原 著

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—

衛藤 憲人¹⁾・國弘 幸伸¹⁾・倉島 一浩²⁾・神崎 仁²⁾

A New Algorithm for Quantitative Analysis of Eye Movements Recorded with an Infrared CCD Camera

Norihito Etoh¹⁾, Takanobu Kunihiro²⁾, Kazuhiro Kurashima²⁾, Jin Kanzaki²⁾

¹⁾ *Graduate School of Science and Technology, Keio University*

²⁾ *Department of Otolaryngology, School of Medicine Keio University*

We report a new algorithm that allows quantitative analysis of eye movements recorded with an infrared CCD camera, now widely used to examine nystagmus. With this camera, it is possible to observe minute eye movements and the recorded eye movements can also be replicated.

We first divide a segment of a film of eye movements into frames and then sub-divided the area of each frame into multiple blocks. A pattern-matching method is used to determine the direction and distance (i.e., vector) of the movement of the pixels in each block. The axis and angle of rotation of the eyeball are then calculated based on the derived vectors.

Our algorithm has several advantages. It does not assume that the eyeball rotates around the center of the pupil, but calculates the axis of rotation. Accordingly, complicated eye movements can be analyzed, e.g., those in which the axis of cyclorotation does not cross the center of the pupil. It also minimizes the effects of noise caused by the eyelids, because multiple vectors are used to determine the eye movements. Therefore, it facilitates analysis of eye movements in patients with narrow palpebral fissures. It also eliminates the effects of infrared ray reflex on the bulbar conjunctiva.

Key words: nystagmus, quantitative analysis, infrared CCD camera, pattern matching method, Listing's law

はじめに

眼振検査法としては、Frenzel 眼鏡下に直接眼振を観察する方法と、電気眼振計 (ENG) を用いて眼振を記録する方法が臨床的には広く用いら

れている。前者は簡便で、外来で手軽に行える。しかし、定量的な評価が困難である、眼振の有無やその性状の判定が検者の主観的な判断に委ねられている、固視を完全に遮断できない、等の問題点がある。一方後者には、固視を完全に遮断した条件下で眼振の記録を行える、定量的な解析が可能である、記録を保存できる、等の特長がある反

¹⁾ 慶應義塾大学大学院理工学研究科

²⁾ 慶應義塾大学医学部耳鼻咽喉科学教室

面、手技が複雑である、回旋成分の分析は行えない、眼瞼の節電成分が混入するため上下方向の眼振記録が不正確である、等の問題点がある¹⁾。

最近はこの検査法に加えて、赤外線 CCD カメラを用いた眼振検査法が普及してきている。固視を完全に遮断した条件下で微細な眼振の観察が簡便に行えるこの検査法は眼振映像の記録も可能で、Frenzel 眼鏡を用いる方法に代わって外来での標準的眼振観察法となるのではないかと予測される²⁾³⁾。

我々はこの赤外線 CCD カメラを用いて記録した映像をもとに眼振等の眼球運動を定量的に解析するアルゴリズムを考案した。今回はそのアルゴリズムの概略につき報告する。

基本原理

動画像は、直行する 2 次元の x, y 空間座標と 1 次元の時間座標 t で表現される 3 次元的な広がりをもったデータ集合を指す (図 1)。つまり動画像は静止画 (frame) の集合である。また静止画は画素の集合であるといえる。(画素とは画像を構成する最小単位である。)

モノクロ (monochrome) 画像の個々の画素は輝度 (濃淡) 情報 f のみを持つ。よって動画像 M は次式のように表現される。

$$M(t)=f(x, y, t)$$

時刻 t において座標 (x, y) に存在する画素が、微小時間 dt 経過した後、座標 $(x+dx, y+dy)$ に輝度を一定に保ったまま移動したとき、次式が成立する。

$$f(x, y, t)=f(x+dx, y+dy, t+dt)$$

図 1 動画像の構成

この関係式をもとに相関法を用いて動画像のオブティカルフロー (みかけの速度場) を決定する⁴⁾。

パターンマッチング

画素値 (輝度) が完全に保存されるならば連続する 2 フレーム中の個々の画素を 1 対 1 に対応付けることができるが、実際には画素値は変化する。そこで、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中において探索する。

5×5 に分割したそれぞれの block が、 5×5 ドット (つまり 25 画素) で構成されると仮定して説明する (図 2)。block 中の画素の移動は 1 ドット以内とする。ここで連続する 2 つの frame (frame 1, frame 2) 中の同位置にある block (pre_block, post_block) を考える。pre_block 中に任意の subblock (参照ブロック) を設定する。そして post_block 中で、この subblock と最もよく適合する領域を探索する。

例えば subblock の大きさを 3×3 ドットとすると、図 2 右下段に示したように post_block 中に 9 個の subblock (被探索ブロック) が設定できる。ここでは block 内の画素の移動は 1 ドット以内と仮定しているので、pre_block 中に設定した subblock と同じ画素の集合は、post_block 中に設定した 9 個の subblock のいずれかの位置に移動しているはずである (subblock の 4 辺と

