

注視距離が眼球の水平回転に与える影響について

早見, 武人

九州大学大学院システム情報科学府知能システム学専攻 : 博士後期課程

堀本, 修平

九州大学大学院システム情報科学府知能システム学専攻 : 修士課程

志堂寺, 和則

九州大学大学院システム情報科学府知能システム学部門

松永, 勝也

九州大学大学院システム情報科学府知能システム学部門

<https://doi.org/10.15017/1525439>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 7 (1), pp.19-22, 2002-03-26. 九州大学大学院システム情報科学府知能システム学部門

バージョン :

権利関係 :

注視距離が眼球の水平回転に与える影響について

早見 武人*・堀本 修平**・志堂寺和則***・松永 勝也***

Transverse Rotation of the Eyeball Affected by Fixation Distance

Takehito HAYAMI, Shuhei HORIMOTO, Kazunori SHIDOJI and Katsuya MATSUNAGA

(Received December 14, 2001)

Abstract: The video eye-tracker can measure the direction of the visual axis of the eye based on the calibration, which creates a relationship between the displacement of a feature on the eyeball and the direction of the visual axis. However, this calibration method takes no account of the distance from the subject to the target. Version displacement of the pupil center was measured when the subject is fixating on stationary targets on the planes stood at different distances from the subject. As a result, the small transverse movement of the pupil center was observed when the subject had a version movement of the eyes for the targets on the near plane. The relationship between the distance and the amount of transverse movement was conspicuous in the dominant eye.

Keywords: Depth perception, Fixation, Conversion, Eye rotation, Eye dominance

1. はじめに

高い空間精度の眼球運動測定装置では、注視点の位置と撮像素子などのセンサの出力値とを対応付けるためにいくつかの視標を用意して被験者に注視させ、そのときのセンサの出力値を記録することによって注視点の位置とセンサの出力値とを対応付ける仕組みになっている。眼球の向き、もしくは視線方向を得るという目的から、視標は被験者の前額面に平行な一つの平面上に配置されるのが普通である。

このような較正方法に基づいた視線方向測定では、注視距離の変化に伴う眼球の回転中心や回転半径の変化が十分無視できるほど小さいものとみなしている。しかし

Enrightによれば、遠見と近見を繰り返す眼球の運動（輻輳開散運動）に伴って眼球の回転中心は前後に移動するという⁴⁾。このことは、輻輳開散運動を含んだ眼球運動時の注視点の位置を測定する際に測定精度の低下をもたらす原因となる。しかし、たとえ注視位置までの距離の変化に伴って眼球の回転中心が移動するとしても、視標までの距離とセンサの出力値について対応づけを行えば3次元空間上における注視位置の測定精度を向上させることができると考えられる。

2. 実 験

2.1 装置

本実験においては、前方の実空間を等倍で見ることのできるシースルー型のヘッドマウントディスプレイを着用した状態で眼球運動の測定ができる、ヘッドマウントディスプレイ型眼球運動測定装置を使用した（本装置は我々の研究室で作成した）。

本装置は、眼球の画像を撮影し、その映像を分析することにより眼球運動を測定する映像法⁸⁾の原理に基づいている。本装置はヘッドマウントディスプレイ（OLYMPUS：Media Mask MW601）の内側に前眼部を照射する赤外線ダイオードを設置し、外側前方には近赤外線を反射し可視光線を透過するダイクロミックミラーを斜めに取り付け、その上方に近赤外線を感知する小型白黒カメラ（TOSHIBA：IK-M41MR）を下向きに取り付けたもので、その外観をFig. 1に示す。

眼球の画像はコンピュータに取り込んでデジタル画像処理を行い、瞳孔の中心点の移動量から眼球の回転量を計算する⁹⁾。システム構成をFig. 2に示す。画像から

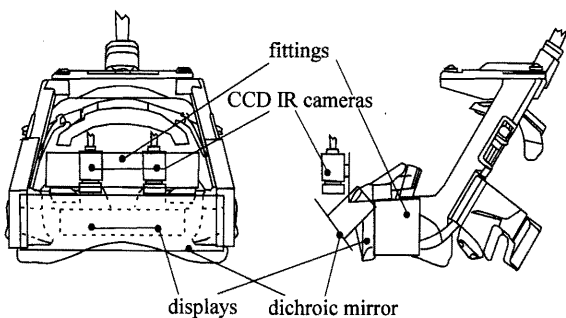


Fig.1 The head-mounted display with binocular eye tracker.

