教育講座

眼球運動の三次元解析とその意義

八木 聡明

Three-Dimensional Analysis of Eye Movements

Toshiaki Yagi

Department of Otorhinolaryngology, Nippon Medical School

Eye movement is defined as the rotational movements about three axes with respect to the eye in the primary position: an axis for vertical movements (X axes); an axis for horizontal movements perpendicular to the first axis (Z axis); and an axis for torsional movements about the line of sight (Y axis).

To record these three axes' rotational eye movements accurately, three-dimensional analysis of the movements is necessary. Until very recently, however, few methods of analysis have been reported. In this paper, the significance of three-dimensional analysis of eye movements is discussed with the use of actual three-dimensional analysis data, and our own analysis system.

Key words: three-dimensional analysis, nystagmus, image recognition, computer

はじめに

眼球運動は本来眼球内の一点、すなわち回旋点を中心として行われる回旋運動として捉えることができる。眼球が前方を注視している位置で、眼球内の回旋点を含む前額面を考えると、この面は大体眼球の赤道面に一致していて、リスティング面 (Listing's Plane) と呼ばれている。眼球には、このリスティング面上で回旋点を通して、水平および垂直に直交する二軸 (X 軸, Z 軸) と、同回旋点を通りこの面に垂直な軸 (前後軸, Y 軸) の三軸が想定される。Y 軸は、眼球の固視線に相当する (図1)。

リスティング面内における垂直軸 (Z 軸) および水平軸 (X 軸) を中心とした運動をとくに眼球の主要運動と言っている。実際の眼球運動は、しかし、多くの場合これに前後軸 (Y 軸) を回る運動 (回旋運動) が加わっている。眼球運動を正確に解析するためには、従って、どうしても三次元

解析が必要になる。

ここでは、眼球運動の種々の方法を述べながら三次元解析の重要性に触れ、最後にわれわれの行っている眼球運動三次元記録・解析の実際について言及したい。

眼球運動記録解析の歴史的背景

眼球運動を正確に記録、あるいは解析するために種々の眼球運動記録法が考案されてきた。それらのうち代表的なものについて以下に述べる。

1) シネカメラを用いた方法

眼球運動をシネカメラ、あるいは 35 mm スチールカメラを用いて撮影する方法はかなり以前から行なわれている。実際、眼球反対回旋の解析などにもこの方法が使われた経緯がある。しかし、撮影したフィルムの現像時間や、再生のために映写器やスクリーンを必要とするなど不便なことが多かった。また、この方法で定量的に眼球運動解析をするにはフィルム1枚1枚を解析する必要がある^{1) 2)}、現実問題として困難が多いため現在では用いられることは非常に少なくなった。

図1 リスティングの面と眼球運動の3軸

2) VTR を用いた方法

最近では、映画に代って小型 CCD カメラを用いたビデオ録画が広く用いられている。撮影に赤外線 CCD カメラを用いると、暗所でより著明になる内耳性眼振の観察、記録が可能である。これらの方法は、眼球運動の観察という面からは目的を達することができるが、基本的には眼球運動を肉眼で観察するのと同じで、定量的解析ができない大きな欠点を有している。

その解決手段として、われわれは後に述べるような、赤外線 CCD カメラとコンピュータを組合わせることによって、新しい眼球運動の定量解析装置を開発し現在実際に用いている。

3) 光センサを用いた方法

眼球の鞏膜と虹彩の境目の明暗の違いを、光センサで認識し記録する方法がある³⁾。この方法は、白い鞏膜と暗い虹彩の境目が強いコントラストを有している点に着目して、その部の移動を光センサーで感知するものである。しかし、この境目の一部は上眼瞼によって隠れてしまうことが多く、垂直性の眼球運動の解析には不向きであり、水平

運動のみの記録になってしまう。

また、鞏膜と虹彩の境目のコントラストを用いるのではなく、赤外線のスポットを眼球上に当て、その動きを赤外線センサで感知する方法もある。この方法だと、視角で10度程度の範囲内の眼球運動は記録できるが、それ以上の運動の記録は難しい。また、光センサが頭部に固定されているわけではないので、頭部運動が少しでもあると記録に大きな誤差が生じる。

4) 眼底写真を用いる方法

眼底カメラで撮影し、網膜上の血管を指標として眼球運動を定量解析する方法がある。この方法は、主として眼球の回旋運動の定量的解析に用いられている。臨床的には耳石機能検査として⁴⁾、あるいは一側前庭機能喪失後の代償過程の研究⁵⁾などがこの方法を用いて行われている。しかし、垂直、水平運動については記録上の制限があり、三次元解析には不向きである。

