

各種眼球運動測定方式の比較

斎田 真也

製品科学研究所

〒305 茨城県つくば市東1-1-4

1. はじめに

眼球運動測定方式に関する、代表的な四つの方式について前頁までに各々の長所短所が明らかにされているので、本稿では各測定方式を眼球運動測定時に要求される項目ごとに比較する。なお、測定方式の1つとして EOG^{1,2)}も含めた。EOG は網膜と角膜との間に僅かな電位差(角膜

の方が1 mV 弱正電位)があることを利用したもので、皮膚電極を眼の回りに配置することにより眼球運動を検出する方式である。

表1の縦方向は各種眼球運動測定方式、横方向は眼球運動測定時に要求される項目である。以下各項目ごとに詳述する。

表1 眼球運動測定方式の比較

	精度	測定範囲	応答速度	校正の容易さ	安定度	頭部の固定	被験者の負担	解析の容易さ	価格及び製品化
サーチコイル法	◎	◎	◎	◎	○	◎	×	◎	○
リンバストラッカー	○	○	◎	▲	○	○	○	◎	◎
角膜反射法	○	○	○	▲	○	▲	○	◎	○
眼底像追跡	◎	▲	▲	◎	◎	◎	▲	×	▲
EOG	×	◎	×	▲	▲	○	▲	◎	◎
Double Purkinje	◎	▲	◎	▲	○	▲	○	◎	▲

◎ 非常に良い ○ 良い (一部問題) ▲ 可 (問題もある) × 大きな問題あり

2. 精度(水平, 垂直眼球運動測定の精度)

最も精度が高いものがサーチコイル法^{3,4)}で、いわゆる微小眼球運動も検出可能^{5,6)}であるが、サーチコイルが眼球に常に密着していなければ測定誤差となる(動物の眼球運動検出の場合は特別な手術を行う)。更にコイルと増幅器との結線が磁場を横切っているので、この部分でも起電力が生じノイズとなるので結線を必要としない方式も提案されている^{7,8)}。眼底像を追跡する方法^{9,10)}は高速度で(例えば500フィールド/秒)で高解像度(HDTV以上の解像度)で撮像できる機器があれば、微小眼球運動の検出が可能であるが、実時間の画像処理が現時点では不可能であるのでオンラインで視刺激等を変化させる実験には不向きである。

次に高精度な検出方法はDouble Purkinje法¹¹⁾で、秒のオーダーの検出は難しいが、分のオーダーの検出は可能である。この方式は原理的には頭部運動による誤差を相殺することが可能であるので高精度が実現されている^{12,13)}。

0.5度位の精度が得られるものとしてリンバストラッカー¹⁴⁾および角膜反射法¹⁵⁾が代表的な方式で、頭部を歯形、あご台、頭部バンドなどで測定機器にがっちり固定すれば分のオーダーの検出も可能である¹⁶⁾。直線状に並べた9個のLEDと9個のセンサーを使った方法¹⁷⁾では2分までの精度が可能とのことである¹⁸⁾。ただし、リンバストラッカーは垂直方向の検出精度は差動方式を採用できなければ良くなく、高々1~2度程度である。

EOGでは他の筋肉や眼球への入射光量の増減による網膜電位の変化などの影響が大きく数度以上の精度を求めることは難しい¹⁹⁾。

3. 測定範囲

左右方向に70°以上まで計測可能な方式はサーチコイル法²⁰⁾とEOG²¹⁾であるが、これらの方法で得られる計測値は眼球回転角のサインに比例するので精度は大きな眼球運動ほど悪くなる(ただしサーチコイル法では回転磁場等を用いれば角度に依らず広範囲高精度で検出可能である)²²⁾。リンバストラッカーおよび角膜

反射法での通常の計測範囲は左右30度位である。Double Purkinjeは第4プルキンエ像を利用するために瞳孔径の大小で測定範囲が異なり、10人中6人位が右15°、左5°の測定範囲(ただし測定光を右側から入れた場合)で、残りの4人はこれより少ない(M. Komodaとの私信, 1989)。眼底像追跡法では左右数度が限界である。

