユーザが数点の注視を行う校正作業（キャリブレーション）が必要なままであり、応用範囲が限定される状況にあった。

本研究では、幾何学的な制約によるランタイムキャリブレーションについて研究し、その限界を示した。そのため新たな方法を検討した結果、画面情報を活用したランタイムキャリブレーション手法を提案した。画面情報としては、顕著性マップ、顔の領域抽出を利用した。その結果、顕著性マップより、顔の領域抽出を用いた場合で、精度よくキャリブレーションを行えることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的な意義は、これまで難しいとされていた、ランタイムキャリブレーションによる高精度視線計測が、注視対象物の制約はあるが、可能となったことである。

これにより、様々な社会的な意義がある。例えば、心理学の実験において、被験者に意識させない自然な状態でデータ収録ができるようになる。これにより、拘束時間が減少し、コスト削減が可能である。さらに、乳幼児や動物の計測も容易になる。また、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る。手の届かない／触ってはいけない展示物とのインタラクションも可能となる。また、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。

研究成果の概要（英文）：It is expected that the research and development of the human interface using the gaze will progress rapidly in the future. However, the user still needs to perform calibration in which the user gazes at several points before using the device, which limits the range of application of gaze tracking.

In this study, we concluded that there is a limitation of run-time calibration by a method based on the geometrical constraints. Then, searching for a new method, we propose a run-time calibration method using screen information. As the screen information, a saliency map and face area extraction were used. As a result, it was suggested that the method using face area extraction could be used for user calibration with high accuracy than that using saliency map.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：ユーザインタフェース 視線計測

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

市販の視線計測装置は、低価格化が進んでおり、計測した視線を利用したヒューマンインタフェースの研究開発は、急速に進展すると予想されていた。しかしながら、数百万円もする高価格な装置も含め市販の装置は、利用前にユーザが数点の注視を行う校正作業(キャリブレーション)が必要なままであり、そのために応用範囲が限定される状況にあった。研究開始当初の時点で、研究代表者らは、眼球の3次元幾何モデル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(幾何学的な中心軸)を推定することを可能としていた。この光軸推定手法により両眼の光軸を推定し、これらとコンピュータディスプレイとの中点を求めることにより、数度の精度での視線推定が可能であった。これについて特許を取得し、世界初のキャリブレーションフリー視線計測装置を商品化した。この装置では、眼球の光軸と視線のずれであるカップ角を正確に求められないため、計測精度がユーザに依存していること、また、コンピュータディスプレイのみを対象としていることが課題であった。上記の課題を解決し、さらに、応用分野を開拓することが不可欠であった。

2. 研究の目的

高精度ランタイムキャリブレーション視線計測手法とその応用について研究を行う。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。しかし、従来の視線計測装置は、使用前にユーザ毎に数点を注視する校正作業(キャリブレーション)が必要であり、利用可能な場面が限定されていた。本研究では、利用しながらキャリブレーションを自動で行うランタイムキャリブレーション手法を確立することを目的とする。これにより、据え置き型では装置の前に来るだけで視線計測が可能に、また、装着型では付けるだけで視線計測が可能になる。さらに、この技術をもとに、車での利用など、新たな応用分野を開拓する。

3. 研究の方法

(1) 眼球の光軸推定手法の高度化

抽出した瞳孔および反射光の数に応じた光軸推定手法の確立

従来手法では、赤外光源2個とカメラ2台を用いて、画像から抽出した特徴点12点 = 3(瞳孔中心+反射光2点) × 2(両眼) × 2(カメラ2台)が計算に必要であった。これらがあれば、個人依存のパラメタ(角膜曲率半径、角膜曲率中心と瞳孔中心との距離、角膜表面での屈折率)を求めることなしに、眼球の光軸を求めることができた。しかし、大きく目を傾けた場合は、角膜上に反射光が0~1個しか観察できず、眼球の光軸は計算できなかった。

本研究では、光軸計算を安定して行うため、角膜上の反射光の数に応じて計算方法を切り替える。

カメラの高解像度化による光軸推定精度の向上

高解像度カメラを導入して、光軸推定精度の向上を図る。

自然光を用いた光軸推定手法

上記の方法は、赤外光源を用いており精度良く光軸の計算が可能なものであるが、赤外光源設置の手間があるため、あらゆる場所への適用には不向きである。特に屋外などで有効であると考えられる自然光(前方の景色)の角膜での反射画像を用いた光軸推定手法について研究を行う。

