

虹彩とまぶたの形状を考慮した Hough 円検出による虹彩位置推定手法の提案 (2015 年 2 月 3 日版)

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推定する場合、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。1 フレーム前の推定位置から、画像上に写っていると推測される（信頼度の高い）虹彩輪郭のエッジ部に重みを付け Hough 円検出を施すことで、虹彩輪郭以外のエッジによる誤検出を防止する。本文献中ではさまざまな虹彩位置について円周角ごとのエッジ頻度を計測し、虹彩位置により虹彩の輪郭を構成するエッジの信頼度が規則的に変化することを示した。

キーワード：視線計測、虹彩検出、Hough 変換、画像処理、精度向上

Proposal of the iris position estimation method based on Hough circle detection in consideration of the shape of the iris and eyelid (version 2015/2/3)

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 that 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.

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], [3]。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

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

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、虹彩の輪郭を円として検出する手法が挙げられる [4]。円検出には Hough 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、Hough 円検出の投票の際にエッジの信頼度に応じた重みをつけるという手法を提案する。この手法を用いることで、虹彩輪郭を構成しないエッジ（信頼度の低いエッジ）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、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実験を行った。

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 Hough 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「虹彩とまぶたの形状を考慮した Hough 円検出による虹彩位置推定手法」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

この章では非接触型視線計測の概要と、本研究が対象とする Hough 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 [5]。

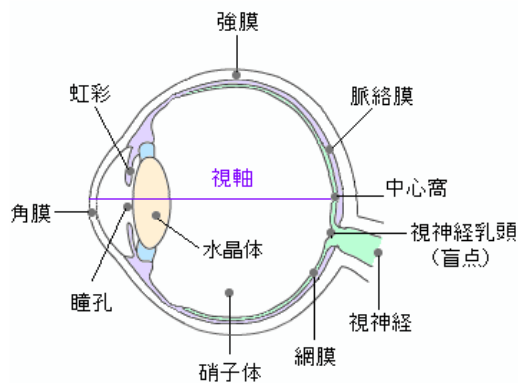


図 1 人間の眼球構造

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っており、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 Hough 変換による虹彩検出

虹彩が円形であることを利用し、Hough 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がある。

Hough 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。Hough 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。Hough 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。

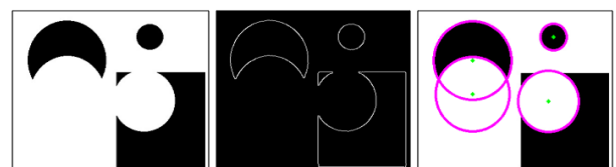


図 2 Hough 変換の例

(左:オリジナル画像, 中:エッジ抽出画像, 左:円検出後の画像)

図 2 は Hough 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。Hough 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 に内蔵されている Hough 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。

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 Hough 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。3 節では以上の課題を解決するための手法を提案する。

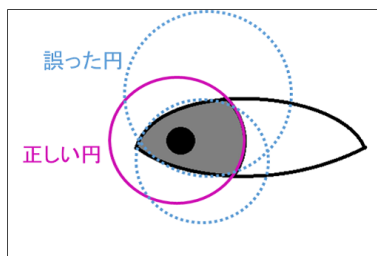


図 3 虹彩輪郭が隠れた場合の円検出失敗例

3. 虹彩位置推定に関する提案手法

この章では、筆者が提案する「虹彩とまぶたの形状を考慮した Hough 円検出による虹彩位置推定手法」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。

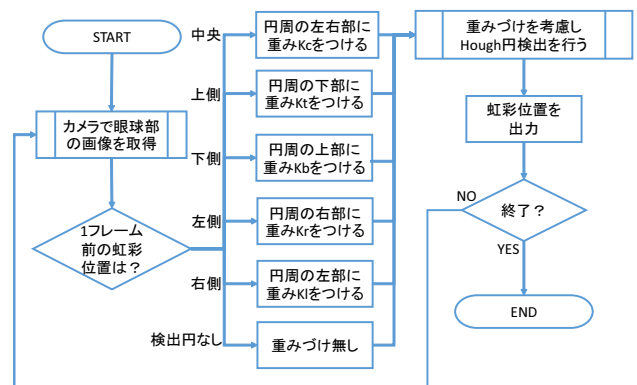


図 4 提案手法の処理フロー

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。Hough 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、その位置によって円周角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。虹彩位置の判定条件や、各重み K_c 、 K_t 、 K_b 、 K_r 、 K_l については、具体的な数値決定をまだおこなっておらず、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 1 フレームごとに虹彩が左側と右側を交互に行き来する場合では大幅な精度低下の恐れがある。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 0.5 秒以上かかる [6]。よって、毎秒 5 回以上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 [7] であるため、問題無いと予想される。

4. 実験

本研究の提案に際し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 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) 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。

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。

4.2 実験結果と考察

実験結果を以下に示す。円周角は、時計の 12 時の位置を 0° とし、時計回りを正として計測した。

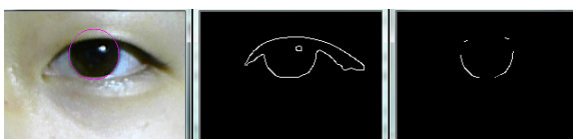


図 5 虹彩が中心に位置する場合の実験画像
(左:元画像, 中:エッジ抽出, 右:虹彩円周上のエッジ)

図 6 は虹彩が中心に位置するときの虹彩の円周角とエッジ頻度の関係である。この図より、円周角 120° 付近と 240° 付近ではエッジ頻度が高く、0° ~ 80° と 280° ~ 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° ~ 280° にあるエッジは他のエッジより信頼度が高いといえる。

