

ビデオ画像解析法を用いた眼振の定量的評価

早川 祐貴¹⁾, 鵜飼 一彦²⁾, 高木 峰夫¹⁾⁴⁾, 白鳥 敦¹⁾, 石川 則夫³⁾
長谷部 日¹⁾, 高田 律子¹⁾, 臼井 知聡¹⁾, 長谷川 茂¹⁾, 阿部 春樹¹⁾

¹⁾新潟大学医学部眼科学教室, ²⁾日本福祉大学情報社会科学部

³⁾日本光電工業, ⁴⁾科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業

要 約

目 的: 近年開発されたビデオ画像解析法の眼振の測定, 解析への応用を試みた。

方 法: ヘッドマウント式に固定された charge coupled device (CCD) カメラで眼球を撮影してデジタルビデオに記録し, 記録画像を二値化して瞳孔縁を検出し, その重心を求めることで水平・垂直眼位を算出した。回旋角は瞳孔縁付近の虹彩紋理全周の濃淡を検出し評価した。

結 果: 記録したビデオ画像から画像処理が容易に行え, 数値的に眼振のパラメータ (振幅, 周期など) が正確に算出できた。その例として, jerky type の先天眼振では foveation period が容易に算出され, 上斜筋ミオキミア

と考えられる異常回旋運動では内旋発作期と非発作期の規則正しい周期性が明らかになった。らせん状眼振では回旋を伴わず, 周囲回転運動の特異な周期性が明らかになった。

結 論: 本法を用いることで, 眼振の波形や回旋運動量の詳細のみならず, 視診では気付かれない疾患固有の運動リズムが明らかになるなど, 眼振の定量的評価に有用であった。(日眼会誌 104: 424—430, 2000)

キーワード: ビデオ画像解析法, 眼振, 回旋運動

Quantitative Evaluation of Nystagmus by an Image-analysis System

Yuuki Hayakawa¹⁾, Kazuhiko Ukai²⁾, Mineo Takagi¹⁾⁴⁾, Atsushi Shiratori¹⁾, Norio Ishikawa³⁾
Hiruma Hasebe¹⁾, Ritsuko Takada¹⁾, Tomoaki Usui¹⁾, Shigeru Hasegawa¹⁾ and Haruki Abe¹⁾

¹⁾Department of Ophthalmology, Niigata University School of Medicine

²⁾Faculty of Social and Information Sciences, Nihon Fukushi University

³⁾Nihon Kohden Corporation

⁴⁾CREST, JST (Japan Science and Technology)

Abstract

Purpose: We attempted to apply a newly developed image-analysis system for measurement and analysis of nystagmus.

Method: Eye movements were recorded by digital video through a head-mounted charge coupled device (CCD) camera. The recorded movie was converted into black and white in order to detect the area of the pupil. Horizontal and vertical eye positions were determined by calculating the centroid of the pupil. Torsional angle was calculated using the iris striate pattern around the pupillary margin.

Results: The parameters (amplitude, cycle, etc.) of nystagmus were calculated easily by the new image-analysis system from the recorded images. As examples, the foveation period was measured accurately in a case of jerky-type congenital nystagmus.

Very regular cycles of intorsional attack period were revealed in a case of superior oblique myokymia. A case of cork-screw-like nystagmus showed a characteristic combination of large and small cycles unassociated with torsion.

Conclusion: This image-analysis system was useful for quantitative analysis of nystagmus, and especially for measurement of torsion. Detailed waveforms and specific rhythms of nystagmus, which could not be recognized by observation, were demonstrated by this system. (J Jpn Ophthalmol Soc 104: 424—430, 2000)

Key words: Image-analysis system, Nystagmus, Torsional movement

別刷請求先: 951-8510 新潟市旭町通1-757 新潟大学医学部眼科学教室 早川 祐貴

(平成11年9月13日受付, 平成11年12月16日改訂受理)

Reprint requests to: Yuuki Hayakawa, M.D. Department of Ophthalmology, Niigata University School of Medicine, 1-757 Asahimachidori, Niigata 951-8510, Japan

(Received September 13, 1999 and accepted in revised form December 16, 1999)