平成13年12月14日受付

* 知能システム学専攻博士後期課程

** 知能システム学専攻修士課程

*** 知能システム学部門

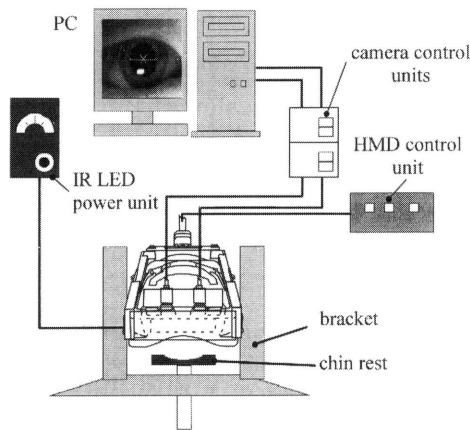


Fig. 2 The head-mounted eye tracking system.

瞳孔の中心点を算出するアルゴリズムは従来にも研究されているが^{1),7),13)}眼球の照明光源の配置に依存するため一般的な方法は確立されていない。本研究においては下記の方法によった。

瞳孔中心の算出方法

- (1) 眼球画像 (320 × 240pxl, 256階調) の中央付近である基準の黒レベル値を出力する画素を選択する。
- (2) 選択した画素を含む行で、当該画素から左右に明るいピークを探索し、左右のうち暗い方のピークと最も暗い画素の中間の濃度を閾値とする。
- (3) 上記閾値で画像を2値化する。
- (4) 最も暗い画素の位置から2値化された画像上で連続した黒領域の外側の輪郭を抽出し、平滑化する。
- (5) 黒領域の幅を画像の縦軸の関数と見たとき正のピークを1つ持っていれば、輪郭上の4点を通る楕円の方程式を求め、その中心を瞳孔中心とする。それ以外の場合、幅が最大となる輪郭の中心を瞳孔中心とする。

この方法には、瞳孔内にできる照明光の像や瞼の下垂といったノイズに対して瞳孔中心を安定して検出できるという特長がある。画像の解像度から得られる眼球回転の検出精度は0.3°であった。

ヘッドマウントディスプレイは枠板にねじ止めして固定した。ディスプレイからの距離が50cm(前面)、100cm(較正面)、150cm(背面)の位置に溝を設け、一辺50cmの3枚の正方形の板を、前面用、較正面用、背面用視標板としてそれぞれの位置の溝に設置した(Fig. 3)。前面用には1辺15.8cmでその中心が板の中心に一致する正方形の頂点、辺の中心、中心の計9箇所に直径1.6cmの黒い円盤を描いて較正視標とした。較正面では点を配置する正方形の辺の長さを31.7cm、背面用は47.5cmとし、前面用と同様に円盤を配置した。ただし円盤の直径は辺

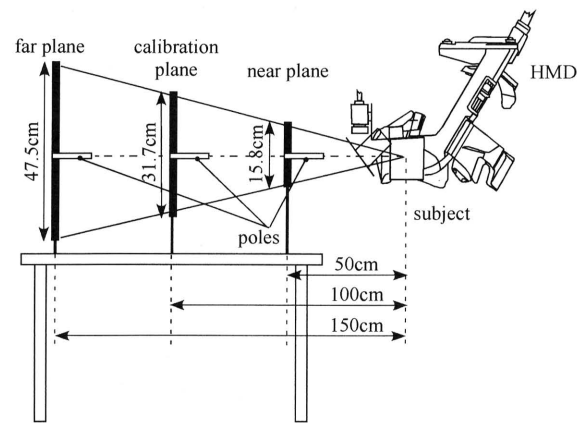


Fig. 3 The plates as the fixation targets.

