

独立成分分析および決定木を利用した瞬目・固視・ サッカードに伴う眼電図波形判別の試み

Discrimination of electro-oculography of blinks, fixations and
saccades using Independent Component Analysis and Decision Tree.

十 河 宏 行

目 的

眼球運動は人間の認知機能の研究における有効な指標のひとつである。しかし、日常的な状況における人間の認知機能の研究に眼球運動を応用するにはさまざまな技術的問題が存在する。眼球運動を測定する方法はいくつかあるが（古賀，1998）、現在市販されている研究用測定装置の主流はカメラによって眼球運動を撮影して記録を行うビデオ式測定装置である。ビデオ式測定装置には、被測定者の眼球を撮影するためカメラを被測定者の正面に設置するリモート式と、眼鏡型、帽子型などの器具に小型のカメラを組み込んで頭部に装着するヘッドマウント式がある。リモート式ではチェンレストやヘッドレストと呼ばれる器具を用いて被測定者の頭部運動を制限したり、装置の正面の一定の範囲内から頭部が移動しないように被測定者に指示したりする必要がある。ヘッドマウント式ではある程度の頭部運動が可能だが、カメラと記録用装置を接続するためのケーブルによる移動範囲の制限、カメラを固定するためのベルト等による頭部への圧迫、頭部に装着する器具の重さによる疲労などの問題がある。最近ではヘッドマウント式装置の小型化、軽量化、無線化が進んでいるが、バッテリー容量などによる制限のため、長時間の連続測定が困難である。日常的状況における眼球運動を測定するためには、被測定者に出来るだけ負担をかけずに長時間記録を行うことが可能な測定装置が不可欠である。

低負荷かつ長時間の眼球運動測定を実現するうえで注目される測定方法のひとつとして、眼電図（electro-oculography: 以下 EOG）が挙げられる。人間の眼球には角膜側が視神経側に対して正となる電位差があり、眼球周辺の皮膚上に電極を配置すると、眼球運動に応じて生じる電位の変化を記録することができる（飯島，1995）。EOG は

この現象を利用した眼球運動測定法であり、ビデオ式と比較して大幅な小型化、省電力化が可能である。この特性を活かして眼鏡型のボディに EOG 測定機能を組み込んだ機器が JINS 社により販売されている。研究用モデルである MEME ES_R（以下 ES_R）は水平、垂直 2 チャンネルの EOG に加えてジャイロセンサと加速度センサによる頭部運動を測定する機能を持ち、Bluetooth 接続で PC、スマートフォン等の外部機器に測定データを送信して記録することが出来る。さらに、バッテリーで数時間以上の連続計測が可能であり、重量が約 36g と眼球運動測定装置としては軽量であるため、被測定者に大きな負担をかけずに長時間測定を行うことができる。

この長時間測定可能という ES_R の特徴を活用して、Iwaki, Sogo, Morita, Nishikawa, Ando, Miyaue, Tada, Yabe, Nagai & Nomoto (2019) はパーキンソン病患者の長時間にわたる瞬目発生頻度の測定を試みた。瞬目時に眼球はまず上方向に運動した後、下方向へ運動して元の位置へ戻る（星野, 1996）ため、EOG 上では図 1 左のようなパルス状の波形として測定することが可能である。しかし、測定されたデータの解析を通じて、ES_R で測定した瞬目波形はサッカードと呼ばれる眼球運動の測定波形と区別が困難であるという問題があることが明らかになった。

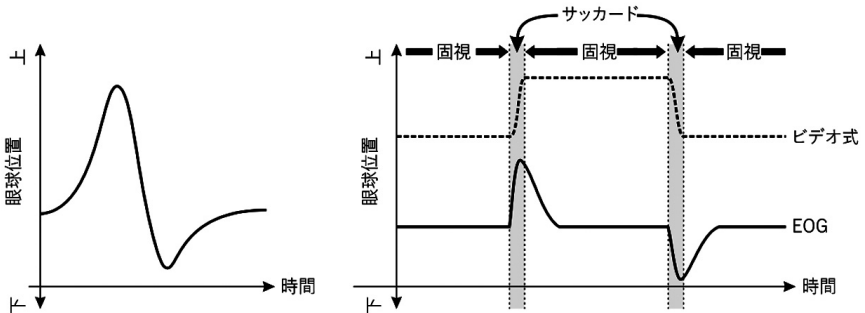


図 1：左は瞬目を交流 EOG で測定した時の波形の模式図。右はサッカード実行時のビデオ式測定装置による測定波形（点線）および交流アンプで増幅した EOG 波形（実線）の模式図。

