

特集 Real-time Measurement of Eye Movement Based on Fast Ellipse Detection*

深谷直樹
Naoki FUKAYA

坂下祐輔
Yuusuke SAKASHITA

藤吉弘巨
Hironobu FUJIYOSHI

Gaze detection is important for Driver Monitoring. We developed a driver gaze and eyeball rotation detection system using image processing techniques. Pupils are regarded as ellipses, and a fast ellipse detection algorithm based on the terms of an inscribed parallelogram has been developed. Results show that pupils are detected within approximately 5 milliseconds with a 97.8% probability of success, and eyeball rotation is detected with a 0.43 degree of accuracy.

Key words: Gaze detection, Driver monitoring, Fast ellipse detection

本稿は、ゴーグルに取り付けたカメラから得られる眼領域の画像から、瞳孔を楕円として捉え、眼球の回転運動である回旋角度をリアルタイムに計測する手法を提案する。本提案手法は、まず、瞳孔を楕円と仮定し、楕円に内接する平行四辺形の成立条件より投票処理を用いて楕円中心を算出する。楕円中心を通る直線と交わる輪郭点の関係からアウトライアの除去を行い、除去後の輪郭点から楕円パラメータを最小二乗法により求める。これにより、高速かつ、高精度な瞳孔抽出が可能となる。次に、求めた瞳孔から虹彩パターンを生成し、参照パターンとの相対回旋角をパターンマッチングにより求める。眼球の高速な動きによって虹彩パターンにブレが生じた場合でも、時系列情報を用いた異常値の抑制を行うことにより、瞳孔径が15ピクセル以内の変化であれば、 0.5° 以下の誤差で眼球回旋角をリアルタイムに計測することが可能となる。

1. はじめに

生体の巧妙・精緻な運動制御メカニズムを理解する方法の一つとして、眼球運動計測に関する研究が盛んに行われている。特に、眼球運動の高速画像計測の実現は、脳内大規模神経回路網による情報処理と運動制御ならびに学習・記憶の発現メカニズムの関係解明に貢献できると考えられている。これらの神経系との運動制御を行うため、眼球運動の計測には精度と計算速度が要求される。

眼球運動には、視線の移動による水平運動、垂直運動、眼球の回転運動である回旋運動があり、これらのうち、水平運動・垂直運動の計測は主に、視線方向推定に用いられている。¹⁾³⁾ 視線方向を求める技術は、心理学、医療、ヒューマンインタフェースなどの分野に

おいて期待されており、その応用として、ドライバの運転状態の検知⁴⁾や、視線を用いてコンピュータを制御する視線インタフェース⁵⁾などが挙げられる。

一方、眼球回旋運動の計測は、宇宙空間における空間識失調の解析や、めまい等の診断に必要とされている。微小重力環境に暴露された場合、耳石からの重力情報を失うため、上下方向の感覚に混乱が生じる。このような空間内での方向感覚などの予防法の確立は、今後の有人宇宙活動を展開していく上での大きな課題となっている⁶⁾。

眼球運動の計測を行う方法として、水平運動と垂直運動の計測には主に眼球電位法(E.O.G)、角膜反射法、ビデオ画像処理法の三つの方法が用いられている。眼球電位法⁷⁾は、電極を被験者に固定する必要があるため、その計測結果も周囲の電氣的ノイズの影響を受けるため、精度に問題がある。角膜反射法⁸⁾は、光源からの光を角膜に照射し、その反射光(プルキニエ像)と瞳孔をカメラで捉え検出することで、高精度な計測が可能となる。しかし、この方法では頭の動きと眼球の動きを安易に区別することはできない。ビデオ画像処理法⁹⁾¹⁰⁾は、画像中から虹彩、もしくは瞳孔を円や楕円として捉え、その中心を検出することで高速に計測を行っている。しかし、これら三つの手法は眼球運動の中でも水平運動と垂直運動の計測を対象としている。従来、回旋運動計測には、コイル付きコンタクトレンズを用いるサーチコイル法や、マーク付きコンタクトレンズを装用し、画像処理によりそのマークを検出し追跡する方法が用いられている。しかし、これらの手法は、被験者への負担が大きく、長時間の計測には不向きという問題がある。

本研究では、ビデオ画像処理法を用いて眼球運動と

*2007年1月30日 原稿受理

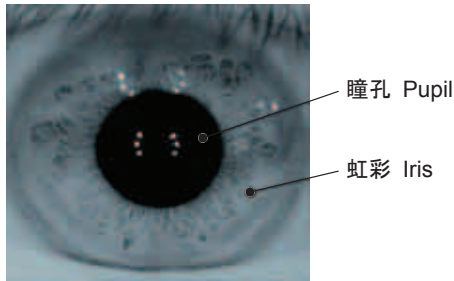


Fig. 1 Pupil and iris image

眼球回旋を同時に計測することを目的とする。眼球の回旋角度を正確に求めるには、瞳孔輪郭部分から放射線状に広がる虹彩パターンを取得するため、高精度な瞳孔抽出が要求される (Fig. 1)。そこで、本稿では、瞳孔を楕円として捉え、瞳孔を高精度かつ高速に検出する手法を提案する。次に、算出した瞳孔径を基に虹彩パターンを取得し、パターンマッチングによる眼球回旋角度の計測法を提案する。

