

高精度な視線計測を実現する瞼の形状を考慮したハフ円検出による虹彩位置計測

平野 公太^{†1,a)} 杉原 真^{†1} 志堂寺 和則^{†1}

概要: 近年、視線計測技術についての研究が盛んに行われている。カメラを用いた非接触型の視線計測では画像処理により虹彩中心と角膜曲率中心を推定することで視線の推定を実現している。虹彩位置を画像から計測する場合、虹彩輪郭がまぶたに隠れることで推定精度が低下する場合がある。本研究は虹彩輪郭の一部がまぶたに隠れた場合の推定精度を向上する手法を提案する。提案手法では、先行フレームの虹彩位置から次のフレームにおける大まかな虹彩位置を予測する。予測された虹彩位置に応じて虹彩円の見え方を考慮し、エッジ点に重みを付けてハフ円検出を施すことで、虹彩輪郭以外のエッジ点による虹彩円の誤検出を防止する。本論文では提案手法と既存手法の精度における比較実験を行い、虹彩中心位置と虹彩半径の計測において精度の向上を確認した。

キーワード: 視線計測, 虹彩検出, ハフ変換, 画像処理, 精度向上

An iris detection for high-precision gaze measurement by Hough circle detection in consideration of the shape of eyelids

HIRANO KOTA^{†1,a)} SUGIHARA MAKOTO^{†1} SHIDOJI KAZUNORI^{†1}

Abstract: Recently, gaze measuring technology has been actively studied. The non-contact gaze measuring using cameras is realized by estimating the iris center and the corneal curvature center by image processing. When estimating the iris position from the images, there is a case that the estimation accuracy of the position is reduced, because the iris contour is hidden in the eyelid. In this study, we propose a method to improve the estimation accuracy of the case that part of the iris contour is hidden in the eyelid. This method is putting the weight on the reliable edges of the iris contours. The reliable edges are presumed from the previous frame. In this paper, measurement of the edge frequency for each circumferential angle for different iris positions showed that the reliability of the edges constituting the iris contour changes regularly by the iris position. We conducted comparative experiments in the accuracy of the proposed method and the conventional method. It confirmed the improvement of the accuracy of the iris position and the iris radius of measurement.

Keywords: Eye tracking, Iris detection, Hough transform, Image processing, Accuracy improvement

1. はじめに

近年、視線計測技術についての研究が盛んに行われている。計測によって得られた視線情報はPCの入力デバイスや広告の注目度調査、自動車運転における運転行動予測などさまざまな分野に利用されている [1]。中でもカメラを用いた非接触型の視線計測は、被計測者に対して計測を意識させないという点において、身体および精神的な負荷を軽減することができる。更に昨今のカメラや計算機の性能

向上、画像処理技術の発展によりリアルタイムな視線計測が可能となり、更なる分野への応用が期待されている。

ところで、カメラを用いた非接触型の視線計測には、被計測者の眼球部の映像から虹彩の中心位置と角膜曲率の中心位置を推定することで視線を推定する手法がある [2], [4]。この手法において視線を精度よく推定するためには、虹彩中心位置と角膜曲率中心位置を精度よく推定する必要がある。本研究では特に虹彩中心位置推定の精度向上を主眼とする。

カメラで眼球部を撮影した眼球画像から虹彩検出を行う際には、虹彩が円形であることを利用して、虹彩の輪郭を

^{†1} 現在, 九州大学
Presently with Kyushu University
^{a)} kouta.hirano@soc.ait.kyushu-u.ac.jp

円として検出する手法が挙げられる [8]。円検出にはハフ変換と呼ばれる検出手法が用いられる。しかし、実際の眼球画像では、虹彩の一部がまぶたに隠れカメラからは円形に見えない場合が多い。特に虹彩が極端に内側、もしくは外側に寄っている場合は虹彩の輪郭は一部しか見えず、位置推定の精度が著しく低下してしまうという問題がある。

本研究では、まぶたに対する眼球の位置によって画像に映る虹彩輪郭の部分が異なるという点に着目し、ハフ円検出の投票の際にエッジの信頼性に応じた重みをつけるという手法を提案する。本稿では虹彩輪郭を構成し得るエッジ（予備実験にて調査）を信頼性のあるエッジと定義する。この手法を用いることで、虹彩輪郭を構成しないエッジ（信頼性のないエッジ）による円の誤検出を防ぐことができると考えられる。本論文では、まず予備実験としてカメラに映る虹彩輪郭部のエッジが眼球位置によってどのような特徴を持つのかを調査した。さらに、提案手法を実装し、既存手法との比較を行った