図 2 解析アルゴリズム

block の 4 辺（例えば subblock の上辺と block の上辺）との間には少なくともこの移動距離よりも大きな間隔を持たせる必要がある。）

この 9 個の被探索ブロックを行列で表現すると、

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}$$

（個々の被探索領域を B とし、 m 行 n 列にある被探索領域を B_{mn} と表す。）

となる。先程設定した subblock を A とし、この subblock A と post_block 中に設定した 9 個の被探索ブロック B_{mn} との差をそれぞれ求めていく（図 2 右下段）。この差を R_{mn} とすると、

$$R_{mn} = A - B_{mn}$$

となる。図 2 の列では 3 行 3 列、つまり 9 個の被探索領域があるので 9 個の R が得られる。これを行列表示すると

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-B_{11} & A-B_{12} & A-B_{13} \\ A-B_{21} & A-B_{22} & A-B_{23} \\ A-B_{31} & A-B_{32} & A-B_{33} \end{bmatrix}$$

となる。この行列中の 9 個の差 $R(R_{11} \sim R_{33})$ の大きさをそれぞれ求め、これを $s(s_{11} \sim s_{33})$ とおく。これを行列で表すと、

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix}$$

となる。

この行列の要素のなかで最も小さい値を有する s （理想的には 0 を持つ）の位置が画素集合（pre_block 中に設定した subblock A ）の移動後の位置である。この例では subblock A を block の中央に設定したため、 s_{22} の位置が subblock A の位置となる。よってこの行列の中で最も小さい要素と s_{22} の相対的位置関係から画素の移動距離および移動方向、つまりベクトルが決定できる。例えば s_{23} が行列中最小であれば s_{22} から s_{23} 方向、つまり向かって右方向に 1 ドット画素が移動したことになる。また s_{22} の値が最小であれば画素の移動がなかったとみなす。このようにして 1

frame 中のひとつの block の画素のベクトルが決定できる。ここでは 5×5 つまり 25 の block を想定している。したがって 25 個のベクトルが得られる。これらの複数のベクトルから、眼球運動を決定する。

眼球の回転軸

眼球運動は、あるひとつの軸を中心とする、眼球の回転運動であるといえる。例えば左右方向の眼球運動は Z 軸を、上下方向の眼球運動は X 軸を中心軸とする眼球の回転運動である。前庭からの入力がないければ全ての眼球の回転軸は Listing 平面上に存在する（図 3 上段）²⁾⁵⁾。しかしサル半規管刺激実験では、あるひとつの半規管を電気刺激すると刺激された半規管に平行な平面に垂直な軸を中心とする眼球運動が生じることが分かっている⁶⁾。このときの回転軸は刺激された半規管の存在する平面に垂直な軸を通り、Listing 平面上には存在しない（図 3 下段）。これらの眼球運動を赤外線 CCD カメラで記録すると、3 次元眼球運動が 2 次元平面に投影されるため、Listing 平面上に回転軸が存在する眼球運動は見かけ上、

図 3 Listing 平面と回転軸

直線運動（図4 上段）を、Listing 平面上に回転軸が存在しない眼球運動は見かけ上、回旋中心点（ O' ）を中心とする回旋運動（図4 下段）を行う。全ての眼球運動を正確に解析するためには、眼球の回転軸を決定する必要がある。

さて一般に Listing 平面上に回転軸の存在する眼球運動（つまり直線運動）を平面に投影すると、個々のベクトルの法線は眼球の回転軸と平行になる。（例えば水平運動であれば、Z 軸とそれら個々のベクトルの法線は平行となる。）回転軸と個々のベクトルから眼球の回転角度を計算する。

一方 Listing 平面上に回転軸のない眼球運動（つまり上述した回旋運動）においては、全てのベクトルの法線は回旋中心点（ O' ）で交わる（図4 下段）。この回旋中心点（ O' ）を中心とする回旋角度がすなわち眼球回転角度（ θ ）である（図3 下段）。この回旋中心点（ O' ）は、個々のベクトルの法線を求め、それぞれの交点を計算することにより定めることができる。また、求めた回旋中心点（ O' ）と個々のベクトルから回旋角度（ θ ）

図4 眼球の平行・回旋運動

を計算することができる（図4 下段）。

マスキング処理

このアルゴリズムはパターンマッチングの手法を用いている。したがって実際の眼球運動の解析を行うにあたっては、パターンがほとんど存在しない瞳孔や眼球結膜において解析エラーが生じる。また赤外線光の反射も解析エラーの原因となる。そこでこれらの解析エラーの原因をマスキング処理によって最小限に押さえる。

