

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 3 月 25 日現在

機関番号：13801
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2012～2014
 課題番号：24500507
 研究課題名(和文)高照度環境対応高精度視線検出のための開口部内2波長光出射光学系の開発基礎研究

 研究課題名(英文)Basic study for development of optical system which irradiates two wavelength near-infrared lights from inside of camera aperture for accurate gaze detection under intense illumination environment

 研究代表者
 海老沢 嘉伸 (Ebisawa, Yoshinobu)

 静岡大学・工学研究科・教授

 研究者番号：40213574

 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：高照度下において、注視点検出に必要な特徴点(瞳孔や角膜反射)を検出するための近赤外LED光源を新規開発し、特徴点検出用光学系の開発に有用な示唆を得ることを目的とした。当初、小型ミラーやハーフミラーを使用し、カメラ開口部内から2波長光を出射する光源を試作したが、特徴点を十分に検出することができなかった。そこで小型反射型LEDを使用した2波長4重リング光源を作成した。低照度下では内側2重目のリングを発光させた。高照度下では、光量が不足したため、内側1重目に加えて2重目のリングを同時発光させた。その結果より、低照度下でも高照度下で特徴点を正しく検出できることを明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to obtain the useful suggestions for the development of a near-infrared LED light source for detecting the feature points (pupils and corneal reflections) for gaze detection especially under intense illumination environment. At first, we tried to develop a light source which irradiates two wavelength lights from the inside of an aperture of a camera by using small mirrors or a half mirror. However, the feature points were not always detected. Therefore, a new light source consisting of small mirror-type LEDs that were arranged in fourfold concentric rings was proposed. Under the dark condition, the second inner ring was lit. Under the intense illumination condition, the first inner ring was lit as well as the second inner ring because of a lack of light power. This results show that the feature points can be detected correctly both under the dark and intense illumination conditions.

研究分野：視覚情報工学

キーワード：ヒューマンインタフェース 瞳孔検出 角膜反射検出 視線検出 注視点検出 高照度 近赤外光源

1. 研究開始当初の背景

ドライバーの安全運転支援装置の開発には強い社会的要望があり、ドライバーが道路標識や信号を見ているか否かを判断するためには、視角にして2度程度の精度を持つ視線検出装置が必要とされる。我々は、眼球の瞳孔と光源の角膜反射との相対位置に基づいて視線を検出する装置を開発しており、座標が既知の1点または2点を被験者に見せるだけで視線校正ができ、頭部が左右、前後に動いても、1度以下の精度で視線検出ができるといった特徴を持つ。瞳孔検出では、カメラ開口部の近くと遠くに波長が異なる不可視の近赤外光源をそれぞれ設け、瞳孔の明るい画像と暗い画像（明瞳孔画像と暗瞳孔画像）を交互に得て、これらの差分画像において瞳孔を浮き彫りにし検出する。角膜反射は小さな光点であり、差分画像からでは相殺されて検出できないため、明・暗瞳孔画像から瞳孔の近傍を探索し検出する。しかし、高照度下で瞳孔が小さくなると、明瞳孔が現れにくく、暗瞳孔と輝度が変わらなくなるため、差分画像から瞳孔検出ができなくなり、同時に視線も検出できなくなる。このため、瞳孔の大小に関わらず瞳孔を安定して検出できれば、車載利用も可能になると考えられる。

また、画像差分法の問題として、明・暗瞳孔画像には取得時間差があるため、この間に頭部が移動すると、差分し合う明・暗瞳孔画像の瞳孔位置がずれ、差分画像から正しい瞳孔像を得られない。そこで、高速度カメラを用いて両瞳孔画像における取得時間差の短縮を試みている。さらに、明・暗瞳孔画像の他に無照明画像を連続的に追加取得し、明・暗瞳孔画像から背景差分することで、太陽光が角膜に映るような場合でも、光源の角膜反射を正しく検出できることを確認してある。