(2) ランタイムキャリブレーション手法の開発

(1)により眼球の光軸の推定精度向上が可能であるので、次の問題は、眼球の光軸と視線とのずれであるカップ角をいかに正確に求めるかである。このカップ角は個人差があり、その推定は、1°ずれるだけで、例えば、隣のアイコンを選択してしまうくらい重要なものである。カップ角は水平成分()と垂直成分()があるので、左右の眼球で求めるべき変数は4変数(L, L, R, R)となる。市販の装置などのキャリブレーション手法では、ユーザに意図的にある点をいくつか見てもらうという条件が必要であった。これをなくすために以下の、 の二つの方法の研究と の実機での検証を行う。

幾何学的な制約を用いる方法

これまでの研究で、ユーザの行動を束縛する条件を緩和することを目指し、「ディスプレイを見ている条件」、「遠方を見ている条件」のどちらかを課すだけで、カップ角を求められる手法を提案したが。これらの手法では、ノイズに非常に敏感で安定して求めるのは困難であった。

そこで、まず、シミュレーションでどのようなノイズに視線計測装置の精度が影響を受けるかの感度解析を行う。この結果をもとに改良を進める。

また、これまで、注視対象が平面(ディスプレイ)の場合だけであったが、自由な形状の場合の計算手法を開発する。前方の形状は、主に、レーザスキャナにより取得した注視対象物の形状データを用いる。

画面情報を用いた方法

画面情報を用いたキャリブレーション手法について研究を行う。推定された光軸付近で、顕著性の高いものや人の目が行きやすいものを見ていると仮定してキャリブレーションを行うものである。この手法では、推定誤差は線形でしか効いてこないため、幾何学的方法より、ノイズに強く、実験室外での一般の利用により向いていると推測される。

ランタイムキャリブレーション手法の実機での検証

赤外光源 2 個とカメラ 2 台を用いたコンピュータディスプレイ用の視線計測装置を、高解像度にして光軸推定精度を向上させる。ユーザからデータを取得し、そのデータを用いて、開発したランタイムキャリブレーション手法の性能評価を行う。また、応用分野を開拓するために、自動車での視線計測をシミュレーションできる環境を開発する。

4. 研究成果

(1) 眼球の光軸推定手法の高度化

抽出した瞳孔および反射光の数に応じた光軸推定手法の確立

従来の方で、眼球を大きく傾けた場合は、角膜上に反射光が 0~1 個しか観察できず、眼球の光軸の計算できないことがあった。本研究では、角膜上の反射光の数に応じて、計算方法を切り替えて光軸計算を行う方法を開発した。その方法については、特許出願を行った。

さらに、カメラの台数、光源の個数が増えた場合についての光軸推定手法についても検討した。カメラの台数、光源の個数が増えた場合に、システム構築が容易となるように、Python (視線の計算) と C++ (画像処理) を組み合わせたプログラムの開発を行った。これによりフレキシブルにカメラの数を増やすことが可能となった。

カメラの高解像度化による光軸推定精度の向上

のプログラムは同時に高解像度のカメラを用いたシステムに利用可能であり、それを利用して、高解像度カメラを用いた視線計測装置を実装した。しかしながら、カメラの解像度を高くしても、眼球の光軸の推定精度は頭打ちとなった。カメラキャリブレーション時の誤差の影響ではないかと考えている。

自然光を用いた光軸推定手法

虹彩領域に反射する環境情報を抽出するため、自然光を用いたモデルベース虹彩追跡を行い、角膜表面反射画像の展開を行った。生成された画像は歪みもなく注視点付近の情報が含まれることから、テンプレートマッチングを用いて環境カメラやディスプレイ画像に対する注視点を算出することが可能となった。

CR-Method を可視光での視線検出に適用する上で、コンピュータディスプレイが眼球に反射した領域を検出する手法について、偏光フィルタを用いる手法、偏光カメラを用いる手法を開発した。

