総	説
---	---

Video-oculography (VOG)

—眼球運動の三次元解析—

今井 貴夫

Video-oculography (VOG)

—Three-dimensional Analysis of Eye Movement—

Takao Imai

Department of Otolaryngology, Kansai-Rosai Hospital

There are two methods for measurement of eye position in three dimensions. One is the scleral search coil technique and the other is video-oculography (VOG). Although the VOG system is not as accurate as the scleral search coil system in the ability of time and space resolution, it is suitable for clinical use. There are two types of VOG system: One for analysis using Fick coordinates, and the other for analysis using axis angle, rotation vector and quaternions. Fick coordinate analysis measures three consecutive rotations about the horizontal, vertical, and torsional eye-fixed axes. Axis angle, rotation vector and quaternions measure single axis rotation from a chosen reference position to the current eye position. The system for analyzing by Fick coordinates utilizes the movement of the center of the pupil in order to calculate horizontal and vertical eye movement. In order to calculate the torsional component, the system uses the movement of an iris freckle or iris pattern. The system for analyzing axis angle, rotation vector and quaternions reconstructs the three-dimensional coordinates of the center of the pupil and an iris freckle in space. From these movements in space, the system calculates axis angle, rotation vector and quaternions. In this review, such two type of VOG systems are introduced, and the advantages and disadvantages of both types are discussed.

Key words: three-dimensional eye position, scleral search coil, video-oculography, fick coordinate, rotation vector

1. 序 論

眼球運動が三次元的であることは古くは Frans Cornelis Donders¹⁾ の記載に認められる。Electronystagmography (ENG) の出現により、眼球運動が定量的に解析できるようになり、前庭動眼

反射を含む眼球運動研究は大いに発展した。眼球運動は三次元的であるにも関わらず、ENG では原理的に眼球運動の三次元解析はできないので、眼球運動を三次元解析できるシステムの開発が行われた。眼球運動の三次元解析システムとして、サーチコイル法、および、コンピューター画像解析の手法を用いた Video-oculography (VOG) が

出現した。VOG においては解析のもとになるのは二次元の眼球運動画像である。二次元の画像から三次元での眼球運動の三つのパラメーターを抽出するため、様々な方法が存在する。眼球運動の定量的解析はまず、ENG にて二次元的に行われていたという歴史があるため、眼球運動の三次元解析が可能となったとき、従来の二次元解析による二次元での視線の動きによる二つのパラメーターに加え、三つ目のパラメーターとして、視線軸周りの回転角度が解析された。視線は移動するので、三つ目のパラメーターの回転軸は移動することになり、眼球運動の解析座標として、動座標系である Fick 座標系²⁾や Helmholtz 座標系³⁾が用いられた。Fick 座標系や Helmholtz 座標系のように連続した三つの回転により眼球運動を表記するのではなく、固定された座標系内での一つの回転軸周りの動きとして三次元的に眼球運動を表記する座標系、すなわち固定座標系が後に用いられるようになってきた。眼球運動の三次元での定量的な解析が可能となり、Donders' law¹⁾や Listing's law⁴⁾が成立することが確認された。Listing's law は動座標系でなく、固定座標系において示される。

本総説では、まず、眼球運動三次元解析が可能となり、定量的に確認された Donders' law と Listing's law についてまず述べる。次に眼球運動三次元解析の理解のために不可欠な、歴史の古い動座標系、また、最近、眼球運動の解析座標系として主流である固定座標系について述べる。そして、種々存在する VOG システムについての詳細を述べ、最後に VOG の今後の課題について述べる。

2. Donders' law と Listing's law

三次元的な眼球運動に関する最初の記載を行ったのは Frans Cornelis Donders であると考えられる¹⁾。ある眼位から別の眼位へは最短距離での一軸周りの回転により変化するものとする、正面視時の眼位である図 1 A から左 90° の眼位へ直接変化した場合、眼位は図 1 B に示すようになる。ところが、左 90° へ視線を変える前に、まず、上方 90° の視線となる眼位を経由し（図 1 C）、その後左 90° の視線となるような眼球運動を考えると、その場合の最終的な眼位は図 1 D のようになる。すなわち左 90° の視線にたどり

つくまでの軌跡が違うと、図 1 B と図 1 D のように最終的な回旋を考慮した眼球の状態は違ったものになってしまう。ところが、1848年、Donders は、頭部が固定されている場合、視線の方向が同じであればその視線にたどりつくまでの軌跡に関係なく、回旋を含めた眼球の状態は同じであることを指摘し、これが後に、Donders' law と呼ばれるようになった。Donders' law に従うと、左 90° の視線時には左 90° の視線を形成するまでの軌跡の違いにより、図 1 B、図 1 D に示すような最終的な回旋を含めた眼球の状態が違ってしまうようなことは起こらない、ということになる。すなわち、回旋を含めた眼球の状態は視線の方向のみによって決定され、二つのパラメーターのみで決定されるということになる。回旋を含めた眼球の状態は三次元で表現されるため、三つのパラメーターが必要である。Donders' law はその三つのパラメーターを x, y, z とすると二つのパラメーターのみで眼球の状態が決まるため、 $z=f(x, y)$ をみたす関数 f が存在することを意味する。

図 1 Donders' law

ある眼位から別の眼位へは最短距離で一軸周りの回転により変化するものとする。A を正面視時とし、正面視から左 90° に視線を変える場合、直接変えた場合は B に示した状態となる。ところが上 90° を経由し C、左 90° に視線を変えた場合は D に示した状態となり、B に示した状態とは視線の方向は同じであるが、回旋を考慮した眼球の状態としては違いが生じる。Donders はこのような違いが生じないことを発見した。