本論文の構成を以下に示す。まず 2 節で非接触型視線計測の概要と、本研究が対象とするハフ円検出による虹彩中心位置推定について紹介する。次に 3 節で、筆者が提案する「瞼の形状を考慮したハフ円検出による虹彩位置計測手法」について説明する。4 節で、実験とその結果に対する考察を述べ、最後にまとめと今後の予定について述べる。

2. 研究背景

この節では非接触型視線計測の概要と、本研究が対象とするハフ円検出による虹彩中心位置推定について紹介する。

2.1 眼球構造と視線

人間の眼球構造と視線の関係について述べる。図 1 は人間の眼球を水平断面から見た図である。

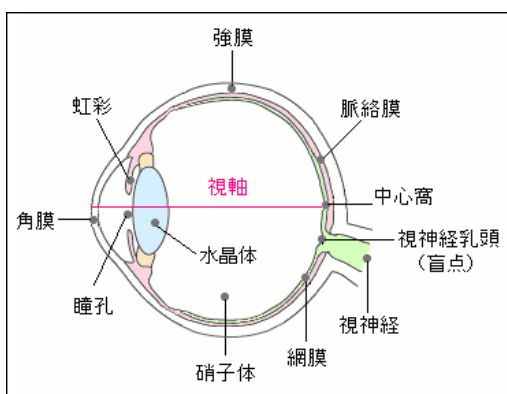


図 1 人間の眼球構造 [9]

人間は瞳孔から取り込んだ光を水晶体を通して網膜に投影することで視覚情報を得ている。網膜の中でも中心窩と呼ばれる部位は特に詳細な情報を得ることができ、虹彩と

中心窩を結ぶ線は視軸と呼ばれる。視軸を眼球外まで伸ばした線がいわゆる視線であり、カメラを用いた視線計測では、視軸を推定することにより視線推定をする。視軸は眼球中心を通過しており、虹彩中心と眼球中心の位置を計測することで視軸を推定することができる。したがって、視線推定の精度は虹彩中心と眼球中心の位置推定精度に大きく依存する。

2.2 ハフ変換による虹彩検出

虹彩が円形であることを利用し、ハフ変換を用いて円検出を行うことで虹彩検出をおこなう手法 [3] がある。

ハフ変換とは、画像中から特定の図形（直線や円など）を検出する手法 [5], [6] であり、オリジナル画像からエッジ点を抽出し、閾値以上の個数のエッジ点を通る対象図形を検出するというものである。ハフ変換による円検出の原理について説明する。

画像中に n 点のエッジが存在するとする。ハフ円検出の目的は閾値 t 個以上のエッジ点を通る円を決定することである。各エッジ点を e_1, \dots, e_n とし、各エッジの座標を $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ とする。 e_i について考える。 e_i の座標は (x_i, y_i) であり、この点を通る円は中心座標 (a, b) 、半径 r とすると

$$(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 = r^2$$

を満たす全ての (a, b, r) が考えられる。 a, b, r をそれぞれ軸にとった空間をパラメータ空間（投票空間）と呼び、 e_i を通過する全ての (a, b, r) をパラメータ空間に射影すると一つの曲面を描く。そのような曲面を n 個のエッジのそれぞれについて射影する。もし多くのエッジが同一円 (a_d, b_d, r_d) 周上に存在する場合、パラメータ空間の (a_d, b_d, r_d) では多くの曲面が交差する。閾値 t 以上の曲面が (a_d, b_d, r_d) で交差した場合、中心座標 (a_d, b_d) 、半径 r_d の円を検出する。

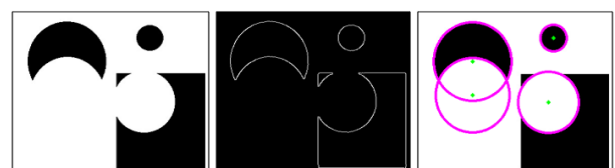


図 2 ハフ変換の例

(左:オリジナル画像, 中:エッジ抽出画像, 右:円検出後の画像)

図 2 はハフ変換による円検出の例で、左からオリジナル画像、エッジ抽出画像、円検出後の画像である。ハフ変換のメリットとして、ノイズや遮蔽物により円の一部が見えない場合の検出が可能である点や、検出する円のパラメータ（半径や中心座標）を制限することで投票空間を削減し高速化ができる点が挙げられる。OpenCV ライブラリに内蔵されているハフ円検出では、エッジの勾配情報を用いる

ことにより処理の高速化や Salt&Pepper ノイズへの耐性向上がなされている [8].

