総 説

日耳鼻 124: 1135-1138, 2021

「第121回日本耳鼻咽喉科学会総会シンポジウム」

リアルタイム三次元解析可能な Videooculography

橋本 誠^{*,**}沖中 洋介^{*}菅原 一真^{*}池田 卓生^{***}山下 裕司^{*}

*山口大学大学院医学系研究科
耳鼻咽喉科学

**山口大学医学部附属病院
高次統合感覚器医療センター

***鼓ヶ浦こども医療福祉センター
耳鼻咽喉科

近年、画像認識技術やハードウェアの進歩に伴い、赤外線 CCD/CMOS カメラによって得られた眼球運動の画像をコンピュータで画像解析をするビデオ眼振検査 (videooculography: VOG) が普及してきた。VOG における画像解析の原理は、眼球運動の水平・垂直成分は画像を二値化して瞳孔を抽出し、瞳孔中心座標から求め、回旋成分は虹彩の輝度のコントラストプロファイルから求める方法が主流である。われわれは、眼球認識の自動化や処理速度の向上などプログラムを進化させ、検査中のリアルタイム三次元眼振図表示を可能にした製品を開発した。医療機器として研究用途のみではなく、臨床用途にも使用しやすくなった。

リアルタイム VOG では、検者自身が眼球運動動画と眼振図の両者を確認しながら検査を行うことができるため、検査中に手応えを持って所見を把握することができる。眼振の回旋成分について、慣れないと方向を判定しにくいことがあるが、眼振波形を確認することで回旋の方向を正確に把握しやすい。数秒前にどんな眼振だったか、動画の観察のみではあいまいになることがあるが、眼振図により眼振の強さの変化や方向の変化などを確認することができる。

そのほか、コンピュータ解析の特性を生かし、定量的評価として眼振緩徐相速度の計測や、頻度、振幅を計測し、眼振の特徴を数値化することができる。検査中には判断が困難な場合でも、あとで見直す際、動画と眼振図の両者を確認して評価することができる。赤外線フレンツェルに加速度センサー・角速度センサーを備えることにより、頭位を感知し眼球動画と同期して記録することができる。出現した眼振の頭位や潜時を正確に確認することができる。

キーワード: 眼振図, リアルタイム三次元解析, ファイリングシステム, 頭位センサー, 高速度カメラ

はじめに

眼振・眼球運動の評価方法として、肉眼で観察する以外には、フレンツェル眼鏡での観察、電気眼振図検査 (ENG) による記録、赤外線 CCD/CMOS カメラによる観察がある。ENG は客観性・定量性という点で非常に優れている¹⁾ が、眼振の回旋成分を記録することができない。一方、赤外線 CCD による観察は、眼振の回旋成分の定性的評価において優れている。しかし、客観性・定量性という面では、動画ビデオを録画して記録する²⁾ のみで、眼振図作成や定量的評価はできない。

近年、画像認識技術やハードウェアの進歩に伴い、赤外線 CCD/CMOS カメラによって得られた眼球運動の

画像をコンピュータで画像解析をするビデオ眼振検査 (videooculography: VOG) が普及してきた³⁾⁴⁾。VOG はテクノロジーの進歩により、検査中にリアルタイムで三次元解析することが可能になった⁵⁾。また単に眼振図を作成するのみではなく、定量的評価、ファイリング機能との連携、高速度記録、vHIT(video head impulse test) への応用など、VOG のもつ付加価値や発展性が向上してきた⁶⁾。本稿では、リアルタイム VOG、そのほか VOG の付加価値や発展性について解説する。

VOG

VOG は、1990年頃から行われはじめた。VOG におけ

図1 VOGとENGの検査風景

VOGでは、医師等検者自身が眼球運動動画と眼振図の両方を確認しながら検査を行うことができる。

る画像解析の原理は、眼球運動の水平・垂直成分は画像を二値化して瞳孔を抽出し、瞳孔中心座標から求め、回旋成分は虹彩の輝度のコントラストプロファイルから求める方法が主流である⁷⁾。われわれも同様の原理で、眼球運動の二次元・三次元解析について、日常診療で簡便に利用するため、無償で入手可能な画像解析ソフトウェアを用いたVOGを考案し、報告してきた⁸⁾⁹⁾。しかし二値化のレベル設定は手動で行うなど煩雑な操作の必要や処理速度の問題があった。そこで、眼球認識の自動化や処理速度の向上などプログラムを進化させ、検査中のリアルタイム三次元眼振図表示を可能にした製品を開発した⁵⁾。医療機器として研究用途のみではなく、臨床用途にも使用しやすくなった。

