

令和 3 年 6 月 24 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K01071

研究課題名(和文) 暗闇でも眼球回旋と視線の長時間計測が可能な眼球運動計測装置の開発

研究課題名(英文) System for long-term measurement of rotational eye movement and gaze in the dark environment

研究代表者

星野 聖 (Hoshino, Kiyoshi)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：80251528

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：目的は、眼球回旋運動と視線の長時間計測が可能な眼球運動計測システムを開発することである。第一に、さまざまな形状等の眼球血管像を持つユーザに対して、適切なテンプレート血管像を選択し、高精度に追跡する眼球回旋運動計測システムを検討した。第二に、どの方向から眼球撮像しても、高精度の視線推定ができるキャリブレーション用注視点を検討した。その結果、第一に、血管像の濃淡コントラストを向上させるための補助光照射なしで、高精度に眼球回旋運動推定できる仕組みを創出できた。第二に、垂直・水平±30～35度程度の有効範囲で、高精度視線推定が可能となるキャリブレーション用注視点6点の提示位置と提示順序が構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、眼球のほぼ横に設置した小型カメラで、眼球回旋運動と視線の2反応を計測できる方法論を確立した。前者は、頭部を左右に傾けると、それと逆方向に眼球が回旋し、視界が傾かないようにする眼球運動であるが、映像酔いや車酔いなどでも起きる。スポーツ競技中も、頭部や体幹が傾くと非合理的な眼球回旋運動が生じ、運動パフォーマンスを低下させる。自動車運転中では、加速度の増加に伴い、非合理的な視線移動が発生するため、眼球回旋運動と視線の同時計測は生体情報センシングに有益な技術となる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop an eye movement measurement system that can measure eye rotation and gaze for a long time. First, we examined an eye movement measurement system that can select an appropriate template blood vessel image and track it with high accuracy for users who have various shapes of the blood vessels. Second, we investigated a calibration gazing points that enable highly accurate gaze estimation no matter which direction the eye is captured from. As a result, first, we were able to propose a system that enables highly accurate eye rotation motion estimation without supplementary light irradiation to improve the contrast of the vessel image. Second, we were able to construct the presentation position and the order of the six gazing points for calibration that enabled highly accurate eye gaze estimation within a wide effective range of ±30 to 35 degrees in the vertical and horizontal directions.

研究分野：生体情報工学

キーワード：眼球回旋運動計測 視線推定 眼球白目領域の血管像 キャリブレーション用注視点

研究成果報告

1. 研究開始当初の背景

従来技術による眼球回旋運動計測では、周囲の明るさにより内径が変化する虹彩上の濃淡パターン(虹彩紋理)を画像処理の手掛かりとするため、光環境を一定にするための背景光遮光用のゴーグルなどが必要であった。また、従来技術による視線推定では、眼球光軸から大きく外れた位置に瞳孔撮像用カメラを置くと推定精度が低下するため、カメラ設置場所に光学的制約がある場合、たとえばヘッドマウントディスプレイや剣道面防具などの装着時の良好な視線推定は困難であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記の問題を解決しつつ、眼球回旋運動と視線の長時間計測が可能な眼球運動計測システムを開発することである。そのために、第一に、さまざまな形状等の眼球血管像を持つユーザに対して、適切なテンプレート血管像を選択し、高精度に追跡する眼球回旋運動計測システムについて検討した。第二に、どの方向から眼球撮像しても、高精度の視線推定ができるキャリブレーション用注視点について検討した。

