

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24650105

研究課題名(和文)実世界環境下での輻輳眼球運動計測による視空間情報処理の研究

研究課題名(英文)Eye movements in the real 3D world measured by an advanced binocular eye tracking system

研究代表者

河野 憲二 (Kawano, Kenji)

京都大学・健康長寿社会の総合医療開発ユニット・特任教授

研究者番号：40134530

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、輻輳眼球運動とサッケード運動を計測するための高精度の眼球運動計測システムを開発した。赤外線で見球を照射し、高速ビデオカメラで撮像した瞳孔を楕円近似し、回転角を計測する。まずマウスを対象として短時間で校正が可能なアルゴリズムを完成させた。次にサルを対象としたシステムを完成させ、このシステムとサーチコイルを使ったシステムを用いて眼球運動を同時計測し、開発したシステムの精度を確認した。さらに同じシステムをヒトの両眼眼球運動計測に適用した。計測実験の結果、近い位置と遠い位置に置いた視覚刺激を交互に見た時、輻輳眼球運動とサッケード運動の間に相互の干渉作用があることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：We developed a new binocular eye tracking system. The system adopts a wide-field, hi-resolution (2048x2048 pixels), and hi-frame-rate USB-3.0 digital camera. Infrared light illuminates both eyes and the reflected image of the illumination on the cornea and the black image of the pupil of each eye are captured by the camera. The center of the pupil is calculated by fitting an ellipse and tracked over time. The reflected image of the illumination on the cornea is used to compensate head-movements.

To assess the quality of this system, we developed a new "real 3-D visual display system" that presents two wide-field visual images placed at different distances but at the same visual angle from the subject. By using the binocular eye tracking system and the real 3-D visual display system, we characterized vergence eye movements of humans when ocular fixation shifted between two visual stimuli of the same view angles placed at different distances in 3-D space.

研究分野：神経生理学

キーワード：eye movements 3-D vision

### 1. 研究開始当初の背景

脳における視覚情報処理の理解は、麻酔下の動物や注視タスクを訓練した無麻酔の動物など眼が動かない実験条件下での研究により急速に進んできている。しかし、私たちを取り巻く環境には豊富な視覚対象物があり、私たちは絶えず視線を移し、その対象物を観察し、知覚している。この視線の急速な移動はサッケード運動と呼ばれ、網膜周辺部に比較して高い感受性を持つ中心窩で対象物を見るために起こる。実世界環境下での視覚情報処理については、サッケード運動との関連からの研究が進められてきている。しかし、サッケード運動で視線を移すプロセスは、写真やコンピュータディスプレイ上の画像を見せることにより調べられているが、いずれも対象図形は眼から同一距離に付置されている。実世界環境下では眼と対象物の間の距離は様々であり、両眼で対象物を融合して見るために輻輳（あるいは開散）眼球運動が起きている。様々な距離に付置された対象物に視線を移す時の輻輳眼球運動をサッケード運動と同時に計測することにより、実世界環境下での視覚情報処理についての新たな知見が得られると考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究は、ヒトが豊富な視環境の中から処理すべき対象物を抽出し、視線を向ける時に起こる輻輳眼球運動とサッケード運動を調べることにより、実世界環境下で対象物の存在を感じ、眼を向けるための視空間情報処理を明らかにしようとするものである。そのため、輻輳眼球運動とサッケード運動を計測するための高精度の眼球運動計測システムを新たに開発する。この高精度の眼球運動計測システムを用いて実世界環境下で被験者の眼から様々な距離に付置された対象物に視線を移す時の輻輳眼球運動をサッケード運動と同時に計測する。この結果を解析することにより、実世界環境下での視覚情報処理についての新たな知見を得ることを目指している。

### 3. 研究の方法

被験者の両眼を赤外線にて照明し、可視光を遮断し赤外線のみを透過するフィルターを備えた USB3.0 接続の高速撮像 CMOS カメラを用いて撮像する。画像処理により被験者の各眼球の瞳孔を楕円近似するとともに、角膜に映る赤外線照明の重心を求める。これらのデータから、眼球回転角を計測する手法を用いて両眼の眼の動きを計測する。

