

学位論文要旨

氏名 多々良 俊哉



論文題目

「視線解析を用いた眼球運動評価システムの開発と有用性の検証」

指導教授承認印

半田 知也



【背景】

サーチコイル法や electro-oculography (EOG) などの電気生理的手法による眼球運動検査では、眼球運動の際の時間的な変化を記録することが可能であり、発生した眼球運動を衝動性眼球運動 (saccadic eye movement; saccade) や滑動性追従運動 (smooth pursuit eye movement; pursuit) に分類することが出来る。加えて、得られた眼球運動波形から、眼球運動の速度や潜時を求めることが可能であり、一定速度で動く視標を追視させた場合、視標速度と眼球運動速度の比から、眼球運動の正確性を gain として評価することが出来る。得られる波形から眼球運動を詳細に分析可能な点が電気生理的手法による眼球運動測定法のメリットである一方で、データ計測のためのポリグラフシステムや増幅器、視標提示装置など多くの機器を連動させる必要があり測定が煩雑である点がデメリットである。また測定結果を評価するには計測されたアナログデータを用いた解析が必要なため、解析に時間を要する。

近年では、video-oculography を用いた視線解析による眼球運動検査の試みがなされており、視線情報から高精度な眼球運動情報が非侵襲的に計測可能となっている。しかし市販されている視線解析装置は心理学的分野や消費者行動分析を主な使用用途として用いられている装置である。そのため、医学的な観点から眼球運動測定を行う際には、別途視標提示モニタを用意し独自の刺激を作成し、測定前に十分なキャリブレーションを行う必要があり、測定および解析の煩雑さの問題は解消していない。これらのことから、視線解析を用いた眼球運動測定は限られた研究施設でしか行うことが出来ない上、各研究施設が独自の刺激を用いることから知見の比較が困難なのが現状である。

そこで本研究では、既に眼科医療機器として実用化されている視線解析を応用した他覚的視機能検査装置 ORTe EYENAC (以下、EYENAC; NAC Image Technology 社製) をベースとした簡便な眼球運動評価システムを開発し、本システムの有用性を検証した (第一研究)。本システムの有用性を確認できた後、スポーツ選手は非選手に比べてより正確に眼球運動を行うという仮説を立て、仮説を検証するために、プロバスケットボール選手の眼球運動を分析した (第二研究)。

【対象と方法 (第一研究)】

対象は屈折異常以外に眼疾患の無い 20.1 ~ 22.9 (平均 \pm 標準偏差; 21.3 ± 0.8) 歳の大学生 16 名 (男性 5 名、女性 11 名) とした。除外基準は立体視が 100 second of arc、視力が 0.0 logMAR 未満の対象とした。

使用機器は EYENAC をベースとした眼球運動検査装置 (本機器は以下、EyeScore と呼ぶ) とした。EyeScore では内蔵モニタに視標を提示し、被検者に視標を追視させることで、視線情報から眼球運動を記録している。EyeScore の内蔵モニタのサイズは 6 インチ、解像

度は 2560×1440 ピクセル、モニタ表示の時間分解能は 50 Hz である。内蔵モニタ上の画像は眼前 33 cm の距離で見えるように設計されている。左右眼を 2 台の独立したカメラで捉え、角膜反射法と瞳孔中心法によって視線情報を検出している。眼球位置取得の時間分解能は 30 Hz である。

視標は 0.775 deg のドットとし、視角 20 deg の範囲を水平または垂直方向に 20 s 連続移動させた。視標速度は水平、垂直方向共に 20、40、60、80、100 deg/s の 5 条件とし、全ての視標速度において水平、垂直眼球運動を各 1 回測定した。

得られた視標および視線の波形より、相互相関係数の最大値 (ρ max) を求めることで、波形間の一致率を算出した。 ρ max は視標の移動から視線の移動の際の lag を考慮して、 ± 25 frame の範囲内で算出した。得られた ρ max は、視標の速度、左右眼、視標の移動方向 (水平と垂直) の要素を含めた multiway analysis of variance (ANOVA) および Bonferroni の多重比較を用いて解析した。

また、先行研究を参考に 100 deg/s を超えた眼球運動速度を saccade と定義し、発生頻度と発生のタイミングを求めた。なお、EyeScore では視標と視線位置の検出システムの間に 3 ~ 5 (平均 4.5) frame の遅延が生じるため、視線情報は視標に対して約 0.15 s 遅れて記録される。そのため、saccade のタイミングの計測はこの時間的ずれを考慮し求めた。各視標速度における saccade の発生頻度と ρ max との相関係数を算出した。加えて、視標速度 20 と 100 deg/s の際の saccade の発生頻度間の相関係数を求めた。相関係数の算出には Pearson 積率相関係数を用いた。

本研究は新潟医療福祉大学委員会 (18508-201019) によって承認された。実験はヘルシンキ宣言に従って実施され、すべての参加者から書面によるインフォームドコンセントが得られた。

【結果 (第一研究)】

左右眼の眼球運動波形の一致率を ρ max にて求めた結果、水平眼球運動の際は 0.995 ± 0.008 、垂直眼球運動の際は 0.967 ± 0.062 であった。また水平、垂直眼球運動いずれも time lag が 0 のときに左右眼の ρ max が得られたことから、本システムにおける左右眼同時記録において時間的なずれは生じていなかった。