4. 応答速度

サーチコイル法及びリンバストラッカー方式では周波数帯域は1 kHz以上可能でありサッカーの特性を研究するには十分な帯域を有している。Double Purkinjeを検出する方式は300Hz前後で、特別な場合以外はサッカー研究にも充分対応できる。角膜反射法では通常のTVカメラを利用する場合がほとんどで、この場合は垂直同期周波数60Hzに制限されてしまい眼球の停留位置を求めることはできても、サッカーの特性を研究するには不向きである。ただし、特別なTVカメラを使用して周波数帯域を400~600Hzにした装置も製品化されている^{23,24,25)}。さらにPSD(position sensitive detector)にて第一プルキンエ像を検出する方法も提案されており周波数帯域は数10kHzと高速である²⁶⁾。眼底像追跡法では通常のTVカメラを使用した場合は角膜反射法の場合と同様であるが、高速度カメラにより時間的分解能を上げることは可能である。EOGは通常の状態ではフィールド周波数(関東では50Hz、関西では60Hz)の影響を除くためにフィルターが必要で、シールドルームなどを利用すれば高帯域まで計測できる可能性はある。

5. 眼球回転角と計測値との校正の容易さ

眼球運動の計測で最も問題となることは、被験者の眼球回転角と計測により得られた値との校正を如何に行うかにある。まず眼底像を追跡する方式は、この校正が全く必要ない方式の一つである。さらにこの方式では直接網膜像を撮影している訳であるからこの網膜上に映っている外界像も一緒に撮像でき、中心窩に何が結像されているかが判定でき、被験者が何を注視し

ているかが判定できる唯一の方式である。サーチコイル法も眼球の回転角に比例した出力値が得られる計測方式であるから、コイルと眼球との間でスリップが無ければ眼球回転角の較正は必要ではない。しかし被験者の眼球の方位は較正なしに決定できても空間座標に対する眼球の位置は計測できないので、被験者がどこを見ているかは眼球運動だけの計測では決定できない（頭部固定の項参照）。これら二方式以外は眼球回転角と計測値との較正は眼球運動計測において最も重要な手続である。通常の較正では、被験者に眼球からの方位が既知な視標数個を順次注視させ、または滑らかに移動する視標を追視させ、その時の計測値を較正データとする。この較正值は被験者が異なれば当然異なるし、計測の安定度が低い場合は実験の各セッションの始めと終りに較正が必要である。

6. 安定度（時間経過による較正のずれ）

安定度は較正と並んで眼球運動計測において重要なファクターである。眼底像追跡は計測方式からして、この問題が存在しない。サーチコイル法もスリップが無ければ、眼位と計測値は常に対応が取れている。リンバストラッカー、角膜反射法、Double Purkinje は、頭部運動の影響が如何におさえられているかで決り、Double Purkinje が比較的安定性がある。角膜反射法では同時に瞳孔の中心を計測して安定度を向上させることができる。角膜反射法とDouble Purkinje は頭部運動の影響以外にも涙による計測誤差も存在する。EOG はすでに精度のところで述べたような影響を受け、さらに皮膚と電極との接触抵抗の変動もあり、安定度は悪い。特別な場合（例えば眼球の運動の有無のみを計測する場合）以外に利用価値は少ない。

7. 頭部固定の必要性及び空間座標系と眼位の関係

精度及び較正の所でも述べたように、検出された眼球運動の値が空間座標の方位に較正なしに対応することができる検出方式はサーチコイル法と眼底像追跡で、この場合は頭部がどの方

位に向いていても、またいかなる頭部運動をしていても良い。すなわち頭部運動を検出すること無しに眼球が向いている方位を検出することができる。ただし被験者がどこを見ているかは眼底像追跡法では判定できるが、サーチコイル法では特殊な磁場または頭部検出用コイルを用いない限り特定できない。頭部運動の許容範囲はサーチコイル法の場合は一様磁場を形成するコイルの大きさに依り、通常数 cm の頭部運動が許される^{5,6)}。眼底像追跡の場合は眼底像撮像の関係から1mm 以下である⁹⁾。

これら二つの方式以外では得られた値が眼球運動によるものか頭部運動による誤差なのかを区別しなければならない。一般的には、a) 頭部運動をなんらかの方法にて検出する場合、b) 眼球運動計測部分を頭載化して、相対的な動きが無い状態にて眼球運動を計測する場合、c) 頭部運動を止める場合とに分けられる。a) では Double Purkinje を利用する方式と、角膜反射法の方式を発展させて第1プルキンエ像と瞳孔径の中心を検出する方法とがあり、数 cm から数10cm の頭部移動が許される^{11,12)}。b) の頭載型としての製品は角膜反射法²⁵⁾およびリンバストラッカー^{17,18,27)}にて実現されている。この場合頭載部分が頭部に対してずれなければ、被験者は自由に動き回れる。