図 8 は虹彩が上側に位置するときの虹彩の円周角とエッジ頻度の関係である。この図より、円周角 180° 付近では

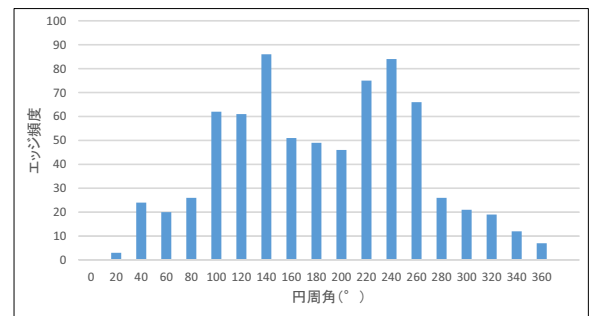


図 6 円周角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:中心)



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)

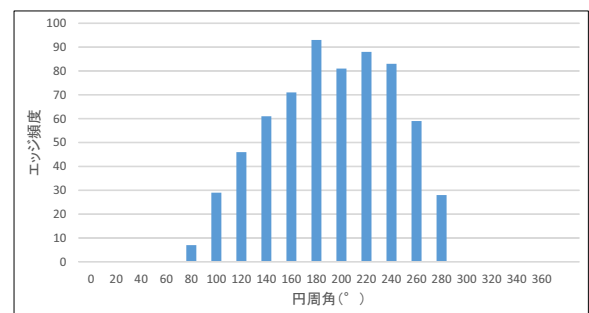


図 8 円周角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:上側)

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° にあるエッジは他のエッジより信頼度が高いといえる。



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)

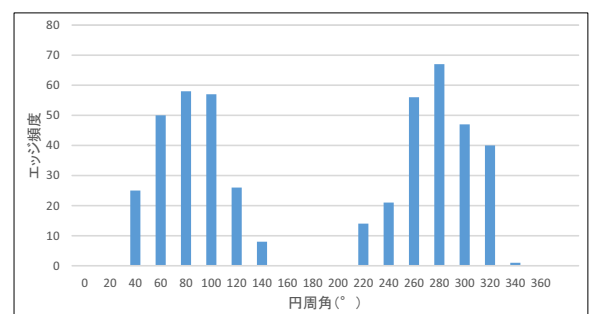


図 10 円周角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:下側)

図 10 は虹彩が下側に位置するときの虹彩の円周角とエッジ頻度の関係である。この図より、円周角 80° 付近と 280° 付近ではエッジ頻度が高く、 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ と $160^{\circ} \sim 200^{\circ}$ 、 $340^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 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 $40^{\circ} \sim 140^{\circ}$ 、 $220^{\circ} \sim 320^{\circ}$ にあるエッジは他のエッジより信頼度が高いといえる。



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)

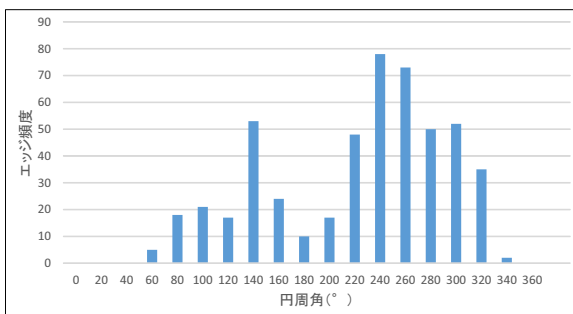


図 12 円周角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:内側)

図 12 は虹彩が内側に位置するときの虹彩の円周角とエッジ頻度の関係である。この図より、円周角 260° 付近ではエッジ頻度が高く、 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ と $340^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 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 $200^{\circ} \sim 340^{\circ}$ にあるエッジは他のエッジより信頼度が高いといえる。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 は虹彩が外側に位置するときの虹彩の円周角とエッジ頻度の関係である。この図より、円周角 120° 付近ではエッジ頻度が高く、 $0^{\circ} \sim 40^{\circ}$ と $280^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 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虹彩輪郭の位置に出ている

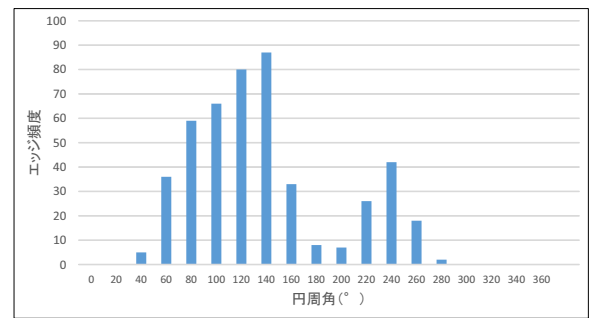


図 14 円周角とエッジ頻度の関係 (虹彩位置:外側)

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 $60^{\circ} \sim 160^{\circ}$ にあるエッジは他のエッジより信頼度が高いといえる。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、虹彩位置により円周角ごとのエッジ頻度に有意な差が現れることがわかる。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。

5. 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、Hough 円検出の際のエッジの信頼度に応じた重み付け手法を提案した。また、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実験を行った。実験結果より、虹彩位置により円周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。

今後は本提案手法で用いるパラメータの決定や、既存手法との比較実験をおこなう予定である。

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] 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.
- [4] Ajdari Rad, Ali, et al. "Fast Circle Detection Using Gradient Pair Vectors." Proceedings of the Seventh Interna-

tional Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications. No. LANOS-CONF-2009-007. CSIRO Publishing, 2003.

- [5] “色 彩 科 学 -目 の し く み-”, 入 手 先
(<http://rock77.fc2web.com/main/color2/color2-1-6.html>)
- [6] 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.
- [7] 東陽テクニカ©, “Smart Eye Pro System”, 入手先
(<http://www.toyo.co.jp/car/smarteye/pro.html>)