地磁気センサによる眼-頭部協調運動の測定について

—— 頭部回転運動測定装置の開発と小児への適用 ——

大阪大学 前迫 孝憲
東京学芸大学 小池 敏英

Measurement of coordination of eye and head movements by sensor of terrestrial magnetism: Development of a measurement system for head movement and application to children

MAESAKO, Takanori

Department of Educational System Technology,
Faculty of Human Sciences, Osaka University,
1-2 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565, Japan

KOIKE, Toshihide

Department of Physiological Psychology for Children with Handicap,
Tokyo Gakugei University,
4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184, Japan

In order to measure eye-head coordination in children, an apparatus for measuring head movements was developed by a sensor of terrestrial magnetism. The sensor on a head detects terrestrial magnetism which relates to the change of direction of head. The sensor was so light weight (100g) that there was no difficulty in installing the sensor on head of a child. The eye movement was recorded by the horizontal electrooculography. Trajectory of gaze was accurately constructed from summation of movements of eye and head. Applying this apparatus to a child of 6 years of age, characteristic pattern of head and eye movement was found during shifts of gaze to targets beyond the oculomotor range. Results indicate that the present apparatus is effective in measuring precisely eye-head coordination of children.

Key words: eye-head coordination, sensor of terrestrial magnetism, gaze shift

【要 約】 小児における眼-頭部協調を測定するため、地磁気センサによって頭部運動を測定する装置が開発された。頭の上のセンサは、頭の方角の変化に関連した地磁気を検出した。センサの重量は100gと軽く、センサを小児の頭に搭載するのに困難はなかった。眼の動きは水平眼球電位図によった。視線の軌跡は、眼と頭の運動の加算によって正確に構成された。この装置を6歳の小児に適用することによって、眼球の運動範囲を越えたターゲットに対して視線移動した際に、頭運動と眼球運動の特徴的なパターンを認めた。結果は本装置が小児における眼-頭部協調の正確な測定において有効であることを示した。

視野内に突然現れた対象物に視線を向ける時、眼球とともに頭も対象物に向けられる。眼球と頭のこの複合運動は眼-頭部協調運動と呼ばれ、視線は眼球と頭の運動の加算として定義される。この協調運動においては、はじめ視標に向かう急速眼球運動が起こり、ついで頭の回転運動が同方向に生起する。頭の運動が続く間に視線は視標に到達し、その後、頭運動と反対方向の眼球運動が生じ、その結果、視標に対して視線が維持され固視が生じる (Johnleigh & Zee, 1983)。眼-頭部協調運動には前庭動眼反射が関与することがサルを対象とした研究で指摘され、視線移動の開始前に、急速眼球運動のプログラミングがなされると考えられてきた (Bizzi, Kalil, & Morasso, 1972; Dichgans, Bizzi, Morasso, & Tagliasco, 1973)。

しかし人の眼-頭部協調運動は、前庭動眼反射のみによって説明できないことが近年明らかになった。Lauritis & Robinson (1986) は、視線が急速移動し視標に達する経過において頭運動に妨害を加え、頭の運動速度を減少させたが、それに対応した眼球運動の変化を観察できなかった。このことから彼らは、眼と頭が急速回転運動する間、前庭動眼反射は機能しないことを指摘した。また頭運動を妨害した場合でも視線移動が正確であることを指摘した。この見解は他の研究者によっても支持されている (Guitton & Volle, 1987; Pelisson, Prablanc & Urquizar, 1988)。

Guitton & Volle (1987) はさらに、頭を固定した条件で眼球運動の限界を測定し、この範囲を越えた角度の視線移動について検討した。その結果、眼-頭部協調運動には視線移動のプログラミングと運動中の視線位置に関するフィードバックが重要であることを指摘した。眼球運動の限界を越えた範囲の視線移動をプログラムする場合には、現在の視線位置と目標対象物の位置関係を、頭を中心とした空間座標で捉えることが不可欠であると考えられる。小児や精神遅滞児において、現在の視線位置と目標対象物の位置関係の把握が空