I 緒 言

眼振とは、持続的な規則性のある律動性の眼球の往復運動である。眼振を定量的に測定解析することは眼振の性質を把握し、他覚的に評価するうえで重要であり、その方法として、これまでに electro-oculogram (EOG)、光電素子法(赤外線反射法)、サーチコイル法、ビデオ画像処理法¹⁾などが用いられてきた。今回、我々は近年開発された画像処理法の一つで、全周の虹彩紋理をパターンとして相関解析するビデオ画像解析法²⁾により、回旋成分を含めて眼振の解析を試み、興味深い知見を得ることができたのでここに報告する。

II 方 法

ヘッドマウント式に固定された 2 個の赤外線 charge coupled device (CCD) カメラ (41 万画素、最低被写体 1.8 lux, エルモ社製) を使用し、30 Hz で撮影された高解像度の両眼の眼球運動画像を同時にデジタルビデオに記録した³⁾。測定装置には赤外線 light emitting diode (LED) も内蔵され、その照明は眼振の急速相の被写体ぶれを最小限にするためパルス照明とし、同時に CCD カメラの電子シャッターを同期させて設定した。片眼につき赤外線 LED 3 個を対向配置にして照明を一樣にし、フレームごとの輝度変化を最小にした³⁾。デジタルビデオに記録された眼球運動画像から、画像取り込みボード (Radius Moto DV) を利用して画像を連続的に取り込んだ。画像解析にはパーソナルコンピュータ (Apple Power Macintosh G 3) と画像処理ソフトである Wayne Rasband NIH Image (ver 1.6) を使用した。記録画像の各フレームは 640×480 ピクセルの画像であり、各フレームを二値化して瞳孔縁を検出し、その瞳孔重心座標を求めることで水平・垂直眼位を算出した (図 1 A)。眼球回旋角は瞳孔縁付近 (瞳孔重心から一定距離の円周上) の全周の虹彩紋理の濃淡の濃度データを 1,800 点サンプルして計測し、全周極相関法で、0.2° の分解能で回旋角を計算した²⁾ (図 1 B)。この方法により、眼球的水平位置、垂直位置、回旋位、瞳孔径の 4 つのデータを得ることができた。なお、瞳孔径が変化しても計算結果は影響を受けないことを確認した (これらの方法については Ukai²⁾ による報告を参照されたい)。眼位の較正は中心と左右 10° を固視させることで行った。速度は眼位を微分することで算出した。回旋角に関してはデータ処理の性質上絶対値で角度が算定できた。なお、後述の症例 3 のように強い眼振では、ある角度を固視させる方法で較正を行うことは不可能である。角膜上で瞳孔が 1 mm 動いた時の角度 θ (°) は、回旋中心から瞳孔までの距離が 10 mm と仮定すると、 $\tan \theta = 1/10$ と表せ、 $\theta = 5.7^\circ$ 動いたことになる。角膜径を 12 mm と仮定することにより、画像の上から大体の水平・垂直較正を求めた。

本法による眼振解析の一般的なパラメータとして周期と振幅を求めた。また、回旋成分についても同時に検討した。特に jerky type の先天性眼振に関しては、速度が 1 deg/s を初めて超えた時点を眼振の開始点と定義し、眼振の速度が 1 deg/s を下回っている間を foveation period、再び 1 deg/s を越えるまでの時間を周期と定義して検討した。

III 結 果

測定装置の装着が短時間に容易に行え、患者が幼少でも測定できた。また、測定装置は患者に対して非侵襲的で、疲労を招かずに長時間測定することが可能であった。今回記録した眼振の画像に関しては、画像処理が容易にコンピュータ上で行え、得られたデータは画像のプレイバックと照らし合わせて矛盾のないものであった。角度の較正は、固視が良ければ容易であり、固視不良の例でも上述の方法で近似的な較正が可能であった。Jerky type の先天性眼振については、foveation period が上述の速度波形を利用した方法で容易に計算でき、その 1 例を下記に示す。また、本測定法は回旋を容易に算出でき、垂直成分の歪みがないことから回転運動の評価にも優れていた。回転はないが回旋のある例、回旋はないが回転のある例を下記に呈示し、本法により垂直・回旋運動を同時に正確に計測する利点を示す。これらの症例はいずれも眼振の手術の術前検査として行われたものであり、定量的な計測を行うことがいずれも手術効果の確認に有用であった。