まず、マウスを対象とした眼球運動計測システムを作成する。マウスの場合には片眼の眼球運動を計測し、眼球運動の訓練ができないため、受動的な校正手法を開発する必要がある。

次に、サルを対象とした眼球運動計測システムを開発する。サルでは眼球運動の訓練が

可能であり、また、我々の研究室ではアイコンシステムを使った眼球運動計測を行っているため、当該研究課題で開発した計測システムとの同時計測により、システムの客観的な評価が可能となる。

動物を対象とした計測システムの開発結果を踏まえて、ヒトを対象とした眼球運動計測システムを開発する。ヒトを対象とした計測では輻輳運動を計測するため両眼の眼球運動を同時に計測できるシステムを開発する。

ヒトを被験者とした実験では、新たに開発した「実空間三次元視覚刺激装置(real 3-D visual display system)」を使って、被験者に近い位置と遠い位置に置いた視覚刺激を交互に見させることにより輻輳眼球運動とサッケード運動を誘発し、計測した。

### 4. 研究成果

この研究で USB3.0 デジタルカメラを用いた非侵襲かつ構築が容易な両眼眼球運動計測システムを開発した。近赤外線で見えを照明し、角膜上に映る照明の反射光と黒く見える瞳孔を、可視光を遮断し近赤外線のみを透過するフィルターを装着したカメラで撮影する。撮影された画像を用い、即時画像処理を行い、反射光重心および楕円で近似した瞳孔形状から楕円中心を求める。事前に校正画像を提示することで、反射光重心と角膜曲率中心の水平、垂直距離、角膜曲率中心と眼球回転中心の距離、カメラ座標系から対象物座標系への変換行列を取得する。これらの校正値を利用し、瞳孔中心位置と反射光重心位置より頭部の動きに左右されない眼球運動を算出する。測定した値は、DA コンバータにより電圧出力、ネットワーク経由での出力、ファイルへの記録を行うことができる。従来の慢性実験において用いられてきたサーチコイルを利用した視線計測システムは、出力をアナログ電圧で行っている。本システムも DA コンバータによる電圧出力も可能なため、このシステムを用いることにより侵襲性の低い実験系への移行が可能となる。

Windows7/8/8.1 x64 上での動作を確認した。

今回用いたカメラは 2048x2048pixel の解像度があり、瞳孔を十分な解像度で撮影した上で両眼を撮影すること可能であった。また、最大 700Hz での計測が可能である。

両眼を有する模擬眼球を作成し、このシステムの性能の評価を行った。ヒトで計測を行い、両眼の視線、輻輳開散運動、瞳孔間距離などリアルタイムで計測できることを確認した。

実際の動物で眼球運動を計測する場合、正確な校正が必要となる。このシステムには、2つの校正段階を設定した。最初の段階は、受動的校正。被験者が偶発的に目を動かしたとき、(その動画像より)システムは瞳孔回転中心、瞳孔回転半径、角膜曲率回転半径、反射光重心と角膜距離率中心の水平、垂直を

求める。この校正により、カメラに対する視線方向を計算できるようになる。能動的校正ができないマウスは、ここで取得したデータを用いてカメラ座標系における視線の計測を行う。次の段階は、能動的校正。被験者は、コンピュータ上のディスプレイに提示される3から9個の対象を注視する、システムはそこからカメラ座標系から対象物座標系に変換を行うための変換行列を取得する。この受動的、能動的校正により被験者の視線を対象物座標系に置いて計測できるようになる。まず、マウスを対象として眼球運動を計測し、短時間で校正が可能なアルゴリズムを完成させた。

次にサルを対象として眼球運動を計測するシステムを完成させた。このシステムとサーチコイルを使ったシステムを用いて眼球運動を同時計測し、開発したシステムの精度を確認した。動物を対象としたシステムは、単眼を対象としたものであった。より広い範囲の撮影を行い、画像処理の対象を二箇所増加させることで、同じシステムをヒトの両眼眼球運動計測に適用することが出来た。一台のカメラから取得される画像を処理しているため、二台のカメラで片眼ずつ計測する他のシステムと異なり、左右の眼の計測データに時間のズレが原理的に生ずることがないという利点を有している。輻輳角は両眼の計測データより算出されるため、時間の同期を取るということは非常に重要である。