2. 研究の目的

明・暗瞳孔画像における瞳孔の輝度差を大きくするためには、光源を仮想的にカメラ開口部内に設置し、瞳孔が小さな場合でも明瞳孔を得られる光学系を構成する必要があると考えた。また、頭部移動を伴う場合や、太陽光下で視線を検出する場合には、高速度カメラおよび無照明画像を用いた画像処理の導入が必要である。そこで本研究の目的は、開口部内から2波長光を出射させ、顔画像を撮影する新規光学系を設計・試作し、高速度カメラを利用した光源発光法と画像取得法を組み合わせ、これらの画像処理法の実時間処理を実現することで、新規光学系の有効性を確かめ、今後の瞳孔・角膜反射検出光学系の開発に有用な示唆を与えることにある。

3. 研究の方法

研究当初は2波長光を開口部内出射可能な光源を作成し、瞳孔輝度に関する問題を解決する予定であったが、いくつかの問題が発生したため、最終的には小型の反射型近赤外

LEDを用いた2波長4重リング状光源を開発するに至った。その過程を順に述べる。

(1) 小型ミラーおよびハイパワー反射型LEDを用いた開口部内出射型光源

本光源では、カメラに向かって左右に配置した850 nmおよび940 nmのハイパワー反射型LED（各1個）からの光を集光レンズで一旦集光して、カメラレンズの前面に±45°傾けて設置した2枚の小型ミラーでそれぞれ反射させ、顔全体に光を照射した。開口部内射出のために、それら2枚の小型ミラーをできるだけ近くに、かつ互いに90°の角度で設置するために、2個のプリズムの間に各ミラーを挟み込むように接着してできるプリズム2つをさらに貼り合せて構成した。撮影のため、2つのハイパワー反射型LEDを交互に点滅照明し、明瞳孔画像と暗瞳孔画像を得た。

しかし、得られた明・暗瞳孔画像は、上下の画像の折り返した画像が重畳した画像になってしまった。この理由は、最後に貼り合わせた2つのプリズム境界面において反射が起こったからである。また、使用したミラー型LEDのLEDチップを支える支持棒が影を画像中に落とした。前者の問題は、ミラーを設置する上で技術的に改善が難しいと考えられた。後者については、2mm角程度の小型反射型LEDの使用も考えられたが、ハイパワー反射型も、瞳孔が小さくなったとき、すでに光量が足りないことが予想されたため、ハイパワー反射型LEDよりも小パワーの小型反射型LEDを用いるには、複数個を並べる必要があり、集光が困難であるため、実現が困難であると判断した。以上の理由から、次に(2)の光源を試作することにした。

(2) ハーフミラーを用いた同軸出射型光源

ここでは、一般的な方法であるが、最近では前述の小型反射型LEDが存在するため、ハーフミラー(HM)を使用した同軸照射型光源を試作することにした。HMを利用すると、直接、光を顔に照射する場合に対して、画像の明るさが1/4になるが、小型反射型LEDはその小型さゆえに、カメラ開口部を含めて開口部の近傍に多数LEDを並べることができるため、従来に比べれば光量の問題が改善される期待があった。

図1は光源の概念図を示しており、光源筐体を横から見た断面である。筐体には16mmミニレンズを取り付けたビデオカメラが固定されており、筐体内部のカメラ開口部周りに暗瞳孔LED光源(940 nm反射型LEDを32個使用)が設置されている。なお、ミニレンズを用いたのは、光学系全体の小型化のためである。筐体下部には明瞳孔LED光源(850 nm反射型LEDを12個使用)が取り付けられている。HMは45度の角度で設置されており、HMから明瞳孔光源および暗瞳孔画像までは等距離となっている。筐体の内側壁面はレジスト処理を行った。明瞳孔LED光源の光(青矢印)は、HMで反射し、被験者に照射される。被験者からの反射光はHMを透過し、カメラ