2. 関連研究

2.1 従来の楕円検出法

楕円検出に関する研究は既に多く提案されており、その多くはハフ変換をベースにした手法である。しかし、楕円は五つのパラメータから構成されており、ハフ変換を用いて直接楕円の検出を行うには5次元の配列を必要とし、かつ計算量も増大する。これに対し、計算時間や記憶容量削減などの手法が工夫されている。¹³⁻¹⁴⁾ しかし、ハフ変換に基づく手法は計算量を要し、リアルタイムによる検出は未だ困難な問題である。

また、辻ら¹⁾は、LMedSによるアウトライア除去¹⁵⁾を用いた楕円のフィッティングにより黒目の輪郭検出を行っている。評価手法として

$$\min \text{med} (\epsilon_i^2) \quad (1)$$

を用いる。以下は LMedS による楕円当てはめを行なうための処理手順である。

- (1) 候補点の中から5点をランダムに選出し、5点を通る楕円を計算。
- (2) 各候補点における楕円との距離 ϵ_i^2 を算出。
- (3) ϵ_i^2 ($i = 1, 2, \dots, n$) 中から中間値をとる。
- (4) (1)から(3)の処理を繰り返し、求めた中間値が最小となるパラメータを出力。

文献¹⁾では、抽出した虹彩のエッジが50%以上の場合、正しくフィッティングできることが証明されている。このようなアウトライアを含むデータからのパラメータ推定には、RANSAC¹⁶⁾や最小メジアン法¹⁵⁾等が用いられている。これらの手法では、高精度なパラメータを推定をするには、ランダムにピックアップする輪郭点の組み合わせ数を多くする必要があり、推定に要する時間(繰返し回数)が求める精度に対して増大するという問題がある。これに対して、本手法はアウトライアを除去してから楕円パラメータを推定するため、高速化が期待できる。

2.2 従来の眼球回旋計測法

虹彩パターンを用いた画像処理における眼球回旋の計測には、予め取得した回旋運動が生じていない安静時における虹彩パターンを基準に、他の時刻における虹彩パターンとの相互相関を計算し、その最大値を回旋角度として出力する手法が提案されている。⁹⁾¹⁷⁾しかし、これらの手法は、瞳孔径の大きさによって変化する虹彩パターンの影響を考慮していないため測定誤差が生じる。この問題に対して堺ら⁹⁾は、瞳孔径変化毎の虹彩パターンを抽出し、テーブル化することで対処している。しかし、テーブルの作成に手間がかかるという問題がある。

本研究では、複数の参照パターンを必要とせず、瞳孔径の変化に対応できる眼球回旋計測を目的とする。

3. 眼球回旋角度の算出

本研究では、より正確な眼球運動を計測するために、Fig. 2に示すような眼球運動計測装置を作成した。本システムは、近赤外線LEDを照射し、近赤外線カメラを用いて撮影するため、瞳孔領域のみが観測される。⁷⁾ Fig. 2に眼球運動計測装置の外観と、その構成を示す。本装置を頭部に装着することにより、頭部の動きの影響を受けずに眼球運動の画像の取得が可能になる。また、眼球運動を故意に発生させるために装置には光の強さを調節できる白色LEDを搭載している。これにより、直接眼領域に光を照射して、瞳孔の大きさが変化した瞳孔映像を撮影することができる。以下に本装置を用いた眼球回旋計測の流れを示す。

- (1) 撮影した画像から瞳孔を抽出。
- (2) 求めた瞳孔径をもとに、瞳孔輪郭から円弧状に虹彩パターンを取得。

(3) 参照パターンとのマッチングにより，回旋角度を算出．

瞳孔は視線の向きによって楕円形になる場合があり，瞳孔抽出は円ではなく楕円として検出する必要がある．また，Fig. 3に示すように近赤外線LED等の反射が眼球に写ることがあり，楕円形状が欠損する場合がある．より正確な瞳孔(楕円パラメータ)を抽出するには，このようなアウトライアを除去する必要がある．

3.1 楕円検出

楕円は(2)式で示すように，楕円の中心座標 (x_0, y_0) ，長軸，短軸の長さ a, b ，x軸方向から長軸への回転角 ϕ の合計五つのパラメータから構成されている．

$$\frac{((x-x_0)\cos\phi+(y-y_0)\sin\phi)^2}{a^2} + \frac{((x-x_0)\sin\phi-(y-y_0)\cos\phi)^2}{b^2} - 1 = 0 \quad (2)$$