まず瞳孔重心（P）を求め、瞳孔重心から虹彩紋理外縁までの距離を半径（d）とする円を設定する（図5 上段）。この円外の領域をマスキング処理し、また同時に二値化処理によって瞳孔部分のマスキング処理を行う（図5 下段）。これらの処理によって眼球結膜および眼瞼を取り除くとと

図5 マスキング処理

もに、瞳孔部分における赤外線光の反射を除去し、虹彩紋理を抽出することができる。

ただ、このような処理を行っても、眼裂が狭い場合には抽出した虹彩紋理領域に眼瞼の一部が含まれることがある。また赤外線光の虹彩紋理での反射も除去できない。しかし眼球を剛体とみなすと個々のベクトルは互いに拘束し合うため、統計的処理によって解析エラーをキャンセルすることができる。(眼球の直線運動では全てのベクトルの移動方向および移動距離は等しく、また回旋性眼球運動は回旋中心点をはさんで対称な位置に存在するベクトルの大きさは等しく、向きは逆になる(図4)。これらの条件を満たさないベクトルはノイズとみなしキャンセルする。)

以上の解析アルゴリズムを用いて眼球運動を決定する。

考 察

今回我々が考案したアルゴリズムは虹彩紋理上の特徴点を利用せずパターンを追跡を行っているため、特徴点の少ない眼振記録画像も解析できるという特長がある。従来の赤外線 CCD カメラを用いた眼球運動解析システム²⁾⁷⁾では虹彩紋理上の一点を特徴点として設定し、その特徴点と瞳孔重心の移動方向及び移動距離を測定することにより解析を行っている。しかしこのアルゴリズムを用いた場合には、虹彩紋理の少ない被験者では特徴点を設定しづらく、また眼裂の狭い被験者では特徴点が眼瞼に隠れてしまいエラーが生じるという問題点がある。更に、遮眼すると瞳孔が拡大する。これより特徴点となる虹彩紋理の面積が小さくなり、特徴点の確保が一層困難になる。縮瞳薬を用いて虹彩紋理を広げる方法はあるが、安全性や検査時間の観点から好ましくない。我々の用いたアルゴリズムではこれらの解析エラーは生じにくい。

また従来のアルゴリズムでは、瞳孔重心 (P) と眼球の回旋中心点 (O') とが一致すると仮定して解析を行っている(図3)²⁾⁷⁾。しかし上述のごとく、回旋中心点 (O') は必ずしも瞳孔重心 (P) と一致しない。我々のアルゴリズムでは、瞳孔重心を回旋中心点と仮定しておらず、様々な眼球運動の正確な解析が可能である。

この解析アルゴリズムの問題点としては、従来のアルゴリズムと同様に眼球を平面として取り扱

っている点が挙げられる。解析精度を上げるためには、画像の三次元補正を行う必要がある。この補正を行うためのプログラムは既に完成している。現在このプログラムの検証中である。

またアルゴリズムとは直接の関係はないが、我々の解析システムの動画像取り込み速度はまだ遅い。現時点における速度は 30 frames/s である。緩徐相の解析ではこの程度の取り込み速度でも十分であるが、急速相の解析には 100 frames/s 以上の取り込み速度が必要である。

今後はハード面の改良を行っていくとともに、種々の疾患における異常眼球運動を本アルゴリズムを用いて解析し、その解析結果を逐次報告していく予定である。

本稿を終えるにあたり、貴重な助言を頂きました慶應義塾大学理工学部物理情報工学科 富田豊教授、本多 敏教授に深謝致します。

本論文の要旨は、第55回、第56回日本平衡神経科学会総会学術講演会にて口演した。

文 献

- 1) 時田 喬, 戸川達男, 小松崎篤, 他: 平衡機能検査の実際. 日本平衡神経科学会編. 150-152頁, 303-324頁, 南山堂, 東京, 1994
- 2) 八木聰明: 眼球運動の3次元解析からみた平衡機能とその異常. 5-6頁, 25-38頁, 医学書院, 東京, 1997
- 3) 加我君孝: めまいの構造. 28-31頁, 金原出版, 東京, 1993
- 4) 三池秀敏, 古賀和利編著: パソコンによる動画像処理. 森北出版, 東京, 1993
- 5) 鈴木康夫: なぜ今 Listing の法則なのか? . Equilibrium Res 56: 401-412, 1997
- 6) Cohen B, Suzuki J, Shanzer S, et al: Semicircular canal control of eye movement. In ed Bender MB. The Oculomotor System, pp 163-172, Harper & Row Publishers Inc, New York, 1964
- 7) 石川忠夫, 小林直樹, 保坂栄弘, 他: 新しいめまい検査システムの開発. 医用電子と生体工学 33: 192-202, 1995

原稿到着: 平成10年3月25日
別刷請求先: 衛藤憲人
〒160-8582 東京都新宿区信濃町35
慶應義塾大学医学部耳鼻咽喉科学教室
E-mail: norihito@thx.appi.keio.ac.jp