へと入射する。また、暗瞳孔 LED 光源の光 (赤矢印) は、HM を透過し、反射光も同様に透過して、カメラへと入射する。これにより、2 波長の同軸出射を可能にした。

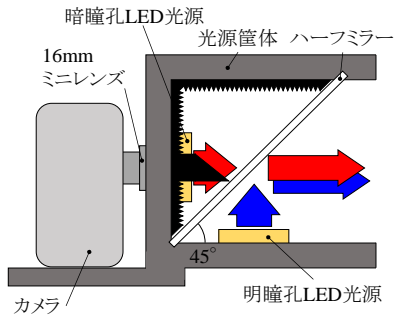
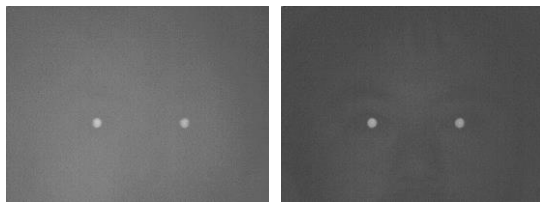


図 1 ハーフミラー光源の概念図



(a) 明瞳孔画像 (b) 暗瞳孔画像

図 2 暗所における明瞳孔画像および暗瞳孔画像

図 2(a)および(b)に、白熱電球をわずかに照らした暗所 (眼の周辺照度が約 0.14 lux) において撮影された明瞳孔画像および暗瞳孔画像をそれぞれ示す。撮影された画像を分かりやすくするため、原画像に対して輝度およびコントラスト調整を施している。被験者の頭部とカメラとの距離は約 80 cm であり、被験者には眼鏡をせず、カメラに視線を向けるように指示し、角膜反射が瞳孔のほぼ中央に現れるようにした。瞳孔がほぼ最大になった状態で撮影した。図 3(a)および(b)は、明・暗瞳孔画像において、左右の瞳孔上に現れた角膜反射を通る直線の輝度プロファイルをそれぞれ示している。明・暗瞳孔画像において、瞳孔は確認できるが、瞳孔の輝度差はあまり見られず、角膜反射はわずかに確認できるのみであった。

暗所と同様の実験を、蛍光灯下の室内で、瞳孔を小さくするため被験者の顔面に LED ライトの可視光を照射した状態 (約 2,200 lux) で行った。図 4 は左右の瞳孔上に現れた角膜反射を通る直線における輝度プロファイルをそれぞれ示している。瞳孔が小さくなっていくため明るくならず、いずれの画像においても瞳孔がわずかに確認できる程度であった。角膜反射はまったく見られなかった。

また、撮影された画像全体が白く汚れる問題が生じた。これは HM で反射もしくは透過

した LED 光が、筐体内上面において反射し、カメラに入射している影響であると考えられた。そこで、筐体の上部に円形の開口部を設け、光を逃がすようにした。また、外部光が筐体内に入射することを防ぐため、開口部周りを円柱状の筒で覆った。その結果、開口前の画像 (図 2) と比較し、画像全体の白い汚れは減少したが、周囲が明るいとき、ハーフミラーを介して入射した外部光が画像全体を白々とさせ、瞳孔検出が困難であった。したがって、ハーフミラーを用いた同軸出射型光源も高照度下では不向きであると判断した。