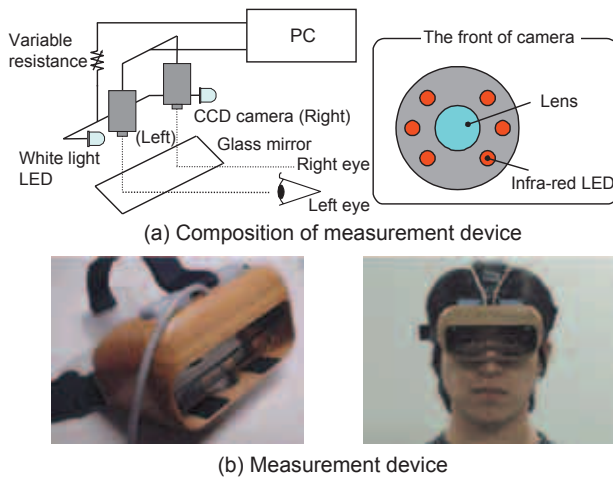


Fig. 2 Experimental setups

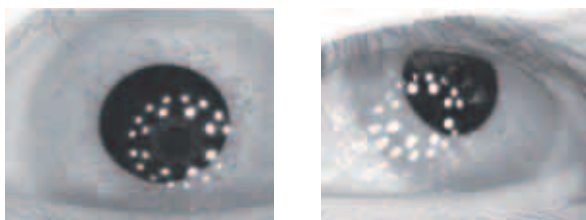


Fig. 3 Examples of outliers by light source reflection

ハフ変換によって楕円を求める場合は5次元の配列を必要とし，実用的ではない．また，撮影画像には多くのアウトライアを含んでいる．そこで本手法では，より高速にかつ正確に楕円パラメータを求めるために，RANSACのような繰り返し処理を行わず，アウトライアの除去後の輪郭点から，楕円パラメータを求める．

- (1) 瞳孔の輪郭を抽出．
- (2) 楕円中心の算出．
- (3) アウトライア除去．
- (4) 楕円パラメータ推定を行い，瞳孔を検出．

以下に各手順の詳細を述べる．

3.1.1 瞳孔輪郭の抽出

楕円推定を行うには画像中から楕円の輪郭候補点を抽出しなければならない．近赤外画像では，瞳孔領域が黒く浮き出るため二値化処理によって瞳孔領域を検出する．このとき，睫毛などの影響でノイズが生じる場合があるが，最小の瞳孔径が約2mm程度ということから除去を行う⁶⁾．このように得られた二値化画像から輪郭点を抽出する．

3.1.2 楕円中心の算出

楕円中心の算出には，楕円に内接する平行四辺形の成立条件を用いる．この平行四辺形の相対する辺の midpoint同士を連結すると2本の直線が交わり，その直線の交点が楕円の中心となる(Fig. 4 参照)．

欠損した楕円にも対処できるように，上下，左右から順に平行四辺形を求めていき，平行四辺形が求められる場合のみ交点の画素に投票していく．最終的に投票数が最大の画素を楕円中心として算出する．

以下に楕円中心算出のアルゴリズムを示す．

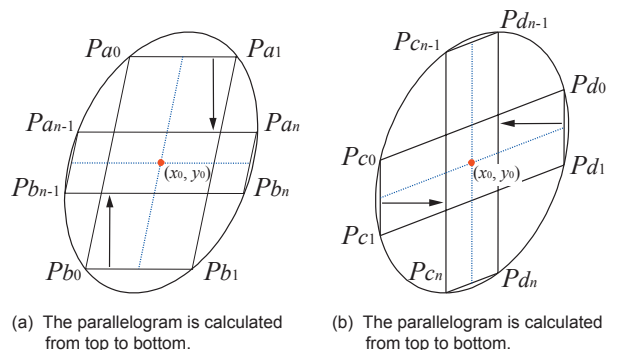


Fig. 4 Ellipse detection algorithm based on the terms of inscribed parallelograms

```

Create an array A
Initialize A to 0
  // calculated from top to bottom (Fig. 4(a))
  For ( $i \leftarrow 0$  to  $n - 1$ )
    If ( $\overline{P_{a_i} P_{a_{i+1}}} = \overline{P_{b_i} P_{b_{i+1}}}$ )
       $A[(P_{a_i} + P_{b_{i+1}})/2, (P_{a_i} + P_{b_i})/2] + = 1$ 
    End
  // calculated from left to right (Fig. 4(b))
  For ( $i \leftarrow 0$  to  $n - 1$ )
    If ( $\overline{P_{c_i} P_{c_{i+1}}} = \overline{P_{d_i} P_{d_{i+1}}}$ )
       $A[(P_{c_i} + P_{d_i})/2, (P_{c_i} + P_{d_{i+1}})/2] + = 1$ 
    End
  Find( $x_0, y_0$ ) = arg max A
End

```

3.1.3 アウトライアの除去

カメラにより瞳孔画像を撮影する場合、近赤外線照明の光が角膜で反射し、反射像や上下左右の欠けが存在する。従って、欠損した瞳孔から楕円を検出するにはアウトライアの除去が必要である。

楕円中心を o 、ある輪郭点 p_1 と楕円中心を対称とした輪郭点 p_2 とし、 $\overline{op_1}$ と $\overline{op_2}$ が等しい輪郭点のみを残すことで、アウトライアを除去する。本手法では、より正確な楕円パラメータを推定するため、 $|\overline{op_1} - \overline{op_2}| \leq 1$ を満足する p_1 と p_2 を正しい輪郭点とする。Fig. 5 にアウトライアを除去する過程とアウトライアを除去した後の輪郭点を示す。