各視標速度における視標波形と眼球運動の視線波形との一致率を ρ max にて求めた。結果、視標速度が上がるにつれて ρ max が有意に低下し ($p < 0.0001$)、Bonferroni の多重比較の結果、視標速度 20 deg/s と 40 deg/s 間には ρ max に有意差がなく ($p = 0.0839$)、他の速度間では有意差があった ($p = 0.0117 \sim < 0.0001$)。水平眼球運動の際の ρ max は垂直眼球運動より有意に高く ($p = 0.0003$)、左右眼の ρ max に有意差はなかった ($p = 0.3749$)。

Saccade は視標速度が上がるにつれて発生頻度が増加する傾向があった。Saccade 発生のタイミングは視標速度に関係なく、視標が動いてから約 10 ~ 14 frame (0.30 ~ 0.42 s) 後に最も頻繁であった。ただし本測定システムには視標波形と視線波形の間に 3 ~ 5 frame (平均 4.5 frame) 遅延があるため、実際の saccade のタイミングは視標が動きはじめて 5.5 ~ 9.5

frame (0.17~0.29 s) であった。各視標速度における saccade の発生頻度と rho max との相関を分析した結果、視標速度 20 deg/s では $r = -0.75$ ($p = 0.0008$)、40 deg/s では $r = -0.42$ ($p = 0.1023$)、60 deg/s では $r = -0.24$ ($p = 0.3674$)、80 deg/s では $r = 0.09$ ($p = 0.7451$)、100 deg/s では $r = 0.66$ ($p = 0.0050$) であった。視標速度 20 deg/s における saccade の発生頻度と視標速度 100 deg/s における saccade の発生頻度には負の相関があった ($r = -0.51$, $p = 0.0420$)。このことから視標速度が遅い時に saccade が少ない (= rho max が高い) 被検者は、視標速度が速い時には saccade が多く (= rho max が高い) なる傾向にあり、rho max が高い被検者は視標速度に依存せず常に rho max が高かった。

【対象と方法 (第二研究)】

対象は新潟アルビレックス BB に所属する女子プロバスケットボール選手 8 名 (以下、basketball players group) で、平均年齢 (\pm 標準偏差) は 24.3 ± 2.4 歳であった。分析に先立ち、被検者の視力が 0.0 logMAR 以上であること、斜視がないこと、Stereo Fly test (Stereo Optical Co.) で 60 second of arc より良好な立体視が得られることを確認した。

EyeScore を用いて、第一研究と同じ条件で眼球運動の測定を行った。加えて、コントロールとして第一研究の被検者の中から、性別を一致させた 8 名を無作為に抽出した (以下、non-athlete group)。なお、第一研究で判明した視線位置と視標との 3~5 frame の time lag に対処するため、time lag を補正するようにソフトウェアを改良し、non-athlete group のデータは saccade のタイミングを正確に把握するため再解析した。

視線が視標に達しているか調べるため、視標速度 100 deg/s の際の視線波形の振幅の到達点を求め、各サイクルにおける右方視と左方視の際の振幅の合計を全振幅とした。basketball players group と non-athlete group との全振幅の分散の違いを評価するために、F test を行った。さらに Welch Two-Sample t -test を行い、2 群の全振幅を比較した。

加えて、第一研究と同様に 100 deg/s を超える速度の眼球運動を saccade と定義し、saccade のタイミングと頻度を表すヒストグラムを作成し、Geary's test for normality concerning kurtosis を用いて尖度と正規性を評価した。また、2 群間の saccade の際の time lag の分散の違いを評価するために、F test を行った。

本研究は新潟医療福祉大学倫理審査委員会の承認 (18135-190117) を得て実施された。対象には検査の目的および意義を説明した後、同意書を取得してから測定を行った。

【結果 (第二研究)】

視標速度 100 deg/s の測定における、全振幅 (平均値 \pm 標準誤差) は basketball players group が 37.96 ± 0.82 deg、non-athlete group が 27.74 ± 2.55 deg であり、Welch Two-Sample t -test の結果、有意差があった ($p = 0.0047$)。視標は左右方向各 20 deg、合計で 40 deg 移動していることから、basketball players group の方が視標と視線位置が近かったと言える。また、20 s の記録中に 18 サイクルの測定を行っており、各人の 18 サイクル中の分散を求めた。次いで求めた分散の値に対する、8 人分散を求め、F test を行った。その結果、

non-athlete group より basketball players group の分散が小さく ($p = 0.0020$)、basketball players group は眼球運動にばらつきが少なかった。

視標速度 100 deg/s において、basketball players group の saccade は特定のタイミングに集中し、高い尖度を示し、非正規分布であった (尖度 = 8.50、 $p = 0.0050$)。一方で non-athlete group の saccade は特定のタイミングに集中しておらず、尖度は低く、正規分布していた (尖度 = 4.11、 $p = 0.2110$)。saccade の際の time lag の分散は basketball players group が有意に小さかった (F test、 $p = 0.0499$)。これらの結果は、basketball players group は non-athlete group よりも、saccade が特定のタイミングに集中していることを示している。

【結論】

第一研究では、EYENAC に視標位置と視線の同期ユニットを組み込んだ装置“EyeScore”を用いた眼球運動評価システムを開発した。本法で解析した眼球運動は、従来の方法に類似した結果を示しており、本システムは被検者の眼球運動の性質を把握するのに十分であった。さらに、健常成人の中にも視標を捉える際に、視標速度に応じて適切に saccade することが出来る被検者と不得手な被検者がいることが明らかとなった。

第二研究では EyeScore を用いてプロバスケットボール選手の眼球運動を測定し、第一研究の被検者と比較した。その結果、プロバスケットボール選手の saccade 時の視線到達点は非選手よりも視標に近い位置であり、視線移動が正確であった。さらにバスケットボール選手は非選手よりも saccade を規則的に行う性質があることが明らかとなった。