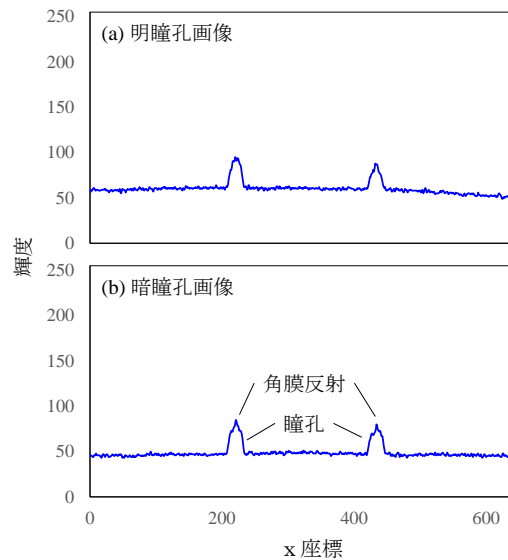


図 3 暗所における各瞳孔画像の左右瞳孔、角膜反射を通る直線の輝度プロファイル

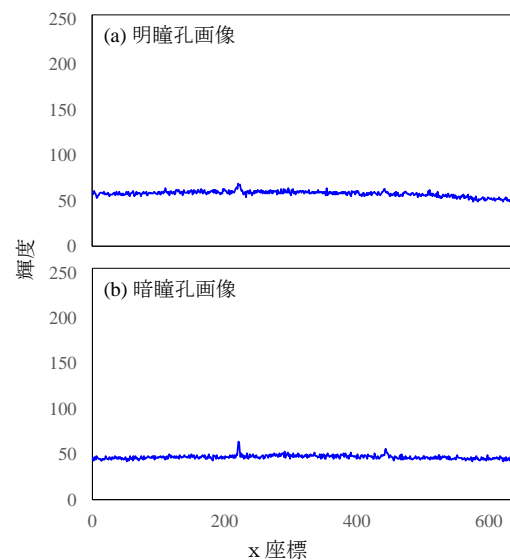


図 4 瞳孔が小さい状態における各瞳孔画像の左右瞳孔、角膜反射を通る直線の輝度プロファイル

(3) 小型反射型 LED を用いた 4 重リング状光源

上述のように、高照度下で瞳孔が小さくなった場合には、開口部に近いところに光源を設置し、少しでも明瞳孔画像の瞳孔を明るくすることが望まれるが、その反面、角膜反射が出現し難くなることから、小型反射型 LED を用いた 4 重リング光源を試作した(図 5)。これは、我々が、もともと試作し使用していた 3φ の砲弾型 LED を使用した 2 波長 2 重リング状光源を基本にしたものであるが、従来よりも小型化に成功した。本光源では、開口部に近い内側 2 重のリングには 850 nm の LED を使用し、明瞳孔用とした。外側 2 重リングには 940 nm LED を使用し、暗瞳孔用とした。内側の開口部は従来の 2 波長 2 重リング光源と比較して径が小さくなっており(従来光源 12 mm, 新光源 9 mm), LED がカメラ開口部に近い位置に設置されたことによって、より強い明瞳孔効果が期待できる。

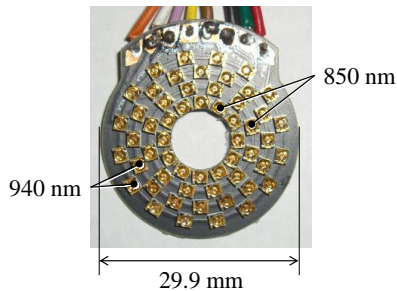


図 5 2 波長 4 重リング状 LED 光源

4. 研究成果

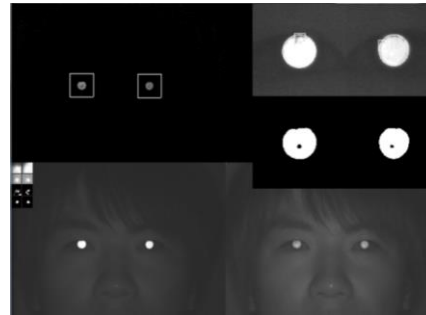
(1) 60 fps カメラを使用した検出実験

一般的な 60 fps のカメラに本光源を取り付け、暗所および直射日光が顔面に正面から当たる環境において、瞳孔および角膜反射の検出を試みた。被験者をディスプレイから約 80 cm の位置に座らせ画像を撮影した。眼周辺の照度は、暗所で約 0.1 lux, 直射日光下で約 42,000~60,000 lux であった。