その後、Johannes Benedict Listing は、頭部が固定されている場合、ある眼球位置を参照眼位（図 2 A）とすると他のすべての眼球位置はその参照眼位からの一回の回転で表すことができるが（図 2 B）、そのときの回転軸は一平面に乗る（図 2 C）、という法則を唱えた。この平面は広義の Listing 平面と呼ばれ、この法則は Listing's law と呼ばれる（後に説明する Listing's law の第一眼位以外を参照眼位とした場合の眼位平面は厳密には Listing 平面とは呼ばれず変位平面（displacement plane）⁵⁾ と呼ばれているが、便宜的に変位平面も含め、広義の Listing 平面とすることも慣例化されている⁶⁾）。Listing 自身は直接 Listing's law を発表しておらず、1855年、Rueete により Listing's law が記載されている⁴⁾。ある眼位は、基準となる眼位を決めその基準となる眼位に対して相対的にしか表現することができない。この基準となる眼位を参照眼位と呼び、参照眼位は

図 2 Listing's law

A を参照眼位とする。
B に示した眼位へは A の眼位から回転軸 L 周りに回転させることにより到達することができる。
C の回転軸 L は A の眼位を参照眼位とする Listing 平面 P 上に存在する。参照眼位をどのようにとっても頭部が固定されている場合、参照眼位から他の眼位に到達させることのできる回転軸は一平面上に存在する。しかし、参照眼位の視線の方向 S と Listing 平面 P とが必ずしも直交するわけではなく、平面 P の法線ベクトル V と参照眼位の視線の方向 S とは必ずしも同一ではない。

任意に決定することができる。Listing's law が成立し、図 1 の A, B, C という眼位をとる個体を考える。A を参照眼位とすると A から B へ一回の回転で眼位を変えることのできる回転軸は $x=y=0$ であり（図 3 上段真中）、A から C への回転軸は $x=z=0$ である（図 3 上段右）。よってこの二本の回転軸が存在する平面は $x=0$ であり、参照眼位 A に対するこの個体の Listing 平面は $x=0$ ということになる（図 3 上段左）。この個体において B を参照眼位とすると B から A への回転軸は $x=y=0$ であり（図 3 中段真中）、B から C への回転軸は $x=-y=-z$ である（図 3 中段右）。B から C へ一回の回転で眼位を変えることのできる回転軸は $x=-y=-z$ のみであり、図 3 中段右の挿入図に示すように軸 $y=z=0$ 周りの回転では視線の方向は C と一致するが回旋を含めた眼球の状態は C とは一致しない。以上より、この二本の回転軸が存在する平面は $x=-y$ であり、参照眼位 B に対するこの個体の Listing 平面は $x=-y$ ということになる（図 3 中段左）。同様に参照眼位 C に対するこの個体の Listing 平面は $x=-z$ ということになる（図 3 下段左）。このように、すべての参照眼位に対し、共通の Listing 平面が存在するわけではなく、一つの参照眼位に対し、その参照眼位固有の Listing 平面が存在するのである。この個体での眼位を表現する場合、すべての眼位は参照眼位に対し相対的に表現されるのである。同一の眼位を表現する場合、基準となる参照眼位が違えば、その眼位は違ったものとして表現される。参照眼位が違えば A, B, C という眼位の表現のされ方、また Listing 平面も変化するが、この個体が A, B, C という眼位を取ること、Listing's law が成立するということには何の変化も生じない。この個体において、A を参照眼位とした場合、参照眼位の視線の方向とその参照眼位に対する Listing 平面とは直交しているが、B や C を参照眼位とすると参照眼位の視線の方向とその参照眼位に対する Listing 平面とは直交しない。Listing's law が成立する場合、参照眼位の視線の方向と Listing 平面とが直交するのは一つの参照眼位に限られる。この例においては A の眼位を参照眼位とするときのみ、参照眼位の視線の方向と Listing 平面が直交し、この個体のその他のすべての参照眼位に

図3 図1のA, B, Cを参照眼位とした時の Listing 平面
上段：図1Aの眼位を参照眼位とする Listing 平面
中段：図1Bの眼位を参照眼位とする Listing 平面
下段：図1Cの眼位を参照眼位とする Listing 平面
上段の参照眼位に対し、中段、下段の参照眼位は 90° 回転している。上段の Listing 平面に対し、中段、下段の Listing 平面は参照眼位の回転時と同じ回転軸周りに 90° の半分の 45° 回転している。

対しては参照眼位の視線の方向とその参照眼位に対する Listing 平面は直交しない。参照眼位の視線の方向とその参照眼位に対する Listing 平面が直交する場合、そのときの参照眼位を Listing's law における第一眼位と呼び、第一眼位に対する Listing 平面を狭義の Listing 平面と呼ぶ⁶⁾。ある個体での一つの参照眼位に対する Listing 平面を実測により求めれば、この個体での第一眼位、および狭義の Listing 平面は理論的に計算により求めることができる。Listing 平面の実測法はある参照眼位を決め、その参照眼位に対し、その他すべての眼位を Rotation vector, Axis angle, もしくは四元数で表し、Rotation vector, Axis angle, もしくは四元数のベクトル部を三次元座標にプロットすればよいのである。Listing 平面とは平面であるので理想的には厚さが0であるが実測すれば厚さを少しもってしまう (図4A)⁷⁾。実測した Rotation vector, Axis angle, もしくは四元数のベクトル部までの距離の2乗の和を最小とする平面が実測した Listing 平面ということになる。実

