水平、垂直滑動性眼球運動の周波数分析†

松 島 純 一¹⁾・熊 谷 雅 彦¹⁾・酒 井 昇¹⁾
菅 沼 俊 哉¹⁾・伊 福 部 達²⁾・高 橋 誠²⁾

はじめに

滑動性眼球運動は動く視標を頭部、体部、視標の動きにかかわらず、常に中心窩に捉えようとする運動である。正常人における滑動性眼球運動の定量的解析は少なからずあるが、ほとんど水平方向に関して垂直方向に関する報告は少ない¹⁾。これは、記録方法が d.c-electro-oculogram (以下 EOG と略す) であることから、EOG のもつ、基線の drift があることや容易にその利得が変化し易いという欠点、それに垂直方向の記録が信頼出来ないという特徴による。

現在までの水平方向の滑動性眼球運動においては、それらが EOG 記録によるものであり、前述した欠点から解析のパラメータは主に速度の利得²⁾³⁾ についてである。このパラメータだけでは、動いている視標に対して眼運動系がどれだけ追従出来るかを知るのには不十分と考えられ、さらに滑動性眼球運動に生じる衝動性眼球運動に注目し定量的解析を行っている⁴⁾⁵⁾。

今回、動いている視標に対して眼運動系がどれだけ追従出来るかを、眼運動系に対する入力と出力の関係がどれだけあるかをみるパラメータであるコヒーレンスという生体工学的概念を取り入れて⁶⁾、滑動性眼球運動を周波数分析し定量的に検討したので報告する。

方 法

対 象：23歳から36歳までの健康成人(平均31.4歳)で視力正常な13人について行った。

方 法：視標は半径1mのスクリーン上に視標刺激装置(浜松ホトエレクトロニクス製)から投射された径1cmの赤い点を用いた。眼球の動きは固体撮像イメージセンサーを用いた眼球運動記録装置を用い、テレビの画面でモニタしながら眼球と視標の動きをデタロガー 7

V08(日電三栄製)のフロッピーに格納した。図1上には視標とそれに対する垂直眼球運動記録の例を示す。デタロガー 7V08のフロッピーに格納されているこの両者の波形を GP-IB にて off-line でシグナルプロセッサ 7T17 に取り込む。取り込まれたデータは図1上に表示されている実線と破線との間の12秒間のデータについて周波数分析を行う。滑動性眼球運動の視標に対する追従性を表す指標として1. コヒーレンス(波形の純粋性)、2. 位相のずれ、について定量的に検討した。

方法として、図1下には示すが、最初に伝達関数を求める。次いで、位相とコヒーレンス(Coherence)を求める。コヒーレンスは最も成分の大きい周波数の値をもって表し、視標の動きと全く同じ周波数であれば最大100%となり、全く一致しなければ0%となる。

なお、較正は左右上下5度で、実験の前後で行い値が大きく異なった場合は実験をやり直した。

実験のプロトコールは、正面にある視標を、(1) 視角10度で0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1 Hzと周波数を変化させた時、(2) 周波数は0.4 Hzと固定し、視角を水平では5, 10, 15, 20度と変えた時、垂直では5, 10, 15度に変化させた時の水平、垂直滑動性眼球運動の定量的分析を行った。さらに(3) 視角10度、周波数0.4 Hzで視標を上下に動かし、視標の空間における位置(上, 下, 正面)による追従性の差を見た。

結 果

実験1：視角10度で指標の動く周波数を0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1 Hzと変化させた時、周波数が増加すると視標と位相のずれは水平、垂直滑動性眼球運動共に遅れが大きくなる傾向にあるが水平、垂直滑動性眼球運動の間では有意の差はなかった(図2)。

周波数を変化させても水平滑動性眼球運動のコヒーレンスはほぼ100%と変化がなかった。しかし、垂直滑動性眼球運動で、0.2, 0.6, 0.8 Hzでは0.4, 1 Hzに比較して追従性が悪い傾向にあることが分かった(図3)。