症例 1: 38 歳、男性。

主 訴：視力不良。

現病歴：10 歳時に視力低下を主訴に新潟大学病院眼科を受診し、両眼先天性眼振と診断された。25 歳時に右内直筋後転術＋左外直筋後転術を受けた。第一眼位でも眼振が著明に残存したため、さらに追加手術を希望し、38 歳時に当科受診となった。

所 見：初診時視力は右眼 0.3 (0.6×−7.5 D ⊂ cyl−4.0 DA 10°)、左眼 0.15 (0.5×−4.5 D ⊂ cyl−4.75 DA 170°)。眼位は正位、眼球運動に制限はなかった。眼振は全 9 方向であり、側方視で減弱した。複視の自覚はなかった。Titmus stereo test や Lang stereo test は正常で、近見立体視に異常はなかった。眼振の記録を図 2 に示す。測定データの結果から眼振は周期 0.65 ± 0.09 (平均値 ± 標準偏差) s を持ち foveation period は比較的長い 0.41 ± 0.07 s で、等速で立ち上がる jerky nystagmus であることがわかった。眼振は第一眼位で最大で、側方視で性状が著明に減少した。

症例 2: 20 歳、女性。

主 訴：右眼動揺視。

現病歴：16 歳時から右眼動揺視自覚するも放置していた。20 歳時に精査加療目的に近医から当科紹介受診となった。

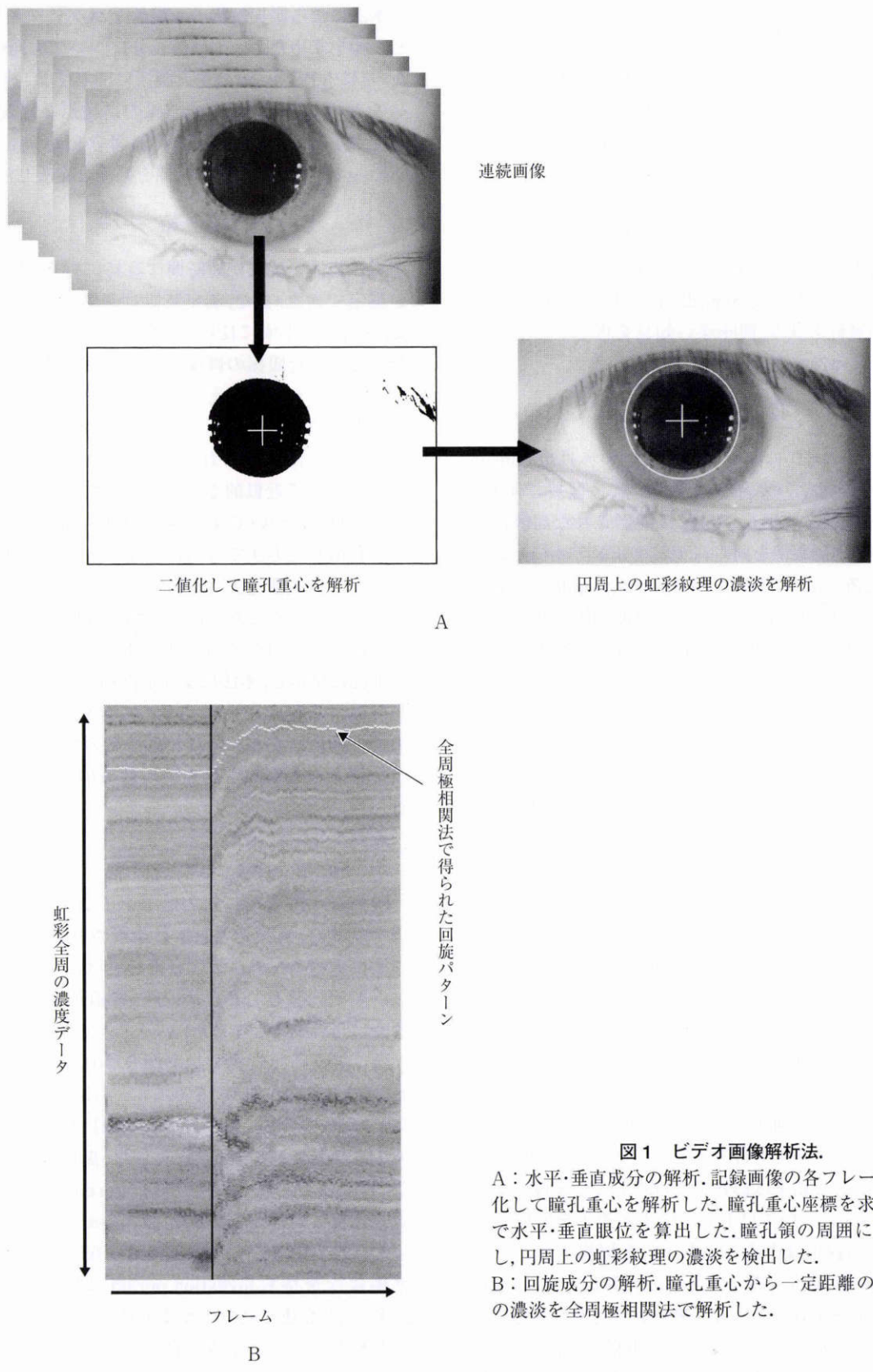


図1 ビデオ画像解析法.