8. 被験者への負担

サーチコイル法は大変優れた検出方式であるが唯一最大の欠点は眼球への負担が大変大きいことである。人間に用いる場合、現在ではほとんどドーナツ状のコンタクトレンズを使用するが、眼球とコンタクトレンズとのスリップを防ぐために密着させる必要がある。コンタクトレンズ装着中は点眼用の麻酔剤を使用することが多く、その場合は痛みは軽減されたとしても不快感は常にある。ほとんどの場合一回の装着時間は20～30分で、週に1～2回の使用にとどめるよう求められている。外国では医者立ち合い無しで利用されているが、国内では障害等が生じたときの問題に対して充分考慮しておく必要がある。EOG は生体に侵蝕すること無し

に計測可能であるが、皮膚電極を取り付ける部分の接触抵抗をできるだけ下げる関係上接着部をアルコール等で拭く必要があり、被験者の同意が必要である。その他の方式では非接触にて計測可能で、特に角膜反射法では被験者に眼球運動を計測していることを意識されずに計れる方式も開発されている²⁸⁾。

9. 解析の容易さ

眼底像追跡法は画像処理をしなければ眼球運動を解析できないので、現在的高速並列処理コンピュータを使用してもミリ秒単位での眼球運動分析はできない。他の方式は電圧変化として取り出すことが可能で、その後の分析処理はパソコンにて可能である。

10. 価格および製品化

最後に購入の容易さや価格も大切な要素で、日本ではリンバストラッカー、角膜反射法およびEOGの装置が購入しやすく、リンバストラッカーは50~300万円²⁷⁾、角膜反射法は300万円前後²⁵⁾、EOGは100万円位である。サーチコイルとDouble Purkinjeを利用する製品は輸入することが可能で、サーチコイル法は低価格としては30万円²⁹⁾から50万円³⁰⁾の製品が入手可能である。高いものでは200万円以上³¹⁾する。Double PurkinjeはSRIに特注しなければならず価格も2000万円代と高く、メンテナンスにも技術的知識が必要である。

11. むすび

以上述べた眼球運動計測装置の評価は検出対象を水平・垂直眼球運動に限定したものである。眼球運動はその他に回旋運動がある。回旋運動の検出には、サーチコイル法および眼底像追跡法にて検出可能であり、全眼部の撮影でも虹彩の紋理を捕えれば検出可能である³²⁾。また、コンタクトレンズに印を付けてそれを追跡することでも検出できる(渡邊建氏との私信 1991)。

多くの研究者が指摘するように眼球運動検出装置には一長一短があり、それぞれ実験の目的に合わせてどの方式を採用するかを決めなければ

ならない。どうしても高精度の眼球運動を計測するためにはサーチコイル法以外に無いが、被験者への負担を考えなければならない。眼底像追跡法およびDouble Purkinjeを利用する方式は大きな眼球運動測定には向かない。EOGは精度の点で問題が残る。リンバストラッカーは垂直眼球運動の検出精度多少低いが、一般的な使用ではリンバストラッカーまたは角膜反射法で被験者の頭部運動を検出して、眼球運動計測値を補正することが望ましい。

文 献

- 1) E. Marg: Development of electro-oculography standing potential of the eye in registration of eye movement. *AMA Archives of Ophthalmology*, **45**, 169, 1951.
- 2) B. Shackel: Eye movement recording by electro-oculography. *A manual of psychophysiological methods*, P. H. Venables and I. Martion (Eds.), North-Holland, Holland, 1967, pp.300-334.
- 3) D. A. Robinson: A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Transactions on Bio-Medical Electronics*, **BME-10**, 137-145, 1963.
- 4) A. F. Fuchs and D. A. Robinson: A method for measuring horizontal and vertical eye movements chronically in the monkey. *Journal of Applied Physiology*, **21**, 1068-1070, 1966.
- 5) R. S. Rimmel: An inexpensive eye movement monitor using the scleral search coil technique. *IEEE Transactions in Biomedical Engineering*, **31**, 388-390, 1984.
- 6) J. de Bie: An after image vernier acuity method for assessing the precision of eye movement monitors: results for the scleral coil technique. *Vision Research*, **25**, 1341-1343, 1985.
- 7) J. Reulen and L. Barker: The measurement of eye movement using double induction. *IEEE*