実験2：周波数は0.4 Hzと固定し、視角を水平では5, 10, 15, 20度、垂直では5, 10, 15度と変えた時の水平、垂直滑動性眼球運動の定量的解析を行ったところ、視標の振幅(視角)が大きくなると垂直性滑動性眼球運動で

† Quantitative Frequency Analysis of Pursuit Eye Movements with CCD-EOG; A Coherence Function Study

Jun-ichi Matsushima¹⁾, Masahiko Kumagai¹⁾, Noboru Sakai¹⁾, Toshiya Suganuma¹⁾, Tohru Ifukube²⁾ and Makoto Takahashi²⁾

¹⁾ 北海道大学医学部耳鼻咽喉科学教室

(主任：犬山征夫教授)

²⁾ 北海道大学電子科学研究所

図1 垂直眼球運動の記録とコンピュータ処理された波形。

上図 視標とそれに対する垂直眼球運動記録例。

図に示されている実線と破線との間(12秒間である)のデータの周波数分析を行う。

下図 最初に伝達関数を求める。破線で示される最もパワーの高いところがコヒーレンス(Coherence)である。

は位相は進む傾向にあった。しかし、水平性滑動性眼球運動では位相のずれは殆どなかった(図4)。

また眼球運動の周波数分析によりコヒーレンスをみたところ、水平方向では視角5度のコヒーレンスは同10, 15, 20度と比較して低く、追従性の悪いことが分かった($p < 0.01$)。視角10, 15, 20度ではコヒーレンスに差は無く、ほぼ100%と極めて追従性の良いことが分かった。垂直方向は水平に比して視標に対する追従性は悪く、特に視角5度と10度とが追従性が悪い傾向にあることが分かった(図5)。

実験3：視角10度、周波数0.4Hzで視標を上下に動か

し、視標の空間における位置(上, 下, 正面)による追従性の違いを見たところ視標が視野の上半分を動く時が、視野の下半分, 正中を動く時に比較して追従性が悪い($p < 0.01$)ことが分かった(図6)。

考察

滑動性眼球運動の生理学的機構に関しては他の眼球運動システム程には分かっていないが、accessory optic system⁷⁾、脳幹網様体⁸⁾、小脳扁桃⁹⁾、大脳皮質¹⁰⁾等の関与が知られている。コンピュータを用いた滑動性眼球運動の定量的解析には速度の利得(眼球の速度/視標の速度)がそのパラメータとして用いられ、今までに分かつ

図2 視標の周波数を変えたときの視標と水平、垂直滑動性眼球運動の位相のずれ。
視角10度で0.2, 0.3, 0.4, 0.6, 0.8, 1 Hzと周波数を変化させた時、周波数が増加すると視標との位相のずれは水平、垂直滑動性眼球運動共に遅れが大きくなる傾向にあるが水平、垂直滑動性眼球運動共に有意の差はなかった。

図3 周波数を変化させた時の水平、垂直滑動性眼球運動のコヒーレンスの変化。

周波数が増加しても水平滑動性眼球運動のコヒーレンスはほぼ100%と変化がなかった。しかし、垂直滑動性眼球運動では0.2, 0.6, 0.8 Hzでは0.4, 1 Hzに比較して追従性が悪い傾向にあることが分かった。

たことは小脳前庭障害で速度の利得は低下し、一側性の大脳障害では利得の左右差が生じるとされている。しかし、多くの研究で簡便なEOGが眼球運動記録に用いられていて、基線のdriftがあることや容易にその利得が変化し易いという欠点を持っているため、滑動性眼球運動性の利得(眼球の速度/視標の速度)を求めるのはまだしも、波形そのものの検討には不十分と思われた。

