第55回 日本視能矯正学会

一般講演

視線追跡装置による衝動性眼球運動速度の計測

掛上 謙¹⁾・藤田和也¹⁾・田村了以²⁾・三原美晴¹⁾

¹⁾ 富山大学附属病院眼科

²⁾ 富山大学統合神経科学講座

The velocity of saccadic eye movements by using eye-gaze tracking system

Ken Kakeue¹⁾, Kazuya Fujita¹⁾, Ryoi Tamura²⁾, Miharuru Mihara¹⁾

¹⁾ Department of Ophthalmology, Toyama University Hospital

²⁾ Integrative Neuroscience, Toyama University

要 約

【目的】視線追跡装置を用いて健常者の衝動性眼球運動 (saccadic eye movement : SEM) 速度を計測する。

【対象】20歳以上、矯正視力1.0以上で、眼位異常・眼球運動異常・瞳孔異常がない健常者33名を対象とした。

【方法】液晶モニターにHess赤緑試験のチャートを元に作製した図を表示し、中心点から水平・垂直方向は15°、斜方向は21°の位置に点視標を提示。中心点を固視させ、提示した各点視標に視線を移動させた。View Point Eye Tracker® system (Arrington Research, USA) を用い、各眼を高感度カメラで撮像し (220Hz) 瞳孔中心の位置のX-Y座標で記録した。取得したデータからSEMの平均速度および最高速度 (degree/sec) を算出した。

【結果】SEM平均速度は上方 180.0 ± 26.8 (mean $\pm$ SD) deg/sec、下方 177.3 ± 42.9 、右方 217.3 ± 25.0 、左方 214.7 ± 25.0 、右上方 219.5 ± 28.0 、右下方 216.0 ± 45.7 、左上方 231.2 ± 39.7 、左下方 212.2 ± 47.9 であった。水平・斜方向に比べ垂直方向が有意に遅かった ($p < 0.05$)。

【結論】視線追跡装置を用いて健常者のSEM速度の計測を行った。SEM速度は眼球移動方向により差を生じ、垂直方向で遅い結果となった。

別冊請求先 (〒930-0194) 富山県富山市杉谷2630番地 富山大学附属病院眼科 掛上 謙

Tel. 076 (434) 7363 Fax. 076 (434) 5037

E-mail : kakeue@med.u-toyama.ac.jp

Key words : 衝動性眼球運動、ViewPoint EyeTracker、眼球運動速度、健常者

Saccadic eye movement, ViewPoint EyeTracker, velocity of eye movement, healthy individual

Abstract

【Purpose】 To measure the velocity of saccadic eye movements (SEMs) in healthy people by using an eye-gaze tracking system.

【Participants】 Thirty-three healthy individuals aged 20 years or more with a corrected visual acuity of 1.0 or better were included. They had no abnormal eye positions or movements, or pupil abnormality.

【Methods】 A chart, based on the Hess red-green test, was shown on a liquid crystal display (LCD) screen. Dots were displayed at positions of 15 degrees in the horizontal and vertical direction, and 21 degrees in the diagonal direction from the center. First, the subject was instructed to fixate on the center and then, move the eyes to another displayed dot. The ViewPoint EyeTracker® System (Arrington Research, USA) equipped with a high-resolution eye camera (220_Hz) traced the movements of the pupil center and recorded its position in the x-y plane. The mean and maximum velocities of SEMs (degree/sec) were measured using the data obtained.

【Results】 The mean velocity of SEMs in each direction was as follows: supraversion, 180.0 ± 26.8 (mean $\pm$ SD) deg/sec; infraversion, 177.3 ± 42.9 ; dextroversion, 217.3 ± 25.0 ; levoversion, 214.7 ± 25.0 ; dextro-supraversion, 219.5 ± 28.0 ; dextro-infraversion, 216.0 ± 45.7 ; levo-supraversion, 231.2 ± 39.7 ; levo-infraversion, 212.2 ± 47.9 . Vertical gaze velocities were significantly lower than horizontal and diagonal gaze velocities ($p < 0.05$).

【Conclusion】 Velocities of SEMs in healthy individuals were measured. The SEMs differed depending on the direction of eye movement. Especially, the velocities in the vertical direction were lower than those in the other directions.