3.1.4 楕円パラメータの推定

楕円を表す(2)式はパラメータに対して線形な形で表すと、

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0 \quad (3)$$

となる。(3)式に線形最小二乗法を適用し、各パラ

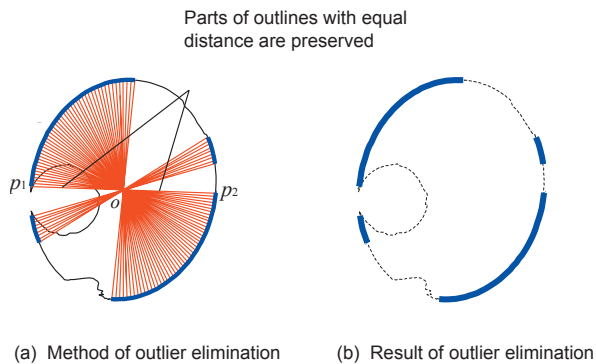


Fig. 5 Elimination of outliers

メータ ($A \sim F$) を推定する。アウトライアを除去した輪郭点に対して誤差が最小になるような計算を行うことにより、楕円パラメータの推定が可能になる。

パラメータの推定後、(2)式と(3)式の関係から長軸の回転角 ϕ を(6)式、長軸 a 、短軸 b を(7)式で求める。

$$x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \quad (4)$$

$$y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{B}{A - C} \right) \quad (6)$$

$$(a, b) = \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Bx_0y_0 + Cy_0^2 - F)}{A + C \pm \left(\frac{B}{\sin 2\phi}\right)}} \quad (7)$$

ただし、(7)式で求めた大きい値を長軸 a 、小さい値を短軸 b とする。

3.2 眼球回旋計測

前節では、瞳孔中心、瞳孔径、回転角を高精度で求める手法について述べた。本節では、瞳孔抽出の結果を基に生成した虹彩パターンによる眼球回転運動(眼球回旋)の計測について述べる。

3.2.1 虹彩パターンと回旋角の計測

虹彩パターンは瞳孔の輪郭から円弧状に取得する必要があるが(Fig. 6)、取得する幅を固定した場合、視線を横方向に向けた場合や、光などの影響によって瞳孔が縮んだ場合、虹彩パターンは変化する。そのため、正しい回旋角度を求めることは容易ではない。そこで、本手法では、瞳孔の長軸と短軸を考慮して取得する幅を決定する。長軸と短軸の長さが $a:b$ の場合、Fig. 7 に示すように、長軸上のパターンと短軸上のパターンの取得する幅も $p:q$ でなければならない。

以下に眼球回旋計測の手順を示す。

STEP 1. あらかじめ視線を正面に向け、回旋運動が生じていないときの虹彩パターンを参照用虹彩パターンとして取得する。

STEP 2. 3章1節で述べた手法により楕円検出を行い、瞳孔中心 (x_0, y_0) 、瞳孔径 a, b 、傾き ϕ を算出する。

STEP 3. 求めた楕円パラメータを基に瞳孔画像の (x, y) 空間から (θ, r) 空間に虹彩パターンを投影する(Fig. 7)。これにより、後の虹彩パターンのマッチングが安

