

# 論文

## 瞳孔径変化による虹彩パターン伸縮のモデル化と眼球回旋運動計測への応用

橋本 勉<sup>†</sup>      牧 孝郎<sup>†</sup>      坂下 祐輔<sup>††</sup>      西山 潤平<sup>†</sup>  
 藤吉 弘亘<sup>†</sup>      平田 豊<sup>†a)</sup>

### A Model of the Iris Pattern Stretches in Relation to Pupil Diameter and Its Application to Measurement of Roll Eye Movements

Tsutomu HASHIMOTO<sup>†</sup>, Yoshio MAKI<sup>†</sup>, Yusuke SAKASHITA<sup>††</sup>,  
 Junpei NISHIYAMA<sup>†</sup>, Hironobu FUJIYOSHI<sup>†</sup>, and Yutaka HIRATA<sup>†a)</sup>

あらまし 眼球運動は外界三次元空間の脳内表現を反映することから、脳・神経科学等の基礎科学分野から人間工学等の応用分野まで、様々な学問領域の研究対象とされている。眼球運動は Yaw, Pitch, Roll 成分からなるが、本研究では、一般に高精度計測が困難とされている Roll 運動である眼球回旋運動を精度良く計測するための方法を提案する。提案法は、虹彩パターンの非線形な伸縮特性を定式化し、これを用いて、異なる瞳孔径にある虹彩パターン間のマッチング精度を上げるものである。評価実験の結果、虹彩伸縮を考慮しない方法や従来法に比べ大幅な精度向上が得られることを示す。

キーワード 眼球運動, 回旋計測, 虹彩パターン, 瞳孔

### 1. ま え が き

眼球運動は外界三次元空間の脳内表現を反映することから、脳・神経科学等の基礎科学分野から人間工学等の応用分野まで、様々な学問領域の研究対象とされている。眼球運動は三次元回転運動であり、一般に水平 (Yaw), 垂直 (Pitch), 回旋 (Roll) 成分で表される。こうした眼球運動の計測用に様々な方法が開発されており、三次元回転運動を同時に計測できる方法としてサーチコイル法 [1], [2] とビデオ映像に基づく方法が提案されている。サーチコイル法は精度良く三次元眼球運動を計測できるが、眼にコイル付きコンタクトレンズを装着する必要がある、被験者の負担が大きく長時間の計測が困難という問題がある。ビデオ映像に基づく方法にも、マーク付コンタクトレンズを装着

させるもの [3] や輪舞結膜上に指標用の色素を付着させるもの [4] など、眼球への侵襲を伴う方法もあるが、非侵襲で被験者への負担が少ない虹彩パターンを利用する方法が一般的である。この方法では、眼球画像からの抽出が容易な瞳孔中心の縦・横方向の移動量として求められる垂直・水平眼球運動は簡単なアルゴリズムによって計測される。一方、瞳孔中心軸回りの Roll 回転である回旋運動は、計測基準時刻における虹彩パターンと計測対象時刻における虹彩パターンをマッチングする方法 [5]~[12] や虹彩パターン内の局所特徴領域をトラッキングする方法 [13], [14] により計測されるが、瞳孔径に依存して虹彩パターンが大きく変化すると、計測精度が低下する問題がある。瞳孔径は外界の光強度や被験者の注視点までの距離に依存して変化する他、これらの条件が一定でも常に揺らいでいることが知られている [15]。したがって、瞳孔径に依存した虹彩パターンの変化は、平衡機能検査における回旋性前庭動眼反射計測や、種々の視覚刺激条件下で行われる心理物理実験時の回旋角計測等で大きな問題となる。堺らは、撮影輝度環境を徐々に変化させ、瞳孔径が約 0.1 mm 変化するごとに虹彩パターンをテーブル化し、

<sup>†</sup> 中部大学工学部情報工学科, 春日井市

Department of Computer Science, Chubu university, 1200 Matsumoto-cho, Kasugai-shi, 487-8501 Japan

<sup>††</sup> (株) ニデック, 蒲郡市

NIDEK CO., LTD., 34-14 Maehama, Hiroishi-cho, Gamagori-shi, 443-0038 Japan

a) E-mail: yutaka@isc.chubu.ac.jp



テーブルルックアップにより計測対象時刻の瞳孔径に最も近い瞳孔径をもつ基準虹彩パターンとの比較を行う手法を提案した [7]. しかし, テーブルの作成に時間がかかるほか, 各瞳孔径の基準をすべて 0 と定義することは厳密には正しくないことから, この方法により回旋運動を高精度に計測することは難しい. 朝比奈らは, 瞳孔径に依存した虹彩パターンの変化の様子をとらえる実験を行い, 虹彩巻縮輪の特に瞳孔縁に近い部分の虹彩パターンは瞳孔径によらずほぼ一定であることを確認した [8]. これにより, 瞳孔エッジ付近の虹彩パターンのみをマッチングに用いることで瞳孔径変化に対応したが, 取得できる虹彩パターンの情報量が少なくなってしまう, 高精度の計測は困難と考えられる. これまで, 瞳孔径変化に伴う虹彩パターン伸縮特性をモデル化したものとして, 虹彩認識時の虹彩パターン正規化用に開発された Yuan と Shi の非線形正規化モデル [16] がある. このモデルは Wyatt の虹彩線維伸縮の Minimum-wear-and-tear meshwork 仮説 [17] を元に, 虹彩パターンの瞳孔径依存性を非線形関数で記述したものであるが, (1) 瞳孔を真円と仮定した定式化となっている, (2) モデルの妥当性を直接的に実験で確認していない等の問題がある.