RGB-IR カメラを用いて、可視光及び近赤外の併用による視線計測に取り組んだ。近赤外の照射によって検出された瞳孔中心を手掛かりに、眼球の 3 次元モデルを使用し、眼球姿勢及び虹彩領域の推定が可能であることを確認した。

(2) ランタイムキャリブレーション手法の開発

幾何学的な制約を用いる方法

注視対象物上で両眼の視線が交差するという条件を用いたキャリブレーション手法の開発を行った。注視対象が平面以外の場合については、レーザスキャナにより注視対象物の計測が可能となった。

眼球の動きをシミュレーションし、そのデータを用いてランタイムキャリブレーションのアルゴリズムが動くか検証した。その結果、光軸が 0.5 度程度の誤差の場合は上手くいくことが分かった。しかしながら、実際にカメラを用いて取得した眼球の光軸データを用いて検証したところ、動作が不安定であった。カメラの解像度を上げても、眼球の光軸の推定精度はある程度までしか上がらない限界のようなものが見えてきた。

以上から、当初の予定の注視対象物上で眼球の視線が交差するという条件によるキャリブレーションは、シミュレーションでは問題なくできるが、光軸の推定精度が悪いと視線の推定値が収束せず発散してしまうため、一般での利用に耐えうる実装は極めて困難であることが分かってきた。

画面情報を用いた方法

別のアプローチとして、被験者が見ている画面の情報を利用することとした。

眼球の光軸周りの顕著性マップを用いたランタイムキャリブレーション手法を考案し、実装した。この手法では、推定誤差は線形でしかキャリブレーション結果に効いてこないため、ノイズに強く、一般での利用により向いていると推察される。図1のような画像を見ているときに、光軸を検出し、その周辺の視軸の探索範囲の画像を切り出す。次に、図2のように、この切り出した画像を顕著性マップに変換し、キャリブレーションに用いる時間分のマップを平均化処理する。これにより光軸を基準とした座標系で視軸の推定が可能となった。この結果については、ACM ETRA2018において発表を行った。

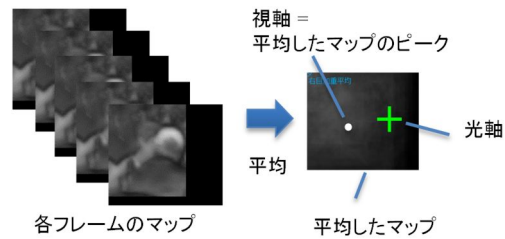


図 1. 光軸中心画像の切り抜き 図 2. 光軸中心周辺画像の顕著性マップの重ね合わせ

顕著性マップを用いたランタイムキャリブレーション手法に加えて、顔検出を用いたランタイムキャリブレーション手法の開発を行った。ディスプレイに顔が写っているという条件が必要であるが、動画を用いた実験では、顕著性マップを用いたときよりも高い精度でキャリブレーションが可能であった。図3のような画像を見ているときに、光軸を検出して、その周辺から顔検出を行う。顔の部分白い矩形とし、顕著性マップの時と同様の計算を図4のように行う。これにより、顕著性マップの場合より高精度で眼球の視軸を推定することができた。この結果はCHI2019のLate-breaking workにて発表した。

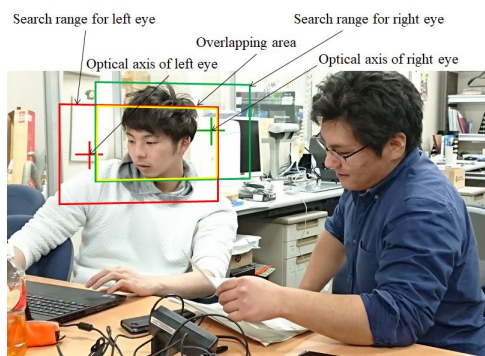


図 3. 光軸中心画像の切り抜き

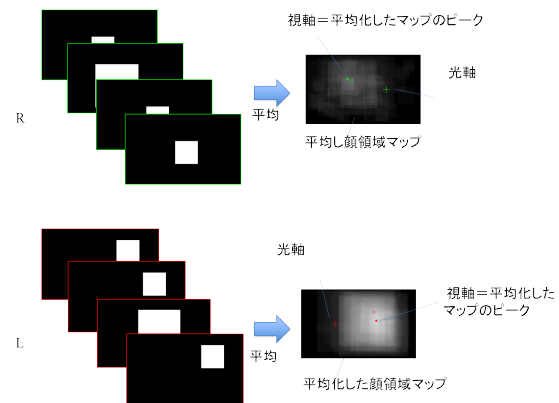


図 4. 光軸中心画像内の顔領域の抽出と重ね合わせ (両眼)