2.3 虹彩中心位置推定と課題

虹彩中心位置推定の手順を以下に示す.

- (1) カメラで眼球部を撮影する.
- (2) ノイズを除去するため, 画像にガウシアンフィルタをかける.
- (3) Canny フィルタにより, 画像からエッジを抽出する.
- (4) 手順 3 により得られたエッジ点について, 2.1 節のハフ円検出を施す.
- (5) 円検出により得られた円の中心点を, 虹彩の中心位置と推定する.

高速化のため, 手順 2 と手順 3 の間に虹彩部を抽出するよう二値化処理を挟む場合がある. これにより手順 3 で抽出されるエッジの個数を削減することができるため, 処理の高速化が期待できる.

この手法の課題点として, 虹彩が上下左右端に位置する場合, 虹彩輪郭がまぶたに隠れることによる円検出の精度低下が挙げられる. 例としては図 3 のような場合である. 図 3 では, 上まぶたや下まぶたの輪郭を虹彩の輪郭と誤ることで正しい虹彩輪郭の検出に失敗している. このような失敗は視線計測の精度に大きな悪影響を与える. 3 節では以上の課題を解決するための手法を提案する.

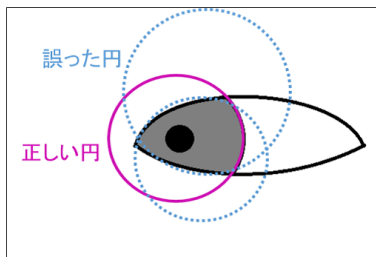


図 3 虹彩輪郭が隠れた場合の円検出失敗例

3. 虹彩位置推定に関する提案手法

この節では, 筆者が提案する「瞼の形状を考慮したハフ円検出による虹彩位置計測手法」について説明する.

3.1 仮説

本提案手法は以下の仮説に基づくものである.

- 虹彩が中央に位置する場合は, 円周左右部のエッジが虹彩を構成する可能性が高い.
- 虹彩が上側に位置する場合は, 円周下部のエッジが虹彩を構成する可能性が高い.

- 虹彩が下側に位置する場合は, 円周上部のエッジが虹彩を構成する可能性が高い.
- 虹彩が右側に位置する場合は, 円周左部のエッジが虹彩を構成する可能性が高い.
- 虹彩が左側に位置する場合は, 円周右部のエッジが虹彩を構成する可能性が高い.

本論文の 4 章にて, 以上の仮説を立証する予備実験を行った.

3.2 提案手法の処理フロー

提案手法の処理フローを図 4 に示す.

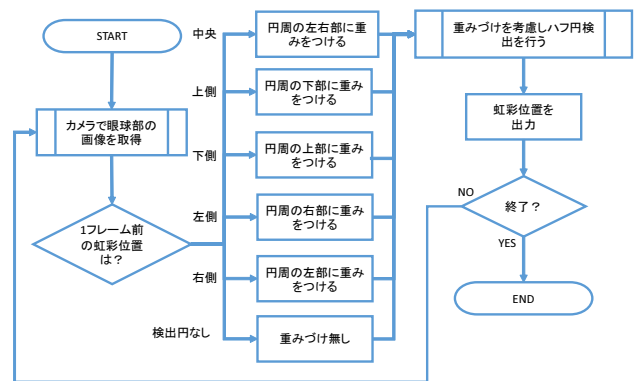


図 4 提案手法の処理フロー

この提案手法は, ビデオカメラを用いた連続的な虹彩検出を対象としている. ハフ円検出の際に, 1 フレーム前の虹彩位置により現在のフレームの大まかな虹彩位置を推定し, その位置によってエッジの勾配方向別に投票に重み付けをおこなう. 検出の最初のフレームと, まばたき等で円検出に失敗した次のフレームでは重み付けをしないとする. 本論文では, 虹彩位置の判定条件や各重みについては最適な数値を求めていないため, 今後の研究課題とする.