本研究では, まず実験により瞳孔径変化による虹彩伸縮特性を明らかにする. 次に, これを近似するための線形ゴムひもモデルを提案し, このモデルを用いた虹彩パターン変換法を提案する. 更に, 種々の光環境下において瞳孔径が異なる際の回旋性前庭動眼反射誘発実験を実施し, その際の眼球回旋角計測にこの変換法を適用することにより, その有効性を確認する.

## 2. 瞳孔径変化による虹彩パターンの伸縮特性

瞳孔径の変化による虹彩パターンの伸縮特性を調べるために, 次の実験並びに解析を行った. 暗室において, 赤外線小型 CCD カメラ付眼球映像撮影装置 (ニューオプト ET-60-L) により両眼眼球映像を撮影中, 被験者の眼に白色 LED フラッシュを照射した. これにより図 1 に示すような瞳孔のフラッシュ応答が誘発され, 瞳孔径が変化する. 撮影した動画を 1 フレームごとの静止画に分割し, 瞳孔径が最大となるフレームから最小となるフレームまで 24 枚を選択した (図 1 ○印). 虹彩パターン中の特徴点 26 個を適当に定め, 24 フレームすべてにわたり, 目視によりこれらの点を追跡した. 図 2 に示すように, 各特徴点は上方向を

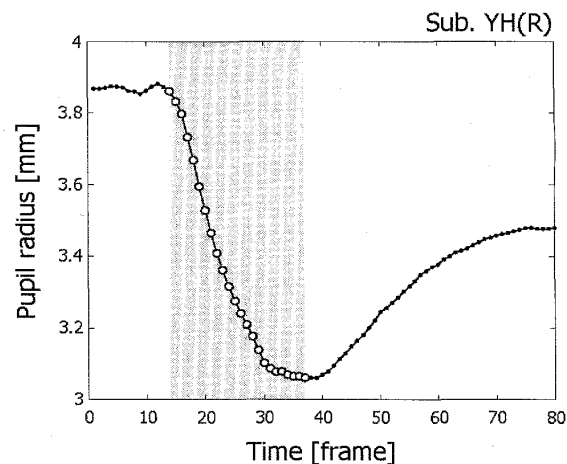


図 1 フラッシュ応答による瞳孔径変化  
Fig. 1 Change in pupil radius in response to a flash stimulus.

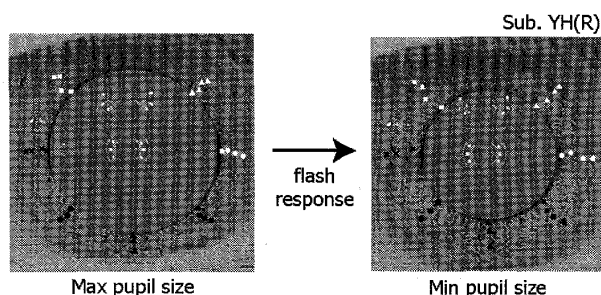


図 2 フラッシュ応答による縮瞳に伴う虹彩パターンの変化  
Fig. 2 Change in iris pattern due to pupil contraction.

除く 45 度刻みの 7 方向の放射軸上付近で, 各方向最大 4 点設定した. 図 3 に瞳孔径変化による各特徴点の放射軸方向の移動特性を示す. この図で横軸は解析した 24 枚の画像中の瞳孔半径, 縦軸は各瞳孔半径における各特徴点の瞳孔中心からの距離を表している. 図中の直線は, 各特徴点の移動特性に対する回帰直線である. 各直線の色, 線種は図 2 における特徴点の記号 (黒実線と白丸, 黒点線と黒丸, 灰色実線と三角, 灰色点線と四角) に対応している. これより, 瞳孔半径  $r$  のときの各特徴点の瞳孔中心からの距離  $d$  は, 回帰直線の傾き  $a$ , 切片 (瞳孔径 0 の際の仮想位置)  $b_0$  により, 以下の式でよく近似できることが分かる (決定係数  $R^2 > 0.82$ ).

$$d = a \cdot r + b_0 \quad (1)$$

図 3 では, 瞳孔中心に近い特徴点ほど回帰直線の傾きは大きく, 遠ざかるにつれて小さくなるように見える. この特徴点の位置と回帰直線の傾きの関係調べるために, 瞳孔径 0 の際の仮想位置  $b_0$  と各特徴点の



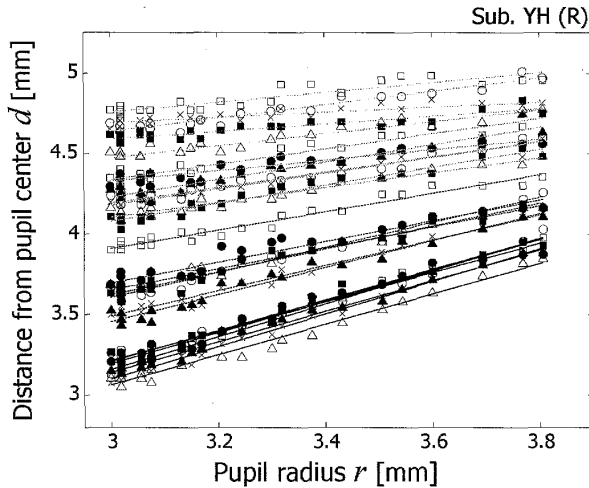


図3 瞳孔半径と虹彩パターン特徴点の瞳孔中心からの距離の関係

Fig. 3 Relationship between pupil radius and characteristic points in an iris pattern.