サッカードは回転速度が数百度 / 秒に達し、数十ミリ秒から百数十ミリ秒で終了する非常に高速な眼球運動である。読書中に視線を動かすなどの日常的な作業における随意的な視線移動の大部分はサッカードによって実現されるので、この眼球運動を誤って瞬目と判別すると、瞬目発生頻度の測定値の信頼性は大きく低下してしまう。通常、サッカードで視線が移動した後は数百ミリ秒ほど視線がほぼ静止する固視と呼ばれる状態となり、固視が終了すればまたサッカードによって異なる場所へ視線が移

動する。このサッカードと固視が繰り返されている状態をビデオ式眼球運動測定装置で測定すると、図1右の点線のようなステップ状の波形が記録される。一方 EOG でサッカードと固視の繰り返しを測定する場合、電気信号の増幅に用いるアンプの周波数特性によって得られる波形が大きく異なる。直流アンプであればビデオ式測定装置とほぼ同様の波形が得られるが、低空間周波数成分のゲインが小さいアンプ（交流アンプ）を用いると、図1右の実線のようなパルス状の波形が得られる。ES_Rのアンプ特性は公開されていないが、ES_Rでサッカードを測定すると交流アンプ使用時のようなパルス状の波形が得られる。この波形が瞬目測定時の波形（図1左）と類似しているため、ES_Rでは瞬目とサッカードの判別が困難なのである。

本論文では、ES_Rで測定した瞬目とサッカードの波形の区別に独立成分分析 (independent component analysis; 以下 ICA) を用いる方法を検討する。ICA は m 次元の信号 $x_i (i = 1, \dots, m)$ がある時に、 n 次元の独立な信号 $s_j (j = 1, \dots, n)$ の線形和 $x_i = a_{i,1}s_1 + a_{i,2}s_2 + \dots + a_{i,n}s_n + N_i$ に分解する手法である（ただし $N_i (i = 1, \dots, m)$ は互いに独立な平均値 0 の Gauss 雑音）。サッカードおよび瞬目開始時から 500 ミリ秒間、および固視中の 500 ミリ秒間のデータを切り出すと、ES_R のサンプリング周波数が 100 Hz であるため、50 次元のベクトルが 2 つ（水平、垂直成分）得られる。ICA を用いて 2 つの 50 次元ベクトルを次元削減し、決定木を用いてサッカード、瞬目、固視を判別する。削減後の次元数、決定木の深さをパラメータとして最適なパラメータを探索し、交差検証によって判別精度の評価を行う。

方法

眼球運動に異常がない 19 歳から 29 歳までの女性 5 名、男性 5 名が実験に参加した。眼球運動測定には ES_R に加えて 100 fps で撮影可能な USB カメラ (NaturalPoint OptiTrack V100R 2) を用いた。刺激提示には 23 型液晶ディスプレイ (EIZO EV2313W-BT; 以下 LCD) を用いた。これらの機器を Windows 10 搭載パーソナルコンピュータ (以下 PC) に接続し、PsychoPy (Peirce, Gray, Simpson, MacAskill, Höchenberger, Sogo, Kastman & Lindeløv, 2019) および GazeParser (Sogo, 2013) を用いて制御した。

実験開始前に参加者に実験の説明を行い、参加同意文書への署名を得て実験を行った。実験はサッカードを測定するセッションと瞬目を測定するセッションで構成された。サッカード測定セッションでは、LCD を設置した机の前に実験参加者を着席させ、頭部の位置を安定させるために LCD の前方 57 cm の位置の設置されたヘッドレストに顎と額を当てるよう指示した。姿勢に無理がないよう椅子の高さの調節などを行

わせた後、実験参加者の右眼が撮影できるようにカメラの位置を調整した。続いて ES_R を装着させて EOG 信号が記録されていることを確認したうえで GazeParser のキャリブレーションを行った。キャリブレーション終了後、参加者に準備ができていることを確認したうえで、実験者が PC に接続したキーボードを操作して試行を開始した。試行中は LCD 中央に視角 4 度、8 度、12 度の半径を持つ同心円と、その中心から水平に右方向を 0 度として 0 度、45 度、90 度、135 度、180 度、225 度、270 度、315 度の 8 方向に視角 12 度の直線を灰色の背景に白色で描画した。実験参加者の課題は、この背景上に描画される 1 辺の長さが視角 0.5 度の黄色で塗りつぶした正方形の視標の移動を追ってサッカードと固視を行うことであった。視標は試行開始時に中央に 1 秒間提示し、同心円と直線の 24 箇所の交点のいずれか 1 箇所に 1 秒間提示した後、再び中央に 1 秒間提示するというサイクルで、すべての交点を無作為な順序で 1 回ずつ巡回するように提示した。視標の移動と同時に 2000Hz のピープ音を 50 ミリ秒提示した。以上の手続きを 1 試行として、試行間に参加者の希望に応じて休憩を取りながら 5 試行を行って 1 セッションとした。

