

楕円体推定による注視点測定

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

志堂寺, 和則

九州大学大学院情報システム科学研究所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研究所知能システム学部門

<https://doi.org/10.15017/1515717>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 6 (1), pp. 59-64, 2001-03-26. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン :

権利関係 :



楕円体推定による注視点測定

早見 武人*・志堂寺和則**・松永 勝也**

Fixation Point Measurement with an Ellipsoid Estimation

Takehito HAYAMI, Kazunori SHIDOJI and Katsuya MATSUNAGA

(Received December 15, 2000)

Abstract: The fixation point is usually measured with the optic axis of the eye. This method assumes that the relation between the mental direction of view and the direction of the optic axis is mappable with the calibration. In this paper we take up monocular fixation for a static target. In this situation, not only is the relative angle between the visual axis and the optic axis fixed, but also the angle between the visual axis and the mental direction of view are coincident. The accuracy of fixation point measurement would rely on the accuracy of optic axis measurement. We attempted accurate measurement of the optic axis with an ellipsoidal model about the orbit of the pupil center. Consequently, under the condition that the visual field was horizontal 43 and vertical 22 degrees with nine points calibration, the maximum discrepancy between the actual target and estimated fixation point over the field was about 0.7 degrees, which was accurate in comparison with 1.4 degrees which arose from the calibration of the simple plane interpolation method.

Keywords: Fixation, Calibration, Eye-tracker, Pupil, Eye rotation, Ellipsoid

1. はじめに

本論文では中心窩に到達する光源とその人が意識している注視対象が一致していると考えられる、単眼による静止光源注視時の注視点について検討する。

このような条件下では、注視点は眼球の回転中心と中心窩に到達する光源を結ぶ注視線にある。眼球の回転中心と瞳孔中心もしくは角膜の曲率中心を結ぶ直線（ここでは光軸と呼ぶ）と注視線のなす角を一定とみなせば注視線の測定と光軸の測定は等価であり、したがって光軸を測定すれば注視点が測定できることになる。

光軸は眼球の回転中心と瞳孔中心を測定することによって得られるが、眼球の回転範囲が十分小さく瞳孔中心が一つの平面上で動いているものとみなせば、瞳孔中心の位置の変化量のみによって注視点の測定が可能になる。このような注視点の測定方法は、角膜反射像を用いて注視点を測定したMackworth⁶⁾ら以後使用されている注視点測定装置の基本原則といえるであろう。

眼球が一点を中心にして回転しているのであれば、眼球の回転範囲が大きい場合は上記の方法では平面投影による投影歪みが生じ、測定精度に影響すると考えられる。Nakayamaはこのことを考慮し、眼球が一点を中心に回転しているとした場合に投影歪みを無くす眼球測定モデルを示した⁸⁾。さらにMooreらは、較正によって回転中

心を測定する方法を示した^{2) 7)}。この方法では、測定された瞳孔中心の位置から実際の瞳孔中心の位置を推定するので眼球の光軸のシミュレートが可能であり、精度の高い測定が期待される。

筆者らはこれまで瞳孔中心法に球面推定を取り入れた注視点測定の研究を行ってきたが³⁾、これまでの研究では、推定される軌跡球面の半径が垂直方向と水平方向で異なる傾向が見られるため、球面推定で注視点測定の精度を向上させるのは難しいという結果を得ている。そこで、球面の代わりに楕円体を推定する方法を用いたところ、注視点の測定精度を向上させることができた。本稿はこの方法と実験結果を報告するものである。

2. 注視点測定の較正

2.1 平面補間による注視点測定

瞳孔中心追跡による眼球の回転量と注視点を対応づける最も単純な方法は、カメラに投影された瞳孔中心の座標を拡大して注視平面に重ね合わせ、注視点の変位が瞳孔中心の変位と同じになるように大きさを調整する方法である。この手法は、Mackworthらがカメラに投影された角膜反射像に対して適用した方法⁶⁾であるが、瞳孔中心に対しても同様に適用できる。

上記の方法を発展させた方法として、平面補間の使用が考えられる。平面補間では、注視平面上のいくつかの点を注視した時の投影された瞳孔中心の座標を記録し、カメラの投影面を記録した座標を頂点とする三角形に分割する。注視平面も対応する三角形で分割する。ある瞳

平成12年12月15日受付

* 知能システム学専攻博士後期課程

** 知能システム学部門

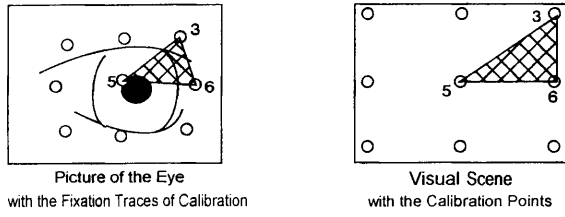


Fig.1 Mapping pupil center on the picture of the eye to fixation point by plane interpolation.