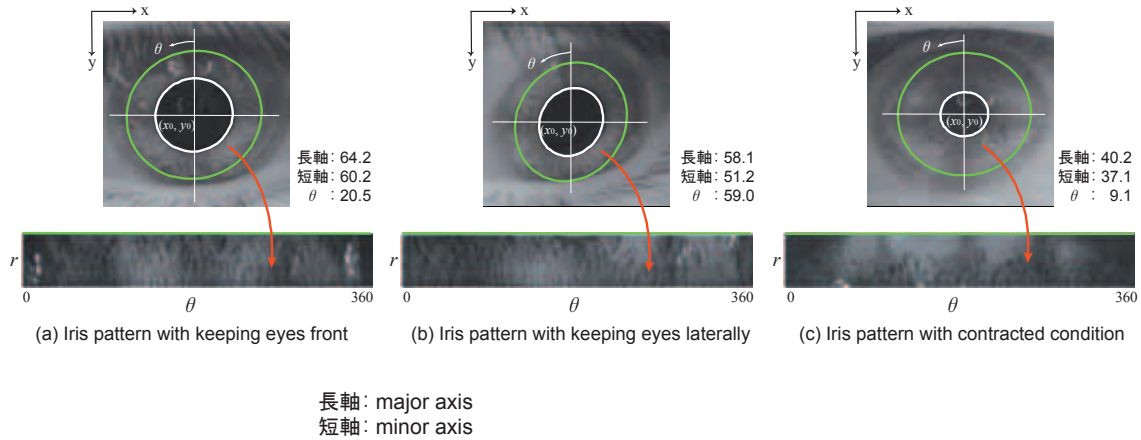


Fig. 6 Iris pattern extracting method

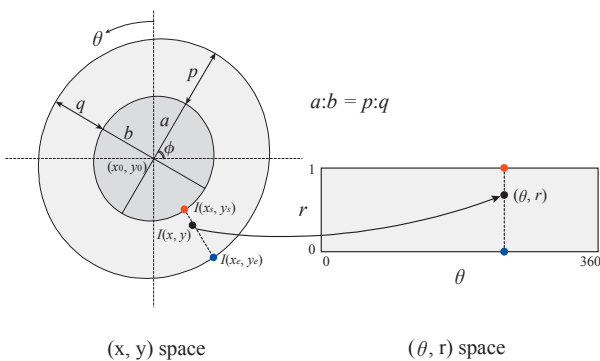


Fig. 7 Projection from (x, y) space to (θ, r) space

易になる. θ に対応する瞳孔輪郭点 (x_s, y_s) と, 対応する拡大した楕円の輪郭点 (x_e, y_e) を(9)式により求める. 次に, (8)式を用いて (θ, r) に対応する画像中の (x, y) 座標を求め, その輝度値を近傍画素からバイリニア補間により求め, r, θ の値とする. このとき, 投影した虹彩パターンを格納する配列の大きさ θ は, 0.5° 刻みに720個, r は0.2刻みで50個とする. なお本手法では, 虹彩パターンを取得する範囲は瞳孔中心から虹彩パターンが写る 6.5 mm に相当する130ピクセルの範囲とした.

$$\begin{aligned}
 (\theta, r) &= I(x, y) \\
 &= I(rx_e + (1-r)x_s, ry_e + (1-r)y_s) \quad (8) \\
 & \quad 0 < \theta < 360, 0 < r < 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases}
 x_s = x_0 + a \cos \phi \cos \theta - b \sin \phi \sin \theta \\
 y_s = y_0 + a \sin \phi \cos \theta - b \cos \phi \sin \theta \\
 x_e = x_0 + (a+p) \cos \phi \cos \theta - (b+q) \sin \phi \sin \theta \\
 y_e = y_0 + (a+p) \sin \phi \cos \theta - (b+q) \cos \phi \sin \theta
 \end{cases} \quad (9)$$

STEP 4. 取得した虹彩パターン $T(\theta, r)$ と 0.5° ずつずらした参照用虹彩パターン $Ref(\theta, r)$ との類似度を算出し, 最も類似した角度を眼球回旋角度として出力する((10)式).

$$\hat{\theta}_s^{T, Ref} = \arg \min_{\theta_s \in (0, \dots, 360)} \sum_{\theta} \sum_r |T(\theta, r) - Ref(\theta + \theta_s, r)| \quad (10)$$

3.3 時系列情報を用いた眼球回旋計測

瞳孔映像を取得した際, 瞳孔の高速な動きにより虹彩パターンにブレが生じる場合があり, 正しい回旋角度を出力することができない. そこで, 本研究では時系列情報を用いて回旋検出精度の低下を防ぐ(Fig. 8). 初期フレームである参照パターンと現フレームの推定回旋角 $\hat{\theta}_s^{t,0}$, 参照パターンと1フレーム前のフレームとの推定回旋角 $\hat{\theta}_s^{t-1,0}$, 1フレーム前のパターンと現フレームとの推定回旋角 $\hat{\theta}_s^{t,t-1}$ を算出し, ブレによって生じる異常値を(11)式により抑制する.

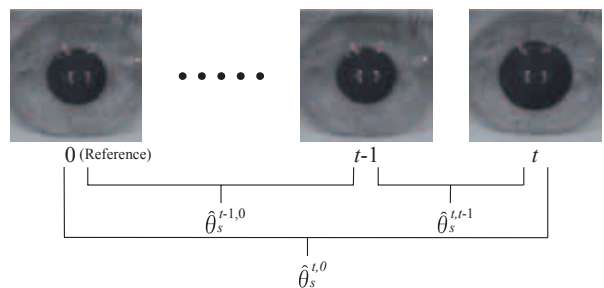


Fig. 8 Relation of the time series variables

$$\hat{\theta}_s = \begin{cases} \hat{\theta}_s^{t,0} & , (|\hat{\theta}_s^{t,0} - \hat{\theta}_s^{t-1,0} - \hat{\theta}_s^{t,t-1}| \leq 1^\circ) \\ reject & , (|\hat{\theta}_s^{t,0} - \hat{\theta}_s^{t-1,0} - \hat{\theta}_s^{t,t-1}| > 1^\circ) \end{cases} \quad (11)$$

4. 評価実験

4.1 実験環境

評価実験として、Fig. 9に示すように頭部を左右に振った際の眼球の回転運動を計測対象とする。その際、頭部の動きと同時に白色LEDを点滅させ、瞳孔径が2.4 mm から 3.9 mm(62 pixel ~ 83 pixel)に変化した際の瞳孔抽出と眼球回旋角を求め、目視により求めた真値との比較を行う。

4.2 瞳孔抽出実験

瞳孔抽出実験として、以下の二つの実験により評価を行う。

実験 1: 楕円検出率、長軸誤差、短軸誤差の比較をアウトライアを含む輪郭点からの推定と本手法であるアウトライアを除去した輪郭点からの推定による評価。

実験 2: 処理時間、検出率の比較を最小メジアン法と本手法により評価。

実験 1

500フレームの実画像に対して楕円パラメータを求め、楕円検出率、長軸誤差、短軸誤差により評価を行う。Fig. 10に瞳孔抽出の比較結果の例を示す。Table 1に楕円検出率、長軸の測定誤差、短軸の計測誤差を示す。