I. 緒言

定量可能な眼球運動検査にはElectro-oculography (EOG) やサーチコイル法がある。EOGは臨床で簡便に使用できるが精度が低く電極の装着を必要とし、サーチコイル法は高精度だが検査が煩雑であり、被検者への負担が大きい^{1), 2)}。眼球運動は眼科以外に心理学、人間行動学などの分野でも研究されており強膜反射や角膜反射、瞳孔を検知することで非接触にて眼球位置を計測する方法も出てきている^{3), 4)}。

今回我々は瞳孔追跡を利用した視線追跡装置view point eye tracker® (以下アイトラッカー) を使用し衝動性眼球運動saccadic eye movement (以下SEM) 速度を計測したので報告する。

II. 対象及び方法

対象は矯正視力1.0以上で、斜視、眼球運動異常、瞳孔異常、他眼疾患を有さない健常成人33名(男性14名、女性19名、平均 31.9 ± 11.1

歳)。屈折異常者は視標の内径 0.2° を視認することができれば裸眼またはソフトコンタクトレンズ装用下で行い、瞳孔検出に影響が出るハードコンタクトレンズ装用者は対象外とした。

頭部は顎台と額当てに固定し眼前40cmの液晶モニターにHess chartを元に作製した画像を表示。キャリブレーションは計測毎に行い、通常9点で計測可能だがより精度を上げるため16点で行った。両眼開放下にて、中心点を固視させた状態から垂直・水平方向に各々 15° の位置と斜方向は 21° (第三眼位)の位置に視標が出現、消失を繰り返し、中心点と視標を交互に固視させた。順序は上方→右上方→右方→右下方→下方→左下方→左方→左上方に出現、消失を繰り返した。

計測は被検者の眼下に設置したカメラ(サンプリング周波数220Hz)で行った。瞳孔中心を眼球位置として捉え、眼球位置データはX-Y座標で取得された。計測データは解析ソフトView Point Data Analysis™で被検者が見ていた画面と、右眼と左眼の固視点を時間毎に表示できるため眼球が運動していることを確認しな

がら解析した。また、連続した3つのサンプルを平均した速度が40deg/secを超えた点をSEM開始点とし、下回った点を終了点とした。開始点から終了点までに要した時間（second）と移動角度（degree）を抽出して平均速度を算出し、最高速度は定位した眼球移動期間で連続したサンプルの移動角度をすべて求め、次に移動角度の最大値をソーティングアルゴリズムにより取り出し算出した。平均速度、最高速度とも次の式より算出し中心点から遠心8方向のSEM速度を求めた（図1）。

SEM速度（deg/sec）＝

移動角度／眼球移動時間

視距離とモニターサイズを元にX-Y座標データをcmに換算し、眼球移動期間で連続した座標点と、開始点と終了点を結んだ線で囲まれた内面積をSEMの軌跡面積とした。座標間の内面積は三角形の集合体として考え、座標法である次の式を用いて計算した。

$$S(\text{cm}^2) = 1/2 \left| \sum x_n (y_{n+1} - y_{n-1}) \right|$$

垂直・水平方向と斜方向は移動角度が異なるため分けて検討した。各方向のSEM速度の左右眼の差については対応のあるT検定（有意水準5%）を行った。移動方向のSEM速度の比較

図1 解析方法

右眼（破線）と左眼（実線）の左方時の座標の動きを示す。眼球運動開始点と終了点を選択すると中心点から視標までの移動時間（矢印①）と移動角度（矢印②）（座標は角度に換算）からSEM速度を算出する。

は一元配置分散分析を行いTukey Kramer法（有意水準5%）を行った。

Ⅲ．結果

1. 各方向のSEM速度

各方向の右眼と左眼のSEM速度に有意な差はなかった（表1）ため、右眼と左眼のSEM速度を平均した。平均速度は上方180.0 ± 26.8

表1 垂直・水平方向の左右眼の平均速度と最高速度

[deg/sec]	平均速度		最高速度	
	右眼	左眼	右眼	左眼
上方	177.4±29.3	182.5±26.9	366.8±77.0	366.6±88.0
下方	174.6±41.4	178.4±45.6	345.6±73.3	327.7±74.2
右方	213.0±27.3	220.1±24.0	382.4±57.8	379.1±49.0
左方	211.8±23.4	215.7±27.0	397.9±114.1	376.6±64.4
右上方	217.8±26.7	219.7±31.2	427.2±68.5	430.0±82.6
右下方	211.6±46.1	217.6±44.6	433.2±91.3	437.9±98.3
左上方	230.2±37.1	231.4±46.7	402.2±64.0	434.5±119.3
左下方	213.6±48.9	210.3±48.4	436.8±73.8	406.4±66.2