本提案手法では, 虹彩位置が切り替わった最初のフレームに限っては誤った重み付けを行うため推定精度が落ちると予想される. 特に短いフレーム間隔で虹彩が左側と右側を交互に行き来する場合には, 連続して精度が低下する恐れがある. しかしながら, 人間の眼球運動で最速である衝動性眼球運動 (Saccade) の角速度は $300 \sim 600^\circ/\text{sec}$ 程度であり, Saccade と Saccade 間の停留 (Fixation) は $20 \sim 50 \text{ ms}$ 程度であるため, 虹彩が左右を往復する時間は少なくとも 0.4 秒以上かかる [10]. よって, 毎秒 30 回程度の視線計測が可能であれば極端な精度低下は起こらず, また現在の非接触型視線計測では毎秒 60 回の視線計測が可能 [12] であるため, 大幅な精度低下はないと予想される.

4. 実験

本提案に際し, 3.1 節で述べた仮説に対する予備実験と,

本提案手法の有用性を確認するための虹彩検出精度における比較実験を行った。この節ではこれらの実験結果と考察を述べる。以下に述べる実験では OpenCV[13] と呼ばれる画像処理用のオープンソースライブラリを使用した。

4.1 予備実験

本研究の提案に際し 3.1 節の仮説を立証するため、カメラに映る虹彩輪郭部のエッジが虹彩中心位置によってどのような特徴を持つのかを調査する予備実験をおこなった。虹彩位置により画像に現れるエッジに偏りがあれば、その知見を円検出の精度向上に活かすことができると期待される。この章では、実験によって得られた結果と考察について示す。

4.1.1 実験手法

予備実験の手法を以下に示す。

- (1) 眼球部の画像 (サイズ: 200 × 140) を用意する。
- (2) 人の手により画像上の虹彩の中心位置と半径を求める。
- (3) ノイズを除去するため、画像にガウシアンフィルタ (フィルタサイズ 5 × 5) をかける。
- (4) 虹彩部を抽出するよう二値化処理をおこなう。
- (5) Canny フィルタにより、エッジを抽出する。
- (6) 手順 2 の円と手順 5 で得られたエッジの共通部を抽出する。
- (7) 手順 6 の各エッジについて、虹彩中心からの方位角を求める。
- (8) 方位角 20° ごとのエッジ頻度をヒストグラムとして記録する。

方位角とは虹彩中心から各エッジの方向を表す。時計の 12 時の方向を 0° とし、時計回りを正とした。実験は被験者一人の左眼球部の画像で、虹彩が中央、上、下、内、外のものそれぞれ 10 枚について行った。ヒストグラムは各画像 10 枚分のエッジを加算してある。

4.1.2 実験結果と考察

実験結果を以下に示す。また、各場合の実験画像 (左から元画像, エッジ抽出画像, 虹彩円周上のエッジ抽出画像) も合わせて示している。

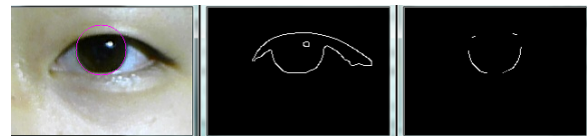


図 5 虹彩が中心に位置する場合の実験画像
(左:元画像, 中:エッジ抽出, 右:虹彩円周上のエッジ)

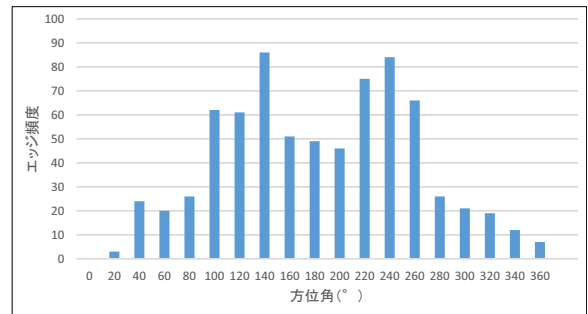


図 6 方位角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:中心)

図 6 は虹彩が中心に位置するときの虹彩の方位角とエッジ頻度の関係である。この図より、方位角 120° 付近と 240° 付近ではエッジ頻度が高く、0 ~ 40° と 320 ~ 360° ではエッジ頻度が低いことが分かる。以上の結果より、虹彩が中心に位置する場合、円周の 80 ~ 320° にあるエッジは信頼性があるといえる。