測した Listing 平面 P の法線ベクトル V を考える (図2C)。この平面 P 上にベクトル部が存在し、回転を表す四元数 q を考える。参照眼位を四元数 r によって回転させた新たな参照眼位を考えるとこの新たな参照眼位に対する Listing 平面は四元数 qr^{-1} のベクトル部により形成される平面となる。 r による回転角度を 2α とすると qr^{-1} のベクトル部により形成される平面は q のベクトル部により形成される平面に対し、 r と同じ回転軸で α だけ回転している⁵⁾。よって、実測時に用いた参照眼位の視線の方向 S と V とを含む平面内で参照眼位を 2α 変化させると、Listing 平面は α 変化する⁵⁾。このことは鈴木⁶⁾ の総説の中では同一の終点に至る回転の開始点は、回転軸が傾くとその傾きの2倍同方向に傾かなければならないことから示されている。例を挙げると、図3上段の参照眼位に対し、図3中段、下段の参照眼位は 90° 回転しているが、Listing 平面は図3上段の Listing 平面に対し、図3中段、下段の Listing 平面は参照眼位が回転した同じ回転軸に

図4 実測した Listing 平面

A : 参照眼位の視線の方向と、その参照眼位に対する Listing 平面が直交する場合、その参照眼位を Listing's law における第一眼位 (primary position) と呼び、その時の Listing 平面を狭義の Listing 平面と呼ぶ⁵⁾。参照眼位での視線の方向 S と Listing 平面 P がなす角度は参照眼位の決め方により様々である。一つの参照眼位に対する Listing 平面が実測により求められ、以下に示す方法で第一眼位、および狭義の Listing 平面を求めることができる。 P に対する法線ベクトルを V とする。 S と V を含む平面内で S を 2α 変化させた S' を視線の方向とする参照眼位を考えると、この参照眼位に対する Listing 平面 P' は P に対し、 α だけ変化する²⁾。我々のシステムにて正面視時の眼位を参照眼位とし、Listing 平面を実測したところ S と V のなす角度は 11.6° であった。 S と P のなす角度は $(90+11.6)^\circ$ となる。平面 YZ 内で S を 2α 変化させ、 S' となるようにすると、 P' と S' のなす角度は $(90+11.6)-11.6 \times 2 + 11.6$ より 90° となり、 S' と P' は直交することになる。よって、 S' を視線の方向とする眼位が第一眼位であり P' は狭義の Listing 平面である。

B : 第一眼位の視線の方向に Z 軸をとると Listing 平面は $z=0$ と表される。

て 90° の半分である 45° 回転している。 S と V とのなす角度の 2 倍、 S と V を含む平面内で S を変化させた参照眼位 S' を考える。我々のシステムにて実測した Listing 平面を図 4 A に示す⁷⁾。実測時、正面視時の眼位 S を参照眼位とした。 S と V のなす角度は 11.6° であったので、 S と P のなす角度は $(90+11.6)^\circ$ となる。 P' と S' のなす角度は $(90+11.6)-11.6 \times 2 + 11.6$ より 90° となり、 S' と P' は直交する (図 4 A)。よってこの S' の視線の方向をとる眼位、すなわち 23.2° 上方視の眼位が第一眼位であり、 P' が狭義の Listing 平面である。第一眼位の視線の方向に Z 軸をとり、 Z 軸と直交するように X , Y 軸をとると、Listing 平面は $z=0$ と表される (図 4 B)。よってこのとき、関数 f は $f(x, y)=0$ と決定される。Donders' law は関数 f の存在を示唆するのみであり、関数 f を決定したのが Listing's law ということになる。関数 f を決定するためには眼球位置を表す三つのパラメーターを定量的に解析する必要があるが、定量的な三次元眼球運動解析法が開発されていなかった時代に Listing がどのようにして Listing's law にたどりついたかは謎である。

3. 動座標系—Fick 座標系と Helmholtz 座標系—

Electronystagmography (ENG) により眼球運動が一次元や二次元で定量的に解析されるようになった。さらに、Robinson⁸⁾ により、サーチコイル法による眼球運動計測法が開発され、Collewijn ら⁹⁾ などにより改良が加えられてからサーチコイル法による眼球運動の三次元的な解析が可能になった。映像による眼球運動の三次元的解析方法は Nakayama¹⁰⁾ により報告された。一次元や二次元での解析では眼球の動きは瞳孔中心の動き、すなわち視線の方向の動きとして解析されてきたため、三次元的な解析を行う場合、最初は従来の瞳孔中心、視線の動きの追跡をふまえ、三つ目のパラメーターとして視線軸周りの回転が用いられた。そのため、座標系として眼球に固定され眼球とともに運動する動座標系である Fick 座標系や Helmholtz 座標系が用いられることになった。Fick 座標系は Adolf Fick によって報告された²⁾。眼球の三次元的な位置を表す際、正面視時の眼位からまず水平回転させ、次に垂直回転

させ、最後に視線軸周りに回旋させる座標系である（図5A）。Helmholtz 座標系とは Hermann Helmholtz によって報告された座標系であり³⁾、Fick 座標系に対し、水平、垂直の順序が逆である（図5B）。