3. 研究の方法

第一の、眼球回旋運動計測システムにおいては、当初は、微弱な青色補助光などにより、眼球の白目部分(強膜や結膜)に存在する血管像の濃淡コントラストを向上させ、テンプレート血管像を追跡する眼球回旋運動計測手法について研究を行った。問題点としては、テンプレートマッチングにより結膜血管端を追跡して眼球回旋運動推定を行う手法では、テンプレートマッチングに選ばれる白目血管像の太さが必ずしも太くなく、色も必ずしも濃いものではなかった。また、屋内での眼球運動計測のように、眼球白目に外部光源の映り込みがあると、推定精度が低下することも少なくなかった。そのため、血管像の濃淡コントラスト強調のための短波長補助光を眼球付近に照射しないと、あるいは光強度を強めないと、眼球回旋の推定誤差が大きくなってしまう傾向があった。そこで、太さや色の濃さが異なる眼球白目の血管像を持つユーザに対して、短波長補助光の照射なしに、高精度に眼球回旋計測を行い得る手法について検討を行った。具体的には、3つのステップによりテンプレートマッチングのための最適テンプレート画像を選ぶようにした。第一に、トラッキングに適した太くて濃い血管部分を、眼球白目領域全体からテンプレート画像として選択できるようにするために、まず、撮像画像の白目領域から輝度勾配を手掛かりに画像特徴点を検出し、特徴点の数を計数するようにした。第二に、特徴点の数が多い領域の中から、外部光源の映り込みを有する領域を除外するようにした。第三に、近傍に類似形状を持たない血管像を有する領域をテンプレート画像として選択するようにした。評価実験の結果、血管像の濃淡コントラストを向上させるための特別な補助光照射なしに、眼球白目血管像の個人差や、外部光源の眼球表面への映り込みの影響を除外しつつ、高精度な眼球回旋運動推定が実現できた。

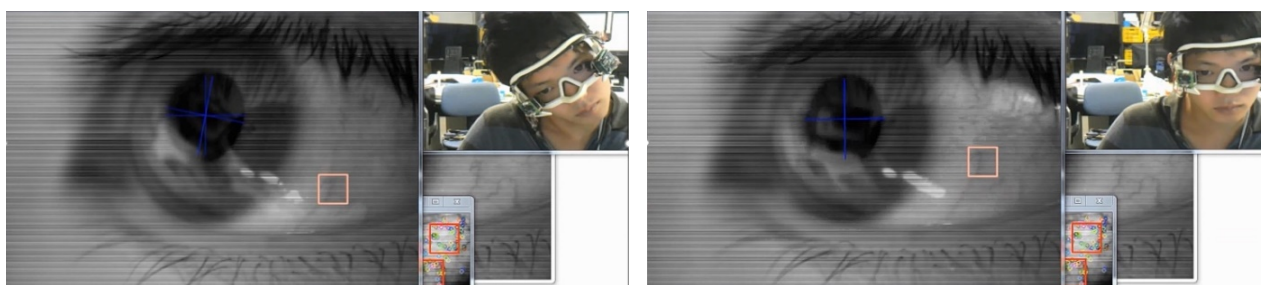


図1 眼球の白目領域(結膜および強膜)に存在する、濃淡コントラストが大きく、特徴的な形状の血管映像を本システムが追跡している例。

第二の視線推定システムにおいては、高精度推定を実現しようとする、本来は、撮像素子に搭載する接写レンズ、広角レンズ、眼球に対するカメラの向き、青色光と近赤外光の照射角度や強度、照射領域、時分割の照射時間、照射パターン、偏光フィルタの要不要などについて、使用環境と個人差を想定した検証を行う必要がある。しかし、身体差に関する個人差や個人内差の補正方法をハードウェアやソフトウェアの両面から研究していくと、眼球回旋運動だけでなく視線推定も、眼球のほぼ横に置いた小型カメラで可能であることが分かってきた。そして、眼球の横60~75度の位置に瞳孔撮像用カメラが設置された場合でも、非常に高精度な視線推定が可能であることが実験的に確認できた。その結果、個人差に合わせたハードウェアが不要で、ソフトウェアの変更により身体差を吸収できるようになった。たとえば、瞳孔撮像用のカメラが眼球正面の光軸上にあるとすると、水平 ± 40 度、垂直 ± 30 度、刻み10度