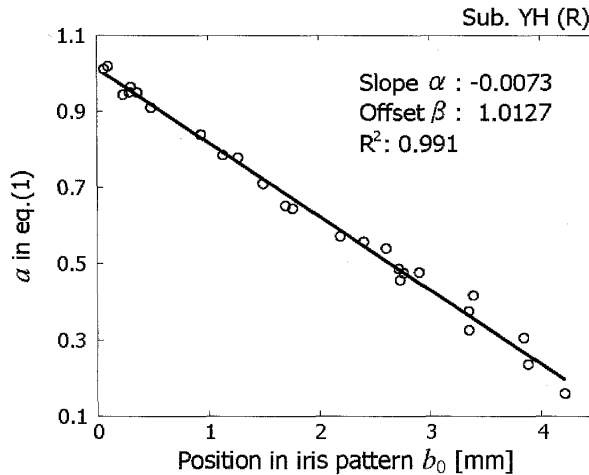


図4 瞳孔径0時の各特徴点の仮想位置と式(1)の傾きの関係

Fig. 4 Relationship between  $b_0$  and  $a$  in Eq. (1).

回帰直線の傾き  $a$  の関係を求めた。その結果を図4に示す。図中の直線は回帰直線であり、虹彩中の特徴点の位置  $b_0$  と図3の回帰直線の傾き  $a$  の関係も一次式でよく近似できることが分かる ( $R^2 = 0.991$ )。したがって、図4における回帰直線の傾き  $\alpha$  と切片  $\beta$  により、図3並びに式(1)の直線の傾き  $a$  は以下の式で表せる。

$$a = \alpha \cdot b_0 + \beta \quad (2)$$

これと同様の解析を3名の被験者 (YH, TO, JN) に対して行い、いずれの場合にも、図3並びに図4と同様の結果が得られることを確認した。その際の直線近似における決定係数  $R^2$  と  $\alpha$ ,  $\beta$  の値、フラッシュ

表1 式(2)の  $\alpha$ ,  $\beta$  の左右眼並びに被験者依存性  
Table 1 Dependencies of  $\alpha$  and  $\beta$  in Eq. (2) on subjects and R/L eyes.

Subject	YH(R)	TO(R)	JN(R)
min $R^2$ in fig.3	0.82	0.70	0.79
Slope $\alpha$	-0.0073	-0.0076	-0.0076
Offset $\beta$	1.0127	1.0174	1.0233
$R^2$ in fig.4	0.991	0.983	0.957
Pupil radius range [mm]	3.000 - 3.806	2.550 - 3.375	2.119 - 2.644

応答時の瞳孔径範囲を表1にまとめる。これより、被験者 (YH, TO, JN) における  $\alpha$  と  $\beta$  は、近い値となっている。特に、 $\beta$  はいずれも1に近い値となっている。このことは式(2)における  $b_0$  が0、すなわち、図3において瞳孔のエッジにある特徴点の直線の傾きは1になることを示しており、妥当な値が推定されていることが確認できる。

### 3. ゴムひもモデルによる虹彩パターン伸縮特性の同定

前章では、瞳孔径変化に伴う虹彩パターン内の特徴点移動は瞳孔径に対して線形的でありながら、その傾きは特徴点の瞳孔中心からの距離に依存することを示した (図3)。すなわち、虹彩内側の特徴点ほど、瞳孔径変化に対しより大きな傾きで線形的に移動する。また、この傾きの虹彩内位置依存性も図4のように直線的であることを示した。こうした性質は、以下の議論のようにゴムひもの伸縮特性と高い類似性をもつ。

まず、瞳孔径変化による虹彩の伸縮は、瞳孔中心を始点とした放射軸方向で主に起こることから、ここでは図5のように、一つの放射軸上の虹彩パターンの移動を考える。図5 A, B, C は、異なる瞳孔径における一つの放射軸上の虹彩特徴点の移動を模式的に記したものである。ここで、この軸上に瞳孔のエッジ (▲) から虹彩外側のエッジ (●) まで張られたゴムひもがあるとする。瞳孔径が変化すると、▲は瞳孔径とともに動き、●の位置は不変である。すなわち、▲、●の位置とも瞳孔径に対して線形に変化し、前者の傾きは1、後者の傾きは0とみなせる。ゴムひも上で虹彩外側のエッジから任意の距離  $\tilde{r}$  の位置にある特徴点 (◆, ★, ■) の場合も、同様に瞳孔径に対して線形に放射軸上の位置が変化することになり、その傾きは

$$a = \frac{\tilde{r}}{I_r - r} \quad (3)$$

$$\tilde{r} = I_r - d \quad (4)$$



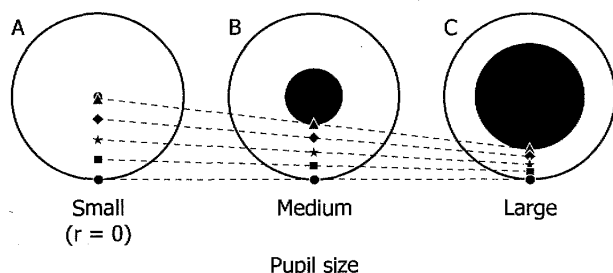


図5 ゴムひもモデルと虹彩パターンの伸縮特性  
Fig.5 Rubber string model and iris pattern stretch.