A：水平・垂直成分の解析. 記録画像の各フレームを二値化して瞳孔重心を解析した. 瞳孔重心座標を求めることで水平・垂直眼位を算出した. 瞳孔領の周囲に円を想定し, 円周上の虹彩紋理の濃淡を検出した.

B：回旋成分の解析. 瞳孔重心から一定距離の虹彩紋理の濃淡を全周極相関法で解析した.

所 見：視力は右眼 1.2(矯正不能), 左眼 1.2(矯正不能). 眼位は正位, 眼球運動に制限はなかった. 右眼の不随意的内旋および上下運動を呈し, 内下転で上下運動が大きくなり, 外転位では純回旋運動を呈し, 上斜筋ミオキミアと診断された. 磁気共鳴画像 (MRI) では脳内・眼窩部に

異常はなかった. 9 回分の連続した異常運動について解析したところ, 測定データから回旋の振幅は約 $10^{\circ} \sim 11^{\circ}$ で回旋を生じる発作期 (8.0 ± 0.5 s, 平均値 $\pm$ 標準偏差) と, 回旋を生じない非発作期 (18.7 ± 3.2 s) の非常に規則正しい周期が存在することが明らかとなった (図 3). こ

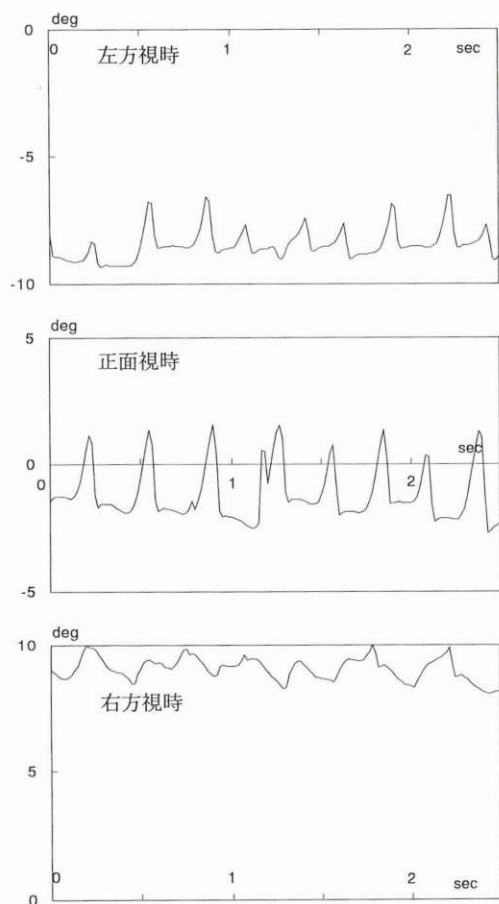


図 2 症例 1 の眼振のグラフ(左眼).

縦軸に眼振の振幅(°), 横軸に時間(s)で表す. 上段は左方視時, 中段は第一眼位, 下段は右方視時の右眼の眼振. 上向きが右方向. 眼振の振幅は第一眼位で最大で, 側方視で振幅が減少していた.