図 7 虹彩が上側に位置する場合の実験画像
(左:元画像, 中:エッジ抽出, 右:虹彩円周上のエッジ)

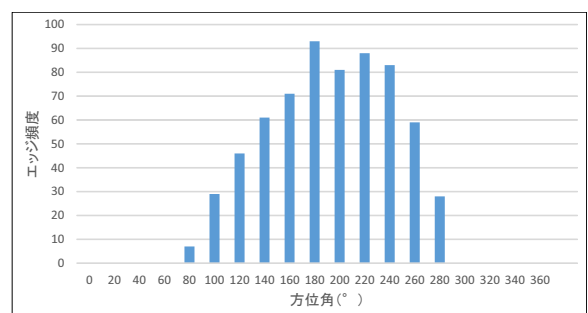


図 8 方位角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:上側)

図 8 は虹彩が上側に位置するときの虹彩の方位角とエッジ頻度の関係である。この図より、方位角 180° 付近ではエッジ頻度が高く、0 ~ 70° と 300 ~ 360° にはエッジが全くないことが分かる。以上の結果より、虹彩が上側に位置する場合、円周の 80 ~ 280° にあるエッジは信頼性があるといえる。



図 9 虹彩が下側に位置する場合の実験画像
(左:元画像, 中:エッジ抽出, 右:虹彩円周上のエッジ)

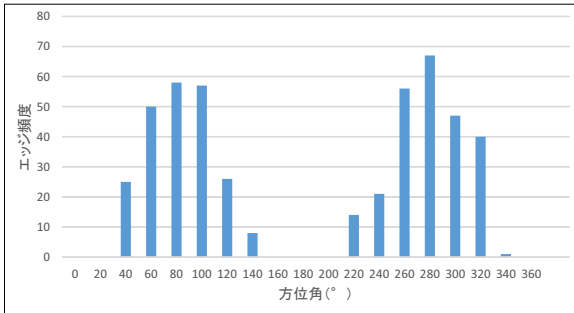


図 10 方位角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:下側)

図 10 は虹彩が下側に位置するときの虹彩の方位角とエッジ頻度の関係である。この図より、方位角 80° 付近と 280° 付近ではエッジ頻度が高く、0 ~ 20° と 160 ~ 200°, 340 ~ 360° ではエッジ頻度が低いことが分かる。以上の結果より、虹彩が下側に位置する場合、円周の 40 ~ 140°, 220 ~ 320° にあるエッジは信頼性があるといえる。



図 11 虹彩が内側に位置する場合の実験画像
(左:元画像, 中:エッジ抽出, 右:虹彩円周上のエッジ)

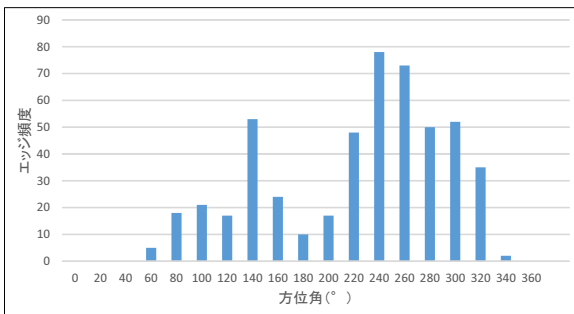


図 12 方位角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:内側)

図 12 は虹彩が内側に位置するときの虹彩の方位角とエッジ頻度の関係である。この図より、方位角 260° 付近ではエッジ頻度が高く、0 ~ 60° と 340 ~ 360° ではエッジ頻度が低いことが分かる。また、140° 付近にピークがあるが、これは目頭の部分のエッジがたまたま虹彩輪郭の位置に出ていることが原因だと思われる。以上の結果より、虹彩が

内側に位置する場合、円周の 200 ~ 340° にあるエッジは信頼性があるといえる。また、140° 付近に目頭によるエッジが存在し、誤検出の原因になると推測される。



図 13 虹彩が外側に位置する場合の実験画像
(左:元画像, 中:エッジ抽出, 右:虹彩円周上のエッジ)

