高速楕円検出に基づく眼球回旋運動の計測

Measurement of Cycloduction Movement Based on Fast Ellipse Detection

坂下祐輔 † 藤吉弘亘 † 平田豊 † 高丸尚教 † 深谷 直樹 ‡

Yuusuke SAKASHITA†, Hironobu FUJIYOSHI†, Yutaka HIRATA†, Hisanori TAKAMARU†, Naoki FUKAYA‡

†中部大学 ‡株式会社デンソー †Chubu University, ‡DENSO Corporation E-mail: ys@vision.cs.chubu.ac.jp, hf@cs.chubu.ac.jp

Abstract

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度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 [2],[14],[17].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 [8] 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 [9] 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[4].

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3つの方法が用いられている.眼 球電位法 [1] は,電極を被験者に固定する必要があり, その計測結果も周囲の電気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[5]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 [4],[6],[7]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3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 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



図1 瞳孔と虹彩パターン

瞳孔抽出が要求される (図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5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[10]~[13]. 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 [2] は, LMedS によるアウトライア除去 [16] 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

$$\min \operatorname{med}(\epsilon_i^2) \tag{1}$$

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. 侯補点の中から 5 点をランダムに選出し, 5 点を 通る楕円を計算.
- 2. 各侯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, ..., n) の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 [2] 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,RANSAC[15] や最小メジアン法 [16] 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[3],[4].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[4]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, 図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[1].図 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,図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



(b) 眼球回旋撮影装置

図2 本システムで用いた眼球運動計測装置



図 3 近赤外線 LED によるアウトライアの例

の合計5つのパラメ-タから構成されている.

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

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[4].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中 点同士を連結すると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(図4参照).



図4 平行四辺形による楕円中心の算出

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.

Create an array A
Initialize A to 0
For $(P_{a_0}$ to $P_{a_{n-1}}, P_{b_0}$ to $P_{b_{n-1}})$
$\mathbf{If}(\overline{P_{a_0}P_{a_1}}=\overline{P_{b_0}P_{b_1}})$
$\mathbf{A}[(P_{a_0} + P_{a_1})/2, (P_{b_0} + P_{b_1})/2] + = 1$
End
$\mathbf{Find}(x_0, y_0) = rg \max \mathbf{A}$
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, $|\overline{op_1} - \overline{op_2}| \le 1$ を満足する p_1 と p_2 を正しい輪郭点とする.図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.



図5 アウトライアの除去

3.1.4 楕円パラメ - タの推定

楕円を表す (2) 式はパラメ - タに対して線形な形で 表すと,

$$Ax^{2} + Bxy + Cy^{2} + Dx + Ey + F = 0$$
(3)

となる.(3)式に線形最小二乗法を適用し,各パラメ-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 よって,楕円パラメ-タの推定が可能になる.

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

$$x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \tag{4}$$

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

$$(a,b) = \sqrt{\frac{2(Ax_0^2 + Bx_0y_0 + Cy_0^2 - F)}{A + C \pm \left(\frac{B}{\sin 2\theta}\right)}}$$
(6)

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{B}{A - C} \right) \tag{7}$$

ただし,(6)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,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,図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. 予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. 3.1 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 (図 7). これにより,後の虹彩パターンのマッチングが安易にな る. θ に対応する瞳孔輪郭点 (x_s, y_s) に対応する拡大し 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,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 度刻みに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.



図 7 (*x*, *y*) 空間から (*θ*, *r*) 空間への投影

$$(\theta, r) = I(x, y)$$

$$= I(rx_e + (1 - r)x_s, ry_e + (1 - r)y_s) \qquad (8)$$

$$0 < \theta < 360, \quad 0 < r < 1$$

$$x_s = x_0 + a\cos\phi\cos\theta - b\sin\phi\sin\theta$$

$$y_s = y_0 + a\sin\phi\cos\theta - b\cos\phi\sin\theta$$

$$x_e = x_0 + (a + p)\cos\phi\cos\theta - (b + q)\sin\phi\sin\theta$$

$$y_e = y_0 + (a + p)\sin\phi\cos\theta - (b + q)\cos\phi\sin\theta$$

$$(9)$$

Step 4. 取得した虹彩パターン $T(\theta, r)$ と 0.5 度ずつ 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).

$$\hat{\theta}_s^{T,Ref} = \underset{\theta_s \in (0,\cdots,360)}{\arg\min} \sum_{\theta} \sum_r \left| T(\theta,r) - Ref(\theta + \theta_s,r) \right| (10)$$

第12回画像センシングシンポジウム予稿集, pp.558-565, Yokohama, Jun., 2006





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(図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フレーム前の推定回旋角 $\hat{\theta}_{s}^{t-1,0}$,1フレーム前と現フレームの推定回旋角 $\hat{\theta}_{s}^{t,t-1}$ をそれぞれ算出し,現フレームの結果を式(11)により 判定する.