(3)ランタイムキャリブレーション手法の実機での検証

研究室内に、カメラ 2 台、光源 2 個を用いた、ディスプレイを対象とした視線計測装置（図 5） 自動車シミュレータを対象とした視線計測装置開発環境を作成した（図 6）。

これらで実験するとともに、ミュンヘン工科大学に設置してある自動車の実物を用いたシミュレータで取得したデータについても検証を行った（HCI 2019 にて発表）。

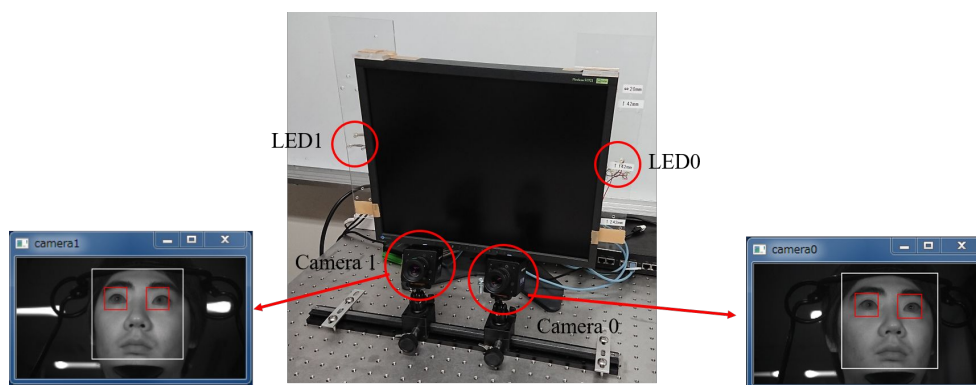


図 5. 開発した視線計測装置



図 6. 開発した自動車用視線計測装置開発環境

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 山岸健太, 竹村憲太郎	4. 巻 55(8)
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) 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 田中直樹, 岡本章裕, 中田裕一, 廣野康平	4. 巻 28(9)
2. 論文標題 船用レーダにおける映像特徴に基づいた ターゲット抽出方式	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 画像ラボ	6. 最初と最後の頁 21-28
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 無
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30件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 11件）

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 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講演概要集 201
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 (UIST2019) (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 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 (ETRA2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kenta Yamagishi and Kentaro Takemura
2. 発表標題 A Hybrid Method for Remote Eye Tracking using RGB-IR Camera
3. 学会等名 Proceedings of the 14th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (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 using Polarization Camera System
3. 学会等名 Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces (ISS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Nagamatsu, Mamoru Hiroe, and Gerhard Rigoll
2. 発表標題 Corneal-Reflection-based Wide Range Gaze Tracking for a Car
3. 学会等名 HCI International 2019 (HCII 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mamoru Hiroe, Shogo Mitsunaga, Takashi Nagamatsu
2. 発表標題 Implicit User Calibration for Model-based Gaze-tracking System using Face Detection around Optical Axis of Eye
3. 学会等名 Extended abstracts on Human factors in computing systems (CHI 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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 Michiya Yamamoto, Hirofumi Sakiyama, Satoshi Fukumori, Takashi Nagamatsu
2. 発表標題 Modeling corneal reflection for eye-tracking considering eyelid occlusion
3. 学会等名 The 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mamoru Hiroe, Michiya Yamamoto, Takashi Nagamatsu
2. 発表標題 Implicit user calibration for gaze-tracking systems using an averaged saliency map around the optical axis of the eye
3. 学会等名 The 2018 ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications (ETRA2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 横田杏里, 山本倫也, 廣江 葵, 長松 隆
2. 発表標題 角膜反射の限界点に着目した視線計測におけるカメラと光源の移動可能範囲の導出
3. 学会等名 情報処理学会第81回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 満永 彰吾, 丸山 拓朗, 廣江 葵, 長松 隆
2. 発表標題 モデルベース視線計測手法における特徴点抽出のずれが眼球の光軸の推定値に及ぼす影響
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryoma Matsuo, Haruka Sugimoto, Mamiko Sakata, and Michiya Yamamoto
2. 発表標題 A Study on Extracting Attractive Regions from One-Point Perspective Paintings
3. 学会等名 HCI 2017 International (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 松尾 良磨, 山本 倫也, 長松 隆
2. 発表標題 瞼の影響を考慮した視線計測のための角膜反射領域のモデル化
3. 学会等名 情報処理学会第80回全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松尾 良磨, 福森 聡, 山本 倫也, 長松 隆
2. 発表標題 笑いの表情に対応した視線計測のための基礎的検討
3. 学会等名 日本顔学会誌
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本 倫也
2. 発表標題 メディアとしての身体動作を活かすヒューマンインタフェース技術
3. 学会等名 電子情報通信学会第59回ヴァーバル・ノンヴァーバル・コミュニケーション研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本 倫也
2. 発表標題 身体動作をメディアとするヒューマンインタフェース技術
3. 学会等名 HCD-Net関西フォーラム 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenta Yamagishi, and Kentaro Takemura
2. 発表標題 A hybrid eye-tracking method using multispectral camera
3. 学会等名 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山岸健太, 竹村憲太郎
2. 発表標題 RGB-IRカメラを用いた瞳孔・虹彩同時追跡 -極座標変換を用いた虹彩の自動検出-
3. 学会等名 第18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 2017年