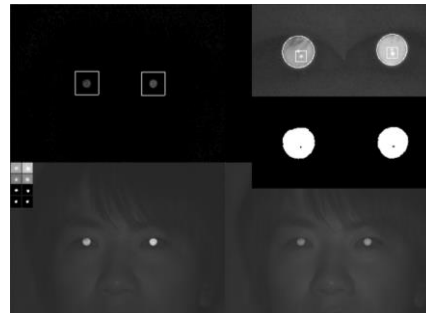
図 6 に、暗所において内側 1 重目と 2 重目の LED リングをそれぞれ発光させ、瞳孔および角膜反射を検出した結果を示す。図 6(a) および(b)における左下, 右下の画像はそれぞれ明瞳孔画像, 暗瞳孔画像であり, 左上は両画像の差分画像である。また, 右上には瞳孔および角膜反射の検出結果を示しており, 瞳孔は白い楕円で, 角膜反射は白い四角で囲まれている。図 6(a) の 1 重目を発光させた場合では, 瞳孔は正しく検出できているが, 瞳孔が大きく輝度が飽和しており, 角膜反射が瞳孔に埋もれることで, 誤検出されていた。しかし, 図 6(a) の 2 重目を発光させた場合では, 瞳孔輝度が低く抑えられ, 角膜反射も正しく検出できていた。

図 7 は, 直射日光下における図 6 と同様の結果を示す。瞳孔が小さくなっているため,

明瞳孔効果が強くなる 1 重目リングを発光させた場合には瞳孔および角膜反射が正しく検出できている。一方, 明瞳孔効果が弱くなる 2 重目を発光させた場合は, 瞳孔および角膜反射は検出できなかった。

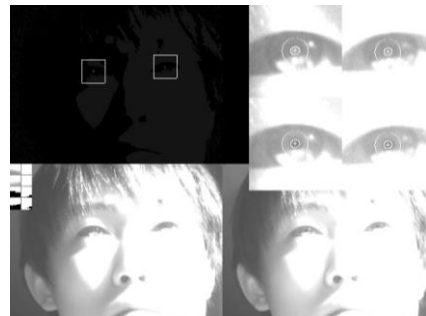


(a) 1 重目の LED リングを発光させた場合



(b) 2 重目の LED リングを発光させた場合

図 6 暗所で 60 fps カメラを使用し, 内側 1 重目リングと 2 重目リングのそれぞれを発光させ場合の瞳孔および角膜反射検出結果



(a) 1 重目の LED リングを発光させた場合



(b) 2 重目の LED リングを発光させた場合

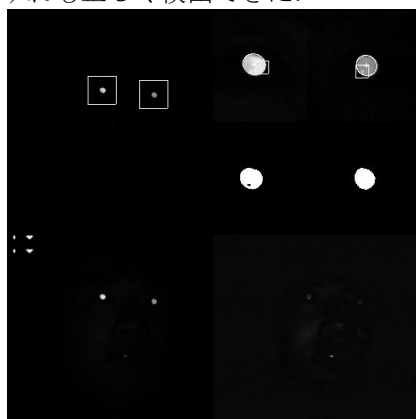
図 7 直射日光下で 60 fps カメラを使用し, 内側 1 重目リングと 2 重目リングのそれぞれを発光させ場合の瞳孔および角膜反射検出結果

(2) 高速度カメラを使用した検出実験

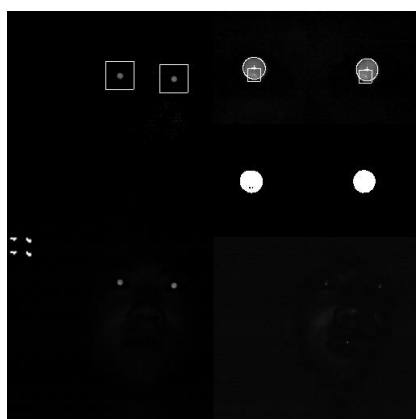
高速度カメラ (2,000 fps) および無照明画像を用いた画像処理法を用いた瞳孔および角膜反射の検出を, 60 fps カメラを使用し