の症例についての手術治療と, その効果については別報に譲る.

症例 3: 8 歳, 男児.

主 訴: 視力不良.

現病歴: 生後 3 か月頃から両眼が著明に回転する特異な眼振があり, 生後 5 か月時に当科紹介受診. 外斜視と固視により増悪する先天性眼振があり, 以後当科外来で経過観察. 8 歳時に手術加療のため受診となった.

所 見: 視力は右眼 0.2 (0.4 × +1.0 D ⊖ cyl -1.0 DA 180°), 左眼 0.2 (0.3 p × +1.25 D ⊖ cyl -3.0 DA 180°). 眼位は約 15° の外斜視で, 眼球運動に制限はなく, 軽度の右への斜頸があった. 記録上, 眼球は著明な回転運動を呈していたが(図 4 A 上段), 水平・垂直位に分けて表示すると, 水平・垂直の軸の位相がずれていることが判明した(周囲回転⁴⁾, 図 4 A 下段). さらに細かく時間を区切ってみると, 眼球は 4~5 回小さく回転(周期 0.24 ± 0.03 s)する間に大きく 1 回転(周期 0.87 ± 0.12 s)する特異なラセン運動をしていることがわかった(図 4 B). 大回転の振幅は, 水平方向で 7.56° ± 2.76° (平均値 ± 標準偏差), 垂直方向で 6.10° ± 2.60° であった. この場合, ラセン運動に眼球回旋は伴っていなかった.

IV 考 按

今回使用したビデオ画像解析法はヘッドマウント固定式の CCD カメラで撮影・記録するので, 簡便で眼球に非接触的に眼球運動を測定できる. また, 両眼の眼球運動の水平・垂直・回旋成分を同時測定することが可能なので, 眼振の詳細な性状を測定解析することが可能である. サンプル周波数は 30 Hz (デインターレース方式を採用すれば最大 60 Hz) と時間的分解能は粗いが, 臨床例に対して簡便に測定解析する上では十分に対応できる眼球運動測定系と考えられる. 今回開発されたビデオ画像解析法は精度も高く, 0.2° の分解能で回旋を測定することができた. 画像解析法にも眼球回旋を解析する方法には 2 種類あり, 虹彩紋理中の 1 つまたはいくつかの特徴点を描出し, その座標を追跡する方法と, ある範囲の角度の虹彩紋理をパターンとして追跡する方法とがある. この

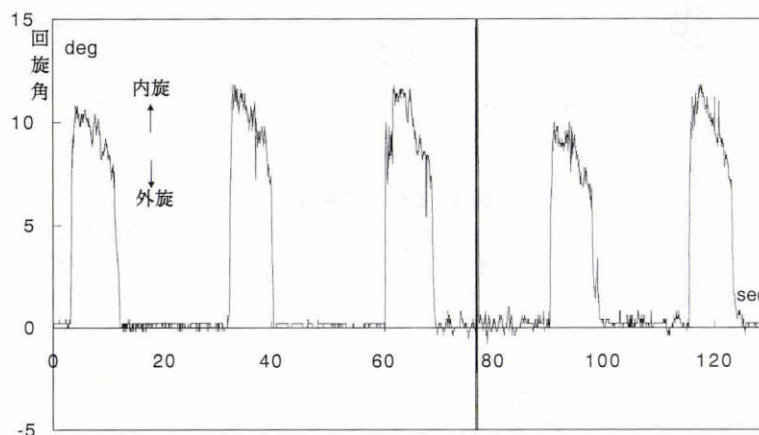


図 3 症例 2 の眼振(右眼).

縦軸は回旋の振幅(度, 上向きが内旋), 横軸は時間(s)を表す. 時間 80 s 近くの大きな noise は閉瞼による. 10° 近い内旋運動があり, 回旋が生じる発作期(8.0 ± 0.5 秒)と回旋が生じない非発作期(18.7 ± 3.2 s, 平均値 ± 標準偏差)に, 非常に規則正しいリズムが存在することがわかった.