で注視点を提示した場合、眼球が球体であっても、瞳孔中心座標はおおむね格子状の交点に撮像される。しかし、同カメラを側方（目尻側）に設置すると、瞳孔中心座標の分布は大きく歪む。なぜなら、眼球が3次元の球体であるのに対して、画像上では、2次元表面上に瞳孔中心があると見なされるためである。民生用の視線推定システムでは、たとえば9点の格子状の各交点に相当する注視点を見た時の撮像画像の瞳孔中心座標 (x, y) から、次式のように、数学的に優設定にしておいて最小二乗法により (θ_x, θ_y) への写像を求める。

$$\theta_x = a_0 + a_1x^2 + a_2xy + a_3y^2 + a_4x + a_5y \quad (1)$$

$$\theta_y = b_0 + b_1x^2 + b_2xy + b_3y^2 + b_4x + b_5y \quad (2)$$

ここで、

θ_x, θ_y : 視線方向

x, y : 瞳孔中心座標

$a_0 \sim a_5, b_0 \sim b_5$: カメラ座標系から視角へ写像するための係数

である。視線推定では、この操作をキャリブレーションと呼ぶ。これを本研究では、カメラは眼球のほぼ横に置き、キャリブレーション手続き簡略化のため、注視点を最低6点にする。6個の注視点座標から上式6個のパラメータ推定を行うため、連立方程式を解く問題と同じとなる。したがって、注視範囲を、水平 ± 40 度、垂直 ± 30 度、10度刻みの範囲とすると、注視点は最大63個となり、それらの中から6点の注視点を選ぶ問題となる。実験的検討により、注視点の配置を適切に選ぶことができたので、ほぼ側方から眼球を撮像した場合でも、6点の瞳孔中心座標だけで高精度の視線推定が可能となった。