の長さに比例して拡大もしくは縮小した。これらの正方形が左右のディスプレイの中間点に対して張る角は水平、垂直ともに17度であった。

2.2 方法

2.2.1 測定前準備

眼球の画像を取得する前に、まず利き目を測定した。ヘッドマウントディスプレイの前方20cmのところ定規を固定し、較正面を台に設置した。被験者には較正面の中心視標を両眼、右眼のみ、左眼のみの3条件で注視させ、中心視標の目盛の位置を記録した。右眼のみと左眼のみで記録した目盛りの位置の中心を基準とし、両眼のときの目盛りの位置が中心よりも右にあった場合には右を利き目、左にあった場合は左を利き目とした¹²⁾。

次に、視標板の中心に直径1cm、長さ30cmの真鍮の円柱を垂直に取り付けたものを用意し、前面位置に設置した。被験者にはヘッドマウントディスプレイを通して円柱を眺めさせた。実験者は被験者の報告に従い円柱が円に見える(すなわち正中線上にある)と感じるまで板を左右に動かし、最終的な板の中心位置を記録した。較正面位置、背面位置も同様に行った。

2.2.2 注視方向の測定

被験者には較正面上の9個の較正視標をそれぞれ1秒間ずつ注視させ、各点において1秒間に検出された瞳孔中心の座標の重心を取りその較正点に対応する値を瞳孔中心位置(眼球画像上の較正点)として記録することにより較正を行った。

次に較正面を取り外し、前面か背面のいずれかの中心が記録した正中線に一致するように取り付け、較正点のうち各面の中心を含む水平方向の3個の配列を用い、左→中→右の順で注視させ、そのときの眼球画像上における瞳孔中心位置を記録した。以後、較正面→前面(もしくは背面)→較正面→背面(もしくは前面)の順で同様に3点を注視させ、瞳孔中心値の記録を行った。

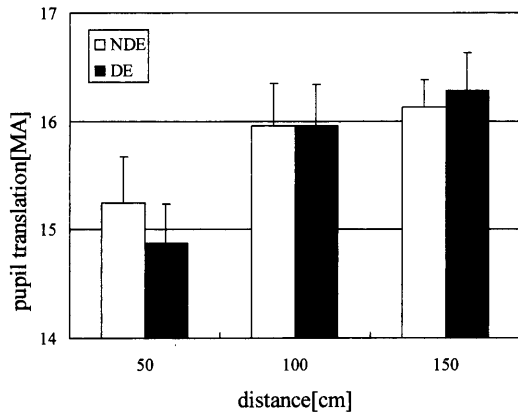


Fig.4 The measured translation of the pupil center.

2.3 結果

利き目測定の結果は、被験者4人中3人が右、1人が左利きであった。

左視標と中央視標を注視したときの瞳孔中心の検出位置の差と、較正面上の中央視標と右視標を注視したときの瞳孔中心の検出位置の差について分析を行った。差を取ったのは、注視距離の違いによる瞳孔中心位置の変化や水晶体の屈折力の違いによる視線と中心窩の位置関係の変化の影響を排除するためである。瞳孔中心の移動量は、較正面における値を15.8MAとして計算した。

測定結果をFig. 4に示す。視標面が被験者から遠くなるにつれて、利き目側 (DE)、非利き目側 (NDE) とともに瞳孔中心の移動量が多くなっている。ただし、利き目側のほうが移動量の増え方が顕著であった。

2.4 考察

瞳孔中心の移動量が注視距離によって変化する直接の原因について考察する。瞳孔中心の移動量が異なるためには、以下のうち1つ以上の現象が生じていなければならない。

- (1) 注視面までの距離によって眼球の回転量が変化する。眼球の回転中心は常に一定の位置にある (すなわち回転半径は一定である)。
- (2) 注視面までの距離によらず眼球の回転量は一定である。瞳孔中心の回転半径が変化する。

もし注視面までの距離によって眼球の回転量が変化するならば、本研究の実験結果は注視距離によって視標が網膜上に結ぶ像の中心窩内での位置が変化することを示していることになるが、網膜上の像に含まれるボケなどの距離情報は像の位置とは関係がない一方、注視対象の像を中心窩の中心に移動させる精度は $10'$ と言われており、考えにくい²⁾。そこで瞳孔中心の回転半径を変化させる要因を挙げると次のようになる。