瞳孔中心座標が検出された時の注視点は、投影面上の三角形の頂点からの距離の割合を注視平面上の対応する三角形で比例配分した点とする。たとえばFig. 1において、視標面上の点3,5,6を注視させた時の瞳孔中心が撮像面上の点3,5,6で検出されたとする。撮像面上の点5を始点、6を終点とするベクトルを \vec{a}_p 、3を終点とするベクトルを \vec{b}_p とおく。3,5,6を頂点とする三角形(網かけ部分)上の点は一般に点5を原点として

$$\vec{x}_p = t\vec{a}_p + u\vec{b}_p \quad (1)$$

で表される。そこでこの式から瞳孔中心が \vec{x}_p に検出された時のt,uを測定前較正で計算しておく。視標面上では、撮像面上の \vec{a}_p, \vec{b}_p に対応するベクトルを \vec{a}_v, \vec{b}_v とすると、 \vec{x}_p に対応する点は

$$\vec{x}_v = t\vec{a}_v + u\vec{b}_v \quad (2)$$

によって得ることができる。

2.2 楕円体推定による回転角測定

瞳孔中心が常にある楕円体の表面上を動いているものと仮定すると、4つの眼球画像上の瞳孔中心の座標から楕円体を推定することができる。以下、頭部系を頭骨上に固定された左手座標系、投影系をカメラ上に固定された左手座標系とする。較正点1~4を注視している時の瞳孔中心の、投影系における座標を次のようにおく、

$$\vec{v}_n = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (n = 1 \dots 4) \quad (3)$$

頭部系を投影系に変換する座標変換が、回転Aと平行移動 \vec{d} によって

$$\vec{x}_p = A \cdot \vec{x}_h + \vec{d} \quad (4)$$

で表されるものとする。ただし、

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad \vec{d} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}$$

とする。座標系をFickの左手系で取ることにすると、Aは回転パラメータ θ_a, ϕ_a, ψ_a を用いて

$$A = \begin{bmatrix} \cos \theta_a \cos \phi_a \cos \psi_a + \sin \theta_a \sin \phi_a \cos \psi_a & \cos \theta_a \cos \phi_a \sin \psi_a - \sin \theta_a \sin \phi_a \sin \psi_a & \sin \theta_a \cos \phi_a \\ \sin \theta_a \cos \phi_a \cos \psi_a + \cos \theta_a \sin \phi_a \sin \psi_a & \sin \theta_a \cos \phi_a \sin \psi_a - \cos \theta_a \sin \phi_a \sin \psi_a & \cos \theta_a \sin \phi_a \\ -\sin \phi_a & \cos \phi_a \sin \psi_a & \cos \phi_a \cos \psi_a \end{bmatrix} \quad (5)$$

と表すことができる²⁾。頭部系において、基準視標注視時の瞳孔中心の座標を $(r, 0, 0)$ と置いて基準とする。ある較正点を注視した時の眼球の回転をRとすると、その時の瞳孔中心の投影座標は

$$\vec{x}_p = AR \cdot \begin{bmatrix} r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \vec{d} \quad (6)$$

である。ただし、眼球の水平、垂直方向の回転角をそれぞれ θ, ϕ として、Rは次の式で表されるFick系の回転行列である。

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & -\sin \theta \cos \phi & \sin \theta \sin \phi \\ \sin \theta \cos \phi & \cos \theta \cos \phi & \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

較正点n(n=1...4)を注視している時の眼球の回転が

$$R_n = \begin{bmatrix} Rn_{11} & Rn_{12} & Rn_{13} \\ Rn_{21} & Rn_{22} & Rn_{23} \\ Rn_{31} & Rn_{32} & Rn_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