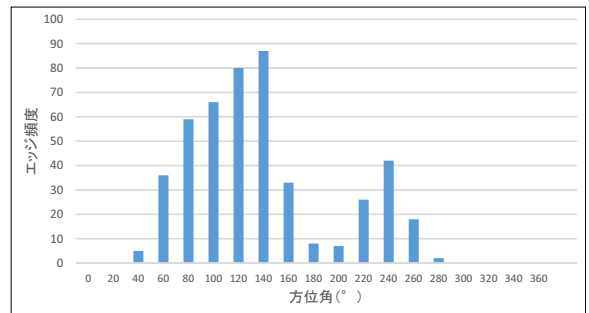


図 14 方位角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:外側)

図 14 は虹彩が外側に位置するときの虹彩の方位角とエッジ頻度の関係である。この図より、方位角 120° 付近ではエッジ頻度が高く、0 ~ 40° と 280 ~ 360° ではエッジ頻度が低いことが分かる。また、240° 付近にピークがあるが、これは目尻の部分のエッジがたまたま虹彩輪郭の位置に出ていることが原因だと思われる。以上の結果より、虹彩が外側に位置する場合、円周の 60 ~ 160° にあるエッジは信頼性があるといえる。また、240° 付近に目尻によるエッジが存在し、誤検出の原因になると推測される。

全体的な考察として、虹彩位置により方位角ごとのエッジ頻度に有意な差が現れることが分かった。3.1 節で述べた仮説は概ね正しく、虹彩位置が中央、上、右、左の場合、仮説は正しいと言える。虹彩位置が下側の場合、虹彩の上側輪郭部のエッジは検出されなかった。これは虹彩が下がるに連れてまぶたも下がるため、虹彩の上部が見えないことが原因だと考えられる。よって虹彩位置が下側の場合、提案手法での重み付けは円周左右部について行うべきだと言える。

4.2 比較実験

提案手法を実装し、既存手法との比較を行った。虹彩中心位置の絶対値平均誤差と虹彩半径の絶対値平均誤差を比較項目とし、虹彩の位置が中央、内側、外側の場合について比較を行った。

4.2.1 実験手法

本実験の手法を以下に示す。

- (1) 眼球部の画像 (サイズ: 200 × 140) を用意する。
- (2) ノイズを除去するため、画像にガウシアンフィルタ (フィルタサイズ 5 × 5) をかける。
- (3) 虹彩部を抽出するよう二値化処理をおこなう。
- (4) Canny フィルタにより、エッジを抽出する。
- (5) ハフ円検出により虹彩の中心座標と半径を求める。
- (6) 正解データと比較し、絶対値平均誤差を得る。

以上の手順を既存手法と提案手法それぞれについて行った。実験画像は被験者一人の左眼球部の画像で、虹彩が中央、内、外、上、下のものそれぞれ 20 枚について行った。実験の前提として、画像中には円 (虹彩) が必ず一つだけ存在するとし、ハフ投票空間にて最も得票の多い円を検出円とした。提案手法実装の際には、予備実験の結果を考慮し、信頼性があるエッジには重み 1、それ以外には重み 0 をつけた。具体的な方位角と重みの関係は以下である。

- 中央: 方位角 40 ~ 320° に重み 1、それ以外は 0。
- 上: 方位角 80 ~ 280° に重み 1、それ以外は 0。
- 下: 方位角 40 ~ 140°, 220 ~ 320° に重み 1、それ以外は 0。
- 内: 方位角 220 ~ 320° に重み 1、それ以外は 0。
- 外: 方位角 60 ~ 160° に重み 1、それ以外は 0。

今回の前提では最多得票数の円 1 つが検出されるため、重みの絶対数ではなく方位角ごと重みの比率が重要となる。

4.2.2 実験結果と考察

比較実験の結果を以下の表に示す。誤差の単位はピクセルであり、誤差の比率は既存手法に対する提案手法の誤差の比率である。今回の実験画像では、1 ピクセルは約 0.5mm であった。

表 1 は虹彩中心位置計測における誤差の比較結果である。

表 1 虹彩中心位置計測における誤差の比較結果

虹彩位置	中心位置の平均絶対誤差		誤差の比率
	既存手法	提案手法	
中央	1.82	2.59	1.42
上	1.19	1.19	1.00
下	4.25	4.65	1.09
内	12.85	2.85	0.22
外	27.96	8.23	0.29