4. 固定座標系一軸解析一

Fick 座標系や Helmholtz 座標系は図5に示すように回転とともに移動する Gimbal が存在し、連続した三つの回転軸による動座標系である。しかし、眼窩内には Gimbal は存在せず、実際の眼球運動は六つの外眼筋から形成されるトルクにより起こる。よって Fick 座標系や Helmholtz 座標系のように連続した三つの回転により眼球運動を表記するのではなく、最近では固定された座標系内での一つの回転軸周りの動きとして三次元的に眼球運動を表記する座標系、すなわち固定座標系が用いられるようになってきた¹¹⁾。図6に示すように参照眼位からある眼球位置に移動させることのできる回転軸、およびその位置に到達するのに必要な回転軸周りの回転角度 θ を考える。その回転軸の方向をもつ単位ベクトルを $\mathbf{n}$ とすると $\theta \mathbf{n}$ が Axis angle であり¹²⁾¹³⁾、 $\mathbf{n} \tan(\theta/2)$ が Rotation vector である¹⁴⁾。四元数 (Quaternion) によっても回転を表現することができる^{11)15)~19)}。四元数とは四つの実数 a, b, c, d に対し三つの基底 i, j, k により

図6 固定座標系での軸解析

A を第一眼位とすると、A から B の眼位へ変化させることのできる回転軸は $\mathbf{n}$ と平行であり、B の眼位は $\mathbf{n}$ および θ で表される。

$$\alpha = a + bi + cj + dk$$

で表される数である。 i, j, k には

$$i^2 = -1, j^2 = -1, k^2 = -1, ij = k, ji = -k, jk = i, \\ kj = -i, ki = j, ik = -j$$

が成立する。A は実部、 $bi + cj + dk$ はベクトル部と呼ばれる。 $a = \cos(\theta/2)$ 、 $\sqrt{b^2 + c^2 + d^2} = \sin(\theta/2)$ 、ベクトル (b, c, d) が $\mathbf{n}$ と平行になるように a, b, c, d を決めれば四元数 α は回転軸 $\mathbf{n}$ 周り θ の回転を表すことになる。このような眼球運動の三次元的軸解析はサーチコイルに関しては Tweed ら²⁰⁾ により、ビデオに関しては Imai ら⁷⁾ により可能となった。

5. Video-oculography (VOG)

眼球運動を三次元解析できる方法は現在、サーチコイル法、および画像解析による方法のみである。サーチコイル法は被験者への負担が大きく、計測空間が制限され、その扱いが繊細である。そこで、臨床の場で三次元眼球運動解析を行う際、眼球運動のビデオ画像のコンピューター解析を行うことがほとんどである。コンピューター画像解析法を用いた眼球運動解析システムは Video-oculography (VOG) と呼ばれる。VOG で眼球運動映像を解析する際、技術的に一番問題になるのは眼瞼や赤外線光の写り込みなどがノイズになってしまうことである。しかし、我々のような平衡医学に携わるものにとってはこれらのノイズの存在する映像からどのような工夫がなされ特徴点や特徴パターンを抽出するのか、また処理速度を上

図5 Fick 座標系と Helmholtz 座標系

A : Fick 座標系。回転の順序は水平、垂直、回旋となる。

B : Helmholtz 座標系。回転の順序は垂直、水平、回旋となる。

(今井貴夫：眼振の三次元解析。武田憲昭，池田勝久，加我君孝，他編。耳鼻咽喉科診療プラクティス6。EBMに基づくめまいの診断と治療。174-177頁，文光堂，東京，2001より引用)

げるためにどのような工夫がなされているのか、というような細かいことはあまり重要ではない。我々は解析されたデータが Fick 座標系によるものなのか、Rotation vector, Axis angle, Quaternion のような固定座標系での軸解析によるものなのかということや、各 VOG の利点、欠点を知った上で自分が必要とするデータ採取のためにはどの VOG が一番適しているのかを理解する必要がある。

(i) Fick 座標系を採用したシステム

暗室下においても眼球画像が撮影できるよう、通常、光源として赤外線が使用される。赤外線下での映像はカラー映像ではなく、グレースケールの映像であり、図 7 A に示すように瞳孔部は他の部分に比べ黒の度合いが強い。よってある黒の度合いを決め、それより黒いところとそれより白いところにわけると二値化と呼ばれる比較的簡単な画像解析の手法によって容易に瞳孔中心を抽出することができる (図 7 B)²¹⁾。最近では眼瞼や赤外線の写真込みによるエラーを少なくするため、瞳孔縁のデータに楕円近似を用いることにより瞳孔中心を求めるシステムが増えている²²⁾。最近の VOG はほぼすべてのシステムにおいて瞳孔中心を解析しており、瞳孔中心の動きから水平、垂直の二つのパラメータを求めている。そのため、三次元解析を行う場合の三つ目のパラメータを瞳孔中心周りの回旋角度としているシステムが多い。瞳孔中心周りの回旋角度を計測しているため、Fick 座標系、もしくは Helmholtz 座標系における解析である。現在、Helmholtz 座標系が用

いられる機会はほとんどなく、本解析法によるデータは Fick 座標系でのデータとして扱われている。三次元解析といっても、眼球を二次元に投影したビデオ画像の水平、垂直、回旋の三成分を解析しているので、厳密には Fick 座標系でのデータではないことに注意する必要がある。あらかじめ較正により、1 度の水平、垂直の眼球の動きが画面上でどの程度の動きになるか求めておき、その値を利用し、図 8 に示すように画面上での瞳孔中心の水平、垂直の動きの大きさから水平、垂直成分を求めることになる。正面視時の瞳孔中心の三次元座標を $(x\ 0\ 0)$ とし、Fick 座標系での回旋、水平 θ 、垂直 ϕ を考えると、回転後