間座標上で不十分な場合には、視線移動プログラミングとその制御過程に成人とは異なる特徴が見られることが予想される。しかし眼-頭部協調運動の発達に関する研究は極めて少なく (Funk & Anderson, 1977)、この点に関する検討は十分されていない。これは小児に頭運動の記録装置を装着した場合、運動に制限が加えられて頭運動の記録が困難であったためと考えられ、小児に適用可能な測定装置が必要であることが指摘できる。

頭運動の記録は従来、ヘルメットと連結したポテンショメータを用いて行われてきた。また人工的に作り出した磁場の相互干渉を利用して測定プローブの位置や姿勢を測定する方法がマン-マシン・インタフェースの研究で開発され、頭運動の記録に適用されている (Rabb, Blood, Steiner, & Jones, 1979)。一方、地磁気は地球表面での絶対方向を示していることから、地磁気の方角を検出するセンサを頭部に装着することで、頭の向きの変化を知ることができる。近年、センサ技術の進展に伴い、軽量で誤差の小さい地磁気測定装置の構成が可能になった。

そこで本研究では、地磁気センサを利用した頭部回転運動測定装置を作成し、頭運動への負担を少なくした状態で頭運動の記録を行った。地磁気は測定地点の緯度によって規定され、測定した場所の磁性体の分布によっても影響される。このことから、実験場所での地磁気センサの誤差評価が必要であることが指摘できる。そこで初めに地磁気センサの測定誤差に関する較正方法を検討した。それを基に種々の角度の視線移動の測定を行って従来との結果と比較検討し、さらに小児の視線移動の特徴を検討することによって、本方法の有効性を検討した。

測定システム

測定装置

頭運動 地磁気センサは頭の中心部に置かれ

た．中心部は，鼻根正中点と後頭部隆起の間の距離を100%とし，鼻根正中点より50%後方の部位とした．Fig. 1は頭運動の測定システムの回路図を示したものである．地磁気センサ（ロジックフラット製 DG/AN360）は，環状コア，デジタルICのAN360とDG360から構成されている．環状コアは地磁気による磁場中に置かれ，AN360が環状コアを周期的に励磁した．コアには90°の角度で向かい合う2組のコイルが巻かれていた．地磁気の印加方向によってコアの飽和のタイミングは微妙にずれるが，DG360はその時間差を計測することで角度の測定を行った．角度の測定が終わるとINT端子に信号が出力された．コンピュータはこの状態をプリンタインタフェースのBUSY端子を通して検知した．角度のデータについてはシフトレジスタ(74LS166)によりパラレル－シリアル変換され，同様にBUSY端子を通して読み込まれた．このため，BUSY端子に加える信号はデー

タセレクトで選択された．なおコンピュータで測定開始のトリガ信号を読み取るようトランジスタを使った回路を加えた．シリアルで入力されたデータはコンピュータのプログラムで数値データに変換された．センサの精度は0.25°で重量は約100gであった．

眼球運動 眼球運動は眼球電位図(EOG)により測定した．EOGは，両眼の眼窩上部と下部，両眼の外側縁に電極を置き生体現象用増幅器（日本電気三栄1169）で直流増幅することによって記録した．水平眼球運動に伴うEOGの直線性は左右にそれぞれ約45°で（福島・田淵，1987），分解能は約1°であることが指摘されている（Carpenter, 1977）．EOGによる方法は他の方法と比べて時間分解能が高く，記録が容易であることから，本研究において眼球運動の測定に用いた．

データ収集・解析プログラム

データ収集は視線移動の測定時にオンラインで

Fig. 1 Diagram of a measurement system for head movement.

行った。頭の回転角度は、11.52ms おきに地磁気センサからデータ転送用インタフェースとプリンタポートを介してデジタル転送した。EOG は A/D ボード (ネオローク製 PCN-2198) によりサンプリング間隔 0.72ms で A/D 変換した。頭の回転角度と EOG はパーソナルコンピュータ (日本電気, PC9801LX) によってデータ収集した。頭の回転角度と EOG ではサンプリング周波数が異なるため、眼-頭部協調運動を再構成する際に時間軸上で数値補間が必要となり、それに伴う誤差が生じる。そこで EOG サンプリングの 16 点毎に頭の回転角度をサンプリングし、時間的ずれが生じないようにした。