リアルタイムVOGの利点

リアルタイムVOGの利点は、眼球動画と眼振図を同時に見ることができることである。リアルタイムに三次元眼振図を表示するシステムでは、検査をしている最中に、眼球の動画に同期して、水平、垂直に加え、回旋成分の眼振図がリアルタイムで表示される。

ENGでは、医師等の検者は被検者（患者）の横でフレンツェルあるいは赤外線フレンツェルの所見を観察し、検査技師など検者と別人がENG機器の操作をすることが多い。そのため検者自身が検査の最中にENG眼振図を同時に確認することは困難である。VOGでは、検者自身が眼球運動動画と眼振図を確認しながら検査を行うことができるため、検者が把握する情報が増え、手応えを持って検査を進行することができる（図1）。

数秒前にどんな眼振だったか、動画観察の記憶のみで

図2 VOGでの温度刺激検査

左上が動画画面、左下に眼球角度や速度などの数値データを示す。右はVOGによる眼振図、上段に水平成分の眼球角度、下段に水平成分の眼球速度を示す。

はあいまいになることがあるが、検査中のリアルタイム眼振図表示では、眼振図により眼振の強さの変化や方向の変化などを実際に見て確認することができる。動画の観察のみでは分からない情報に、VOGでの眼振図を見ることにより気づくことがある。

定量的評価

VOGは眼球の座標を数値化しているものであり、アナログのENGと比べて定量的評価に取り組みやすい。

温度刺激検査をVOGで行うと、最大緩徐相速度や平均緩徐相の算出、visual suppression (%)の計算などを、ENGより容易に行うことができる。われわれが開発したシステムで、温度刺激検査を行ったものを示す（図2）。水平成分の眼球運動波形と速度波形である。速度波形では、緩徐相速度が上昇して、固視抑制し、低下しているのを確認することができる。速度波形からも、緩徐相速度やvisual suppressionを把握することができる。

日々の診療で見られる眼振所見についても、VOGで定量的評価をすることにより、眼振の振幅や頻度、緩徐相速度を数値化することができ、検者の主観によらない客観的な所見として、記録することができる。

視刺激検査

赤外線 CCD カメラは通常暗所下で使用するが、反射ミラー式によるゴーグルとカメラを用いると、暗所のみではなく前方視での記録が可能となり、注視眼振や、visual suppression 検査、視刺激検査をVOGで行うこと

ができる。脊髄小脳変性症症例の追跡眼球運動検査 (eye tracking test: ETT) において ENG と VOG の同時記録を行ったところ、ENG で記録された saccadic な追跡所見と同様な所見を、VOG においても記録することができた。われわれは、このような saccadic pattern の ETT 異常例について定量的解析を行い、saccade の個数や、視標と眼球運動の平均速度の差などいくつかのパラメータにおいて、正常例との違いを明らかにした¹⁰⁾。

VOG 本体からモニターに視標を提示する方法だと、ENG と比べて、さらに簡便に行うことができる。簡便だと、経過観察での通院中に経時的に検査・記録を行うことができ、病状の変化を把握するのにも有用となる。視運動性眼振検査、急速眼球運動検査を含めて VOG でを行い、正常、異常を定量的に判定することができるか検討を進めている。

ファイリング機能

結果をファイリング管理しやすいことも VOG の利点である。検査結果の保存をファイリングシステムと連携させておくと、検査日や ID、患者名などで検索して確認することができる。動画を DVD などに録画するだけでは、いつ、どの患者の、どの検査なのか分かりにくくなるが、ファイリングシステムと連携することにより解消される。再生中にも眼球動画と眼振図がリンクして表示されるので、検査の進行中には判断が困難な場合でも、後ほど再生して確認することができる。

加速度センサー・角速度センサーを備えた赤外線フレントツェルでは、頭位を感知し眼球動画と同期して記録することができる。頭位眼振検査や頭位変換眼振検査において、眼球動画と眼振図に加え、頭位の3つの情報を同期して記録することができ、眼球動画と眼振図に頭位情報という付加価値を持たせることになった。頭位は再生時にもアニメーションと数値で表示されるので、頭位と眼球動画、眼振図をリンクして確認することができる(図3)。眼振が出現したときの頭位情報を客観的に記録していることになる。

日常診療で頻度の高い食性発作性頭位めまい症を例にとると、頭位眼振検査や頭位変換眼振検査で出現した眼振がどの頭位の時であったのか、またその頭位をとってから眼振が出現するまでの潜時を正確に確認することができる。実際の臨床における BPPV では患者の開眼が不十分で、クリアに VOG を記録することが困難なことが多い。そのような場合、頭位の情報が確実に残っていることにより、眼振図がうまく表示できなくても眼球動画と頭位情報で診断の参考となる。