で表される時、次の関係式が成り立つ。

$$\vec{v}_n = r \begin{bmatrix} A_{11}Rn_{11} + A_{12}Rn_{21} + A_{13}Rn_{31} \\ A_{21}Rn_{11} + A_{22}Rn_{21} + A_{23}Rn_{31} \\ A_{31}Rn_{11} + A_{32}Rn_{21} + A_{33}Rn_{31} \end{bmatrix} + \vec{d} \quad (9)$$

球ではなく楕円体を考える場合は、x,y,z軸方向の半径をそれぞれ r_x, r_y, r_z とすると、9式は

$$\vec{v}_n = \begin{bmatrix} (A_{11}Rn_{11} + A_{12}Rn_{21} + A_{13}Rn_{31})r_x \\ (A_{21}Rn_{11} + A_{22}Rn_{21} + A_{23}Rn_{31})r_y \\ (A_{31}Rn_{11} + A_{32}Rn_{21} + A_{33}Rn_{31})r_z \end{bmatrix} + \vec{d} \quad (n = 1 \dots 4) \quad (10)$$

に置き換えられる。10式を両辺から引いて成分別に整理すると、次の式が得られる。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ x_3 - x_1 \\ x_4 - x_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} y_2 - y_1 \\ y_3 - y_1 \\ y_4 - y_1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} z_2 - z_1 \\ z_3 - z_1 \\ z_4 - z_1 \end{bmatrix} \end{cases} = \begin{cases} r_x R_\Delta \\ r_y R_\Delta \\ r_z R_\Delta \end{cases} \begin{bmatrix} A_{11} \\ A_{12} \\ A_{13} \\ A_{21} \\ A_{22} \\ A_{23} \\ A_{31} \\ A_{32} \\ A_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

ただし

$$R_\Delta = \begin{bmatrix} R_{211} - R_{111} & R_{221} - R_{121} & R_{231} - R_{131} \\ R_{311} - R_{111} & R_{321} - R_{121} & R_{331} - R_{131} \\ R_{411} - R_{111} & R_{421} - R_{121} & R_{431} - R_{131} \end{bmatrix}$$

眼球中心の位置から見た各較正点の方向を予め測定しておけば7式により $R_{11} \dots R_{41}$ を得ることができる。これらの両辺に R_Δ^{-1} を掛けることにより、 $(r_y A_{21}, r_y A_{22}, r_y A_{23}), (r_z A_{31}, r_z A_{32}, r_z A_{33})$ を得ることができる。 r_y, r_z は次の式から得ることができる。

$$\begin{aligned} r_y &= \sqrt{(r_y A_{21})^2 + (r_y A_{22})^2 + (r_y A_{23})^2} \\ r_z &= \sqrt{(r_z A_{31})^2 + (r_z A_{32})^2 + (r_z A_{33})^2} \end{aligned} \quad (12)$$

また、同時に $A_{21}, A_{22}, A_{23}, A_{31}, A_{32}, A_{33}$ が得られる。なお、 $x_1 \dots x_4$ はカメラに垂直な成分であり、計測不能なので r_x は不定となる。したがって r_x には適当な数値を当てはめることになるが、その数値としては r_y もしくは r_z が考えられる。そこで今回は、 $r_x = r_y$ の楕円体 E_1 と $r_x = r_z$ の楕円体 E_2 を考え、 θ 方向の回転は E_1 、 ϕ 方向の回転は E_2 を用いて計算することにした。

座標系間の回転角は次の式で得ることができる。

$$\begin{aligned} \theta_a &= \sin^{-1} \left(\frac{A_{21}}{\sqrt{A_{32}^2 + A_{33}^2}} \right) \\ \phi_a &= -\tan^{-1} \left(\frac{A_{31}}{\sqrt{A_{32}^2 + A_{33}^2}} \right) \\ \psi_a &= \tan^{-1} \left(\frac{A_{32}}{A_{33}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

これにより、回転行列 A を求めることができる。また、10式によって d_y, d_z を得ることができる。

較正点をTable-1の4点で与えた場合、

$$R_\Delta = \begin{bmatrix} \cos \theta_c - 1 & \sin \theta_c & 0 \\ \cos \phi_c - 1 & 0 & -\sin \phi_c \\ \cos \theta_c - 1 & -\sin \theta_c & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

であり、これを使って A, \vec{d} を求めることができる。

この較正後は、眼球画像上の瞳孔中心の座標が (v_x, v_y, v_z) であったときの眼球の回転行列は

Table-1 The directions of calibration points.