た場合と同様の条件で暗所および直射日光下において行った。

図8に、暗所において内側1重目と2重目のLEDリングをそれぞれ発光させたときの瞳孔および角膜反射を検出した結果を示す。60 fps カメラ使用時の結果と同様に、1重目を発光させた場合は、瞳孔が正しく検出できたが、角膜反射は誤検出されていた。しかし、2重目を発光させた場合は、瞳孔と角膜反射のいずれも正しく検出できた。



(a) 1重目のLEDリングを発光させた場合



(b) 2重目のLEDリングを発光させた場合

図8 暗所で高速度カメラを使用し、内側1重目リングと2重目リングのそれぞれを発光させ場合の瞳孔および角膜反射検出結果

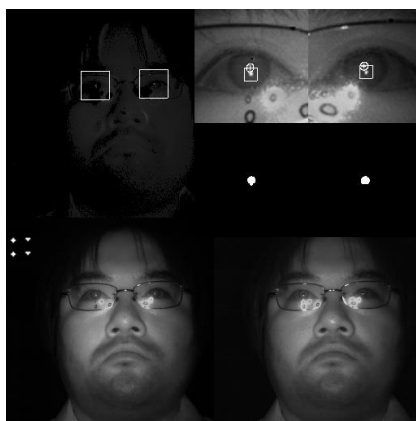


図9 高速度カメラを使用し、直射日光下で、内側1重目リングと2重目リングを同時発光させた場合の瞳孔および角膜反射検出結果

直射日光下において高速度カメラを使用した場合、内側1重目を使用しても光量が足りなかった。そこで、同時発光LED数を増やす必要があり、内側1リングと内側2重リングを同時発光させた。図9は、直射日光下(約16,000 lux)における瞳孔および角膜反射の検出結果である。図中の左下, 右下画像は明瞳孔画像, 暗瞳孔画像から無照明画像をそれぞれ背景差分した, 差分明瞳孔画像と差分暗瞳孔画像を示しており, 図7の明・暗瞳孔画像と比較すると, 輝度が低くなっている。内側2重リングを同時発光させることで, 瞳孔を正しく検出できた。また, 角膜反射も検出できた。

(3) 結論

本研究では、暗所条件から瞳孔が小さくなる高照度条件において、瞳孔や角膜反射を検出するために必要な近赤外LED光源を新規に開発し、今後の瞳孔・角膜反射検出用光学系の開発に有用な示唆を得ることを目的とした。当初、小型ミラーやハーフミラーを使用し、カメラ開口部内から2波長光を出射して、明・暗瞳孔画像および角膜反射を取得する光学系を試作したが、瞳孔や角膜反射を十分に検出することができなかった。そこで反射型LEDを使用した2波長4重リング光源を作成した。暗所条件では内側から2重目のリングと発光させ明瞳孔画像を得た。高照度条件では内側1重目と2重目を同時発光させ明瞳孔画像を得た。その結果、どちらの場合も、瞳孔と角膜反射が正しく検出することができた。これにより注視点検出も可能であることが示唆された。本研究で得られた知見は、今後の光源設計や光源発光法の開発にとって有用であると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計7件)

- ① 山川大貴, 福元清剛, 海老澤嘉伸: 3カメラによる眼鏡装着者における瞳孔検出改善, 映像情報メディア学会誌, 査読有, 68(6), pp. J232-J237, 2014, DOI: 10.3169/itej.68.J232
- ② Y. Ebisawa and K. Fukumoto: Head-free, Remote Eye-gaze Detection System Based on Pupil-corneal Reflection Method with Easy Calibration Using Two Stereo-calibrated Video Cameras, IEEE Trans Biomed Eng., 査読有, 60(10), pp. 2952-2960, 2013
- ③ 福元清剛, 海老澤嘉伸: ビデオ式注視点検出システムにおける瞳孔間距離一定を仮定した瞳孔検出のロバスト性向上-眼鏡反射問題への対処法-, 映像情報メディア学会誌, 査読有, 66(12), pp. J504-J509, 2012, DOI:

10.3169/itej.66.J504

- ④ 海老澤嘉伸：近赤外光源と高速度カメラを用いた瞳孔及び角膜反射検出，画像ラボ，査読無，23(9)，pp.29-34，2012
- ⑤ 海老澤嘉伸：車載用高精度視線検出を旨して～頭部移動を許容する遠隔注視点検出装置～，0 plus E，査読無，34(6)，pp.512-521，2012

他 2 件

〔学会発表〕(計 24 件)

- ① 曾根祐輔，福元清剛，海老澤嘉伸：遠隔注視点検出装置における近赤外光源の発光量自動調整による注視点検出のロバスト性向上，2014年映像情報メディア学会冬季大会，2014年12月17日～2014年12月18日，東京理科大学 森戸記念館（東京都新宿区）
- ② 望月幸平，齊藤翔太，福元清剛，海老澤嘉伸：遠隔注視点検出装置の眼鏡反射対応のための新光源と差分位置補正法の提案，2014年映像情報メディア学会冬季大会，2014年12月17日～2014年12月18日，東京理科大学 森戸記念館（東京都新宿区）
- ③ 齊藤翔太，福元清剛，海老澤嘉伸：高速度カメラを用いた高照度下対応の注視点検出装置の実装，DIA2014，2014年3月6日～2014年3月7日，熊本大学 百周年記念館（熊本県熊本市中央区）
- ④ 齊藤翔太，増田和也，福元清剛，海老澤嘉伸：遠隔注視点検出装置における眼鏡着用者対応のための近赤外光源の提案，ViEW2013，2013年12月5日～2013年12月6日，パシフィコ横浜アネックスホール（神奈川県横浜市西区）
- ⑤ Y. Ebisawa and K. Fukumoto: Head-Free, Remote Gaze Detection System Based on Pupil-Corneal Reflection Method with Using Two Video Cameras-One-Point and Nonlinear Calibrations, HCII2013, 2013年7月24日～2013年7月26日, Mirage Hotel (Las Vegas, Nevada, USA)

他 19 件

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 22 件)

名称：瞳孔検出装置、瞳孔検出方法及び瞳孔検出プログラム

発明者：海老澤嘉伸

権利者：国立大学法人静岡大学

種類：特許

番号：特願 2014-230030

出願年月日：2014年11月12日

国内外の別：国内

名称：瞳孔検出用光源装置の制御方法

発明者：海老澤嘉伸

権利者：国立大学法人静岡大学

種類：特許

番号：特願 2014-230099

出願年月日：2014年11月12日

国内外の別：国内

名称：瞳孔検出システム、視線検出システム、瞳孔検出方法、および瞳孔検出プログラム

発明者：海老澤嘉伸

権利者：国立大学法人静岡大学

種類：特許

番号：特願 2014-118846

出願年月日：2014年6月9日

国内外の別：国内

名称：瞳孔検出用光源装置、瞳孔検出装置及び瞳孔検出方法

発明者：海老澤嘉伸

権利者：国立大学法人静岡大学

種類：特許

番号：特願 2012-120312

出願年月日：2013年5月8日

国内外の別：国内

名称：瞳孔検出方法、角膜反射検出方法、顔姿勢検出方法及び瞳孔追尾方法

発明者：海老澤嘉伸

権利者：国立大学法人静岡大学

種類：特許

番号：特願 2012-120312

出願年月日：2012年5月25日

国内外の別：国内

他 17 件

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.sys.eng.shizuoka.ac.jp/~ebiken/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

海老澤 嘉伸 (EBISAWA, Yoshinobu)

静岡大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40213574