※誤差の単位はピクセル

表 1 の比較結果より、虹彩中心位置の平均誤差について、

虹彩位置が内と外の場合は誤差が改善している。中央と下の場合は誤差がわずかに悪化している。

内と外においては既存手法の 3 割未満の誤差に抑えられている。これは 2.3 節で述べた輪廓による検出ミスが既存手法において多く見られたため、既存手法では平均誤差が大きくなっていることが要因だと考えられる。提案手法においてはそのような検出ミスは殆ど見られず、2.3 節の課題を解決できたと言える。中央、下の場合ではどちらの手法においても輪廓による検出ミスはあまり見られなかったが、提案手法の重み付けが最適でなかったせいか、既存手法のほうが誤差が小さく抑えられている。上の場合、既存手法と提案手法の間に差は見られなかった。虹彩位置が上にある場合、連続した虹彩輪廓が多く見えるためどちらも精度よく検出でき、差が生じなかったためだと考えられる。

表 2 は虹彩半径計測における誤差の比較結果である。

表 2 虹彩半径計測における誤差の比較結果

虹彩位置	半径の平均絶対誤差		誤差の比率
	既存手法	提案手法	
中央	1.45	1.09	0.75
上	0.17	0.17	1.00
下	2.63	1.88	0.71
内	4.00	0.87	0.22
外	16.40	5.90	0.36

※誤差の単位はピクセル

表 2 の比較結果より、虹彩半径の平均誤差については、上以外の全てにおいて提案手法の誤差のほうが小さくなっている。特に虹彩位置が内と外の場合に、大幅な改善が見られる。上の場合では表 1 と同様に差が見られなかった。理由は同じく、連続した虹彩輪廓が多く見えるためどちらも精度よく検出でき、差が生じなかったためだと考えられる。虹彩位置が外にある場合の誤差が既存手法、提案手法共に大きくなっているが、これは小さい弧の曲率から円を推定することが難しいためと思われる。

表 1 と表 2 の結果より、虹彩位置が内と外の場合、提案手法の誤差が大幅に小さくなっており、有効性が確認できた。表 1 では、中央と下の場合に提案手法の誤差が悪化しているが、重みは自由に変えられるため、例え最適な重み付けが見つからずとも、全ての角度で重みを 1 (既存手法と同じ) にすれば最悪でも誤差は既存手法と同じとなる。

また、今回の実験から、虹彩位置が外の場合より内の場合の方が精度よく検出できることが分かった。視線計測を目的とする場合、左右両眼球を同時に計測することが考えられるため、左右両眼球の虹彩の内外を互いに補完する (例えば左眼の虹彩が外にある場合は右眼の虹彩が内にある) ことで精度の向上が見込まれる。

5. 高精度な視線計測にむけて

2.1 節では虹彩中心位置と角膜曲率中心位置を計測することで視線を推定する手法を述べた。2.1 節の手法において、虹彩中心位置計測の誤差が視線計測の誤差に及ぼす影響について考察する。考察の前提として、角膜曲率の中心位置は与えられるものとし、角膜曲率の半径は 8.0mm[11] とする。

今、L[m] 先を注視する視線を計測した際の注視点誤差について考える。

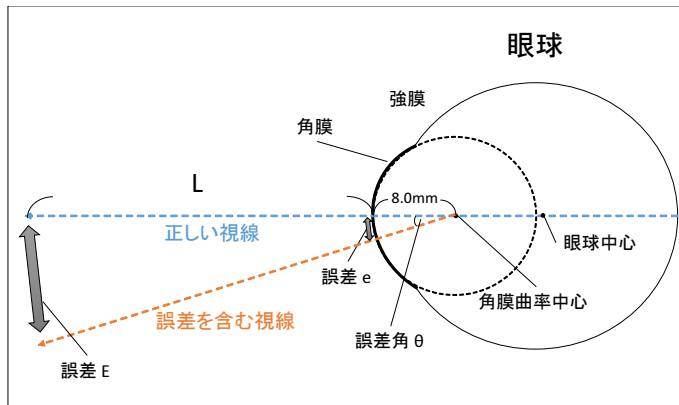


図 15 虹彩位置の誤差が視線計測に及ぼす影響

図 15 は、虹彩位置の誤差が視線計測に及ぼす誤差を模式的に表したものである。ここで、

L : 注視点距離 [m]

e : 虹彩中心位置の誤差 [mm]

E : 視線距離 L における注視点誤差 [m]