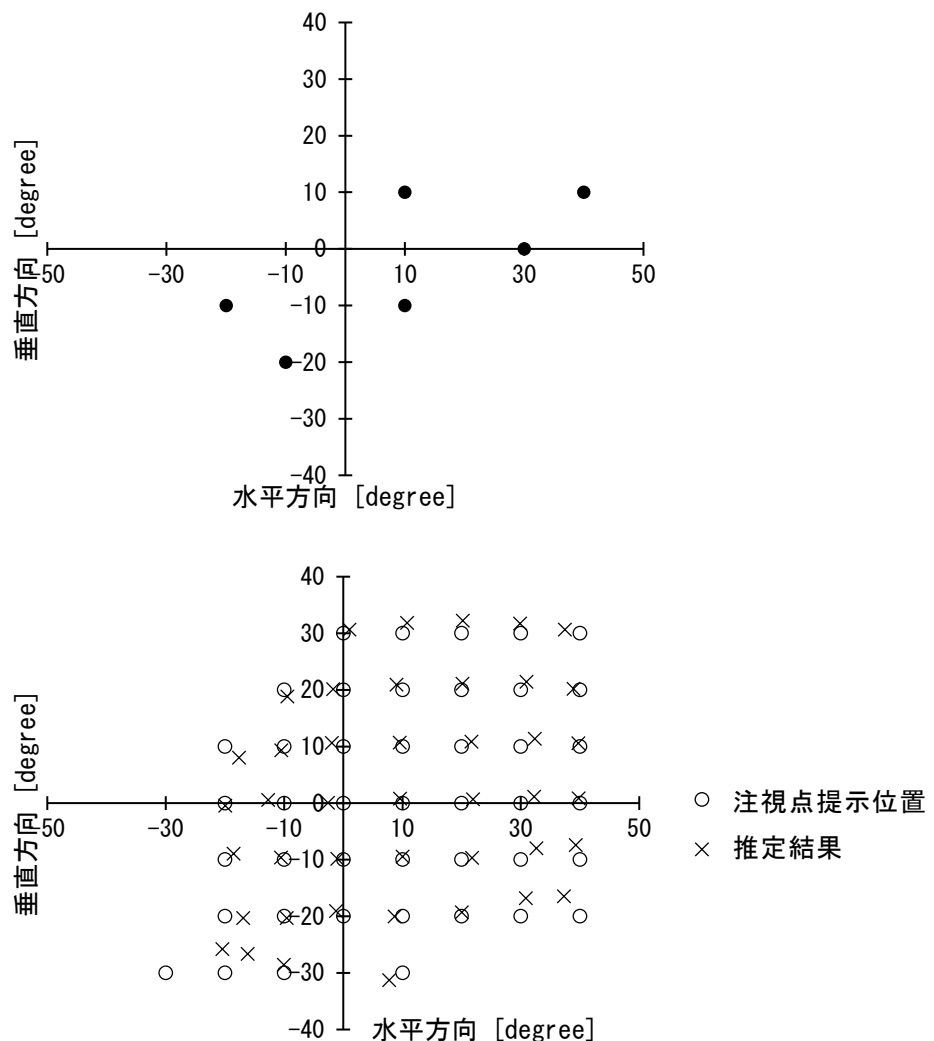


図2 眼球から60度側方（目尻側）に設置したカメラにより、6点のキャリブレーション用注視点を用いて視線推定した例。上図が、適切に選ばれた注視点6点の例。下図がそれを使った視線推定の結果である。下図では、○印が注視した位置、×が視線推定結果を、それぞれ表す。

4. 研究成果

一連の研究の結果，第一に，血管像の濃淡コントラストを向上させるための補助光照射なしで，高精度に眼球回旋運動推定できる仕組みを創出できた．第二に，垂直・水平 $\pm 30\sim 35$ 度程度の有効範囲で，高精度視線推定が可能となるキャリブレーション用注視点6点の提示位置と提示順序が構築できた．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 Hoshino Kiyoshi、Kawamoto Keisuke、Nakai Yuya	4. 巻 3
2. 論文標題 Calibration fixation points that enable accurate gaze estimation with pupil image capturing camera installed almost next to eye	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. Intl. Conf. on Image, Video and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3459212.3459219	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 Hoshino Kiyoshi、Noguchi Yuki、Ono Nayuta	4. 巻 13
2. 論文標題 Eye Tracking and Measurement of Eye Rotation Using a Small Camera Installed roughly next to the Eye	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 2020 13th International Conference on Human System Interaction	6. 最初と最後の頁 1-6
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 Hoshino Kiyoshi、Noguchi Yuki、Nakai Yuya	4. 巻 5
2. 論文標題 Gaze Estimation with Easy Calibration Method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of the 2020 5th International Conference on Intelligent Information Technology	6. 最初と最後の頁 102-106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3385209.3385232	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 Hoshino Kiyoshi、Nakai Yuya、Noguchi Yuki、Ono Nayuta	4. 巻 5
2. 論文標題 Estimation of Rotational Eye Movement based on Intensity Gradients in the Eye Images	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of the 2020 5th International Conference on Intelligent Information Technology	6. 最初と最後の頁 121-126
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1145/3385209.3385234	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 Hoshino Kiyoshi、Shimano Satoshi、Nakai Yuya、Noguchi Yuki、Nakamura Maki	4. 巻 5
2. 論文標題 Estimation of the Line of Sight from Eye Images with Eyelashes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of the 2020 5th International Conference on Intelligent Information Technology	6. 最初と最後の頁 116-120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3385209.3385233	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 Hoshino Kiyoshi、Nakamura Maki、Nakai Yuya、Ozone Yoshimasa、Shimano Satoshi、Noguchi Yuki	4. 巻 6
2. 論文標題 A World Camera for Recording the Game Tactics in Martial Arts using Bamboo Swords	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of International Conference on Biomedical and Bioinformatics Engineering	6. 最初と最後の頁 188-192
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3375923.3375955	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 Hoshino Kiyoshi、Ono Nayuta	4. 巻 2
2. 論文標題 A Compact Wearable Eye Movement Measurement System for Support of Safe Driving	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 2019 IEEE International Conference on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 225-231
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICMECH.2019.8722890	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 Shimano Satoshi、Hoshino Kiyoshi	4. 巻 1
2. 論文標題 A wearable imaging system for recording the game tactics in martial arts using swords	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 2019 IEEE 1st Global Conference on Life Sciences and Technologies	6. 最初と最後の頁 139-140
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 Ono Nayuta, Hoshino Kiyoshi	4. 巻 11
2. 論文標題 Method for Measuring Rotational Eye Movement by Tracking Eye Vascular Images Using Luminance Gradient Information	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. International Conference on Network, Communication and Computing	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3301326.3301389	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 Hoshino Kiyoshi, Ono Nayuta	4. 巻 1
2. 論文標題 Measurement of Eyeball Rotational Movements in the Dark Environment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 WACV2017 Workshop on Human Activity Analysis with Highly Diverse Cameras	6. 最初と最後の頁 75-80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/WACVW.2017.19	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14件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Gaze Estimation and Eye Rotation Measurement by a Small Camera Installed almost next to the Eyeball