我々、北海道大学グループは水平方向のみならず垂直方向の眼球運動記録が可能な固体撮像イメージセンサを用いた眼球運動記録装置を開発し、その応用例について報告してきた^{11) 12)}。本記録法の特徴は垂直方向に対しても、水平方向と同じ精度をもっていることから、水平方向に加えて、殆ど報告の無い垂直性滑動運動の定量的解析を行った。その基線の安定性と利得が変わらないことから、眼球が視標の動きにどれだけ追従出来るかを波形の類似性について検討した。

今回そのパラメータとしてコヒーレンスが用いられた。コヒーレンスとは工学的概念であって波形の純粋性と訳され、ある運動系に対する入力波形と出力波形の関係がどれだけあるかをみるためのパラメーターである。このコヒーレンスを用いて入力と出力の波形がどれだけ一致しているかを周波数分析することにより定量化化することが出来る。入力と出力が一致しているときは100%又

図4 視標の動く角度を変えたときの視標と水平、垂直滑動性眼球運動の位相のずれ。周波数は0.4Hzとし、視角を水平では5、10、15、20度、垂直では5、10、15度と変えた時の水平、垂直滑動性眼球運動の定量的解析を行ったところ視標の振幅（視角）が大きくなると垂直性滑動性眼球運動では位相は進む傾向にあった。しかし、水平性滑動性眼球運動では位相のずれは殆どなかった。

図5 視角を変えた時のコヒーレンスの変化。水平方向では視角5度のコヒーレンスは同10、15、20度と比較して低く、追従性の悪いことが分かった ($p < 0.01$)。視角10、15、20度ではコヒーレンスに差は無く、ほぼ100%と極めて追従性の良いことが分かった。垂直方向は水平に比して視標に対する追従性は悪く、特に視角5度と10度において追従性の悪い傾向にあることが分かった。

は1で表される。今回これを滑動性眼球運動に応用したわけであるが、人の眼運動系をブラックボックスと考えた時、視標の動きを入力とし、出力を眼球の動きとした時、その両者の波形の類似性から眼運動系の働きを推察しようとするものである。

眼球運動の周波数分析を行って定量化する方法は Wolfe¹³⁾ が最初に行っている。それによると、正弦波の動きをする視標に対しコヒーレンスの値は、正常人ではおよそ0.95と、我々の値よりやや低かった。衝動性眼球運動が混入するとコヒーレンスは低下するが、値の違いは眼球運動の記録方法が異なるためと考えられた。d.c.-EOGでは基線のdriftのがある。それ故、この器械的DCバイアスがコヒーレンスを低下させたと考えられた。Bahill¹⁴⁾ は、視標を予知できない動きにした時のコヒーレンスを計測し、0.5Hzで約0.8であるとし、やはり器械的DCバイアスの関与について触れている。なお、患者の記録からは衝動性眼球運動が混入するとコヒーレンスは低下し、小脳橋角部腫瘍の患側でコヒーレンスは低下していたと報告している。

最後に、今回は臨床応用において診断的価値を高めるための基礎実験として、正常人において水平方向に加えて殆ど報告の無い垂直性滑動運動の周波数解析を行った。CCD-EOGは全く基線のdriftが無いことから、眼球運動の周波数分析を行うのに有効であることが分かった。このことは、すでに足踏み時の眼球運動の周波数分析を行い報告されている。今後、患者についてその診断的価

図6 視標の空間における位置とコヒーレンスとの関係。

視角 10度, 周波数 0.4Hz で視標を上下に動かし, 視標の空間における位置 (上下, 正面) による追従性の違いを見たところ, 視標が視野の上半分を動く時が, 視野の下半分, 正中を動くときに比較して追従性が悪い ($p < 0.01$)。

値を検討したい。

まとめ

1. 周波数が増加すると視標との位相のずれは水平, 垂直滑動性眼球運動共に大きくなり, かつ遅れるが両者に有意の差はなかった。周波数を 0.4Hz として, 視標の振幅 (視角) が大きくなると垂直性滑動性眼球運動では位相は進む傾向があった。しかし, 水平性滑動性眼球運動では位相のずれは殆どなかった。