ヒトを対象とした両眼輻輳運動を計測するために、「実空間三次元視覚刺激装置(real 3-D visual display system)」の開発を行った。この装置は、液晶ディスプレイ、ハーフミラー、それらを保持する直方体の枠(アルミ角柱)、遠距離位置視覚刺激用のもう一台の液晶ディスプレイにより構成される。被験者の前に直方体の枠を設置する。直方体の枠の上面に近い視覚刺激を提示するための液晶ディスプレイを表示面が枠の内側を向くように載せる。直方体の内部には上部に乗せた液晶ディスプレイの画面を反射させて提示するハーフミラーを45度の角度で配置する。直方体枠の被験者と反対側にもう一台の液晶ディスプレイを配置する。ハーフミラーを通して、被験者に遠い視覚刺激を提示することができる。視覚刺激提示ソフトを導入したコンピュータに二台の液晶ディスプレイを接続する。それぞれのディスプレイを切り替えて視覚刺激を提示することにより、被験者に三次元空間上の異なる位置に視覚刺激を提示することが可能になった。

これら両眼眼球運動計測システムと実空間三次元視覚刺激装置(real 3-D visual display system)」を用いることによりヒトを対象とした計測実験の結果、近い位置と遠い位置に置いた視覚刺激を交互に見た時、教科書に記載され、よく知られている Yabus (1957) の実験結果とは異なり、輻輳眼球運動とサッケード運動との間に相互の干渉作

用があることが明らかになった。

## 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)

Sugita Y, Miura K, Araki F, Furukawa T, Kawano K Contributions of retinal direction-selective ganglion cells to optokinetic responses in mice *European Journal of Neuroscience*, 38:2823- 2831 (2013) DOI:10.1111/ ejn.12284 査読有

Miura K, Inaba N, Aoki Y, Kawano K Difference in Visual Motion Representation between Cortical Areas MT and MST during Ocular Following Responses *Journal of Neuroscience*. 34: 2160- 2168 (2014) DOI: 10.1523/ JNEUROSCI.3797-13.2014 査読有

Inaba N, Kawano K. Neurons in cortical area MST remap the memory trace of visual motion across saccadic eye movements. *Proc Nat Acad Sci*. 111: 7825- 7830 (2014) DOI: 10.1073/ pnas.1401370111 査読有

Sugase- Miyamoto Y, Matsumoto N, Ohya K, Kawano K. Face inversion decreased information about facial identity and expression in face- responsive neurons in macaque area TE. *J Neurosci*. 34: 12457-12469 (2014) DOI: 10.1523/ JNEUROSCI.0485- 14 査読有

Nohara S, Kawano K, Miura K. Difference in perceptual and oculomotor responses revealed by apparent motion stimuli presented with an inter- stimulus interval. *J. Neurophysiology*. 113: 3219- 3228 (2015) DOI: 10.1152/ jn.00647 査読有

Sugita Y, Araki F, Chaya T, Kawano K, Furukawa T, Miura K. Role of the mouse retinal photoreceptor ribbon synapse in visual motion processing for optokinetic responses. *PLoS One*. 10: e0124132 (2015) DOI: 10.1371/ journal.pone.0124132 査読有

Inaba, N, Kawano, K. Eye position effects on the remapped memory trace of visual motion in cortical area MST. *Scientific Reports* 6: 22013 (2016) DOI: 10.1038/ srep22013 査読有

[学会発表](計 14 件)

杉田 祐子、三浦 健一郎、小池 千恵子、荒木 章之、古川 貴久、河野 憲二 マウス視運動性反応における網膜方向選択性神経節細胞の役割第35回日本神経科学大会 2012年09月19日 名古屋市