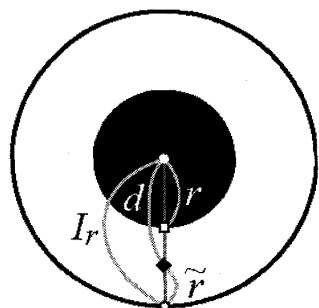


図6 ゴムひもモデルにおける瞳孔径 ( $r$ ), 虹彩エッジから特徴点までの距離 ( $\tilde{r}$ ), 虹彩径 ( $I_r$ )  
Fig.6 Pupil radius ( $r$ ), distance from iris limbus to characteristic point in iris pattern ( $\tilde{r}$ ) and iris radius in rubber model ( $I_r$ ).

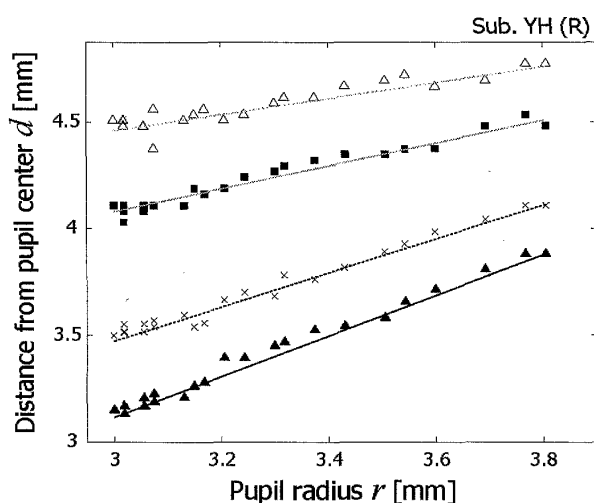


図7 ゴムひもモデルによる実験データの再現  
Fig.7 Verification of the rubber model to describe the iris pattern stretches.

となる (図6). これは, ゴムひもの伸縮においては, ゴムひもの長さ (図6における  $I_r - r$ ) とひも上のある点までの距離 (同  $\tilde{r}$ ) の比が保存される性質による.

瞳孔径に対する虹彩パターンの伸縮特性を近似する上でこのモデルの妥当性を確認するため, 前章で示した実験結果 (図3) と式 (3), (4) による予測を比較した. その結果を図7に示す. 瞳孔中心からの距離

表2 ゴムひもモデルによる虹彩パターン伸縮特性の近似精度

Table 2 Evaluation of the rubber string model to approximate iris pattern stretches.

Subject	YH(R)	TO(R)	JN(R)
mean residual [mm]	0.033	0.044	0.033
mean $R^2$	0.85	0.85	0.89

が異なる代表的な四つの特徴点 (図3における黒実線, 黒点線, 灰色実線, 灰色点線) の実験結果 ( $\blacktriangle$ ,  $\times$ ,  $\blacksquare$ ,  $\triangle$ ) と, ゴムひもモデルで予測された各特徴点の瞳孔径依存直線を示してある. この図から, モデルが実験データをよく近似していることが分かる. ここでは, 代表的な四つの特徴点のみに関する結果を示したが, 図3におけるすべての特徴点に関する同様のゴムひもモデルによる近似結果 (全特徴点の実験値とこのモデルによる推定値の残差二乗和平方根の平均値: mean residual, 決定係数の全特徴点にわたる平均値: mean  $R^2$ ) を3人の被験者について評価し, その結果を表2に示す. 平均決定係数 mean  $R^2$  は, 全被験者において高い値が得られ, また, 残差平均 mean residual も最大でたかだか 0.044 [mm] となっており, ゴムひもモデルが実際の虹彩内特徴点の移動特性を少なくとも表1に示した瞳孔径変化範囲において被験者によらずよく近似していることが分かる.

#### 4. 眼球回旋角推定手順

前章までに, 瞳孔径の変化に対する虹彩パターンの伸縮特性をゴムひもモデルにより良好に近似できることを示した. 本章では, この特性を考慮した眼球回旋角推定手順をまとめる.

眼球回旋角推定は, 以下の順に行う.

- 瞳孔部検出
- 虹彩パターンの切出しとゴムひもモデルによる変換
- 回旋角算出

以下に各処理の手順を述べる.

##### 4.1 瞳孔部検出

瞳孔は虹彩の内側にあり, 虹彩パターンを取得する際の基準となるため, まず瞳孔を検出する必要がある. ここでは, 撮影動画の各フレームに対し, 高精度に瞳孔を抽出できる瞳孔部の楕円近似法 [5] を用いて瞳孔の中心座標 ( $x_0, y_0$ ), 長軸  $r_l$ , 短軸  $r_m$ , 傾き角  $\phi$  を求めた (図8左).