2. 滑動性眼球運動の周波数分析により, 垂直方向は水平に比して視標に対する追従性 (コヒーレンス) は悪かった。特に, 視標が視野の上半分を動くときには著しいことが分かった。

稿を終えるに際し, 眼球運動記録装置 CCD-EOG を制作していただいた中川原 氏に深謝致します。なお, 本研究の内容は第40回日本平衡神経科学会で報告した。

文 献

- 1) Yamazaki A and Ishikawa S : Horizontal and vertical smooth pursuit movements. Jap J Ophthalmol 17 : 103-112, 1973
- 2) Williams RA and Fender DH : Velocity precision in smooth pursuit eye movements. Vision Res 19 : 343-348, 1979
- 3) Baloh RW, Kumley WE, Honrubia V, et al : Quantitative measurement of smooth pursuit eye movements. Ann Otol Rhinol Laryngol 85 : 111-119, 1976
- 4) Lucyna S : Quantification of tracking eye movements in normal subjects. Acta Otolaryngol 90 : 404-413, 1980
- 5) Bergenius J : Computerized analysis of voluntary eye movements-A clinical method for evaluation of smooth pursuit and saccades in otoneurological diagnosis. Acta Otolaryngol (Stockh) 98 : 490-500, 1984
- 6) 朝倉利光 : 光のゆらぎの相関とその応用相関関数およびスペクトラム—その測定と応用—, 磯部孝編. 312-324頁, 東京大学出版会, 東京, 1971
- 7) Westheimer G, Blair SM : Unit activity in accessory optic system in alert monkeys. Invest Ophthalmol 13 : 533-534, 1974
- 8) Eckmiller R, Mckebe M : Premotor single unit activity in the monkey brain stem correlated with eye velocity during pursuit. Brain Res 184 : 210-214, 1980
- 9) Zee DS, Yamazaki A, Butler PH, Gucer G : Effects of ablation of flocculus and paraflocculus on eye movements in primate. J Neurophysiol 46 : 878-899, 1981
- 10) Sharpe JA, Sylvester TO : Control of the saccadic and smooth pursuit system after cerebral hemidecortication. Brain 102 : 387-403, 1979

- 11) 松島純一, 原田千洋, 熊谷雅彦, 他: 固体撮像素子イメージセンサを用いた眼球運動記録 (CCD-EOG) について. *Equilibrium Res* 47: 169-173, 1988
- 12) 松島純一, 原田千洋, 熊谷雅彦, 菅沼俊哉, 林 光夫, 他: 足踏み時における眼球運動の固視点の位置による影響. 眼球運動の規則性—周波数分布の定量的解析—. *Equilibrium Res* 50: 378-382, 1991
- 13) Wolfe JW, Engelken EJ, Allen JP: Cross-power spectral density analysis of pursuit tracking evaluation of central and peripheral pathology. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 87: 837-844, 1978
- 14) Bahill AT, Iandolo JM, Troost TB: Smooth pursuit eye movements in response to undictable target waveforms. *Vision Res* 20: 923-931, 1980

Abstract

Horizontal and vertical pursuit eye movements were analyzed quantitatively in normal subjects with the use of a charge-coupled device (CCD)-electro-oculogram. Parameters adopted for the

qualification were coherence function and phase.

As the speed of the target increased, the difference in phase between the target and both horizontal and vertical eye movements became larger. However, there was no significant difference in phase between horizontal and vertical eye movement.

Quantitative frequency analysis of pursuit eye movements showed that eyes follow a horizontally moving target more accurately than a vertically moving target. When a target is moved vertically in the upper half of the field, the eyes follow it less accurately.

Key words : quantitative frequency analysis,
pursuit eye movements, CCD-EOG,
coherence

(原稿到着: 平成 4 年 4 月 6 日
別刷請求先: 松島純一
〒001 札幌市北区北15条西 7 丁目
北海道大学医学部耳鼻咽喉科学教室)