θ : 視線誤差角 [rad]

である。

e と E を円の弧として見れば、方位角と半径と弧の関係から、

$$\theta = \frac{e}{8.0}$$

より、視線誤差角は虹彩中心位置の誤差に比例する。また、

$$\begin{aligned} E &= \theta L \\ &= \frac{eL}{8.0} \end{aligned}$$

より、注視点誤差も虹彩中心位置の誤差に比例することが分かる。虹彩位置が内と外の場合において、本提案手法では誤差を従来の 3 割未満に抑えることに成功したため、視線計測における注視点誤差も従来の 3 割未満に抑えられると言える。

6. おわりに

本論文では、まぶたに対する虹彩の位置によって画像に映る虹彩輪郭の部分が異なるという点に着目し、精度向上のため、ハフ円検出の際のエッジの信頼性に応じた重み付け手法を提案した。まず、本提案で重要となる仮説について、カメラに映る虹彩輪郭部のエッジが眼球位置によってどのような特徴を持つのかを調査する予備実験を行った。実験結果より、虹彩位置により方位角ごとのエッジ頻度に異なる特徴が表れ、本提案手法を用いることで虹彩位置検出の精度向上が期待できることを示した。また提案手法を実装して既存手法との比較実験を行い、特に有効な場面においては虹彩中心位置と半径の誤差を従来の 3 割未満まで抑えられることを確認した。

今回は簡単化のためエッジの信頼性が「ある or なし」により重みを「1 or 0」とした。しかし虹彩輪郭のエッジ頻度によってより細かく信頼性のランクを設け、重みにバリエーションを持たせることでさらなる高精度化を実現できる可能性が大いにあると筆者は考える。今後は本提案手法で用いる重みパラメータの更なる検討や、角膜反射法と組み合わせた視線計測システムの開発を行う予定である。

謝辞 日頃より熱心に御討論頂く九州大学杉原研究室諸氏に深く感謝する。本研究は総務省 SCOPE (152310003)、及び文部科学省科研費 (25330064) の支援によって行われた。

参考文献

- [1] 石若卓夫, 斎藤浩, 坂田雅男, & 岡林繁. 視線計測技術の動向と車両への応用. 自動車技術, 49(7), 7-13, 1995.
- [2] Duchowski, Andrew. Eye tracking methodology: Theory and practice. Vol. 373. Springer Science & Business Media, 2007.
- [3] Kawaguchi, Tsuyoshi, Mohamed Rizon, and Daisuke Hidak. "Detection of eyes from human faces by Hough transform and separability filter." Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics) 88.5 (2005): 29-39.
- [4] Guestrin, Elias Daniel, and E. Eizenman. "General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections." Biomedical Engineering, IEEE Transactions on 53.6, 1124-1133. 2006.
- [5] P.V.C.Hough, "A method and means for recognizing complex patterns", U.S.Patent 3,069,654. 1962.
- [6] Illingworth, John, and Josef Kittler. "A survey of the Hough transform." Computer vision, graphics, and image processing 44.1 (1988): 87-116.
- [7] Yuen, H. K., et al. "Comparative study of Hough transform methods for circle finding." Image and vision computing 8.1 (1990): 71-77.
- [8] Ajdari Rad, Ali, et al. "Fast Circle Detection Using Gradient Pair Vectors." Proceedings of the Seventh International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications. No. LANOS-CONF-2009-007. CSIRO Publishing, 2003.

- [9] “色彩科学 -目のしくみ-”, 入手先
(<http://rock77.fc2web.com/main/color2/color2-1-6.html>)
- [10] 若倉雅登, 三村治. 神経眼科をやさしく理解するための視覚と眼球運動のすべて. Medical View 社. 2007.
- [11] 山本節. ”角膜形状の発達と経年変化: 角膜曲率半径について.” 日本コンタクトレンズ学会誌 39.1 (1997): 1-4.
- [12] 東陽テクニカ®, “Smart Eye Pro System”, 入手先
(<http://www.toyo.co.jp/car/smarteye/pro.html>)
- [13] OpenCV, 入手先 (<http://opencv.org/>)
- [14] Saragih, Jason M., Simon Lucey, and Jeffrey F. Cohn.
”Deformable model fitting by regularized landmark mean-shift.” International Journal of Computer Vision 91.2 (2011): 200-215.