Table 1より、アウトライアを除去しないで楕円パラメータを推定すると、欠損した輪郭点の影響を大きく受けるため推定誤差が大きい。一方、アウトライアを平行四辺形の成立条件により除去した本手法は、欠損した輪郭点の影響を受けないため、検出率が大幅に向上した。

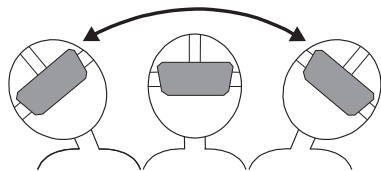
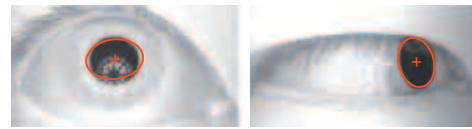
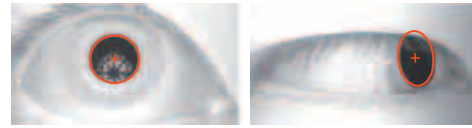


Fig. 9 Experimental method



(a) Pupil detection results with conventional method



(b) Pupil detection methods with proposal method

Fig. 10 Pupil detection results

Table 1 Example results

	Probability of success (%)	Amount of error along major axis (pixel)	Amount of error along minor axis (pixel)
With outlier conditions	37.3	23.3	15.7
Without outlier conditions	97.8	1.9	1.4

実験 2

従来法である LMedS¹⁾を用いて楕円推定をし、本手法との比較を行った。評価には、

- (a) 欠損のない瞳孔画像
- (b) 内部に照明の反射が映っている瞳孔画像
- (c) 端が欠けている瞳孔画像

各200フレーム、合計600フレーム用いた。

本手法と LMedSによる楕円パラメータの推定結果の比較をTable 2に示す。欠損のない瞳孔に対しては両者とも高い精度で瞳孔の検出が可能であることが分かる。本実験における LMedS における繰り返し処理は200回であり、その際の処理時間は約21 ms である。一方、提案手法は約5 ms 以下と高速に楕円パラメータを推定できることが分かる。LMedS の処理時間を同じ5 ms 以下に設定すると繰り返し回数は50回となり、その際の検出率は状態(b) 24.0 %、状態(c) 38.0 % と大幅に低下する。(Fig. 11)

状態(b)のような内部に光の反射が多く見られる瞳孔の場合は、輪郭抽出処理をした際にアウトライアが多くなるため、200回の繰り返しでは少なく、LMedS の検出率は63.0 % と低い。一方、提案手法は、1.5 % の低下のみである。

Table 2 Comparison between proposal method and conventional method, LMedS: Least median of squares

	Least median of squares ¹⁾		Proposal method	
	Processing time (ms)	Probability of success (%)	Processing time (ms)	Probability of success (%)
Pupils without chips	20.6	99.5	4.5	100.0
Pupils with light source reflection	20.5	63.0	4.9	98.5
Pupils with chips on the outline	20.6	91.0	4.7	83.0

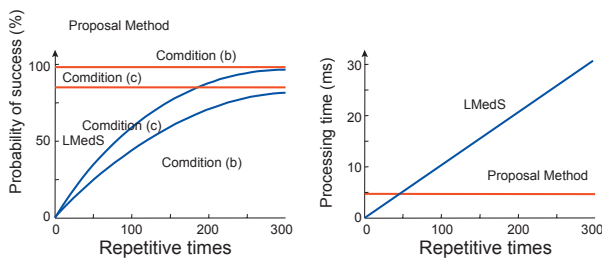


Fig. 11 Comparison between proposal method and conventional method, LMedS: Least median of squares

状態(c)の場合、LMedSは91%に対し、本手法による検出率は83%程度にまで低下する。これは、Fig. 12に示すように、まばたきにより約35%の輪郭が欠けるためである(欠損率25%以下の場合検出率90%以上)。本研究は高速な眼球運動計測を目的としているため、まばたきの最中は、まばたきをしていると判定できればよい。まばたきの判定には、瞳孔の端が欠損した場合、楕円に内接する平行四辺形が求められないため投票処理は大幅に減少する。よって、瞳孔中心の算出過程における最大投票数から判定可能である。

4.3 眼球回旋計測実験

提案手法により計測した回旋角と、真値として手動で求めた回旋角を比較する。評価には、映像約500フレーム分(被験者2人、各500フレームずつ)を用いる。また、参照用の虹彩パターンには、初期フレーム(瞳孔径72 pixel)の画像から作成したものをを用いる。

Fig. 13に時系列情報を用いる手法の結果と用いない結果の比較を示す。また、各フレームにおける瞳孔



Fig. 12 Examples of miss detection images: pupil detection

径の変化と各ポイント(a_1, \dots, b_3)における眼球回旋時の瞳孔例を示す。

時系列による手法は平均誤差 0.43° を得た。これは、時系列情報を用いたため、瞳孔の高速な動きによりブレが生じた際の異常値を抑制できたからである。また、室内において白色LEDを点灯させ、瞳孔径を変化させた場合でも、参照パターンに用いた瞳孔径から15 pixel以内の変化であれば眼球回旋計測には影響が出ないことが分かった(Fig. 13)。