(mean $\pm$ SD) deg/sec、下方 177.3 ± 42.9 、右方 217.3 ± 25.0 、左方 214.7 ± 25.0 、右上方 219.5 ± 28.0 、右下方 216.0 ± 45.7 、左上方 231.2 ± 39.7 、左下方 212.2 ± 47.9 であった。垂直方向が水平方向と斜方向に比べ有意に遅かった ($p < 0.05$) (表2)。

最高速度は上方 367.8 ± 71.1 、下方 337.0 ± 63.5 、右方 380.4 ± 45.8 、左方 387.7 ± 77.5 、右上方 430.4 ± 65.0 、右下方 436.6 ± 88.4 、左上方 424.0 ± 96.1 、左下方 420.8 ± 64.5 であった。垂直方向と水平方向は斜方向に比べ有意に遅かった ($p < 0.05$) が、垂直方向と水平方向の間に有意な差はなかった。(表2)。

2. SEMの軌跡面積とSEM速度の相関

全被検者の両眼が眼球移動する軌跡は、垂直・水平方向は直線的に視標へ移動しており斜方向は曲線を描く様に移動していた (図2)。SEM速度との関係を見ると垂直・水平方向に比べ斜方向では面積が大きいことから斜方向は曲線的に移動していることが分かった (図3) が、平均速度と最高速度ともに軌跡面積との相関はなかった。

表2 各方向のSEM速度

[deg/sec]	平均速度	最高速度
上方	$180.0 \pm 26.8^*$	367.8 ± 71.1
下方	$177.3 \pm 42.9^*$	337.0 ± 63.5
右方	217.3 ± 25.0	380.4 ± 45.8
左方	214.7 ± 25.0	387.7 ± 77.5
右上方	219.5 ± 28.0	430.4 ± 65.0
右下方	216.0 ± 45.7	436.6 ± 88.4
左上方	231.2 ± 39.7	424.0 ± 96.1
左下方	212.2 ± 47.9	420.8 ± 64.5

* $p < 0.05$

図2 一被検者のSEMの軌跡

右眼の軌跡は破線、左眼の軌跡は実線で示す。垂直・水平は直線的に、右下方はやや弧を描き、右上方・左上方・左下方は曲線的に移動している。

図3 各方向の眼球軌跡内面積

縦軸は面積、横軸は方向。箱の中心付近の線は中央値、下端は第1四分位、上端は第3四分位。ひげの下端は最小値、上端は最大値。水平・垂直に比べ斜方向は面積が大きい。

IV. 考按

SEMは速度以外に解析すべき要素として潜時、振幅、持続時間があるが、今回我々は速度を検討した。既報^{5), 6)}のSEM速度は、EOGの平均速度は右方が約230deg/sec、左方が約220deg/secであった。サーチコイル法の最高速度は上方が 370 ± 34 deg/sec、下方が 349 ± 78 deg/secであった。垂直・水平方向に関しては計測方法が異なるものの同様の結果であった (表2)。

最高速度は水平方向と上方に比べ下方が遅いとの報告⁷⁾があり、今回有意な差はなかったが下方が遅い傾向であった。左右眼で比較した場合の外転が速いとの報告⁸⁾がある一方、内転が

速いと報告⁹⁾もあり計測条件によって結果が異なっている。我々の結果では全ての方向において左右差はなかった。平均速度もまた左右差はなく安定した結果が得られた。

過去の報告ではSEM速度は最高速度を記したものを散見する。今回我々は各方向間のSEM速度の比較は右眼と左眼のSEM速度を平均し有意差があった平均速度を主に検討をした。垂直方向の平均速度が遅かった原因として、垂直運動を司る上直筋と下直筋、上斜筋と下斜筋は視軸に対して平行に走行しておらず眼球付着部もまた平行でない。さらに眼周囲組織の抵抗などの解剖的要因や水平運動と比べ神経支配が複雑であることが影響していると考えられた。また、SEM速度はsaccade目標までの移動距離が長くなるにつれ直線的に速度が増す^{5), 10)}。解剖的要因、神経支配が複雑であるにもかかわらず斜方向のSEM速度が速かった理由は眼球移動角度が21°で大きいためと考えられる。

固視点からsaccade目標までの視線の軌跡^{11), 12)}を、今回の計測データからも示すことができた。眼球運動の軌跡のゆがみの原因は垂直と水平方向の眼球運動成分が相互干渉¹³⁾していること、saccade中に一過性の開散運動がみられることがあり、眼球を外転させるほうが内転させるよりも速いという外眼筋の機械的特性¹²⁾がある。他の原因に複雑な神経信号、外眼筋の収縮時間ずれなどが考えられる。眼球運動の軌跡とSEM速度の関係を調べるため軌跡内面積と平均速度および最高速度の相関関係を調べたが、今回の結果では相関はなかった。