1. 発表者名 須藤美和, 山岸健太, 竹村憲太郎
2. 発表標題 非装着型角膜イメージング法のための3次元眼球モデルを用いた虹彩追跡
3. 学会等名 第18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 2017年

1. 発表者名 山岸健太, 竹村憲太郎
2. 発表標題 眼球回旋点の移動を考慮した瞳孔・虹彩同時追跡
3. 学会等名 The 23rd Symposium on Sensing via Image Information(SSII2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 品川慶樹, 山岸健太, 須田沙良, 竹村憲太郎
2. 発表標題 3次元眼球モデルを用いた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2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小谷匡史, 中田祐一, 田中直樹
2. 発表標題 低品質新聞画像における多手法による適応的なOCR 認識精度向上に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松尾良磨 酒井大貴 福森聡 山本倫也 長松隆
2. 発表標題 笑いの表情に対応した視線計測のためのgaze cone の計測
3. 学会等名 第131回ヒューマンインタフェース学会研究会「コミュニケーション支援および一般 (SIG-CE-13)」
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 廣江 葵, 長松 隆, Gerhard Rigoll
2. 発表標題 車用広範囲視線計測装置に関する研究
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 荒井 悠, 亀山 真由子, 長松 隆, 山本 倫也
2. 発表標題 眼球の光軸中心回転体モデルに基づく視線計測手法による強膜反射時の視線推定
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 酒井 大貴, 山本 倫也, 長松 隆, 福森 聡
2. 発表標題 光軸と視軸のズレの個人差を利用する本人認証システムの開発
3. 学会等名 ヒューマンインタフェースシンポジウム2016
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Sara Suda, Kenta Yamagishi, and Kentaro Takemura
2. 発表標題 User Calibration-free Method using Corneal Surface Image for Eye Tracking
3. 学会等名 The 12th Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山岸健太, 竹村憲太郎
2. 発表標題 2CCDカメラを用いた瞳孔・虹彩同時追跡
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2016
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 自動キャリブレーションを行う視線計測装置、視線計測方法および視線計測プログラム	発明者 長松 隆, 廣江 葵, 山本倫也	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-112372	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 特許権	発明者 長松 隆	権利者 神戸大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017- 19978	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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・准教授 (32644)	
研究 分担者	鎌原 淳三 (Kamahara Junzo) (60283917)	神戸大学・海事科学研究科・准教授 (14501)	
研究 分担者	山本 倫也 (Yamamoto Michiya) (60347606)	関西学院大学・理工学部・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)	
研究 協力者	伊藤 京子 (Ito Kyoko) (10397622)	首都大学東京・人間健康科学研究科・客員研究員 (22604)	