3. 学会等名 International Conference on Image, Video and Signal Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Eye Tracking and Eye Rotation Measurement by a Small Camera Installed almost at the Side of the Eyeball
3. 学会等名 International Conference on Biomedical and Bioinformatics Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Eye Tracking and Measurement of Eye Rotation by a Small Camera Installed almost by the Side of the Eye
3. 学会等名 International Conference on Computing and Artificial Intelligence (ICCAI 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Eye Tracking and Measurement of Eye Rotation
3. 学会等名 International Conference on Image, Video and Signal Processing (IVSP 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Simultaneous Estimation of the Line-of-Sight and Rotational Eye Movement by Tracking of Blood Vessel Images of the Eye
3. 学会等名 International Conference on Machine Learning and Intelligent Systems (MLIS 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Eye Movement Estimation Based on the Intensity Gradients of Blood Vessels in the Eye
3. 学会等名 International Conference on Biomedical and Bioinformatics Engineering (ICBBE 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Measurement of Eye Movement Using a Small Camera Installed Roughly next to the Human Eye
3. 学会等名 International Conference on Computing and Artificial Intelligence (ICCAI 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Measurement of line-of-sight and eye rotation using a small camera installed roughly next to the eye
3. 学会等名 International Conference on Image, Video and Signal Processing (IVSP 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Estimation of the Line-of-Sight and Rotational Eye Movement by Tracking of Blood Vessel Images on the Eyeball Sclera
3. 学会等名 International Conference on Digital Medicine and Image Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Simultaneous estimation of the line-of-sight and rotational eye movement
3. 学会等名 2018 International Conference on Biomedical Signal and Image Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] A new method for high-accuracy eye movement measurement
3. 学会等名 2018 International Conference on Medical and Health Informatics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Technology for acquiring biosignals generated during eye movements
3. 学会等名 2018 International Conference on Computing and Artificial Intelligence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Keynote Speech] Measurement of rotational eye movements in the dark environment
3. 学会等名 Intl. Conf. on Biomedical Signal and Image Processing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kiyoshi Hoshino
2. 発表標題 [Invited Talk] Wearable Eye Movement Measurement Device
3. 学会等名 2017 International Conference for Leading and Young Computer Scientists (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 星野 聖	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 11
3. 書名 生体情報センシングと人の状態推定への応用： 第4章 第1節 眼のほぼ横に設置した小型カメラによる視線推定と眼球回旋運動計測	

1. 著者名 星野 聖	4. 発行年 2020年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 12
3. 書名 生体情報センシングと人の状態推定への応用： 第4章 第10節 短剣道の動作計測と技予測	

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 眼球運動測定装置、キャリブレーションシステム、眼球運動測定方法及び眼球運動測定プログラム	発明者 星野聖, 野口勇氣	権利者 筑波大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-025640	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 眼球運動測定装置、眼球運動測定方法及び眼球運動測定プログラム	発明者 星野 聖, 小野那由他	権利者 筑波大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/23226	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 面防具、動作記録システムおよび動作記録方法	発明者 星野 聖, 島ノ江聡	権利者 筑波大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-248113	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 眼球運動測定装置、眼球運動測定方法及び眼球運動測定プログラム	発明者 星野 聖, 小野那由他	権利者 筑波大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-111535	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 眼球回旋測定装置、眼球回旋測定方法、及び眼球回旋測定プログラム	発明者 星野 聖, 中込広幸	権利者 筑波大学
産業財産権の種類、番号 特許、EPC特許 第2818099号	取得年 2019年	国内・外国の別 外国

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------