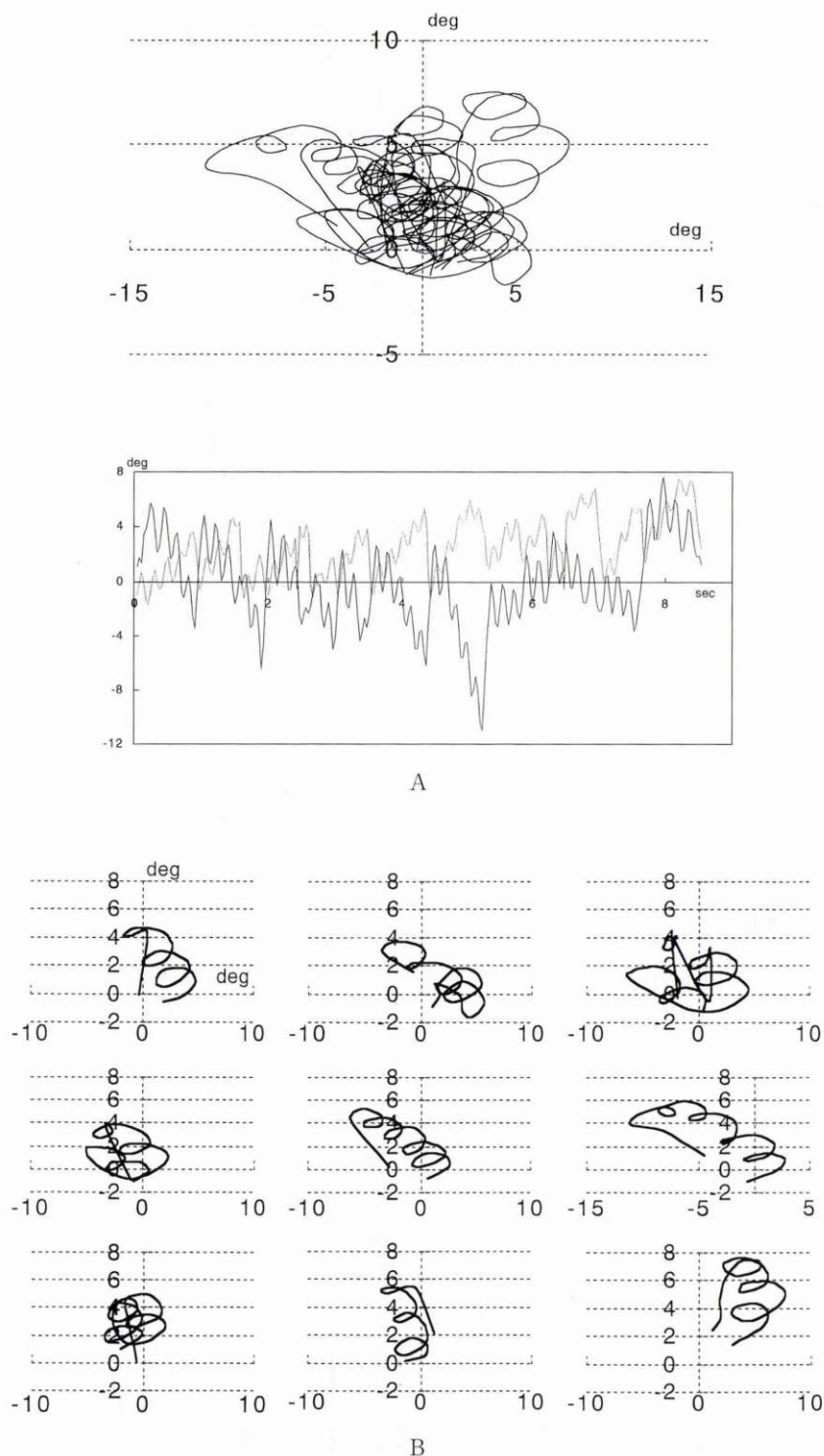


図4 症例3の眼振.

A: 上段は右眼の8.5s間の運動. 縦軸は垂直の横軸は水平の, 角度(°)を表す. 両眼著明に回転する特異ならせん運動があった. 下段はこれを水平成分と垂直成分に分けて呈示. 縦軸は振幅(°), 横軸は時間(s), 実線は水平成分, 点線は垂直成分を表す. 水平成分と垂直成分の波形が, とともに周期的に上下変動し, 各成分に位相のずれがあった.