5) 眼球からの反射を用いる方法

①角膜からの反射

角膜に光を当てると、角膜およびレンズの表面と裏面から合せて4つの反射が得られるが、これを Purkinje image という。すなわち、角膜表面と裏面からの2つ、およびレンズの表面と裏面からの2つの計4つの反射である。この反射を写真やビデオなどで記録して解析する方法がある⁶⁾。この方法では、かなり微細な眼球運動を正確に記録することができるが、そのためには頭部をしっかり固定する必要がある⁷⁾。

②角膜に装着したものからの反射

被検者にコンタクトレンズなどを装着させ、それに光を当てその反射を記録する方法がある。コンタクトレンズを装着する煩わしさや、レンズの滑りやバックラッシュなどが測定誤差を生じるため余り用いられない⁸⁾。

これら①②の方法は、水平や垂直の眼球運動の解析はできるが、回旋運動の記録には適さず、三次元解析を行うことはできない。

5) 角膜網膜電位を用いた方法

現在、臨床検査の眼球運動記録法として最も広く用いられているのが角膜網膜電位⁹⁾を用いた眼振電図 (Electronystagmography: ENG あるいは Electrooculography: EOG) である。この方法では、水平・垂直の眼球運動が記録できる。ENG

は眼振を他覚的に記録し、定量的に分析することができ、また、開眼時と同様閉眼時にも記録できることから、臨床検査上最も一般的であり、医療施設で広く行なわれている。しかし、角膜網膜電位が色々な条件下で変化する点や厳密な意味での正確さに欠ける点がある¹⁰⁾。例えば、最大に明順応しているときの角膜網膜電位は完全に暗順応しているときの2倍であるし、網膜の活動性を高めるような刺激、例えば視運動刺激を与えると電位が増加することが知られている。また、本法の最大の欠点は、眼球運動のうち、臨床検査として診断的意味においてとくに重要な回旋性の眼球運動が記録できない点である。

6) 電磁的記録法

コイルを埋め込んだコンタクトレンズを装着して頭部を特定の磁場に入れ、眼球の運動、すなわちコイルの動きを電気的变化として記録する方法で、理論的には理想的な眼球運動記録法に最も近い方法と言われている。すなわち、現象(眼球運動)に対して忠実であること、周波数特性がよいこと、直線性がよいこと、眼球運動三次元解析ができることなどの点である。事実、動物ではコイルを眼球に埋め込むことができるので、動物実験では現在ほとんどこの方法が使われている¹¹⁾。人でも頭部運動を必要としない状態での眼球運動の正確な解析には極めて有用であり、臨床的にもか

なり使われるようになった¹²⁾。しかし、眼球(リスティング面)と磁場の関係を始めに正確に校正しなくてはならないので、当然頭部が移動してしまうと眼球運動の測定には大きな誤差が生じてしまう。従って、頭位眼振検査や頭位変換眼振検査などの臨床的に重要な検査時に認められる眼振の解析などは行えない。

7) コンピュータ画像認識を用いた方法

現在眼球運動をテレビ撮影して、その画像をコンピュータ画像認識技術を用いて分析する眼球運動三次元解析法に関して、二つの方法が報告されている。水平と垂直の眼球運動の解析に関しては両者とも同じであるが、回旋運動の解析方法に大きな違いがある。一つは、Clarke ら¹³⁾のグループが開発した解析法である。この方法は、ビデオ録画した眼球の1画面1画面の瞳孔重心点を中心とした、虹彩紋理上の同心円軌跡上の輝度の違いを抽出して360度のコントラストプロフィールを作成し、時間経過を追って始めの画面のプロフィールとの相互相関でその頂点を追跡して行く方法である(図2)。この方法は理論的には優れた方法であり、彼らは実際にこの方法で微重力環境下での温度眼振の解析などを行っている。しかし、その結果をみると、必ずしも理論通りに回旋運動が分析できているとは判断しにくい¹⁴⁾。

他の一つは、われわれが開発した方法で^{15)~18)}、

図2 Clarke らの眼球運動三次元解析の方法
(Clarke らの方法の図を多少改変した。)