図 7 瞳孔中心の抽出

- A : 赤外線 CCD カメラにより得られた眼球画像。眼球画像は白黒画像である。
B : A の画像を二値化処理することにより得られた画像。瞳孔のみが抽出されている。

図 8 Fick 座標系を採用した VOG での水平、垂直、回旋成分の求め方

- A : 正面視時の眼球画像。大きな十字は画面上の瞳孔中心を表しており、小さな十字はある特徴的な虹彩紋裡の画面上での重心を表している。
B : 求めたい眼位の眼球画像。
C : 水平、垂直、回旋成分は図に示したように求められる。

の瞳孔中心の三次元座標は $(x \cos \theta \cos \phi \ x \sin \theta \cos \phi \ -x \sin \phi)$ となる⁵⁾。よって画面上での瞳孔中心の位置は $(x \sin \theta \cos \phi \ -x \sin \phi)$ となる。垂直成分を求めるために使う、画面上での瞳孔中心の縦の変化は $-x \sin \phi$ であり ϕ にしか影響を受けないが、水平成分を求めるために使う、画面上での瞳孔中心の横の変化は $x \sin \theta \cos \phi$ であり θ とともに ϕ にも影響を受けてしまう。よって厳密には画面上での瞳孔中心の横の変化のみからは水平成分を求めることはできない。ただし、垂直成分が小さく、 $\cos \phi \approx 1$ と考えると画面上での瞳孔中心の横の変化のみから水平成分を求めることができる。

瞳孔中心周りの回旋角度の求め方には二つの方法がある。一つはある虹彩紋裡の特徴点と瞳孔中心との位置関係から求める方法である (図8)²¹⁾。この方法の利点は水平、垂直成分は瞳孔中心のみから求めているため、瞳孔中心が正確に解析できていれば、水平、垂直成分は正確に求まる。虹彩紋裡の特徴点のみに抽出エラーがあった場合、そ

のエラーは回旋成分にしか反映されない。欠点は立体である眼球を二次元に投写した画像の水平、垂直、回旋成分を解析し、奥行き情報を無視しているため、瞳孔中心が動くとき画面上での瞳孔中心と虹彩紋裡との距離が変化し、その変化の度合いは虹彩紋裡の位置によって違い、またこの変化が回旋成分に影響してしまうことである。よって抽出する虹彩紋裡によって回旋成分に違いが生じ、極端な場合にはこの変化により、回旋の方向が実際の動きとは逆方向に解析されてしまうことすらある。ただし、瞳孔中心の動きが小さな範囲であれば画面上での瞳孔中心と虹彩紋裡との距離の変化は無視できるほどの小さなものであり、このような大きな問題は起こらない。

上記の方法では回旋成分を求める際、虹彩紋裡の特徴点を抽出するが、実際には抽出しやすい特徴点が存在しない場合や、特徴点が赤外線光の写り込みやすい位置や眼瞼、眉毛にじゃまされやすい位置にある場合には特徴点の抽出は難しい。そこで、瞳孔中心周りの回旋成分を求める別の方法

図9 Polar cross correlation method

- A : 正面視時の眼球画像。白十字は瞳孔中心を表す。
- B : 求めたい眼位の眼球画像。
- C : A に示された黒点円上の白黒輝度 (虹彩紋裡のパターン) を示したグラフ。横軸は黒点円上の角度を表し、縦軸は白黒輝度を表す。白黒輝度は値が小さいほど黒く、値が大きいほど白いことを表す。
- D : B に示された黒点円上の白黒輝度を示したグラフ。
- E : C と D の相互相関関数。相互相関関数の値は 13° のところで最大値をとる。すなわち、B の眼球位置は A に比べ 13° 回旋していることになる。

として、虹彩紋裡の特徴点を抽出するのではなく虹彩紋裡をパターンとして抽出し、正面視時の眼位の画像における虹彩紋裡パターンとの相互相関係数を求める方法が開発された^{23)~26)}。この方法は Polar cross correlation method と呼ばれる(図9)。Polar cross correlation method の利点は上記したように虹彩紋裡に抽出しやすい特徴点がない場合にも回旋成分の計測が可能であり、相互相関係数は高速フーリエ変換を利用することにより求めるので、アルゴリズムが複雑ではなく、処理速度が速い。しかし、虹彩紋裡の特徴点を抽出する場合と同じく、虹彩紋裡パターンを形成する瞳孔の外縁は瞳孔中心が移動することによりひずむので、このひずみが虹彩紋裡パターンの位置関係を変化させてしまい、回旋角度に影響してしまうという欠点が存在する。この問題を解決する方法は現在研究中である²⁷⁾。なお、Polar cross correlation method はパターンを利用しているため、特徴点を利用した場合に比べノイズが大きい。

Fick 座標系や Helmholtz 座標系では眼球を水平、および垂直回旋させた場合、みかけ上の回旋成分を生じてしまう。例えば、Helmholtz 座標において、図1Aからの90°垂直(図1C)、90°水平(図1D)、0°回旋の回転運動を考えた場

図10 眼球運動の回転中心の求め方

眼球運動の画面上での回転中心は二次元画面上に投影された楕円を形成する瞳孔の短径が交わる点として求めることができる。 l_1, l_2, l_3 は楕円を形成する瞳孔の短径を表し、これらは一点Oで交わる。

合、最終眼位は図1Dに示したようになるがこの図1Dは Helmholtz 座標では回旋成分0°であるのだが、みかけ上は-90°回旋しているようにみえる。これを偽回旋(false torsion)と呼ぶ⁵⁾。偽回旋は Fick 座標でも存在する。VOGにおいて、上記のような方法で回旋成分を求めると、この偽回旋を回旋成分として捉えてしまう。この点も Fick 座標系を採用した VOG システムの問題点の一つである。ただし、水平成分および垂直成分が小さな場合、偽回旋は無視できるほどの小さな値であるので、上記のように回旋成分を求めることができると考えられる。