較正点	θ	ϕ
1	0	0
2	θ_c	0
3	0	ϕ_c
4	$-\theta_c$	0

$$R = A^{-1} \begin{bmatrix} (v_x - d_x)/r_x \\ (v_y - d_y)/r_y \\ (v_z - d_z)/r_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

回転角は

$$\begin{aligned} \theta &= \tan^{-1} \left(\frac{R_{21}}{R_{11}} \right) \\ \phi &= -\sin^{-1}(R_{31}) \end{aligned} \quad (16)$$

また、視標面の水平方向をY軸、垂直方向をZ軸、眼球の回転中心から視標面までの距離をDとすると、注視点は

$$\begin{aligned} y &= D \tan \theta \cos \phi \\ z &= D \sec \theta \tan \phi \end{aligned} \quad (17)$$

と計算できる。

2.3 楕円体推定による注視点測定

前節の方法によれば、楕円体推定を用いた注視点測定は、投影された瞳孔中心の座標から楕円体表面上の瞳孔中心の座標を推定し、その時の視線から注視点を計算することによって行うことができる。しかし実際には単にこの方法を使うだけでは、推定した楕円体と実際の瞳孔中心の軌跡の差があるため、冒頭の定義による注視点と推定される注視点の間にずれが生じる。このずれを小さくするために筆者らは、楕円体を用いて計算される注視点とその時に注視させた視標の座標を平面補間によって対応付ける方法を考案した(Fig. 2)⁴⁾。

この方法では、まず被験者に較正点を注視させ、その時の眼球画像上の瞳孔中心の位置を記録する。これと眼球からみた較正点の方向と距離の実測値とから、瞳孔中心が表面を通るような楕円体を推定する(1)。次に、較正点を注視した時の眼球画像上の瞳孔中心の位置に対応する(1)の楕円体上の瞳孔中心の位置を計算する。楕円体の中心と楕円体上の瞳孔中心の位置を結んで延長し、視標面と交わった点を注視点とする(2)。最後に、(2)で得た注視点を結んで注視面上に三角形を作る。較正点も同様に結んで三角形を作り、平面補間を行う(3)。このような手順を踏むことで、推定した楕円体を用いて画像上の瞳孔中心の位置を注視点に対応付けることができる。

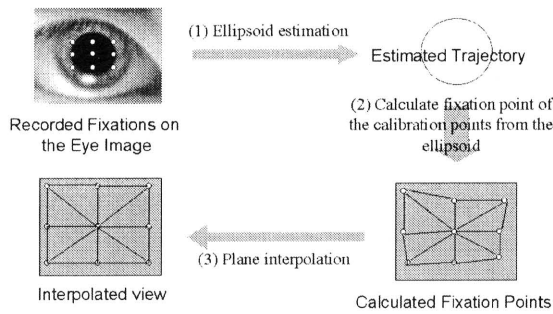


Fig.2 Measuring fixation point with an ellipsoid estimation.

3. 実 験

較正を平面補間のみで行った場合と楕円体推定を用いた場合での注視点の測定精度を、以下の方法により比較した。

3.1 装置

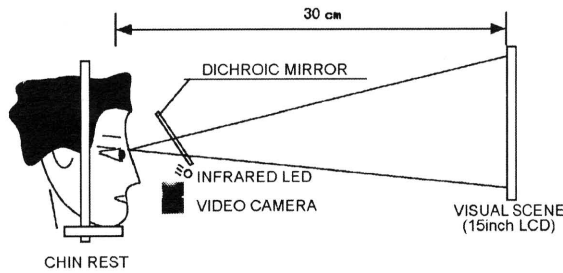


Fig.3 Apparatus.