図3 われわれの眼球運動撮影装置

頭部運動が自由にできるように軽量化したゴーグルと小型赤外線 CCD カメラからなっている。

瞳孔中心と選択した特定の虹彩紋理のなす角度から分析するものである。本方法をその記録方法から少し詳しく述べると、次のようになる。

まず、頭部が動いてもカメラにずれが起きないように改良された軽量ゴーグルにとりつけられた赤外線 CCD カメラ（図3）を通してビデオテープに録画された1画面（30画面／1秒）、1画面を静止させ分析する。コンピュータで画像を解析するためには、十分に鮮明な静止画像を得なければならない。そこで、カメラのシャッタースピードを画像のずれが生じないように1/250秒に早くし、それに同期して照明を明るくしている。そのようにして得られた画像から、瞳孔の重心点を求めるため、眼球画像の一定範囲内における輝度の2値化処理を行なう。すなわち、それによって瞳孔とそれ以外の部分を明瞭に区別することができる。ついで、その瞳孔の重心点を計算で求め画面上の座標として記憶させる。この重心の座標の移動から、水平および垂直の眼球運動が計算される。水平と垂直成分の解析だけであれば、ほとんどリアルタイムでの解析が可能である。

つぎに、コンピュータが追跡するのに適切な、明瞭な虹彩紋理をマニュアルで指定し、これについてやはり2値化処理を行なう。この特定の虹彩紋理の重心点を瞳孔の重心と同様に求め、その座標と既に求めた瞳孔の重心座標のなす角度のずれから回旋角度を求める（図4）。この回旋の処理には、虹彩紋理が瞳孔と比べて小さいことや、形

図4 コンピュータ画像認識による瞳孔と特定の虹彩紋理

認識された瞳孔重心と特定の虹彩紋理（小四角で囲まれた部位）の重心とのなす角度の変化から回旋運動を計算する。

状が一定でないこと、またテレビ画面を静止させるための時間などがあり、実際の解析には多少の時間がかかる。しかし、これらはコンピュータのメモリー容量が増し、ビデオ録画なしに直接メモリー上にカメラからの画像が取り込めるようになれば解決される問題であるし、解析の精度も向上するはずである。

実際に解析するとき、われわれがコンピュータに指示するのは、始めの2値化処理のための画面の範囲、および特定の虹彩紋理であり、その後は指定された画面数だけコンピュータが自動解析するようになっている。この解析装置の最大の利点は、他の方法では解析困難な眼球の回旋運動を、水平および垂直の運動とともに定量的に分析できることである。また、同時に頭位眼振や頭位変換眼振などの頭部運動を伴う臨床検査時の眼振の記録・解析ができることである。

つぎに、本記録・解析装置（日本光電 ETS-1100）を用いた良性発作性頭位眩暈症症例の頭位変換眼振の解析の実際例を示す。

良性発作性頭位眩暈症の頭位あるいは頭位変換眼振は、純回旋性で潜時と減衰があり、めまいを伴うのが特徴である。しかし、実際に良性発作性頭位眩暈症の眼振を解析すると、純粋な回旋性眼振を示すものはない¹⁹⁾²⁰⁾。図5は良性発作性頭位眩暈症患者の頭位変換眼振の三次元解析結果の1

図5 良性発作性頭位眩暈症患者の頭位変換眼振解析の一例

上段：水平，中段：垂直，下段：回旋。各段の上が，右，上，時計回りへの眼球運動を示す。

例を示したものである。水平，垂直，回旋の三成分が示されているが，眼振に全ての成分が含まれていることが明瞭に分る。眼振の向きは，左，上，時計回りであり，三成分は一定の潜時を持って同時に始まり，徐々に緩徐相速度が早まり最大に達したのち，漸次減衰しほぼ同時に三成分ともに消失している。良性発作性頭位眩暈症の眼振の特徴が詳細にわたって解析，再現されている。これら眼振三成分の振幅と緩徐相速度は，回旋成分で最も大であり，垂直成分がそれに続く。水平成分は最も小であり，多くの良性発作性頭位眩暈症の眼振を解析すると，水平成分の明瞭でない症例もある。

一方，良性発作性頭位眩暈症の原因に関しては，耳石障害説と後半規管障害説（cupulolithiasis）がある。耳石由来の眼球運動と後半規管由来の眼球運動では，その性状が異なることは以前から知られている事実である。従って，良性発作性頭位眩暈症症例の眼振を解析することによって，当該疾患の原因を解明することができるはずである。後半規管由来に眼振は垂直回旋混合性であり，垂直成分が回旋成分より大であることが動物実験で明らかにされている²¹⁾。ヒトでも，頭部を後半規管が刺激されるように固定して，回転すると，垂直回旋混合性の眼振が誘発され，垂直と回旋の両成分の速度比は，72：28になるという。これは，良性発作性頭位眩暈症症例の頭位変換眼振の解析結果から得られた垂直成分と水平成分の比，44：56とは大きく異なっている¹⁹⁾²⁰⁾。