データ解析において、眼球運動は視角に換算し表示された。視線の移動軌跡は頭の回転角度と眼球運動角度との加算から算出された。プログラムは C 言語により記述した。データ収集部分のみアセンブラで作成し、関数として呼び出して用いたため、高速かつ自由度の高いデータ収集と表示が可能であった。

地磁気センサの測定誤差

センサの測定誤差は、回転中心のずれに伴う誤差と周囲の磁性体による誤差に大別される。

センサの回転中心の位置ずれは、頭を回転する際に生じる。センサは、地磁気の水平分力の磁気ベクトルを X 成分と Y 成分に分解して測定する。そのため、センサ上の磁束が平行な状態である場合には、センサを 10cm 程度平行移動しても測定値は変化しない。一方、回転中心の位置がずれた場合、注視点と視標刺激から構成される視角が変化し、眼球運動の回転角度に影響が生じる。回転中心の位置ずれに関しては、頭を中心部の左右に赤外線 LED を置き、頭上のカメラで頭の回転を撮影することによって予備的に検討した。頭上カメラの映像を A/D 変換し、高輝度の画素を測定することによって頭の回転運動の前と後における中心部の位置を分析した。その結果成人では、80° の回転角度の試行を 10 回行った場合、左右ないしは前

後方向に 0~18.5mm のずれを観察できた。視標刺激と頭との距離が 100cm、注視点から視標への変位の大きさが 60°、回転中心の位置ずれが左右ないしは前後方向に 2cm である場合、眼球運動の誤差は土約 0.5° と計算される。このことから、視標刺激と頭との距離が 100cm 以上あり、回転中心の位置ずれが 2cm 以内の条件で頭の回転を行った場合には、回転中心の移動に伴う誤差は小さいことが指摘できる。しかし、障害児・者を対象として頭運動を測定する場合には、回転中心の位置ずれが大きい可能性があるため、頭上カメラによるモニタが必要と考えられる。

地磁気は微弱であるため、電車や自動車の通過により地磁気の変化し、磁性体などの環境の影響を受けやすい。地磁気センサの測定誤差を評価するために、測定場所においてセンサを 360° 回転させて誤差を測定した。Fig. 2 は室内の異なる 3 箇所での測定誤差の結果を示したものである。半径方向の +10° から -10° の目盛りが誤差を示し、0° の同心円上が誤差のない場合を示している。円周方向は回転角度とした。0° の回転角度

Fig. 2 Error in measurement of terrestrial magnetism. Radius of the circle indicates measurement error in each direction. Terrestrial magnetism was measured 3 times at each different points in an experimental room. Values of measured errors were superimposed in the circle.

は北の方位を表す．この図からセンサは方位によって $\pm 2.00^\circ$ の誤差を示すと考えられる．なお同一場所での測定値の変動は、 $\pm 0.25^\circ$ の範囲であった．測定を行うと、周囲の磁性体などの影響による地磁気の方角のずれから、同心円が内側や外側によったり楕円上の歪みを生じることがあった．このような環境においても、センサの補正を厳密に行ったり、装着したセンサと周囲に設置したセンサの出力の差分から動きに伴う成分を抽出するなどの方法で正確な測定が可能であった．

本研究では、同一場所の誤差が極めて安定していることが確認できたことから、センサの表示値に対する誤差修正テーブルを作成し、頭運動の回転角度の修正値を算出した．また実験に際しては、刺激前の測定値と頭の回転運動中の出力値との差分から動きに伴う成分を抽出した．このような手続きによって、頭の回転運動の安定した測定が可能となった．

適用例

本測定システムを用いて、成人1名（22歳2か月）と小児1名（6歳5か月）について測定を行った．測定条件は視線移動の角度が左に 40° と 80° の2条件とした．刺激はLEDを用いた．刺激と頭の回転中心との距離は150cmとした．はじめ注視用標的を点灯しておき、被験者に注視するよ

う教示した．運動開始の信号は注視用標的の消灯とし、同時に、視線移動の目標となる標的を点灯させた．各条件について5～8試行測定した．被験者に対して頭を回転させて標的を見るよう教示した．各条件の測定に先立ち練習を行い、測定角度の視線移動に困難がないことを確認した．