瞬目測定セッションでは、サッカード測定セッションと同様の手続で参加者を着席させて ES_R の装着と GazeParser のキャリブレーションを行った。試行中はサッカード測定セッションと同一の同心円及び直線を提示し、中央に 1 辺の長さが視角 0.5 度の水色で塗りつぶした正方形の視標を提示した。試行開始 1 秒後に第 1 のピープ音 (2000Hz) を 50 ミリ秒提示し、第 1 のピープ音の開始から 1 秒後に第 2 のピープ音 (2000Hz) を 500 ミリ秒提示して、第 2 のピープ音の開始から 1 秒間待つというサイクルでピープ音を提示した。実験参加者に、中央の視標を固視し、ピープ音の長さに合わせて瞬目を行うように指示した。以上のサイクルを 12 回繰り返したものを 1 試行とし、参加者の希望に応じて試行間に休憩を取りながら 5 試行を行って 1 セッションとした。

実験はサッカード測定セッションから開始して瞬目セッションと交互に各 2 セッション、合計 4 セッションを実施して終了した。すべてのセッションで、各試行の開始から終了まで ES_R による EOG 測定と GazeParser によるビデオ式眼球運動測定を同時に行った。

実験終了後、GazeParser で記録したデータからサッカード、瞬目、固視の検出を行った。サッカード検出のパラメータは速度 22 度 / 秒以上、持続時間 12 ミリ秒以上、振幅 0.5 度以上とし、瞬目検出のパラメータは持続時間 50 ミリ秒以上とした。サッカードと瞬目のいずれにも該当しない期間を固視とした。検出されたサッカードおよび瞬目の開始時刻を始点として、ES_R の測定データから 500 ミリ秒間の波形を切り出した。前述の通り ES_R の EOG は水平、垂直 2 チャンネルでサンプリング周波数

が100Hzなので、切り出した波形は2つの50次元のベクトルとなる。固視については500ミリ秒以上持続しているものを対象に、開始時刻を無作為に決定して500ミリ秒間の波形をES_Rの測定データから切り出した。ただし、振幅2.0度未満のサッカードに対応する波形は、ES_Rの測定データ上でノイズとの判別が困難なほど振幅が小さく、瞬目と誤判定する可能性が低いため以後の分析から除外した。

交差検証を行うため、切り出された波形の集合を参加者毎に無作為に5群に等分した。5群のうち4群をまとめて訓練群、残り1群をテスト群とし、訓練群を対象にICAで独立成分を計算した。垂直成分、水平成分ごとに2次元から8次元まで7種類の独立成分を計算し、垂直成分と水平成分の独立成分ベクトルを組み合わせ、49種類の特徴ベクトルを得た。ICAの計算にはscikit-learnライブラリのFastICAを用いた。続いて、特徴ベクトルからサッカード、瞬目、固視を判別する決定木を作成した。決定木の深さは2、4、6、9、12、16、20、25、30、36の10種類とし、作成にはscikit-learnライブラリのDecisionTreeClassifierを使用した。特徴ベクトル49種類、決定木の深さ10種類のすべての組み合わせに対して訓練群の波形を用いて決定木を作成し、テスト群の波形を判別して正判別率を計算した。以上の手続を、すべての群が1度テスト群に割り当てられるように5回繰り返し、正判別率の平均値と標準偏差を計算した。

結 果

図2に測定波形の例を示す。参加者によっては図2下段のような高周波数のノイズが確認されたが、このようなノイズを含むデータに対する判定精度も評価するために、再測定を行わずに以後の分析に使用した。参加者一人あたり平均505.9件のサッカード、834.0件の固視および292.8件の瞬目の波形データが得られた。図3に参加者01のデータにおける独立成分の次元および決定木の深さと正判別率の関係をヒートマップで示す。各ヒートマップは決定木の深さに対応し、横軸は水平成分の独立成分の次元、縦軸は垂直方向の独立成分の次元に対応している。決定木の深さの効果に対して独立成分の次元の効果は限定的であることがわかる。独立成分の次元の効果を確認するために、垂直および水平成分の次元が等しい特徴ベクトル（図3の各ヒートマップの左下から右上への対角線に相当する）を抽出して決定木の深さについて平均し、独立成分の次元に対してプロットしたものが図4である。左は参加者別の平均値、右は左に示した参加者別平均値を平均した値を示している。正判別率は参加者間で大きく異なっているものの、次元の変化に対して大きく正判別率が変動しないという傾向は参加者間で一致している。続いて決定木の深さの効果を検討するため、特徴