- Transactions in Biomedical Engineering*, **29**, 740-744, 1982.
- 8) L. Bour, J. van Gisbergen, J. Bruijns and F. Ottes: The double magnetic induction method for measuring eye movements: results in monkey and man. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **31**, 419-427, 1984.
- 9) 鶴飼一彦, 石川哲, 赤外線テレビ眼底カメラによる眼球運動の計測. *光学*, **10**, 253-259, 1981.
- 10) G. T. Timberlake, M. A. Maister, R. A. Augliere, E. A. Essock and L. E. Arend: Reading with a macular scotoma, (1) Retinal location of scotoma and fixation area. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **27**, 1137-1147, 1986.
- 11) T. N. Cornsweet and H. D. Crane: Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkinje images. *Journal of the Optical Society of America*, **63**, 921, 1973.
- 12) H. D. Crane and C. M. Steele: Accurate three-dimensional eye-tracker. *Applied Optics*, **17**, 691-710, 1978.
- 13) H. D. Crane and C. M. Steele: Three-dimensional visual stimulus detector. *Applied Optics*, **17**, 706-714, 1978.
- 14) L. Stark and A. Sandberg: A simple instrument for measuring eye movements. *Quarterly Progress Report*, **62**, Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology, 1961, p.268.
- 15) N. F. Mackworth and H. H. Mackworth: Eye fixations recorded on changing visual scenes by the television eye-marker. *Journal of the Optical Society of America*, **48**, 439, 1958.
- 16) R. W. Ditchburn: *Eye-movements and visual perception*. Claredon press, Oxford, 1973.
- 17) J. P. H. Reulen, J. T. Marcus, D. Koops, F. R. de Vries, G. Tiesinga, K. Boshuizen, and J. E. Bos: Precise recording of eye movement: the IRIS technique Part I. *Medical and Biological Engineering and Computing*, **26**, 20-26, 1988.
- 18) Skalar Instrumenten B. V.: IRIS. PO Box 233, 2600 AE Delft, Sadatweg 14, 2622 AP Delft, The Netherlands.
- 19) G. H. Byford: Non-linear relations between the cornea-retinal potential and horizontal eye movements. *Journal of Pysiology London*, **168**, 14-15, 1963.
- 20) H. Collewijn, F. van der Mark and T. C. Jansen: Precise recording of human eye movements. *Vision Research*, **15**, 447-450, 1975.
- 21) W. Wolf and M. Knemeyer: Eye movement instrumentation. Presented at the American Education Research Association Convention. February 1969.
- 22) R. Hartmann and R. Klinke: A method for measuring the angle of rotation (movements of body, head, eye) in human subjects and experimental animals. *Pflugers Archiv fur die Gesamte Physiologie des Menschen und Menschen und der Tiere*, **362**, 52, 1976.
- 23) 石川 哲, 山崎篤巳, 稲葉光治, 内藤 誠: 新しい眼球運動測定法—高速 XY トラッカー. *日本眼科学会雑誌*, **75**, 1110-1117, 1971.
- 24) Iscan, Inc.: RK-416HS High Speed Pupil/Corneal Reflection Tracking System. 125 Cambridgepark Dr., P. O. Box 2076, Cambridge, MA 02238, U. S. A.
- 25) 株式会社ナック: アイマークレコーダ モデル600. 東京都港区西麻布1-2-7.
- 26) 斎田真也, 池田光男: 眼球運動測定装置の一方. *光学*, **4**, 286-288, 1975.
- 27) 竹井機器工業株式会社: T. K. K 939 トークアイ. 東京都品川区旗の台1-6-18.
- 28) R. A. Monty: An advanced eye movement measuring and recording system featuring unobtrusive monitoring and automatic data processing. *American Psychologist*, **30**, 331-335, 1975.

- 29) Remmel Labs: EM2 electromagnetic eye-movement monitor. 26 Bay Colony Dr., Ashland, MA 01721-1840, U. S. A.
- 30) EMCO: EMCO Search Coil Eye Position Recorder. Department of Psychology, University of Durham, Durham DH1 3LE, England.
- 31) Skalar Instrumenten B. V.: Skalar system for precise recording of eye position, Magnet coil S3000, S3020. 住所は18) 参照.
- 32) M. Hatamian and D. J. Anderson: Design considerations for a real-time ocular counterrole instrument. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **30**, 278-288, 1983.