B: 右眼の運動を各大周期毎に分けて示す. 4~5回の小さく回転(周期 0.24 ± 0.03 秒)する間に大きく1回転(周期 0.87 ± 0.12 s)する特異ならせん運動をしていることがわかった. 回旋成分は伴っていなかった.

うち, 虹彩紋理の一部のパターンしか解析しない方法では瞳孔の位置に対して誤差が生じる可能性が強かった. つまり, 瞳孔の位置を少し見誤って実際より下にあると

確認した場合, 虹彩紋理の左側のみで解析すると, 模様が瞳孔中心に対して上に上がって右回転しているようにみえてしまう. しかし, 左右両側を解析すると, 回旋では両

側で同じ効果, 見誤りでは両側で逆方向の結果で相殺され消失するため, 虹彩全周のパターンを解析すれば誤差に対して強くなる. 本法は虹彩紋理の一部ではなく全周を解析するため, 光量変化に対して瞳孔が散瞳・縮瞳しても, またサンプリングする位置が水平・垂直にずれても, 誤差が生じにくい有効な方法である. ただし, 欠点としては上眼瞼の影響を強く受け, 瞳孔縁上部の虹彩紋理に上眼瞼が下垂すると, 解析は不能になる. また, 全周の虹彩紋理を解析するので, 虹彩紋理を一部解析する方法よりは解析に時間がかかることが挙げられる.

症例 1 は先天性眼振で眼球運動の波形から等速で立ち上がる jerky type であり, foveation period が長く, これが良好な視力と関連しているものと考えられた. この症例のような臨床的に通常遭遇する水平性眼振に対して, 本法により眼振の性状の詳細が的確に捕えられた. 症例 2 では不随意に片眼が内旋する上斜筋ミオキミアで, 症例 3 の“回転”運動とは対照的に“回旋”運動を起こす疾患である. 測定解析の結果, 内旋発作期と非発作期に非常に規則正しい一定の周期があることがわかった. 症例 3 では回旋成分を伴わない特異ならせん状眼振で, 小さく 4~5 回回転する小周期と, その間に大きく 1 回回転する大周期が存在することがわかった. 本症例のらせん運動の小回転は周囲回転¹⁾といわれる回転運動であり, 水平と垂直の軸の位相が異なるため回転運動を生じており, 仮に位相が同じであれば斜め方向の眼振となる. 本例のように眼振の振幅が大きい症例では, 他の眼球運動測定方法である角度を固視させて較正する以外ないため, 較正データを測定することが困難であるが, ビデオ画像処理法では前述の方法により近似的に較正を行うことができる利点がある. 先天性眼振には Dell'Osso らの分類⁵⁾があるが, 水平だけでなく, 垂直, 回旋を加えて検討することにより, さらに的確な類型化が可能になると考えられ, 今後, 症例を蓄積して検討する予定である.

症例 2, 3 では特異な運動リズムが明らかになったが, このように周期正しいリズムをもつ疾患は, この他にも種々存在する. 周期性方向交代性眼振は, 眼振の急速相の方向が約 2 分ごとに周期的に変化する特異な眼振であり, その由来は前庭機能に求められる⁶⁾. 隔日性内斜視は, 内斜視とそうでない日が 1 日おきに交代する⁷⁾. 周期性動眼神経麻痺は, 眼瞼挙上, 内斜視, 縮瞳を伴った動眼神経の完全麻痺が 10~30 s の持続で一定の周期で起こる⁸⁾. Square wave jerks は不随意的な水平性の矩形波状の眼球偏位が記録される疾患で, 持続時間約 200 ms・頻度 9/分以上を持つ⁹⁾. 松果体から第 3 脳室にかけての中脳周辺部腫瘍の患者で発作性に輻湊痙攣が 1 分間という決まった時間の間だけ持続する症例も報告¹⁰⁾されている. 正常な“生体リズム”があるように, 疾患にもある特異なリズムが存在し得る. そして, その疾患固有のリズムを手がかりに病態を解明できる可能性がある. 視診では一見

無秩序にみえる運動にもある一定の法則があることが, このような精度の高い解析を行うことで明らかにされたことは特筆に値する.