(ii) 固定座標系での軸解析を行うシステム

眼球は立体で眼球運動の回転軸は三次元空間に存在するため、眼球運動の三次元解析とは眼球の三次元空間における動きを解析するべきである。しかし、CCD カメラにより撮影された眼球運動

図11 瞳孔中心の回転半径の求め方

A: CCD カメラの映像

B: 眼球を上から見た図

二次元画面上に投影された楕円を形成する瞳孔の短径と長径の比より、眼球の回転角度を求めることができる。

$\sin(\text{眼球の回転角度}) =$

$\frac{\text{画面上の回転中心と瞳孔中心との距離}(r)}{\text{瞳孔中心の回転半径}(R)}$

(今井貴夫: 眼振の三次元解析. 武田憲昭, 池田勝久, 加我君孝, 他編. 耳鼻咽喉科診療プラクティス6. EBMに基づくめまいの診断と治療. 174-177頁, 文光堂, 東京, 2001より引用)

映像は奥行き情報のない二次元画像であり、一台のカメラにより撮影された二次元画像から三次元情報を得ることは不可能である。しかし、眼球は一点を中心に回転し、得られた映像はカメラ軸に垂直な平面に投射した映像である、という仮定のもとでは一台のカメラによる映像から三次元情報を以下のように再構築することが可能となる⁷⁾。二次元画面上に投射された瞳孔は画面上では楕円となり、その短径を構成する直線は必ず画面上の眼球運動回転中心を通るので、楕円である瞳孔の短径を構成する直線の交点として画面上の回転中心を求めることができる(図10)。瞳孔中心の回転半径 R は画面上の眼球運動回転中心と楕円である瞳孔の中心との距離、および、楕円である瞳孔の長径と短径との比から以下の式で求めることができる。

$$R = \frac{(\text{画面上の回転中心と瞳孔中心との距離})}{\sqrt{1 - ((\text{短径の長さ})/(\text{長径の長さ}))^2}}$$

(図11)

瞳孔中心の回転半径が求めれば瞳孔中心の画面上での眼球運動回転中心に対する相対的な座標を $(X \ Y)$ とすると眼窩内での瞳孔中心の三次元座標は $(X \ Y \ \sqrt{R^2 - X^2 - Y^2})$ と求まる。同様にある虹彩紋裡の眼窩内での三次元座標を求めることができる。眼窩内における眼球の運動の直線移動成分は無視できるほどのわずかなものであるから、眼窩内における眼球運動の三次元解析は眼球上の二点の三次元空間での運動情報のみで可能となる。二点の空間での移動情報が得られれば、眼球の回転情報が得られ、 3×3 の回転行列が得られる(図12)。この回転行列から眼球運動を三次元空間における回転軸とその回転軸周りの回転角度により表現する軸解析、すなわち、Rotation vector, Axis angle, Quaternion を求めることができる。この方法による利点は奥行き情報を考慮しているため、瞳孔中心の移動による、画面上での瞳孔や虹彩紋裡のひずみが問題とならないことである。瞳孔や虹彩紋裡のひずみが問題とならないため、眼球運動のモデルを用いた計測では40度の回

図12 固定座標系における回転軸と回転角度の求め方

三次元空間における、回転前後の瞳孔中心の座標を結ぶ線分を垂直二等分する平面 $P1$ 上に瞳孔中心を回転前の位置から回転後の位置に移動させることのできる回転軸が存在する。同様に平面 $P2$ 上に虹彩紋裡を回転前の位置から回転後の位置に移動させることのできる回転軸が存在する。よって瞳孔中心、および、虹彩紋裡をともに回転前の位置から回転後の位置に移動させることのできる回転軸は平面 $P1$ と平面 $P2$ との交線である。回転軸が求めれば、その回転軸周りの回転角度 α を求めることができる。(今井貴夫: 眼振の三次元解析. 武田憲昭, 池田勝久, 加我君孝, 他編. 耳鼻咽喉科診療プラクティス 6. EBM に基づくめまいの診断と治療. 174-177頁, 文光堂, 東京, 2001より引用)

転まで測定可能であった⁷⁾。欠点は虹彩紋裡の特徴点を必要とすること、瞳孔中心あるいは虹彩紋裡のどちらか一方のデータが正確に解析できなければすべての成分にエラーが生じてしまう点である。