Fig. 3は成人における測定結果の代表的記録例を示したものである．Eは眼球運動、Hは頭運動の移動を示し、Gは眼球運動及び頭運動から計算された視線の位置を示している．なお各記録は視線移動の標的点灯を0秒とし、その後の時間経過を表し、上向きが左方向として表示した． 40° 条件では初め急速眼球運動が生起し、約40ms遅れて頭運動が開始した．頭運動が起きている間に眼球運動は最大偏位を示し、その時点で視線は視標位置に達した．その後、眼球は頭運動と逆方向に移動をはじめた．この結果、視線は視標を固視し続けた． 80° 条件については、初め急速眼球運動が生起し、続いて頭運動が開始した．眼球運動が約 40° に達した後、眼球は眼窩内で約30ms停止し、その間視線は頭運動によって移動した．視線が視標に到達後、眼球は頭運動と反対方向に移動し、視線は約50ms固定された．その後小さな眼球運動が重畳し、その結果、視線は視標に到達した．

成人の眼－頭部協調運動において、 40° 条件で

Fig. 3 Examples of recorded trajectories of eye(E), head(H), and gaze(G) during gaze shifts of an adult.
A: gaze shift between targets 40° apart. B: gaze shift between targets 80° apart.

は、眼球運動は最大変位に達した直後に、逆方向に回転することはよく知られている。また80°条件では、眼球運動が最大変位に達した後、眼球そのものの回転運動は停止し、視線は頭運動によって移動することが確認されている (Laurutis & Robinson, 1986; Guitton & Volle, 1987)。本研究においても両条件で、同じ時間経過の頭運動と眼球運動を観察することができた。Guitton & Volle (1987)は種々の角度の視線移動を検討し、より大きな回転角度の頭運動の遂行が被験者に指示された場合、頭運動の最大速度は増加する傾向があることを示し、頭運動の最大速度 $H_{\max}$ とその時点の頭運動の回転角度 H_0 との間の直線的関係を報告した ($H_{\max} = 4.39H_0 + 106$)。Fig. 3の記録について頭運動の最大速度を算出した結果、40°条件では、頭運動が21°で最大速度は198.2°/secであった。また80°条件では、頭運動が35°で頭運動の最大速度は259.7°/secであった。本研究の結果は、Guitton & Volle (1987)の回帰直線の結果とはほぼ一致しており、本実験の地磁気センサによる頭運動の記録が妥当であると考えられる。

Fig. 4は小児における結果の代表的記録例を示したものである。40°条件については、初め急速眼球運動が生起し、その後、頭運動が生起した。眼球運動が最大偏位を示した時点で視線は視標に到達した。眼球運動が最大偏位に到達するのに要

した時間は、成人と比べて約10ms短かった。その後、眼球は頭と反対方向に回転し、視線は視標に対して固定された。成人と比べて小児では、頭部の偏位角度は約15°と小さかった。80°条件でも、初めに急速眼球運動が生起したが、その最大偏位は約60°と大きかった。眼球は眼窩内で約30ms停止した後、頭部方向と反対方向に移動したが、視線は視標を捕えることができず、約100msの後に視標に固定された。

小児の眼-頭部協調運動に関しては、80°条件で成人と異なる運動経過が認められた。成人では、視線が視標に到達する前に眼球運動は停止した。他方小児では、急速眼球運動の偏位が大きく、視線が視標に到達するまでに時間がかかった。頭を固定し、視力を保った状態で眼球を自由に動かせる範囲は±約60°である。約60°以上の視線移動の遂行に関しては、急速眼球運動のみのプログラミングでは不十分で、視線移動に関する空間座標内のプログラミングが必要であることが指摘されている (Laurutis & Robinson, 1986; Guitton & Volle, 1987)。このことから被験児では、現在の視線位置と標的視標の位置関係について、空間座標上の把握が不十分であったことが示唆される。しかし小児の頭の重量は成人と比べて軽いので、成人とは異なった頭運動の制御を行った可能性も考えられる。本研究で対象とした6歳

Fig. 4 Examples of recorded trajectories of eye(E), head(H), and gaze(G) during gaze shifts of a child.

A: gaze shift between targets 40 deg apart. B: gaze shift between targets 80 deg apart.