測定装置を Fig. 3 に示す。被験者には顎を顎台に置き、頭部をゴムひもで固定した。前方には可視光を透過し赤外線を反射するダイクロイックミラー(高さ20cm幅30cm)を地面に対して45度の角度で、またその中心から眼球までの距離が約10cmとなるように設置した。また、被験者の右眼正面下方約40度の位置に赤外ダイオードを取り付け、右眼に向けて照射した。ダイクロイックミラーの下方には赤外領域を撮影できるモノクロCCDビデオカメラ(KONICA KS-30, レンズCOSMICAR B7514C, 接写リング20mm)を光軸を上方に向けて設置した。

赤外ダイオードで眼球前面を照射すると、反射光はダイクロイックミラーで反射して下方のビデオカメラに入る。瞳孔部分はその周辺に比べて特に赤外線をよく吸収し、黒い楕円として撮影される。ビデオカメラで得られる画像をA/D変換器(Data Translation DT3155)とコンピュータにより幅320ピクセル、高さ240ピクセルに処理し、この楕円の中心点を15Hzでリアルタイム検出して記

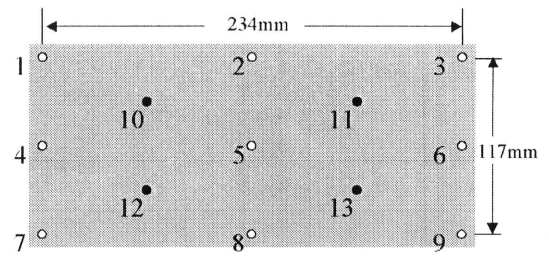


Fig.4 Calibration(open circle) and midway(closed circle) points.

録した。

3.2 方法

被験者にはダイクロイックミラーを通して30cm前方の液晶ディスプレイ装置(表示部の幅30cm、高さ22cm)に表示される視標を注視させた。視標は半径5mmの赤い円と半径1mmの黒い円の同心円とした。被験者は左眼を眼帯で覆い、ディスプレイ中の幅23.4cm高さ11.7cmの長方形の領域内の13点のうち1点に視標を呈示した(Fig. 4)。視標呈示領域の水平視角と垂直視角はそれぞれ43°, 22°であった。被験者には呈示される視標の中心の黒い部分を注視するように指示した。視標を1から13まで順番にそれぞれ5秒間呈示して1試行とし、続けて3試行を行った。

視標をある点に呈示すると、画像上の瞳孔中心は500ms以内で別の場所から大きく移動し、その後その周辺で小さく移動する。そこで、この視標に対応する瞳孔中心の位置を小さな移動領域の中心と考え、次のように算出した。

「瞳孔中心の座標を画像の縦、横方向で表し、それぞれの5秒間の中央値をこの視標位置に対する瞳孔中心の位置とする。」

この方法で、Fig. 4の白丸1~9で示す9較正点に対応する瞳孔中心を得た。次に、前章で挙げた: C_1 平面補間による注視点測定 C_2 楕円体推定と平面補間による注視点測定 の2つの方法を適用し、任意の瞳孔中心位置に対して C_1, C_2 それぞれの方法で注視点の推定が行えるように較正を行った。 C_1 用の較正は、上記の9点に前章の方法を適用することによって行った。 C_2 用の較正では、白丸4,5,6,8の4点に対応する瞳孔中心の位置から楕円体推定を行い、その楕円体を用いて白丸9点に対応する注視点を算出し、平面補間を行った。

最後に、中間点10~13を注視している時に検出された瞳孔中心の位置から、 C_1, C_2 それぞれの方法によって注視点を算出した。各点5秒間分の注視点のうち、中間点の呈示位置からの水平、垂直方向いずれかのずれが5度以上のものは除き、残りの点について重心を取って中間点に対応する注視点とした。

注視方向に依存しない注視点の測定精度を考える。 C_1, C_2 どちらの較正を用いた場合でも、注視点の測定精度が最も悪いのは較正点からの距離が最も遠い中間点付近である。したがって、中間点の呈示位置と対応する注視点のずれの量は全注視方向に関する注視点測定精度であるといえる。そこで、このずれの量をそれぞれの較正法で算出して比較した。

被験者は20代の男性4人とした。

4. 実験結果

同一の瞳孔中心測定データに対して中間点の注視点推定を C_1 :平面補間のみ用いた場合、 C_2 :楕円体推定と平面補間を用いた場合、 C_3 : C_1 と C_2 の midpoint の3条件について行い、視標呈示位置からのずれを比較した。

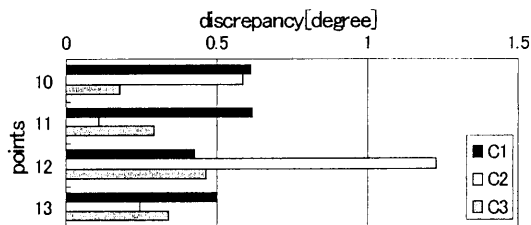


Fig.5 The horizontal discrepancies from the target to the midway points 10 to 13 shown on Fig. 4 (degrees).