(iii) 画面上の回転軸を解析するシステム

眼球運動を一軸周りの回転としてとらえ、画面上に投射された回転軸を求めようという試みが報告されている²⁸⁾。眼球画像にある程度大きな画素の集合を設定し、この画素の集合を参照ブロックとする。この参照ブロックと最もよくマッチする画素の集合を次フレームの眼球画像の中において探索することにより、画素の移動距離および移動方向、すなわちベクトルを決定する。この方法で得られた複数のベクトルから画面上の眼球運動の回転軸、および、その回転軸周りの回転角度を決定するシステムである(図13)。しかし、本システムではすべてのベクトルの法線がある一点で交わると仮定しているが、理論上、法線は一点では交わらない。法線が一点で交わらないので本システムにより正確な回転軸解析を行うことは理論上不可能である。その理由を以下に示す。図14Aに示すように回転軸 L の周りの回転運動を考える。 L に垂直な平面 P 上に存在する眼球上の点は平面 P に存在する円 C 上を動く。円 C は画面上では楕円 E として映る(図14B)。よって回転軸 L 周りの回転運動時、円 C 上の点の動きを表すベクトルは画面上では楕円 E の接線ベクトルとなる。この接線ベクトルに対する法線は、楕円の法線となる。楕円の法線は図14Cに示されるように、一点では交わらないため、本システムでは回転軸を求めることができないのである。眼球運動画像前後2枚の瞳孔の平行移動、回転移動から求まる2本の直線の交点として画面上の回転軸を求めようという試みもある²⁹⁾。ある一軸回転している眼球運動を考えると、この場合、どの2枚の画像から回転軸を求めてもその回転軸は同一であり、画面上の回転軸というものが存在すれば、それはすべて同一でなければならない。しかし、一軸回転中の眼球運動画像での任意の2枚の画像における瞳孔の平行移動、回転移動から求まった2本の直線の交点はある特定の一点ではなく2枚の画像の選び方により様々となり、一軸回転であるにも関わらず回転軸が一本以上存在することにな

図13 画面上の回転軸を解析する方法

- A : 示した眼位から B に示した眼位に変化した場合を考える。A の眼球画像に設定した参照ブロック 1, 2, 3 は B に示した 1', 2', 3' に変化する。
- C : 各参照ブロックの動きを表すベクトルを示す。各ベクトルに対する法線ベクトルが交わる点が画面上の回転軸であり、回転軸が求まれば、その周りの回転角度 θ を求めることができる。(文献28より引用)

り矛盾が生じる。よってこの方法でも正確な回転軸を求めることはできない。

これらの画面上での回転軸を解析するシステムで用いられる眼球画像のパターン解析は眼球上に抽出しやすい特徴点のない被験者や白内障の手術で瞳孔が円ではない被験者においても用いることのできる素晴らしい方法である。しかし、どちらのシステムも画面上の回転軸を求めた後、それを三次元化しているが、それだけでは十分ではな

図14 参照ブロックの動きに対する法線ベクトルは一点では交わらないことの証明

- A : 回転軸 L 周りの眼球回転運動を考える。L に垂直な平面 P を考えると平面 P は眼球と円 C にて交わる。円 C 上の点は L 周りの回転において常に円 C 上に存在する。
- B : 円 C は楕円 E として画面上に映る。楕円 E 上の 3 点を考え、この 3 点を中心とする参照ブロック 1, 2, 3 を考えると参照ブロック 1, 2, 3 の動きを表すベクトルは楕円 E の接線ベクトルとなる。
- C : B に示した接線ベクトルに対する法線は一点では交わらない。三次元空間では参照ブロックの動きを表すベクトルは円の接線ベクトルであり、同一平面上に存在する接線ベクトルに対する、この同一平面内での法線ベクトルは一点で交わり、その点は回転軸上に存在する。2 つ以上の参照ブロックを任意に決めた場合、それらの参照ブロックの三次元空間での移動を表すベクトルは必ずしも同一平面には存在していない。図13に示す方法では各参照ブロックの三次元空間での位置を全く考慮していない。それに対し、図9-11に示す方法では図9, 10に示す方法にて三次元情報を構築し、回転軸、およびその回転軸周りの回転角度を図11に示すように三次元空間にて求めているのである。

い。以下のような解析を追加する必要があると思われる。すなわち、回転軸が眼球と交わる点は回転による移動量が 0 であるので、画面上の領域の動きを表すベクトルの方向、および大きさの分布からベクトルの大きさが 0 となるポイントを求め、そのポイントに奥行き情報をもたせることができれば、軸解析が可能となる。

6. まとめ—VOG の今後の課題—

以上、現在存在する VOG の概略、利点、および欠点を述べた。サーチコイル法は時間的、空間的分解能にすぐれており、研究室での使用ではまだまだ主流である。しかし、コイルが高価で繊細なものであること、被験者にとって侵襲的なものであること、また磁場発生装置と頭部との相対的な位置関係を一定に保たねばならず、磁場発生装

置と頭部との相対的な位置関係を保ったまま回転刺激や直線刺激を前庭器に与えるためには装置がかなり大掛かりになってしまうことなどにより、日々の臨床検査として用いるのは難しい。例えば、サーチコイルによって良性発作性頭位めまい症における頭位変換眼振を記録する際には、ドーム状、三軸周りに回転する回転椅子が必要となってしまう³⁰⁾。それに対し、VOG ではベッドサイドで Dix-Hallpike 法³¹⁾ による記録が可能である³²⁾。よって VOG システムの更なる発展、商業化が必要である。現在、日本の薬事法で認可されており、日本で商業化されている VOG システムはモリタ製作所のニスタモ21しか存在しない。ただし、このシステムは水平成分のみの解析システムであり、三次元解析はできない。日本の薬事法で認可されている三次元 VOG は今のところ皆無である。

VOG はサーチコイル法に比べて時間的、空間的分解能に関しては劣る。しかしこれらの問題はハードの問題であるので将来的には必ず解決される問題であろう。しかし、虹彩紋裡パターンが存在しない場合、眼裂が極端にせまい場合、閉眼時では、今あるどの VOG を用いても三次元解析は不可能である。少しでも虹彩紋裡パターンが存在すればそれを確実に捕らえることのできる解像度の高い CCD カメラの開発が必要である。また、眼球上の虹彩紋裡パターンの三次元空間における動きを捉えるため、CCD カメラを2台以上用いたシステムの開発なども望まれる。