ビデオ画像解析法と他の眼球運動測定機器とを比較すると, 水平性の眼球運動の測定だけであれば光電素子法が簡便であり, 左右 20° 以内であれば 0.1° を超える精度の良さで, サンプリング周波数が高く計測できる. しかし, 垂直運動の測定は眼瞼の動きによる影響を受けるため精度は水平より低く, 回転運動は歪んで測定される. また, 測定値の直線性の良好な装着を調整するのに時間を要し, 測定中も基線が動揺したり較正值が変化しやすい. その面でビデオ画像解析法はサンプリング周波数は低いものの, 安定した評価が可能である. 眼振が強く固視による較正が難しい症例であっても, 近似的な較正ができる点は眼振の評価法としては大きな利点である. 幼少で装置の装着が困難な症例では, 眼球電図 (EOG) の方が簡易的に測定することができるが, 精度は著しく低く, 定性的な測定が目的となる. 眼球回旋運動を同時に測定できるのは本法とサーチコイル法である. 後者は精度が非常に高く, 測定中の基線や較正值の動揺が少ない. ただし, 欠点として, コンタクトレンズを角膜に接触させるため, 小児での測定が困難であり, コンタクトレンズの装用そのものが眼振の波形を変化させる可能性がある¹¹⁾. ビデオ画像解析法は, より自然な状態で回旋を測定できる. ビデオ画像そのものも記録の価値があり, 解析結果と照らし合わせて確認できるとともに, 患者への説明にも有用である. 以上を総合すると, ビデオ画像解析法の解析は, 眼振の測定法としては最も優れた方法と思えるが, 解析に時間を要する欠点があるため, 現時点ではルーチン検査ではなく, 手術の術前術後の比較など, 特に数値的な解析を要する症例に絞って測定するのが望ましい. 今後は時間的分解能向上による眼振急速相の高精度測定, 解析時間の短縮などが改善されていくものと考えられる. 他の眼球運動測定系が, ほぼ完成されたシステムであるのに対して, ビデオ画像解析法は, ビデオカメラやパーソナルコンピュータの性能向上により大きく発展する余地が十分に残されている. 今後の解析システムのさらなる進歩が待たれる.

本研究は, 日本自転車振興会の機械工業振興資金を受け, (財)機械システム振興協会, (社)日本電子機械工業会が実施した三次元映像に関するプロジェクトの一部として行われた. ここに謝意を表する.

文 献

- 1) 藤原由延: ビデオ画像解析による動的反対回旋の研究 第 1 報: 正常者について. 日眼会誌 92:565—572, 1987.
- 2) Ukai K, Saida S, Ishikawa N: Measuring torsional eye movement of head mounted display users. Jpn

- J Ophthalmol, in press.
- 3) 石川則夫, 小林直樹, 保坂栄弘, 森園徹志, 山野辺滋晴, 八木聡明, 他: 新しいめまい検査システムの開発—虹彩紋理追跡法を用いた眼振3成分解析法—. 日本ME学会雑誌 33:192—202, 1995.
 - 4) Taylor D: Nystagmus and eye movements disorders. Paediatric Ophthalmology (2nd ed), Blackwell Science, Malden, 869—896, 1997.
 - 5) Dell'Osso LF, Daroff RB: Congenital nystagmus waveforms and foveation strategy. Doc Ophthalmol 39:152—182, 1975.
 - 6) Furman JM, Wall C 3d, Pang DL: Vestibular function in periodic alternating nystagmus. Brain 113:1425—1439, 1990.
 - 7) von Noorden GK: Esodeviations. Binocular vision and ocular motility (5th edition), Mosby, St Louis, 299—340, 1996.
 - 8) Lowenfeld IE, Thompson HS: Oculomotor paresis with cyclic spasms. A critical review of the literature and a new case. Surv Ophthalmol 20:81—124, 1975.
 - 9) Herishanu YO, Sharpe JA: Normal square wave jerks. Invest Ophthalmol Vis Sci 20:268—272, 1981.
 - 10) 高木峰夫, 吉田武子, 臼井知聡, 阿部春樹, 鷺山和雄, 田中隆一: 特異な輻輳痙攣を示す中脳周辺腫瘍の1例. 神眼5増補: 53, 1988.
 - 11) Grosvenor T: Contact Lens Theory and Practice. Profession Press, Chicago, 340—341, 1963.
-