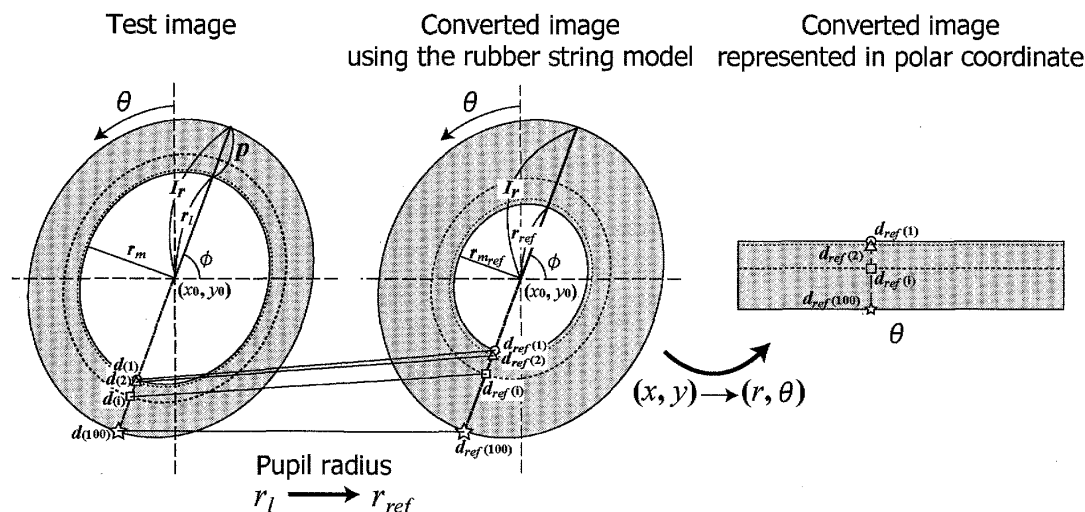


図 8 虹彩パターン伸縮特性を考慮した虹彩パターンの抽出

Fig. 8 Extraction of the iris pattern taking the nonlinear iris pattern expansion into account.

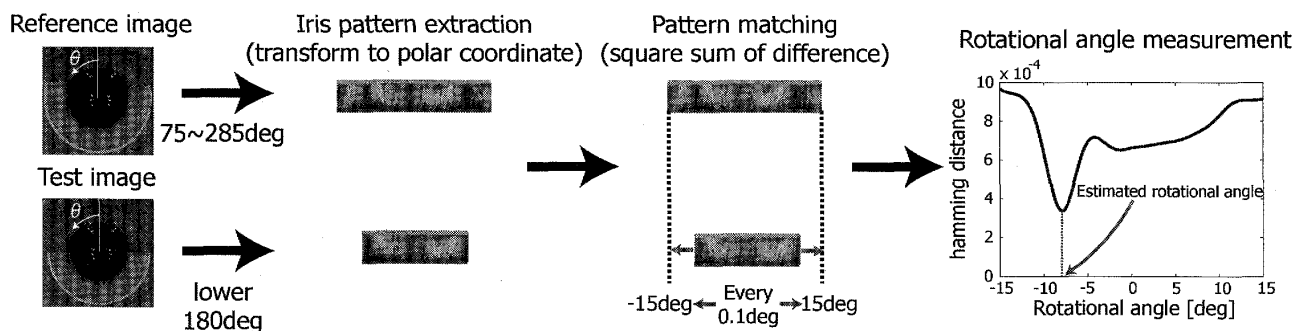


図 9 眼球回旋角計測におけるパターンマッチング

Fig. 9 Pattern matching method to estimate the rotational angle of an iris pattern in relation to the reference iris pattern.

#### 4.2 虹彩パターンの切出しとゴムひもモデルによる変換

虹彩パターンの伸縮特性を考慮するため、4.1の方法で検出された瞳孔のエッジより虹彩パターンを切り出し、瞳孔径変化に伴う虹彩パターンの伸縮をゴムひもモデルにより以下のように補正する(図8)、以下、回旋角計測時に基準となる(回旋角0度)撮影動画中の1フレームを基準画像と呼ぶ。

(1) 4.1により得られた瞳孔半径 $r_l$ (長軸を基準とする)、あらかじめ定めたパターンマッチングに用いる基準画像の虹彩幅(120~140 pixel)、瞳孔中心から虹彩外側のエッジまでの虹彩径 $I_r$ より虹彩パターン取得幅 $p$ を決定する。ここで、虹彩径 $I_r$ の決定に必要な虹彩外側のエッジは、瞳孔のエッジに比べ画像上のコントラストが低く決定が難しいことから、以下の4.3で述べる繰返し計算により最適値を求める。

(2)  $p$ を100等分したそれぞれの点の瞳孔中心か

らの距離を $d(i)$ ;  $i = 1, 2, \dots, 100$ とする。

(3)  $r_l$ と $d(i)$ を式(4)に代入し $\tilde{r}(i)$ を求め、これを式(3)に代入し $a(i)$ を求める。

(4) 求められた $a(i)$ 、基準画像瞳孔半径 $r_{ref}$ 、虹彩径 $I_r$ を式(3)を変形した次式に代入することにより、 $\tilde{r}_{ref}(i)$ が求まる。

$$\tilde{r}_{ref}(i) = a(i)(I_r - r_{ref}) \quad (5)$$

$\tilde{r}_{ref}(i)$ と $r_{ref}$ を式(4)を変形した次式に代入することにより、瞳孔半径 $r_{ref}$ における虹彩パターンの伸縮特性を考慮した瞳孔中心からの距離 $d_{ref}(i)$ ;  $i = 1, 2, \dots, 100$ が求まる。

$$d_{ref}(i) = I_r - \tilde{r}_{ref}(i) \quad (6)$$

(5)  $d_{ref}(i)$ を長軸とする長軸短軸比 $r_l : r_m$ 、傾き角 $\phi$ の楕円を求め、それぞれ極座標変換し、 $(r, \theta)$ 空間に虹彩パターンを投影する。この際、実数値で算



出された  $(r, \theta)$  空間の濃淡値は,  $(x, y)$  空間における近傍 4 点のバイリニア補間によって算出する.