図3 頭位センサー付き赤外線フレントツェルでの VOG 加速度センサー・角速度センサーを備えた赤外線フレントツェルでの VOG 記録。眼球動画と眼振図、頭位の3つの情報を同期して記録することができる。(特開2020-18704)

高速度記録

眼振の急速相など早い眼球運動を解析するには高い周波数特性が必要となる。従来の多くの赤外線 CCD/CMOS カメラで採用されているコンポジット映像信号は 30Hz や 60Hz の時間分解能しかなく、VOG における弱点であった。高速度カメラを採用したカメラを用いると毎秒240フレーム等の高速度記録が可能となる。われわれのシステムにおいて、コマ落ちすることなく、回旋成分の解析も問題なくできることが確認できた。臨床用途では、急速眼球運動の記録などに、また研究用途での有用性を考えている。

vHIT

vHIT は、高速度カメラと加速度センサー・角速度センサーを用いた、VOG の技術を応用したものである。肉眼で所見を評価するベッドサイドの head impulse test では把握することができなかった、頭部回転中に起こる covert catch up saccade を記録することができること、また頭部速度と眼球速度を定量化することにより、VOR gain を算出することができ、saccade と VOR gain から半規管機能を評価することができる¹¹⁾。外側半規管のみではなく、頭部の回転方向を変えることにより、前半規管、後半規管を含めた3つの半規管すべてを評価することが、VOG 技術の応用により可能になってきた。

VOG の問題点・課題

テクノロジーの進歩とともに発展しつつある VOG だが、瞳孔・虹彩の画像を解析するという原理のため、開眼していないと解析ができないという制約がある。瞳孔

が若干欠ける程度であれば補正が可能であるが、半分以上が見えない場合は、瞳孔座標を求めることができず、安定した記録ができない。また、瞬きなどのアーチファクトを可能な限り処理することが、特に定量的解析を正確に行う上で必要である。

高速度記録も可能になりつつあるが、毎秒240フレームの場合、毎秒30フレームの8倍のデータ量になり、検査中にリアルタイム解析するには、まだ処理速度が追いつかないのが現状である。

これらの問題点は、テクノロジーの進歩で改良できる部分もあるが、ブレイクスルーとなる手法の改善も求められ、さらに検討を続ける必要がある。

リアルタイム三次元解析可能な VOG とそのほか近年の VOG の付加価値や発展性について解説した。

文 献

- 1) 小松崎 篤：ENG アトラス。医学書院；2017。
- 2) 渡辺行雄，石川和夫，肥塚 泉，他：赤外線 CCD/C-MOS カメラによる頭位および頭位変換眼振検査マニュアル 日本めまい平衡医学会診断基準化委員会編。Equilibrium Res 2012；71：284-286。
- 3) Yamanobe S, Taira S, Morizono T, et al: Eye movement analysis system using computerized image recognition. Arch Otolaryngol Head Neck Surg 1990；116：338-341。
- 4) Yagi T, Yamanobe S, Morizono T, et al: Three components analysis of eye movements using computerized image recognition. Acta Otolaryngol Suppl 1991；481：460-462。
- 5) 橋本 誠，沖中洋介，藤井博則，他：新時代の video-oculography. Equilibrium Res 2020；79：281-286。
- 6) 橋本 誠，山下裕司：赤外線 CCD カメラと眼球運動解析。耳鼻臨床 2012；105：603-612。
- 7) 八木聡明：めまい平衡医学領域の生理機能検査 そのとりかた，よみかた，ピットフォール ビデオ画像を用いた眼球運動記録・解析法 (VOG)。Equilibrium Res 2010；69：191-197。
- 8) 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 2002；61：90-96。
- 9) 池田卓生，橋本 誠，山下裕司：ImageJ を用いた眼振解析とその表示 平衡機能検査法基準化のための資料に基づいて。Equilibrium Res 2009；68：92-96。
- 10) Fujii H, Hashimoto M, Sugahara K, et al: Quantitative analysis of smooth pursuit eye movement using video-oculography. Arch Otolaryngol Rhinol 2018；4：030-034。
- 11) 新藤 晋：vHIT と VEMP の診断的価値 半規管障害と耳石器障害 vHIT(video Head Impulse Test) の診断的価値。Equilibrium Res 2017；76：212-218。

連絡先 〒755-8505 宇部市南小串 1-1-1

山口大学大学院医学系研究科耳鼻咽喉科学 橋本 誠