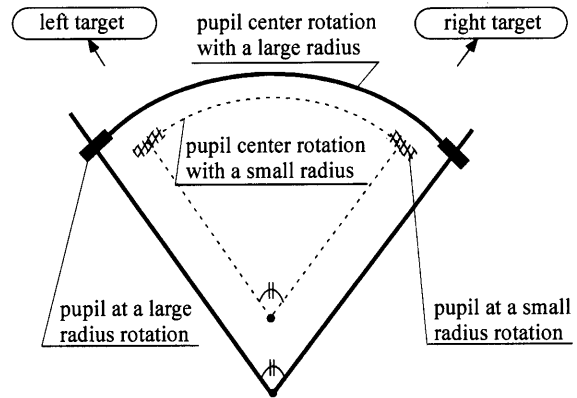


Fig.5 The translation of the rotatory center of the pupil center changes the amount of the transverse displacement of the pupil center.

(2-1) 水晶体の調節によってカメラから瞳孔像までの光学距離が変化する。

(2-2) 眼球の回転中心が移動する。

このうち(2-1)に関しては、調節の距離が遠くなるほどカメラから瞳孔像までの光学距離は遠くなり、眼球の回転半径は小さくなるので当てはまらない。このことから、眼球の回転中心は移動していると考えられる。

瞳孔中心の増加移動量は回転中心が注視方向の変化にしたがって前額面に対して平行に変化するか、もしくは瞳孔中心の回転半径が長くなることに対応する。しかし前額面に平行な眼球の回転中心の移動量は $100\mu\text{m}$ 程度とされている³⁾。このことから、本研究の結果は注視距離が遠くなるにつれて瞳孔中心の回転半径が長くなっていることを示しているものと考えられる。

近見時の眼球の移動について、Enrightは15cmと420cmの視標を交互に注視させたとき、眼球の回転中心は近見時のほうが1mm前方であるとしている⁴⁾。このことは遠見時に眼球の回転半径が長くなることを示しており、本研究の実験結果と一致した傾向を示している。

Fig. 5は、眼球の回転中心が後退することによって瞳孔中心の移動量が増えることを表したものである。瞳孔像 (入射瞳) の中心から眼球の回転中心までの標準的な距離は14mmであり、FryとHillによれば被験者から等距離にある左右の視標を注視したときの回転中心は眼球の光軸から鼻側1mmのところにある⁵⁾。そこでたとえば150cm先を注視したときの瞳孔中心の回転半径を $r_f = 14\text{mm}$ とし、視標までの距離が50cmになったときに生じた1MAの瞳孔中心の移動量の短縮がすべて瞳孔中心の回転半径の短縮によって生じたものとして、その短縮量を計算すると、次のようになる。

50cm先を注視したときの瞳孔中心の回転半径を r_n 、回転量を θ とすると、

$$r_n \theta = r_f (\theta - \theta_r) \quad (1)$$

である。ただし、 θ_r は回転半径の変化による見かけの回転量である。 $\theta = 8.5^\circ$ 、 $\theta_r = 1MA$ とすると、 $r_n = 13.1mm$ という結果が得られ、Enrightの報告に近い値が得られる。

瞳孔中心の回転半径が変化する直接の原因は、近見時と遠見時で眼球の向きを維持するための直筋と斜筋のバランスが異なるためと考えられる。注視距離と回旋の関係については、遠見時にはListingの法則が成り立つものの近見時には上転時に内回旋よせ、下転時に外回旋よせが起き、注視距離によって特性が異なることが知られている。一方注視距離と共同運動や輻輳開散運動との関係については、近見時には眼球の回転可能範囲が狭くなるというHeringの仮説をOnoらは否定している¹⁰⁾。しかし本研究の実験結果は、注視距離が回旋だけでなく共同運動にも影響を与えていることを示すものである。

注視点測定においては、瞳孔中心の移動量と推定注視点の位置を関連付ける較正は、被験者から見て1つの距離に関してのみ行うのが普通である。この場合、被験者の実際の注視距離は様々であるから、瞳孔中心の移動量が注視距離に依存しないことが望ましい。したがってこのような場合、非利き目の眼球運動を測定したほうが距離に依存せず正確な測定ができる。