しかし、Fig. 14(b)のような暗室などで撮影した瞳孔の場合、瞳孔が開くため、虹彩パターンが大きく変化する。そのため、回旋角の推定は不可能となる。虹彩模様は、瞳孔中心に近い場所は伸縮が大きくなるためである。

4.4 計測時間

提案手法を、Pentium4 Xeon 3.6GHz Dual, 2GBのメモリ、Linux kernel 2.6を搭載したPC上で処理時間を計測した結果、瞳孔抽出の処理時間は、前処理に3ms、楕円中心の算出に0.5ms、アウトライア除去に0.2ms、楕円のパラメータ推定に0.3ms、合計5ms以下(最大200fps)であり、ハフ変換等を用いた従来法では困難であったリアルタイム処理が可能である。

また、眼球回旋計測の処理時間は、1回の虹彩パターンのマッチング計算に12.0msである。従って、瞳孔抽出と回旋角算出に約30msの処理時間となり、最大30fpsによるリアルタイム眼球回旋計測が可能となる。

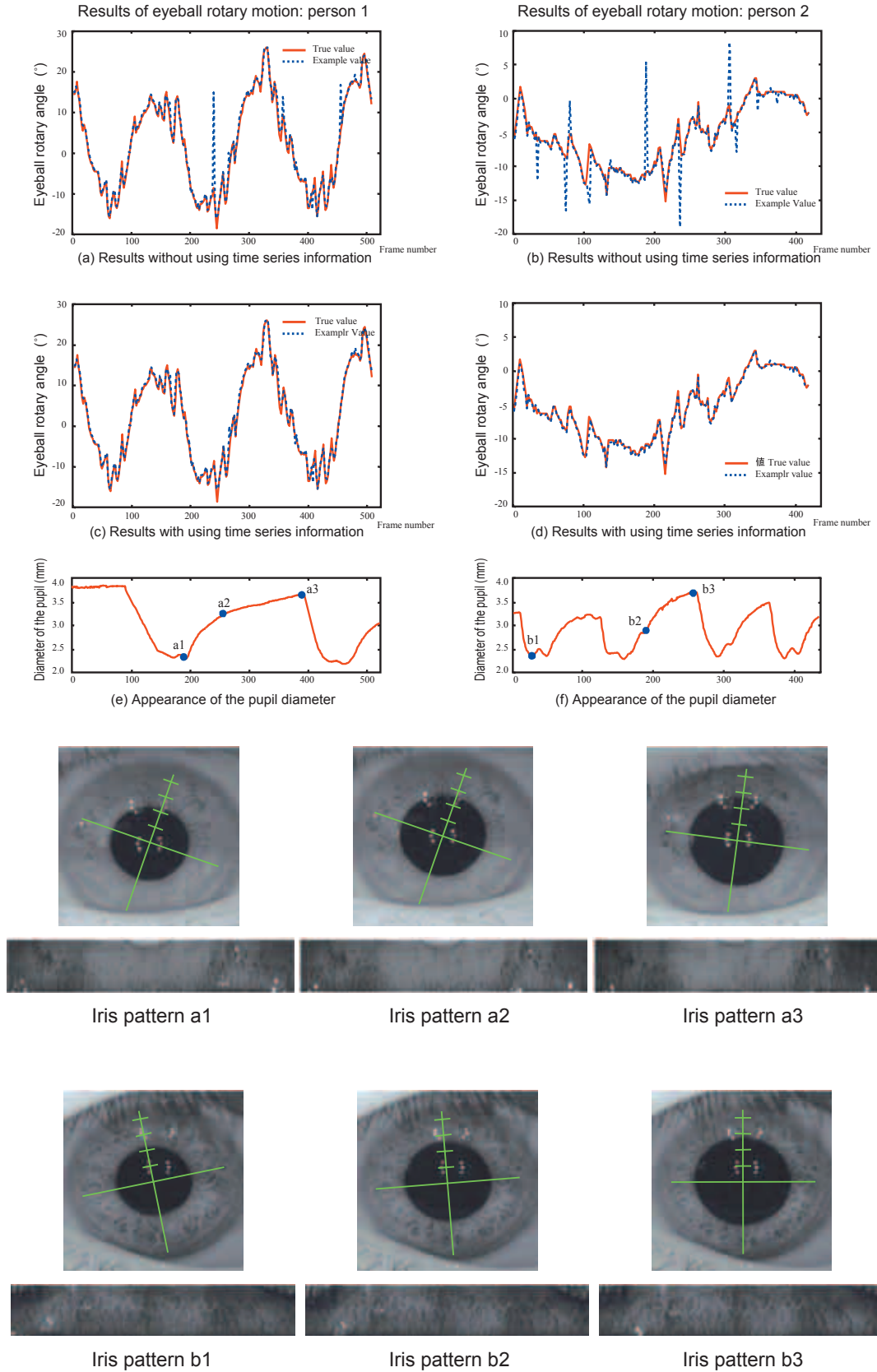


Fig. 13 Comparison between experimental value and true value

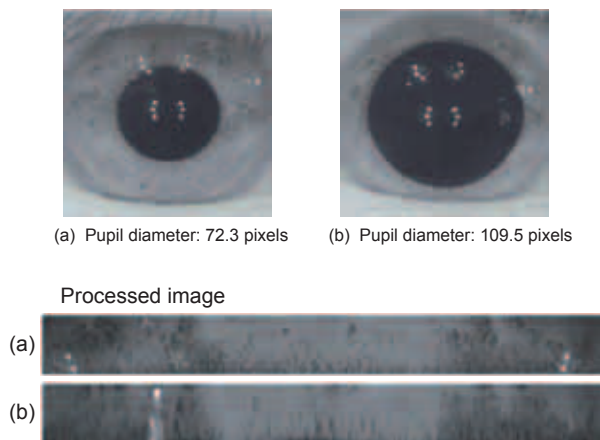


Fig. 14 Examples of miss detection images: eyeball rotary motion

5. まとめ

本稿では、高速楕円検出法を用いて瞳孔抽出を行い、眼球回旋計測に応用する手法を提案した。内接する平行四辺形の成立条件から楕円中心を算出し、アウトライアを除去することで、瞳孔抽出精度 97.8% の検出率を得ることができた。また、従来法では困難であった高速な瞳孔抽出(約 5 ms)が可能であることを示した。さらに、瞳孔抽出によって算出した楕円パラメータから虹彩パターンを取得し、時系列データを用いることによって、眼球回旋角度の真値との誤差 0.43° を得ることができた。瞳孔径が 15 pixel 以内の変化であれば回旋計測に影響が及ばないことも確認でき、提案手法の有効性を示した。

今後は、暗室におけるパターンの伸縮特性を考慮した、眼球回旋方法を検討する予定である。

<参考文献>

- 1) 辻徳生, 柴田真吾, 長谷川勉, 倉爪亮: “視線計測のためのLMedSを用いた虹彩検出法”, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2004論文集I (2004), pp. 684-689.
- 2) 竹上健, 後藤敏行, 大山玄: “視線方向計測のための高精度瞳孔検出アルゴリズム”, 信学論 (D-II), Vol.J86-D-II, No.2 (2003), pp. 252-261.
- 3) 北川洋介, 加藤丈和, 呉海元, 和田俊和: “アイモデルを用いた視線推定のための黒目追跡”, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2005論文集 (2005), pp. 1343-1350.
- 4) 山田浩史, 乗松有, 小塚一宏, 中野倫明, 山本新: “ド

ライバの運転状態の検知1 —インナミラー内蔵カメラによる視線検出—”, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2004論文集I (2004), pp. 63-68.