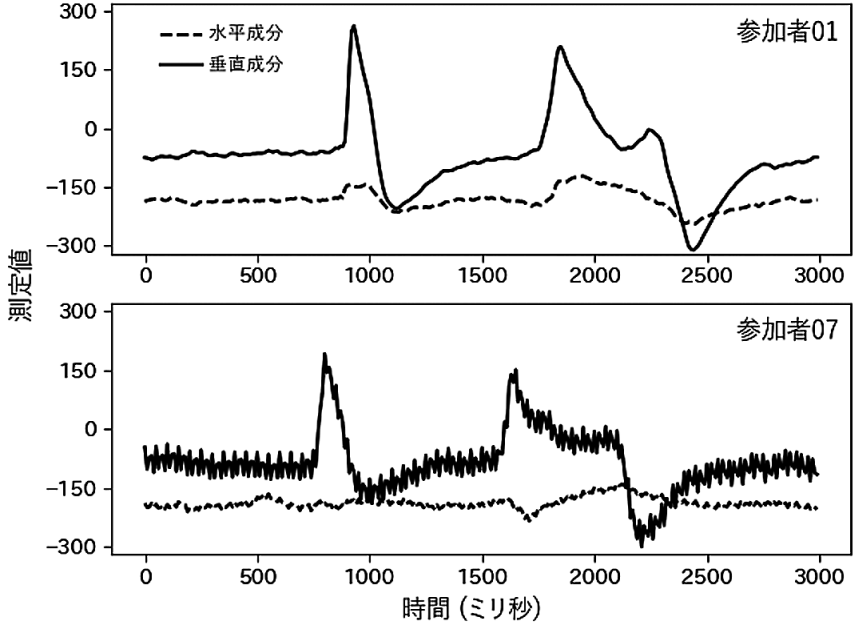


図2：測定された EOG 波形の例。下段の参加者の波形には高周波数のノイズが見られる。

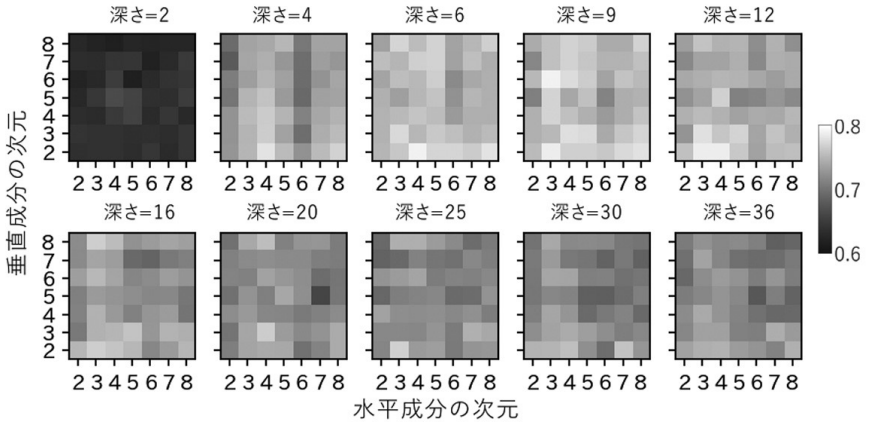


図3：ある参加者のデータにおける独立成分の次元および決定木の深さと正判別率の関係。明るいほど正判別率が高いことを示している。

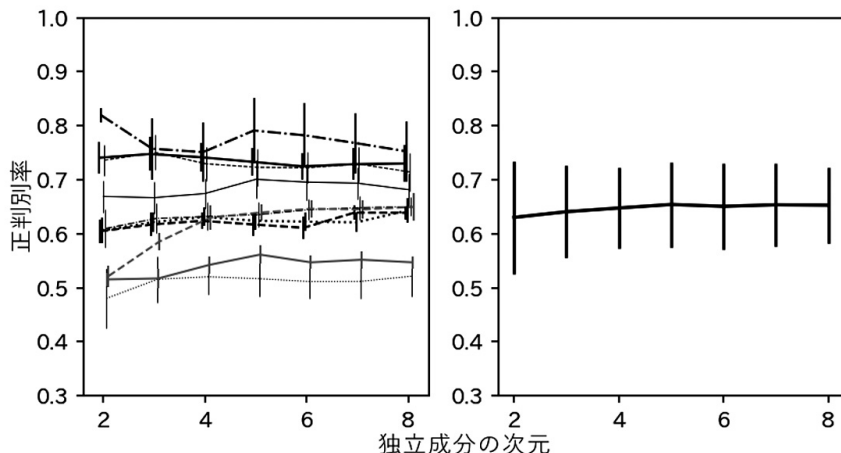


図4：独立成分の次元と正判別率の関係。水平成分、垂直成分とも同じ次元の独立成分を組み合わせ特徴成分とした時の結果を示している。したがって、特徴ベクトルの次元は横軸の値の2倍となる。左は参加者別、右は参加者全員の平均値を計算したもの。エラーバーは標準偏差を示している。

ベクトルについて平均して決定木の深さと正判別率の関係をプロットしたものを図5に示す。左は参加者別に平均したもの、右は左に示した参加者別平均値を平均したものである。個人差があるものの、深さ2から9付近までは深さとともに正判別率が上昇し、それ以上深さが増すと次第に正判別率が低下していく傾向が見られる。垂直および水平成分の次元が等しい特徴ベクトルを用いた結果の中で最も平均正判別率が高かったのは垂直、水平成分の独立成分の次元が7、決定木の深さが9の組み合わせであり、この時平均正判別率は0.677（標準偏差0.08）、最小値0.525、最大値0.797であった。全ての結果の中で最も平均正判別率が高かったのは垂直成分の次元が7、水平成分の次元が8、決定木の深さが6の組み合わせであり、この時平均正判別率は0.679（標準偏差0.06）、最小値0.587、最大値0.795であった。

正判別率の個人差の原因として測定ノイズの影響が考えられるため、固視波形中の眼球運動速度ベクトルの絶対値を計算し、その中央値をノイズ指標とした。図2下段のように高周波ノイズの振幅が大きい場合、この値は高くなる。参加者毎にすべてのパラメータについて平均した正判別率とノイズ指標を計算し、散布図を描いたものが図6である。縦軸は平均正判別率、横軸はノイズ指標である。相関係数は -0.75 であり、ノイズ指標が高いほど平均正判別率が低かった。