他の定量的眼球運動検査としてEOGは1deg以上の高精度な眼球運動の検出には不向き^{14), 15)}とされている。さらにノイズ混入によりSEM速度が過大評価される^{1), 6)}。サーチコイル法は1000Hzと高周波数であり垂直・水平方向ともに1deg以下の検出が可能だが、コンタクトレンズのスリップ、被検者への影響は無視できない。アイトラッカーは周波数90、220、350、400Hzを設定できるが、90HzではSEM速度計測に不向きである。既報⁶⁾では約200Hzで計測されており、今回オフラインで解析をしているため350、400Hzではデータ量が膨大になるこ

とから220Hzで計測した。瞳孔追跡法は実瞳孔と見かけの瞳孔位置のずれにより誤差が生じるが⁴⁾、計測毎のキャリブレーションにより視標位置と検出した眼球位置のずれは解消されていると考えた。しかしキャリブレーション自体のずれや、計測中に頭部が動いてしまうと検出される眼球位置がずれ誤差が生じる。また、瞳孔の縦横比より瞳孔領および瞳孔中心が捉えられるため、特に下方時に眼瞼や睫毛が瞳孔領を侵すとアーチファクトとなり不正確となる。今回SEM速度を計測するにあたって、眼瞼や睫毛が影響していると思われた者は除外している。眼球が移動する瞬間に瞬目が入ると計測はできないが短時間かつ非侵襲的に計測できるため、2回計測することで補うことができた。

アイトラッカーにより非侵襲で簡便にSEM速度の計測および眼球運動の軌跡を評価でき、今後眼球運動異常の診断や定量的評価をするうえで有用と考えられた。

参考文献

- 1) Lappe-Osthege M, Talamo S, Helmchen C, Sprenger A: Overestimation of saccadic peak velocity recorded by electro-oculography compared to video-oculography and scleral search coil. *Clinical Neurophysiology* 121: 1786-1787, 2010.
- 2) Träisk F, Bolzani R, Ygge J: A comparison between the magnetic scleral search coil and infrared reflection methods for saccadic eye movement analysis. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 243: 791-797, 2005.
- 3) 奥山文雄: 角膜反射による眼球運動の測定. *VISION* 3: 81-88, 1991.
- 4) 坂下祐輔, 藤吉弘直, 平田豊: 画像処理による3次元眼球運動計測. *実験力学* 6: 236-243, 2006.
- 5) Baloh RW, Konrad HR, Sills AW, Honrubia V: The saccade velocity test. *Neurology* 25: 1071-1076, 1975.
- 6) Yee RD, Schiller VL, Lim V, Baloh FG, Baloh RW, Honrubia V: Velocities of Vertical

- Saccades with Different Eye Movement Recording Methods. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 26: 938-944, 1985.
- 7) Oohira A, Goto K, Ozawa T: Vertical and oblique saccadic eye movements. *Jpn. J. Ophthalmol* 27: 631-646, 1983.
  - 8) Robinson DA: The mechanics of human saccadic eye movement. *J. Physiol* 174: 245-264, 1964.
  - 9) Baloh RW, Sills AW, Kumley WE, Honrubia V: Quantitative measurement of saccade amplitude, duration, and velocity. *Neurology* 25: 1065-1070, 1975.
  - 10) 木村 洋, 加藤 功, 小池吉郎, 渡辺行雄: 衝動性眼球運動の定量的分析. *日本耳鼻咽喉科学会会報* 82: 647-655, 1979.
  - 11) 大平明彦: 衝動性眼球運動について. *眼科* 27: 855-865, 1985.
  - 12) Zee DS, Fitzgibbon LJ, Optican LM: Saccade-vergence interaction in humans. *J Neurophysiol* 68: 1624-1641, 1992.
  - 13) Bahill AT, Stark L: Oblique saccadic eye movements, independence of horizontal and vertical channels. *Arch Ophthalmol* 95: 1258-1268, 1977.
  - 14) Hertle RW, Dell'Osso LF: Nystagmus in infancy and childhood. 259-270, Oxford University Press, New York, 2013.
  - 15) 石川 哲: 神経眼科学. 116-131, 医学書院, 東京, 1974.
-