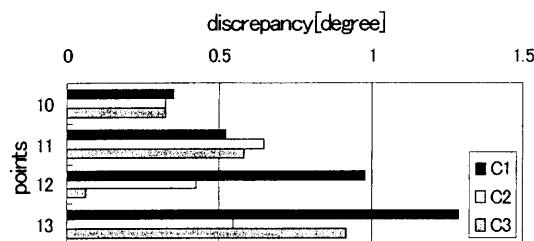


Fig.6 The vertical discrepancies from the target to the midway points 10 to 13 shown on Fig. 4 (degrees).

4.1 水平方向の精度

Fig. 5は視標から推定注視点までの水平方向のずれを視角に換算して表したものである。中間点11,13では C_1 に比べて C_2 のずれが小さく、楕円体推定の効果が表れている。中間点10では C_3 のずれが最も少なく、中間点12では C_1 と C_3 のずれは同程度であった。

4.2 垂直方向の精度

Fig. 6は視標から推定注視点までの垂直方向のずれを視角に換算して表したものである。中間点13では C_2 のずれが最も小さく、中間点12では C_3 のずれが最も小さかった。

4.3 注視点の測定精度

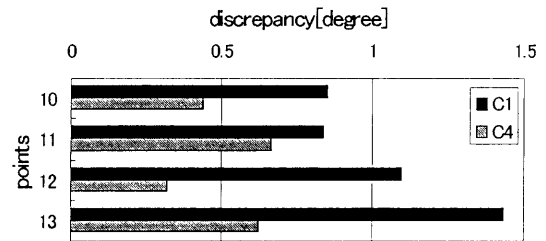


Fig.7 The square-root of horizontal and vertical discrepancies. C4 exceeded C1 in coincidence of the positions of the target with the estimated fixation points.

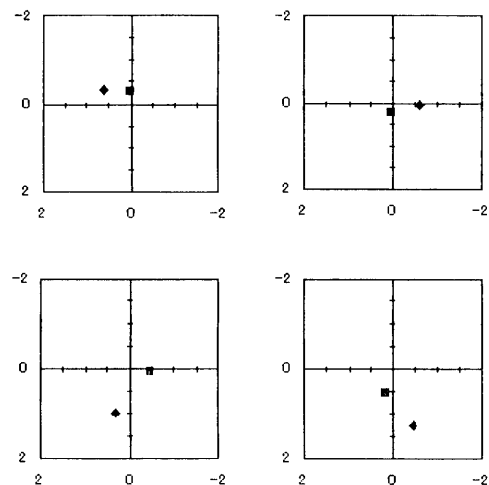


Fig.8 Calculated fixation points correspond to the midway points [degrees]. The upper left, upper right, lower left and lower right plots correspond to gazing midway points 10, 11, 12 and 13 of Fig. 4 respectively. Each origin is derived from the center of the midway visual target. ◆: C1, ■: C4; indicating the center of the gravity of all the subjects.

注視点の測定精度 D_n は、水平方向、垂直方向のずれをそれぞれ $D_n(\theta)$, $D_n(\phi)$ として、次の式によって得ることができる。

$$D_n = \sqrt{D_n(\theta)^2 + D_n(\phi)^2} \quad (18)$$

水平,垂直成分の測定結果から,水平成分に関しては,中間点10,12を含む領域,すなわち鼻側については C_3 を,それ以外の領域には C_2 を適用し,垂直成分に関しては全て C_2 を適用すれば, C_1 に比べて高い精度の測定が実現できるものと考えられる.そこでこの方法を C_4 として,18式を C_1 と C_4 に適用して比較したところ,Fig. 7およびFig. 8に示す結果を得た.最大のずれをそれぞれの方式での精度と考えると, C_1 の精度 1.4° に対し C_4 では 0.7° であり, C_4 は従来に比べて2倍の精度を実現しているといえる.