### 4.3 回旋角算出

伸縮を補正し,  $(r, \theta)$  空間に投影した虹彩パターンから, まつげやまぶたの影響を受けにくい眼球下側 180 度分 ( $\theta = 90 \sim 270$  度) を切り出す. これと, 基準画像の虹彩パターン ( $\theta = 75 \sim 285$  度) の類似度を  $\pm 15$  度の区間で相対的に 0.1 度ずつずらしながら, 両者の差の二乗和により算出し, 最も類似度の高い (差の二乗和の小さい) 角度を回旋角の推定値とする (図 9).

上述のように虹彩外側のエッジの推定にはあいまいさが含まれることから, 計測対象時刻の虹彩パターン取得の際には,  $I_r$  を虹彩幅を初期値として 5 pixel (0.1875 mm) 刻みで変化させながら上述のハミング距離が最小となる角度を眼球回旋角度として出力する.

## 5. 評価実験

虹彩パターンの伸縮を補正することによる回旋角計測精度向上を回旋性前庭動眼反射 (VOR) 計測実験により評価した. ここでは, 虹彩パターンの伸縮を考慮せず, 瞳孔径に依らず瞳孔エッジから一定幅 (30 pixel (1.125 mm)) 虹彩パターンを切り出す回旋角計測法 (虹彩伸縮無考慮法), 朝比奈らが提案した回旋計測法 (従来法) [8] と提案法を比較した. 3 名の被験者 (YH (2. の被験者 YH と同一), YM, TK) に対し, 図 10 のように頭をロール軸周りで約 0.5~0.8 Hz で左右に傾けさせ, 回旋性 VOR を誘発した. このとき, 室内背景光強度を 3 段階に調節し, 回旋性 VOR 中の眼球動画像を計測した (図 11). 次に, これらの動画より各々大きな回旋運動 ( $\pm 5$  deg 以上) が誘発されている 1 秒間 (30 フレーム) を抽出した. 抽出した各動画画像から, 回旋角計測基準画像 (回旋角 0) を 1 フレーム選定し, これらに対する回旋角を推定した. 回旋角の真値は, 鮮鋭化した各フレーム画像において図 12 に☆

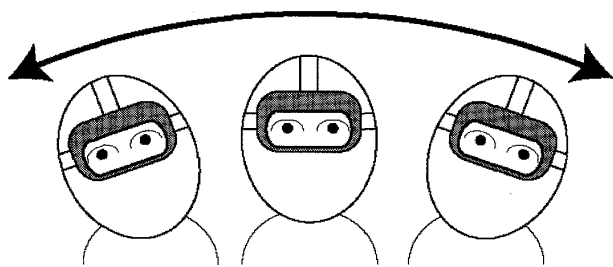


図 10 眼球回旋運動誘発法

Fig. 10 Method to induce rotational eye movements.

で示す特徴点 4 点を目視でトラッキングし, 各特徴点から算出される回旋角の平均値として算出した. 図 13 に虹彩伸縮無考慮法, 従来法, 提案法における回旋角

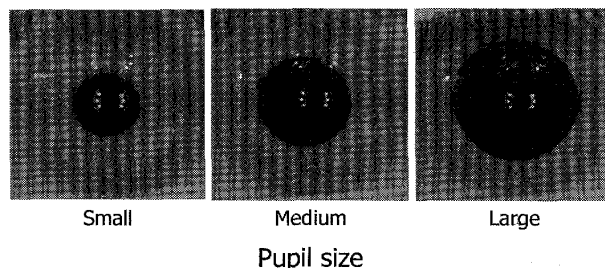


図 11 同一被験者の異なる瞳孔径における虹彩パターン変化の例

Fig. 11 Example of changes in iris patterns at different pupil diameters in the same subject.

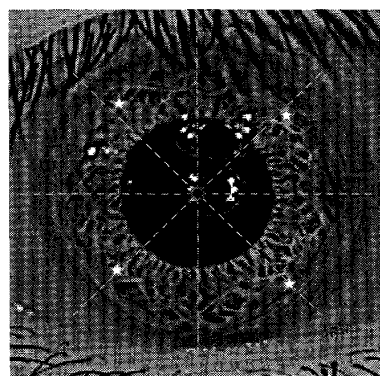


図 12 評価実験における回旋角真値算出に用いた特徴点 (☆) 配置

Fig. 12 Characteristic points (☆) used to calculate true rotational angles in the experiment.