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

4 評価実験

4.1 実験環境

評価実験として,図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2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 - ムの実画像に対して楕円パラメ - 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.図10 に瞳孔抽出の比較結果の例を示す.表1 に楕円検出率,長軸の測定誤差,短軸の計測誤差を示す.



図 10 瞳孔抽出の比較結果

表1より,アウトライアを除去しないで楕円パラメ-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

	検出率	長軸誤差	短軸誤差		
	[%]	[pixel]	[pixel]		
アウトライアあり	37.3	23.3	15.7		
アウトライアなし	97.8	1.9	1.4		

表1 楕円検出精度の比較

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.

実験 2

従来法である LMedS[2] 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 - 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 比較を表 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.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 msec である.一方,提案手法 は約 5 msec 以下と高速に楕円パラメータを推定できる ことがわかる.LMedS の処理時間を同じ 5 msec 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 (図 11).



図 11 LMedS の検出率と処理回数の関係

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.

状態 (c) の場合, LMedS は 91 % に対し,本手法に よる検出率は 83 % に低下する.これは,図 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 % 以下の場合は検出率 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.



図 12 検出できない瞳孔画像の例

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用いる.

図 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 度を得た.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 とがわかった(図 13).

しかし,図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,瞳孔の中心に近づくほど伸縮が大きくなるた めである.



図 14 回旋計測ができない瞳孔

	最小メジアン法 [2]		提案手法	
	処理時間 [msec]	検出率 [%]	処理時間 [msec]	検出率 [%]
欠損のない瞳孔	20.6	99.5	4.5	100.0
内部に欠損の瞳孔	20.5	63.0	4.9	98.5
端の欠けた瞳孔	20.6	91.0	4.7	83.0

表 2 検出率と処理時間の比較

4.4 計測時間

提案手法の処理時間を, Pentium4 Xeon 3.6GHz Dual, 2GBのメモリ, Linux kernel 2.6 を搭載した PC 上で計測した結果,瞳孔抽出では,前処理に3 msec, 楕円中心の算出に0.5 msec, アウトライア除去に0.2 msec,楕円のパラメ-夕推定に0.3 msec,合計5 msec 以下(最大200 fps)となり,八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12.0 msec である.従って,瞳孔 抽出と回旋角算出に約30 msec の処理時間となり,最大 30 fps によるリアルタイム眼球回旋計測が可能となる.

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 msec)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 度を得る 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.

謝辞

本研究は, 文部科学省ハイテク・リサーチ・センター 整備事業(平成16年度~平成20年度)による私学助 成を得て行われている.

参考文献

- 学阪良二,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.
- [2] 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, pp.684-689, 2004.

- [3] 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, pp.3644-3648, 1992.
- [4] 堺浩之、山地一禎、平田豊、戸田尚宏、臼井支郎: "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.
- [5] 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, pp.47-54, 2001.
- [6] 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, pp.285-288,2000.
- [7] 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, pp.9-16, 2000.
- [8] 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 - 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, pp.63-68, 2004.
- [9] 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, pp.602-612, 1999.
- [10] 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, pp.159-166, 1990.
- [11] 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, pp.2504-2512, 1993.
- [12] 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, pp.2221-2229, 1999.
- [13] 藤本公三,岩田剛治,仲田周次: "θ ρ 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, pp.1184-1191, 1991.
- [14] 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, pp.252-261, 2003.
- [15] 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, pp.381-395, 1981.
- [16] P. J. Rousseeuw and A. M. Leroy : "Robust Regression and Outlier Detection", Wiley, New York, 1987.
- [17] 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・理解シンボジウム MIRU2005 論文集, pp.1343-1350, 2005.



図13 実験値と真値との比較