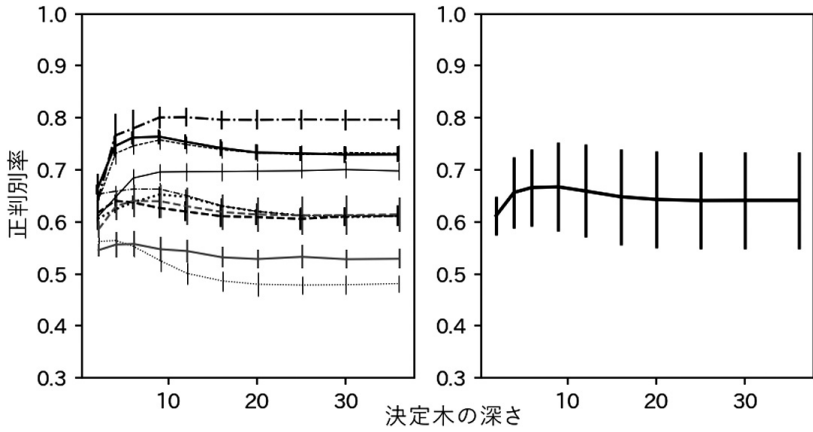


図5：決定木の深さと正判別率の関係。左は参加者別、右は参加者全員の平均値を計算したもの。エラーバーは標準偏差を示している。

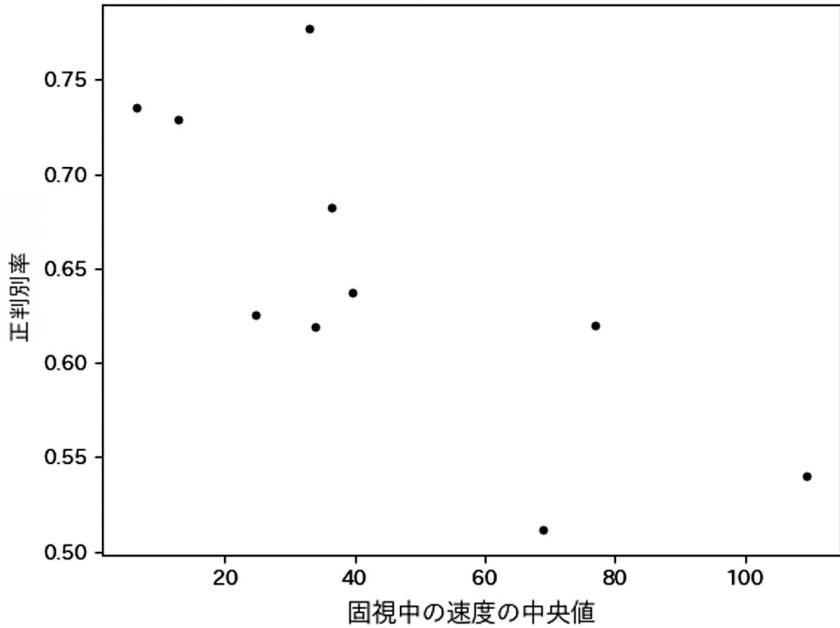


図6：固視中の速度の中央値と参加者別平均正判別率の関係。速度はES_Rの測定値から計算した。高周波数ノイズが高いほど横軸の値は高くなる。

考 察

本研究では、ES_Rによって測定したEOG波形から独立成分分析を用いて特徴ベクトルを得て、決定木を用いてサッカード、瞬目および固視の判別を試みた。検討したパラメータの範囲内で最も高い平均正判別率は約0.68であり、チャンスレベルである0.33と比べると高いものの、十分な判別精度と言えるかどうかは用途に依存するだろう。高周波数ノイズの強さと正判別率に負の相関があったため、電極が安定して皮膚に接するように電極の位置を参加者毎に調節したり、電極に接する部位の皮脂を落としたりするなどの処置によって、より高い判別精度が得られると期待される。しかし、測定が長時間に及ぶ場合は、頭部運動などによる電極の接触状態の悪化や、発汗などによる皮膚電気抵抗の変化が起るため、日常的な状況で理想的な状態を長時間維持するのは困難であろう。ノイズに対して頑健な判別手法を考案する必要がある。

平均正判別率を低下させる可能性がある要因として、高周波数ノイズ以外にも、瞬目に伴う眼球運動の個人差（瀬尾，池田，雲井，1990）や、サッカードとして検出されなかった小振幅の眼球運動が固視に含まれていることなどが考えられる。また、本研究では視標を追ってサッカードと固視を行わせることによってサッカード開始時刻の間隔を確保したが、日常的な状況ではサッカードの開始後500ミリ秒以内に後続のサッカードが生じることは珍しくなく、後続のサッカード波形が判別精度を低下させる可能性が考えられる。切り出す時間を短くすればこのような問題が生じる危険性は低下するが、瞬目波形は数百ミリ秒以上持続するので、瞬目波形の特徴を捉えられない可能性が高まる。波形に応じて切り出し範囲を動的に調整する方法も考えられるが、適切な切り出し範囲を決定する方法と、長さが異なる波形を統一的に扱う方法を考案する必要がある。これらの問題については今後の検討課題である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18K03179 の助成を受けたものである。

引用文献

- 星野 聖 (1996) 注意と瞬目. *テレビジョン学会誌*50(4), 436-442.
- 飯島裕幸 (1995) EOG. *眼科診療プラクティス 17 眼科診療に必要な生理学* pp.116-119. 文光堂.
- Iwaki H, Sogo H, Morita H, Nishikawa N, Ando R, Miyaue N, Tada S, Yabe H, Nagai M, Nomoto M (2019). Using Spontaneous Eye-blink Rates to Predict the Motor Status of Patients with Parkinson's Disease. *Internal medicine*, 58, 1417-1421.
- 古賀一男 (1998) 眼球運動実験 ミニ・ハンドブック. (財労働科学研究所出版部).
- Peirce J, Gray, JR Simpson, MacAskill M, Höchenberger R, Sogo H, Kastman E & Lindeløv JK (2019). PsychoPy2: Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods*, 51, 195-203.
- 瀬尾 徹, 池田利夫, 雲井健雄 (1990). 閉眼時に於ける眼球運動の記録. *Equilibrium Research*, 1990, 49(2), 185-191.
- Sogo, H (2013). GazeParser: an open-source and multiplatform library for low-cost eye tracking and analysis. *Behavior Research Methods*, 45, 684-695