松田 圭司、河野 憲二、三浦 健一郎 高速撮影カメラを用いた汎用リアルタイム眼球運動計測システム第 35 回日本神経科学大会

2012年09月21日 名古屋市  
杉田 祐子、三浦 健一郎、小池 千恵子、荒  
木 章之、古川 貴久、河野 憲二 マウス OKR  
における網膜 ON 型方向選択性神経節細胞の  
役割 第 105 回近畿生理学談話会 2012 年 09  
月 29 日 守口市

清水直樹、山中敏彰、細井裕司、和田佳郎、  
河野 憲二 マウスにおける垂直性 OKR の検討  
第 71 回日本めまい平衡医学会総会・学術講  
演会 2012 年 11 月 29 日 東京都千代田区  
松田圭司、清水直樹、杉田祐子、河野憲二、  
三浦健一郎 高速撮影カメラを用いたマウス  
視線計測システム 第 36 回日本神経科学大会  
2013 年 06 月 21 日(京都)

松浦清人、三浦健一郎、河野憲二 色度情報と  
輝度情報から成る視覚刺激の動きで起る  
追従眼球運動 第 37 回日本神経科学大会  
2014 年 09 月 11 日(横浜)

菅生一宮本康子、松本有史、河野憲二 顔の倒  
立提示でも保たれるサル TE 野の神経活動の  
特徴 第 37 回日本神経科学大会 2014 年 09 月  
12 日(横浜)

松田圭司、河野憲二 高速撮影カメラを用い  
たリアルタイム両眼眼球運動計測システム  
第 37 回日本神経科学大会 2014 年 09 月 12 日  
(横浜)

河野憲二 動くものを眼を動かしてみるー眼  
球運動研究でわかること 第 37 回日本神経科  
学大会(招待講演) 2014 年 09 月 12 日(横浜)  
松田圭司、竹村文、河野憲二 新しいリア  
ルタイム両眼眼球運動計測システムによる  
輻輳開散運動の計測 第 38 回日本神経科学大  
会 2015 年 07 月 28 日(神戸)

K. Matsuda, A. Takemura, K. Miura, T. Ogawa,  
K. Kawano. An advanced real- time  
monocular/ binocular eye tracking system  
using a high frame- rate digital camera  
Annual Meeting Society for Neuroscience  
2014 年 11 月 18 日( Washington, DC)

N. Matsumoto, Y. Sugase- Miyamoto, K.  
Kawano. Members of face- responsive  
neurons in monkey area TE that contribute  
to global categorization of faces and to  
upright- face versus inverted- face  
categorization are different. Annual  
Meeting Society for Neuroscience 2014 年  
11 月 19 日( Washington, DC, USA)

K. Kawano The Role of Cortical Areas MT/  
MST in Short- Latency Ocular Tracking The  
Memorial Lecture for Dr. Hagiwara (招待  
講演) 2015 年 03 月 23 日(神戸)

K. Kawano Memory Remapping of Moving  
Stimuli in Cortical Area MST. Gordon  
Research Conference (招待講演) 2015 年 8  
月 3 日( Boston, USA)

〔図書〕(計 1 件)

河野憲二 「人工物とのアナロジーで理解す  
る視覚」 p 78-96 春日直樹編「科学と文化  
をつなぐ アナロジーという思考様式」東京  
大学出版会 (2016)

〔産業財産権〕

出願状況(計 2 件)

名称: 瞳孔部分を近似する楕円の検出を行う  
方法

発明者: 松田圭司

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2012-207362

出願年月日: 2012/09/20

国内外の別: 国内

名称: 視点位置の計測方法及び計測システム

発明者: 松田圭司、河野憲二

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 2014-184347

出願年月日: 2014/09/10

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

名称:

方法

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.kyoto-np.co.jp/static/kp/med  
ical/search/201506/column.html](http://www.kyoto-np.co.jp/static/kp/medical/search/201506/column.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河野憲二 (KAWANO, Kenji)

京都大学・健康長寿社会の総合医療開発ユニ  
ット・特任教授

研究者番号: 40134530

(2) 研究分担者

松田圭司 (MATSUDA Keiji)

産業技術総合研究所・人間情報研究部門・主  
任研究員

研究者番号: 50358024