本稿を終えるにあたり、貴重な助言をいただきました徳島大学医学部耳鼻咽喉科学教室 武田憲昭教授に深謝致します。

文 献

- 1) Donders FC: Beitrag zur Lehre von den Bewegungen des menschlichen Auges. Holländische Beiträge zu den anatomischen und physiologischen Wissenschaften 1: 105-145, 1848
- 2) Fick A: Die Bewegungen des menschlichen Augapfels. Zeitschrift für rationelle Medicin 4: 101-128, 1854
- 3) Helmholtz H: Handbuch der Physiologischen Optik. Voss, Leipzig, 1867
- 4) Ruete CG Th: Lehrbuch der Ophthalmologie für Aerzte und Studierende. Braunschweig: Vieweg, 2 vols, 1855
- 5) Haslwanter T: Mathematics of three-dimensional eye rotations. Vision Res 35: 1727-1739, 1995
- 6) 鈴木康夫: なぜ今 Listing の法則なのか? . Equilibrium Res 56: 401-412, 1997
- 7) Imai T, Takada N, Morita M, et al: Rotation vector analysis of eye movement in three dimensions with an infrared CCD camera. Acta Otolaryngol (Stockh) 119: 24-28, 1999
- 8) Robinson DA: A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field. IEEE Trans Biomed Eng 110: 137-145, 1963
- 9) Collewijn H, van der Mark F, Jansen TC: Precise recording of human eye movements. Vision Res 15: 447-450, 1975
- 10) Nakayama K: Photographic determination of the rotational state of the eye using matrices. Am J Optom Physiol Opt 51: 736-742, 1974
- 11) Tweed D, Vilis T: Implications of rotational kinematics for the oculomotor system in three dimensions. J Neurophysiol 58: 832-849, 1987
- 12) Schnabolk C, Raphan T: Modeling three dimensional velocity-to(position)position transformation in oculomotor control. J Neurophysiol 71: 623-638, 1994
- 13) Raphan T: Modeling control of eye orientation in three dimensions. I. Role of muscle pulleys in determining saccadic trajectory. J Neurophysiol 79: 2653-2667, 1998
- 14) Hausteine W: Considerations on Listing's Law and the primary position by means of a matrix description of eye position control. Biol Cybern 60: 411-420, 1989
- 15) Brand L: Chap. 10. Vector and Tensor Analysis. Wiley, New York, 1984
- 16) Altmann SL: Rotations, Quaternions and Double Groups. Oxford, Clarendon Press, 1986
- 17) Westheimer G: Kinematics of the eye. J

- Opt Soc Am 47: 967-974, 1957
- 18) Hepp K, Henn V, Villis T, et al: Brainstem regions related to saccade generation. In *The neurobiology of saccadic eye movements*. pp 106-112, Amsterdam, Elsevier, 1989
 - 19) Tweed D, Vilis T: Geometric relation of eye position and velocity vectors during saccades. *Vision Res* 30: 111-127, 1990
 - 20) Tweed D, Cadera W, Vilis T: Computing three-dimensional eye position quaternions and eye velocity from search coils signals. *Vision Res* 30: 97-110, 1990
 - 21) 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
 - 22) Zhu D, Moore S, Raphan T: Robust pupil center detection using a curvature algorithm. *Comput Methods Programs Biomed* 59: 145-157, 1999
 - 23) Hatamian M, Anderson DJ: Design considerations for a real-time ocular counterroll instrument. *IEEE Trans Biomed Eng* 30: 278-288, 1983
 - 24) Vieville T, Masse D: Ocular counter-rolling during active head tilting in humans. *Acta Otolaryngol (Stockh)* 103: 280-290, 1987
 - 25) Clarke AH, Teiwes W, Scherer H: Video-oculography-An alternative method for measurement of three-dimensional eye movements. In eds Schmid R, Zambareieri D. *Oculomotor control and cognitive processes*. pp 431-443, Elsevier, Amsterdam, 1991
 - 26) Moore ST, Curthoys IS, McCoy SG: VTM-An image-processing system for measuring ocular torsion. *Comput Methods Programs Biomed* 35: 219-230, 1991
 - 27) Moore ST, Haslwanter T, Curthoys IS, et al: A geometric basis for measurement of three-dimensional eye position using image processing. *Vision Res* 36: 445-459, 1996
 - 28) 衛藤憲人, 國弘幸伸, 倉島一浩, 他: 赤外線 CCD カメラを用いた眼球運動の定量的解析—その解析アルゴリズム—. *Equilibrium Res* 57: 510-514, 1998
 - 29) 池田卓生, 橋本 誠, 堀池 修, 他: NIH Image を用いた簡易眼球運動画像解析法—三次元解析と回転軸解析について—. *Equilibrium Res* 61: 90-96, 2002
 - 30) Fetter M, Sievering F: Three-dimensional eye movement analysis in benign paroxysmal positioning vertigo and nystagmus. *Acta Otolaryngol (Stockh)* 115: 353-357, 1995
 - 31) Dix MR, Hallpike CS: Pathology, symptomatology and diagnosis of certain disorders of the vestibular system. *Proc R Soc Med* 45: 341-354, 1952
 - 32) Imai T, Takeda N, Uno A, et al: Three-dimensional eye rotation axis analysis of benign paroxysmal positioning nystagmus. *ORL* 64: 417-423, 2002

(原稿到着: 平成14年 9 月 4 日
 別刷請求先: 今井貴夫
 〒660-8511 兵庫県尼崎市稲葉荘3-1-69
 関西労災病院耳鼻咽喉科
 E-mail: imaitakao@hotmail.com)