おわりに

眼球は常に三次元的に運動している。したがって，その運動を三次元的に正確に記録・解析することは長年の夢であった。今日，エレクトロニクスの発達とあいまって，まだ改良の余地あるものの，その三次元解析ができるようになったことは極めて大きな意義を持っていることと考えている。本稿では眼球運動の歴史的な記録法の変遷やその種類を記述しながら，最後に三次元解析の実際を述べた。

文 献

- 1) Nelson JR, Cope D: The otoliths and the ocular countertorsion reflex. Arch Otolaryngol 94: 40-50, 1971
- 2) Diamond SG, Markham CH, Simpson NE, et al: Binocular counterrolling in humans during dynamic rotation. Acta Otolaryngol 87: 490-498, 1979
- 3) Jones R: Two dimensional eye movement recording using a photo-electric matrix method. Vision Res 13: 425-431, 1973
- 4) Kanzaki J, Ouchi T: Measurement of ocular countertorsion reflex with fundoscope camera in normal subjects and in patients with inner ear lesions. Arch Otorhinolaryngol 218: 191-201, 1978
- 5) Curthoys IS, Dai MJ, Halmagi GM: Human ocular torsional position before and after unilateral vestibular neurectomy. Exp Brain Res 85: 218-225, 1991

- 6) Jasper HH, Walker RY: The Iowa eye-movement camera. *Science* 74: 291-294, 1931
- 7) Barlow HB: Eye movement during fixation. *J Physiol* 116: 290-306, 1952
- 8) Boyle PR, West DC: The frequency response of contact lens stalk assemblies. *Vision Res* 8: 474-480, 1968
- 9) Schott E: Über die Registrierung des Nystagmus und anderer Augenbewegungen verm itteles des Saitengalvanometers. *Deut Arch für klin Med* 140: 79-90, 1922
- 10) Kris C: Corneo-fundal potentials variations during light and dark adaptation. *Nature* 182: 1027-1028, 1958
- 11) Robinson DA: A method of measuring eye movements using search coil in a magnetic field. *IEEEA Tras Biomed Eng* 10: 137-145, 1963
- 12) Collewijn H, van der Mark F, Jansen TC: Precise recording of human eye movements. *Vision Res* 15: 447-450, 1975
- 13) Clarke AH, Winfried T, Scherer H: Video-oculography-An alternative method for measurement of three-dimensional eye movements. In eds Schmid R, Zambbarbieri D. *Oculomotor control and cognitive preocess*. pp431-443, Elsevier, North-Holland, 1991
- 14) Clarke AH, Teiwe W, Schere H: Vestibulo-oculomotor testing during the course of a spaceflight mission. *Clin Investg* 71: 740-748, 1993
- 15) 山野辺滋晴, 平良晋一, 森園徹志, 他: コンピュータ画像認識による眼球運動解析システム. *Equilibrium Res* 48: 335-340, 1989
- 16) Yamanobe S, Taira S, Morizono T, et al: Eye movement analysis system using computerized image recognition. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 116: 338-341, 1990
- 17) Yagi T, Yamanobe S, Morizono T, et al: Three components analysis of eye movements using computerized image recognition. *Acta Otolaryngol Suppl* 481: 460-462, 1991
- 18) Yagi T, Kurosaki S, Yamanobe S, et al: Three-component analysis of caloric nystagmus in humans. *Arch Otorhinolaryngol Head Neck Surg* 118: 1077-1080, 1992
- 19) 潮建司朗, 八木聰明, 森園徹志: 良性発作性頭位眼振の3成分解析 *Equilibrium Res Suppl* 10: 80-83, 1994
- 20) Yagi T, Ushio K: Nyatgmus in benign paroxysmal positional bertigo; A three-component analysisi. *Acta Otolaryngol Suppl* (in press)
- 21) Suzuki JI, Cohen B, Bender MB: Compensatory eye movements induced by vetical simicircular canal stimulation. *Exp Neurol* 9: 137-160, 1964

(原稿到着: 平成7年1月5日)
 (別刷請求先: 八木聰明)
 〒113 東京都文京区千駄木1-1-5
 (日本医科大学耳鼻咽喉科学教室)