また、3次元空間上の注視点を両眼の瞳孔中心の位置から算出する場合、較正を被験者から見て1つの距離に関してのみ行うだけでなく、奥行方向にも拡張することによって精度を高めることができると考えられる。しかし較正点数が増えると較正に多くの時間を必要とするという問題が発生する。精度の良い較正を行うためには較正中に0.1mmオーダーで頭部を静止させることが望ましいが、このような静止状態を維持することは被験者に緊張状態の持続を要求する。したがって較正にかかる時間が長くなるほど頭部の移動が発生しやすくなり測定精度を低下させる原因となる。注視距離と利き目の回転半径の関係が明らかになればこのような測定精度の低下を防ぐことができ、3次元空間内における注視点の測定精度を高める効果が期待される。

両眼視時の注視距離と利き目の関係については、開散運動時に非利き目のほうが変位が大きいたったPickwellに対し¹¹⁾、OnoとNakamizoは輻輳と開散の両方を考慮すると利き目の影響はないとしており¹⁰⁾、明らかでないのが現状である。また、利き目と共同運動の関係についてはあまり研究例がない。Heringの法則を補うことができれば神経科学の面で新しい知見となり得るが、この点では本研究はパイロットスタディであり、今後詳細な検討

が必要であろう。

3. ま と め

両眼視時の注視距離と眼球運動の関係を調べた。同じ視角だけ離れた3点を左から右に順次注視したときの瞳孔中心の移動量は、注視距離が短くなるにしたがって小さくなった。注視距離が近い状態では瞳孔中心の回転半径が短くなっていると考えられる。

注 本研究は文部省科学研究費補助金(平成10,11年度基盤研究(B)(2)展開, 人工現実環境における眼球運動の測定と疲労の少ない人工現実環境の研究, 代表者: 志堂寺和則, 課題番号10551004)の助成を受けた。

参 考 文 献

- 1) Barbur, J., Thomson, W. D. & Forsyth, P. M.: A new system for the simultaneous measurement of pupil size and two-dimensional eye movements. *Clinical Vision Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 131-142 (1987).
- 2) Ditchburn, R. W. & Ginsborg, B. L.: Involuntary eye movements during fixation. *Journal of Physiology*, Vol. 119, pp.1-17 (1953).
- 3) Enright, J. T.: Ocular translation and cyclotorsion due to changes in fixation distance. *Vision Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 595-601 (1980).
- 4) Enright, J. T.: Saccadic anomalies: vergence induces large departures from ball-and-socket behavior. *Vision Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 301-308 (1984).
- 5) Fry, G. A. & Hill, W. W.: The center of rotation of the eye. *American Journal of Optometry and Archives of American Academy of Optometry*, Vol. 39, pp. 581-595 (1962).
- 6) Gullstrand, A.: Appendix 3. Schematic eyes. In Smith, G. & Atchison, D.A., *The eye and visual optical instruments* (pp. 777-792). Cambridge: Cambridge University Press (1909).
- 7) 笠井健, 東野直巳, 辻三郎: CCDイメージセンサを用いた眼球運動計測法とその測定分解能. 電子通信学会論文誌, Vol. J65-D, No. 2, pp. 274-281 (1982).
- 8) Mackworth, J. F. & Mackworth N. H.: Eye fixations recorded on changing visual scenes by the television eye-marker. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 48, No. 7, pp. 439-445 (1958).
- 9) 松永勝也, 渡邊建, 船津孝行: 映像物体の最大幅位置検出方式. 特公昭60-045801 (1985).
- 10) Ono, H. & Nakamizo, S.: Changing fixation in the transverse plane at eye level and Hering's law of equal innervation. *Vision Research*, Vol. 18, No. 5, pp. 511-519 (1978).
- 11) Pickwell, L. D.: Hering's law of equal innervation and the position of the binocular. *Vision Research*, Vol. 12, No. 9, pp. 1499-1507 (1972).
- 12) Porac, C. & Coren, S.: The dominant eye. *Psychological Bulletin*, Vol. 83, No. 5, pp. 880-897 (1976).
- 13) 伴野明, 岸野文郎: 視点及び視線検出のための特徴点実時間抽出処理と高精度化の検討. ATRテクニカルレポート, TR-C-0070 (1991).