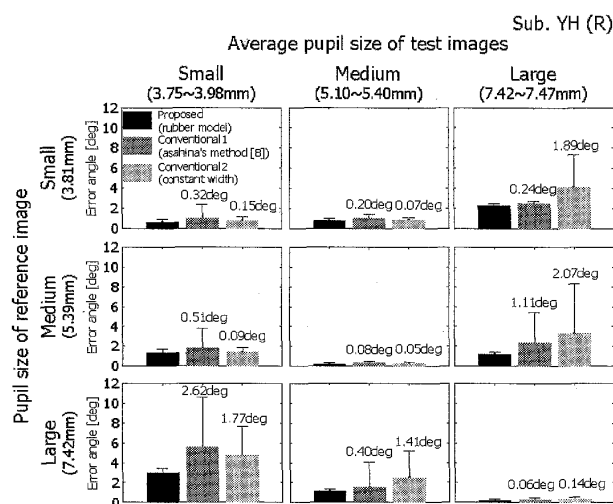


図 13 虹彩伸縮無考慮法, 従来法 [8] と提案法による回旋角計測誤差の比較

Fig. 13 Comparison of error in rotational angles measured by the proposed and conventional methods.



表 3 提案法による回旋角計測に用いた虹彩径  $I_r$   
Table 3 Optimum iris size  $I_r$  used in the proposed method for each pupil size.

		$I_r$ [pixel]	pupil size of test images		
			Small	Medium	Large
pupil size of reference image	Small	min	140	150	155
		max	170	170	160
	Medium	min	150	140	145
		max	170	170	155
	Large	min	145	140	150
		max	155	150	170

推定値の真値との誤差の平均と標準偏差を示す。図中の数値は各条件における虹彩伸縮無考慮法、従来法と提案法による誤差平均の差（虹彩伸縮無考慮法、従来法）－提案法である。また、提案法による回旋角計測の際に推定された最適な虹彩径  $I_r$  の範囲を表 3 に示す。この結果より、基準画像と計測対象画像の瞳孔径がほぼ同等の組合せでは、各方法で誤差平均 1 度以内と高精度に回旋角が求められていることが分かる。これは、瞳孔径変化が小さい場合、虹彩パターンの変化はほとんど発生せず、虹彩パターンの伸縮を考慮しない方法においても良好な虹彩パターンのマッチングが得られるためと考えられる。一方、それ以外の組合せでは、従来法、虹彩伸縮無考慮法に比べ提案法において誤差平均がより小さく、高精度に回旋角が求められている。また、従来法による回旋角計測精度は虹彩伸縮無考慮法よりも計測精度は低く、瞳孔径が大きく異なる組合せにおいて、被験者 TK の基準画像 Large－計測対象画像 Small では誤差平均 7.62 度、同被験者の Small－Large では誤差平均 6.24 度、また、被験者 YM においても Large－Small で誤差平均 9.14 度と他の計測法に比べ計測誤差が大きくなっている。従来法において計測誤差が大きくなる原因は、瞳孔エッジから 0.2 mm にある虹彩パターンのみを用いることから、他の方法と比べ利用虹彩部分（ピクセル数）が極端に小さく、大きな瞳孔径変化に伴う虹彩パターン変化の影響を受けたためと考えられる。以上の結果は、他の被験者 2 名においても同様であり、提案法ではいずれの瞳孔径組合せ条件においても、誤差平均 1 度程度の計測が実現されている。

## 6. む す び

本研究では、瞳孔径変化における虹彩パターンの伸縮特性を明らかにし、高精度眼球回旋運動計測法を提案した。まず、瞳孔径変化における虹彩パターンの特

徴点を追跡することにより、虹彩パターンの伸縮特性を明らかにした。次に、この虹彩パターンの伸縮特性が被験者によらずゴムひもモデルで良好に近似できることを示した。そこで、このモデルを用い、基準画像と計測対象画像の瞳孔径が異なる場合に、計測対象画像の虹彩パターンを基準画像の瞳孔径時のパターンに変換する方法を提案した。評価実験の結果、虹彩伸縮を考慮しない方法や従来法 [8] に比べ、大幅に計測精度が向上することを示した。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省ハイテクリサーチセンター整備事業「次世代先進計測基盤技術の開発と応用」によりサポートされた。