児の眼－頭部協調運動については、従来の研究では2名でしか報告されておらず、80°の視線移動については検討されていない(Funk & Anderson, 1977). 低年齢小児の眼－頭部協調運動の発達の特徴に関しては、今後さらに研究が必要とされる。

本装置の特徴と問題点

本測定システムの特徴として以下の点があげられる。第一の点として地磁気センサの測定誤差が0.25°と小さく、0°から360°の回転角度にわたって誤差が一定であることが指摘できる。ポテンシオメータによる頭運動の測定誤差は約1°であると報告された(Pelisson, Prablanc & Urquizar, 1988). またポテンシオメータは、回転角度と出力値の間の直線性に関して誤差が生じるので、回転角度によって測定誤差が変動する。第二の点として、地磁気センサは軽量であり、装着道具もまた軽量であることが指摘できる。ポテンシオメータはヘルメットを介して固定されるので、装置全体の慣性モーメントは地磁気センサと比較して大きい。このことは、ポテンシオメータによる測定では、頭運動の開始と終了に大きな力が必要であることを意味しており、低年齢の小児が装着した場合、頭の回転運動が妨げられることが指摘できる。本システムによる測定では、地磁気センサは軽量であり、頭がポテンシオメータと連結していないため、頭の回転運動が妨げられず日常に近い環境での測定が可能である。第三の点としては、頭運動の回転角度の測定をEOGの測定と同期させたことが指摘できる。頭の回転角度とEOGではサンプリング周波数が異なるため、時間軸上での補間が必要となる。本方法では、頭の回転角度の測定をEOGのサンプリングに同期させたので、眼－頭部協調運動の再構成に伴う誤差が減少した。

問題点としては、厳密には測定場所の磁性体の分布によって地磁気センサが影響を受けるため、測定に先立って誤差修正テーブルの作成が必要な

ことである。CRTは磁力線をだすため近距離の刺激表示装置として利用が難しく、刺激提示に工夫が必要なことが指摘できる。また本測定システムでは水平面上の回転運動を測定しており、垂直方向の偏位に関しては、磁界の3次元ベクトルを計測する装置の開発が必要である。

本測定システムは測定場所の評価が必要であり、実験に先立つ予備的検討が必要である。しかしながら水平方向の頭の回転に関しては、低年齢小児を対象とした測定が可能であるため、従来研究困難であった小児や障害児の眼－頭部協調運動の検討に適用できると考えられる。また刺激に対する定位探索に伴う頭の回転運動は、刺激情報の受容・処理の結果生じるので、発達初期の視覚や聴覚の認知機能を研究するうえで、本測定システムによる頭運動の定量的測定は有用と考えられる。

引用文献

- Bizzi, E., Kalil, R. E., and Morasso, P. 1972 Two modes of active eye-head coordination in monkeys. *Brain Res.*, **40**, 45-48.
- Carpenter, R. H. S. 1977 *Movements of the eyes*. London: Pion Limited.
- Dichgans, J., Bizzi, E., Morasso, P., and Tagliasco, V. 1973 Mechanisms underlying recovery of eye-head coordination following bilateral labyrinthectomy in monkeys. *Exp. Brain Res.*, **18**, 548-562.
- 福島正文・田淵昭雄 1987 眼球運動の分析. 神経眼科最新の進歩, 眼科MOOK, **35**, 177-187.
- Funk, C. J., and Anderson, M. E. 1977 Saccadic eye movements and eye-head coordination in children. *Percept. Mot. Skills*, **44**, 599-610.
- Guitton, D., and Volle, M. 1987 Gaze control in humans: Eye-head coordination during orienting movements to targets within and beyond the oculomotor range. *J. Neurophysiol.*, **58**,

- 427-459.
- Johnleight, R., and Zee, D. S. 1983 *The Neurology of Eye Movements*. Philadelphia: F. A. Davis Company.
- Laurutis, V. P. and Robinson, D. A. 1986 The vestibulo-ocular reflex during human saccadic eye movements. *J. Physiol.*, **373**, 209-233.
- Pelisson, D., Prablanc, C., and Urquizar, C. 1988 Vestibuloocular reflex inhibition and gaze saccade control characteristics during eye-head orientation in humans. *J. Neurophysiol.*, **59**, 997-1013.
- Rabb, F. H., Blood, E. B., Steiner, T. O., and Jones, H. R. 1979 Magnetic position and orientation tracking system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, *AES-15*, 709-718.