5. 考 察

実験の結果により,楕円体推定と平面補間を用いた較正法は,瞳孔中心追跡による注視点の測定精度向上に有効なことが示されたといえるであろう.

注視点の測定精度は較正点の数や測定視角の大きさに影響される.楕円体推定と平面補間による方法をこのような観点から整理すると次のようになる.まず,較正点の数は補間の観点からは多くて密度が高いほうが測定精度を向上させる.しかし較正点の数が多いことは測定のしやすさを減じるだけでなく,較正中に測定装置と頭部の位置関係がずれて測定精度を低下させる原因ともなる.したがって較正点の数は要求精度に対して必要最小限にするのが最も良い.楕円体推定と平面補間を行う方法は,少ない較正点数でできるだけ精度を上げるための試みである.

次に,測定視角が大きい注視点測定を行う場合は,視線がカメラの光軸から外れるにしたがって注視方向の移動量に対する投影された瞳孔中心の移動量は小さくなっていく.測定精度を維持するためには較正点を増やすのが1つの方法であり,例えばHutchinsonらは20個近くの較正点を使用している⁵⁾.しかしながら,眼球内部の点が動く範囲は球や楕円体のような形状の表面の一部として捉えることができ,特に測定視角が大きい場合その性質が強調される.楕円体推定と平面補間による方法は,較正点を増やさずに精度を維持する試みでもある.

加えて眼球運動測定ではカメラ等のセンサの取付角度・場所の微調整が面倒で,測定の効率を低下させることも多いが,これはカメラの光軸と眼球の光軸が一致していることを前提にした測定システムになっているので個人差の吸収を機械的な微調整にすべて依存していることによる.眼球の回転中心を較正時に測定する方法は計算機の演算によって眼球の光軸を得るので,機械的な操作なしに個人差に対応でき,測定の効率向上にも寄与する.

またこの結果は同時に,瞳孔中心の軌跡に関して示唆を与えるものである.眼球の鼻側変位に対して C_4 の方法が測定精度を向上させたことは,鼻側変位に対する眼球

の動きについて,回転だけでなく平行移動が起きていることを示していると考えられる.眼窩内の眼球の回転中心の動きに関して,Enrightは輻輳運動時の眼球を前方と側方から同時に撮影した結果,内転時の回旋点は前方に移動するという結論を得ている¹⁾.またMooreらは回旋測定に球推定を適用した場合の回旋点の平行移動について,視角 10° 以内の測定では無視できるが影響があることを示唆する考察を行っている.回旋点の動きの詳細がわかれば注視点の測定精度を向上させるのに役立つ可能性もある.

6. ま と め

注視点を高精度で測定するための較正法として楕円体推定と平面補間を用いる方法を提案した.この方法と平面補間による従来法の注視点測定精度を実測により比較した結果,幅43度,高さ22度の範囲の測定においておよそ2倍の精度が見込まれることがわかった.

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) Enright, J. T.: Saccadic Anomalies: Vergence Induces Large Departures From Ball-And-Socket Behavior. *Vision Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 301-308 (1984).
- 2) Haslwanter, T.: Mathematics of Three-dimensional Eye Rotations. *Vision Research*, Vol. 35, No. 12, pp. 1727-1739 (1995).
- 3) 早見武人, 志堂寺和則, 松永勝也: 球形モデルを用いた画像分析方式両眼眼球運動測定装置の開発. 第55回情報処理学会講演論文集, Vol. 2, p. 170(1997).
- 4) 早見武人, 志堂寺和則, 松永勝也: 楕円体推定と注視面補間を用いた注視点測定法の検討. 第53回電気関係学会九州支部連合会大会講演論文集, p. 450(2000).
- 5) Hutchinson, T. E., White, K.P. Jr., Martin, W. N., Reichert, K. C. and Frey, L. A.: Human-Computer Interaction Using Eye-Gaze Input. *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 19, No. 6, pp. 1527-1534 (1989).
- 6) Mackworth, J. F. and 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).
- 7) Moore S. T., Haslwanter T., Curthoys I. S. and Smith S. T.: A Geometric Basis for Measurement of Three-dimensional Eye Position Using Image Processing. *Vision Research*, Vol. 36, No. 3, pp. 445-459 (1996).
- 8) Nakayama K.: Photographic Determination of the Rotational State of the Eye Using Matrices. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, Vol. 51, pp. 736-741 (1974).