## 文 献

- [1] D. Robinson, "A Method of measurement eye movement using a scleral search coil in a magnetic field," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.10, pp.137-145, 1963.
- [2] 高木峰夫, 長谷部日, 阿部春樹, "サーチコイル法による眼球運動の定量的解析," 眼科, vol.39, pp.1269-1276, 1997.
- [3] 岡山英樹, 長谷部聡, 大月 洋, 小西玄人, 藤原由延, "ビデオ画像処理による眼球運動計測," 日本の眼科, vol.62, pp.171-178, 1991.
- [4] 長谷部聡, 大月 洋, 小西玄人, 藤原由延, 渡辺好政, "正弦波頭部傾斜運動における動的反対回旋の計測," 眼科臨床医報, vol.83, pp.848-852, 1989.
- [5] 坂下祐輔, 藤吉弘巨, 平田 豊, 高丸尚教, 深谷直樹, "高速楕円検出に基づく眼球回旋運動のリアルタイム計測システム," 電学論 (C), vol.127, no.4, pp.591-598, 2007.
- [6] D. Zhu, S. Moore, and T. Raphan, "Robust and real-time torsional eye position calculation using a template-matching technique," Computer Methods and Programs in Biomedicine, vol.74, no.3, pp.201-209, 2004.
- [7] 堺 浩之, 山地一禎, 平田 豊, 戸田尚宏, 白井支郎, "瞳孔・眼球運動計測システムの開発と空間識失調評価への応用," 電学論 (C), vol.119, no.1, pp.70-76, 1999.
- [8] 朝比奈成年, 堺 浩之, 山地一禎, 石樽康雄, 白井支郎, "瞳孔反応・眼球運動（水平・垂直・回旋）・焦点調節の両眼同時計測装置の開発とその評価," 信学技報, MBE2000 (489), 2000.
- [9] 佐藤啓仁, 山本純雄, 鎌田 治, 阿見 誠, 福島一城, 内藤富雄, "二次元 CCD カメラを用いた眼球回旋運動の測定," 日本機械学会論文集 (C 編), vol.58, no.556, pp.3644-3648, 1992.
- [10] 早川祐貴, 鶴飼一彦, 高木峰夫, 白鳥 敦, 石川則夫, 長谷部日, 高田律子, 白井知聡, 長谷川茂, 阿部春樹, "ビデオ画像解析法を用いた眼振の定量的評価," 日本眼科学会雑誌, vol.104, no.6, pp.424-430, 2000.
- [11] K. Schreiber and T. Haslwanter, "Improving calibration of 3-D video oculography systems," IEEE Trans. Biomed. Eng., vol.51, no.4, pp.676-679, 2004.
- [12] H. Schworm, J. Ygge, T. Pansell, and G.



Lennerstrand, "Assessment of ocular counterroll during head tilt using binocular video oculography," *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, vol.43, pp.662-667, 2002.

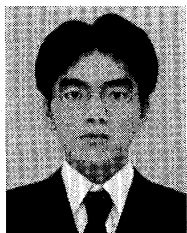
- [13] 石川則夫, 小林直樹, 保坂栄弘, 森園徹志, 山野辺滋晴, 八木聰明, 片山圭一朗, "新しいめまい検査システムの開発—虹彩紋理追跡法を用いた眼振3成分解析法," *ME 誌*, vol.33, no.3, pp.192-202, 1995.
- [14] J. Bos and B. Graaf, "Ocular torsion quantification with video images," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.41, no.4, pp.351-357, 1994.
- [15] 平田 豊, 瞳孔の制御機構とその自律神経系活動モニタへの応用に関する研究, 豊橋技術科学大学博士論文, 1995.
- [16] X. Yuan and P. Shi, "A non-linear normalization model for iris recognition," *IWBRS 2005, LNCS 3781*, pp.135-141, 2005.
- [17] H.J. Wyatt, "A 'Minimum-wear-and-tear' Meshwork for the Iris," *Vision Research*, vol.40, pp.2167-2176, 2000.

(平成21年4月2日受付, 8月10日再受付)



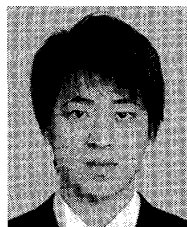
橋本 勉 (正員)

平19 中部大・工・情報工学卒。平21 同大学院博士前期課程了。平21 アイシン・エイ・ダブリュ(株)入社。平19年度 IEEE 名古屋支部学生奨励賞受賞。



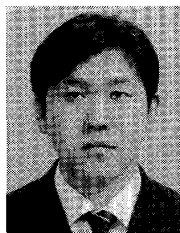
牧 孝郎

平18 中部大・工・情報工学入学。平21 年3月現在, 同大学同学科在学中。



坂下 祐輔

平17 中部大・工・情報工学卒。平19 同大学院博士前期課程了。平19 (株)ニデック入社。画像解析システム, 眼科医療機器の開発に従事。日本眼光学会会員。



西山 潤平 (学生員)

平16 中部大・工・電子卒。平18 同大学院博士前期課程了。平21 年3月現在, 同大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程在学中。主として瞳孔の制御機構とその自律神経モニタへの応用, ドライバの生体計測とストレス, 眠気に関する研究に従事。平19 年度本会東海支部学生研究奨励賞受賞。日本生体医工学会, 情報通信学会, 自動車技術会各会員。



藤吉 弘亘 (正員)

平4 中部大・工・電子卒。平9 同大学院博士後期課程了。平9~12 米カーネギーメロン大学ロボット工学研究所 Postdoctoral Fellow。平12 中部大学講師。平15 同大助教授。平17 米カーネギーメロン大学ロボット工学研究所客員研究員。工博。計算機視覚, 動画像処理, パターン認識・理解の研究に従事。平17 年度ロボカップ研究賞受賞。情報処理学会, 電気学会, IEEE 各会員。



平田 豊 (正員)

平2 豊橋技科大・工・電気・電子卒。平4 同大学院修士課程了。平7 同大学院博士課程システム情報工学専攻了。博士(工学)。同年宇宙開発事業団招聘研究員(新技術事業団科学技術特別研究員)。平9 ワシントン大・医・Research Associate (平10 より科学技術振興事業団若手長期在外研究員)。平12 中部大学工学部電子工学科講師, 助教授を経て, 平16 同大情報工学科教授。眼球運動の運動学習に関する生体・生理工学・計算論的研究, 瞳孔の制御機構とその自律神経モニタへの応用に従事。平7 年度本会論文賞, 猪瀬賞各受賞。日本視覚学会, IEEE, 北米神経科学会各会員。