- 5) 大野健彦: “視線を用いた高速なメニュー選択作業”, 情処学論, Vol.40, No.2 (1999), pp. 602-612.
- 6) 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”, T.IEE Japan, Vol.119-C, No.1 (1999).
- 7) 苧阪良二, 中溝幸夫, 古賀一男: “眼球運動の実験心理学”, 名古屋大学出版社 (1993).
- 8) 大野健彦, 武川直樹, 吉川厚: “眼球形状モデルに基づく視線測定システム —視線入力デバイスの実現に向けて—”, 情処研報 2001-HI-93, Vol.2001, No.38 (2001), pp. 47-54.
- 9) 松田圭司, 永見武司: “共通 VidieAPI 対応視線位置計測システムの開発”, 第15回生体・生理工学シンポジウム論文集 (2000), pp. 285-288.
- 10) 松田圭司, 永見武司, 山根茂: “視線位置計測システムの開発”, 信学技報, TL2000-2 (2000), pp. 9-16.
- 11) 渡辺孝志, 柴田俊浩: “Hough変換と階層化画像を用いた欠損楕円の検出”, 信学論 (D-II), Vol.J73-D-II, No.2 (1990), pp. 159-166.
- 12) 渡辺孝志, 木村彰男, 丹波澄雄, 横山隆三: “Li-Lavin-Le Master 型高速ハフ変換による欠損楕円の検出”, 信学論 (D-II), Vol.J76-D-II, No.12 (1993), pp. 2504-2512.
- 13) 渡辺孝志, 畠山雅充, 木村彰男: “ハフ変換を用いた接線情報の抽出と欠損楕円の検出”, 信学論 (D-II), Vol.J82-D-II, No.12 (1999), pp. 2221-2229.
- 14) 藤本公三, 岩田剛治, 仲田周次: “ θ - p ハフ変換平面からの2次曲線のパラメータ抽出”, 信学論 (D-II), Vol.J74-D-II, No.9 (1991), pp. 1184-1191.
- 15) P. J. Rousseeuw and A. M. Leroy: “Robust Regression and Outlier Detection”, Wiley, New York (1987).
- 16) M. A. Fischler and R. C. Bolles: “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”, Commun. ACM, No.24, Vol.6 (1981), pp. 381-395.
- 17) 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”, 日本機会学会論文集(C編), 58, 556 (1992), pp. 3644-3648.



<著 者>



深谷 直樹
(ふかや なおき)
システム開発部
工学博士
ドライバモニタ技術の開発に従事



坂下 祐輔
(さかした ゆうすけ)
中部大学大学院工学研究科
情報工学専攻
博士課程前期2年
動画像処理の研究に従事



藤吉 弘巨
(ふじよし ひろのぶ)
中部大学工学部
情報工学科助教授
工学博士
コンピュータ・ビジョン，動画像
処理，パターン認識・理解の研究
に従事