

1. はじめに

近年、生体の運動状態を計測するために、瞳孔中心から視線方向を推定する研究が盛んである。既に、瞳孔を円や楕円として捉え、最小 2 乗法やハフ変換を用いて瞳孔中心を求める手法が提案されている。しかし、これらの手法は検出精度や処理時間において問題がある。

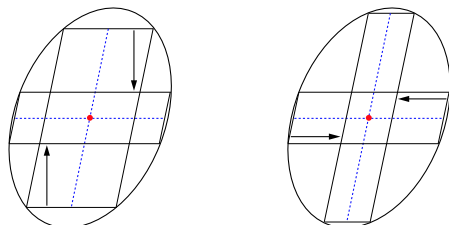
そこで、本研究では瞳孔抽出を高精度、かつ高速に検出する手法を提案し、リアルタイムアプリケーションとしての有効性を示す。

2. 楕円検出

本研究では赤外線照明と可視光カットフィルタを通した CCD カメラを用いており、反射率の高い虹彩は写らず瞳孔領域が観測される。瞳孔は視線の向きによって楕円形になる場合があり、瞳孔抽出では円ではなく楕円を検出する必要がある。また、照明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。そのため、本手法では、まずアウトライアを除去し、楕円パラメータを推定する。

2.1. 楕円中心の算出

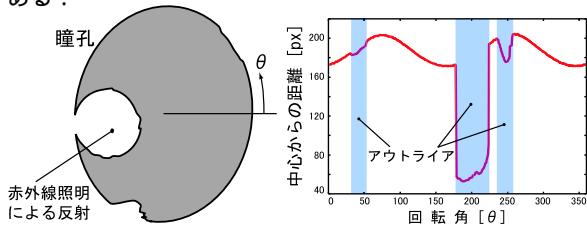
図 1 に楕円中心算出法を示す。楕円に内接する平行四辺形を求め、相対する辺の中点同士を連結すると 2 本の直線が交わり、その直線の交点が楕円の中心となる。実際には欠損した楕円にも対処できるように上下、左右から順に平行四辺形を求めて楕円中心候補に投票し、中心を算出する。



(a) 上下から平行四辺形を求める (b) 左右から平行四辺形を求める  
図 1: 楕円中心算出法

2.2. アウトライアの除去

瞳孔が正楕円であれば、楕円中心から各輪郭点までの距離を求め、最大になる組み合わせが長軸、最小になる組み合わせが短軸となる。しかし、カメラから瞳孔画像を取得する場合、赤外線照明の光が眼球で反射し、図 2 のような反射像や、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。



(a) 欠損楕円の例 (b) 楕円中心から各輪郭点までの距離  
図 2: アウトライアを含む楕円

ある輪郭点と楕円中心を対称とした輪郭点との距離が等しい輪郭のみを残すことで、アウトライアを除去する。図 3 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楕円の輪郭点を示す。

2.3. Levenberg-Marquardt 法による楕円パラメータの推定

楕円の方程式は次の形で表現できる。

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

(x, y) は楕円上の点, (x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>) は楕円の中心座標, a, b は長軸, 短軸の長さ, θ は x 軸方向から長軸への回転角である。また、式 (1) はパラメータに対して線形な形で表すと、

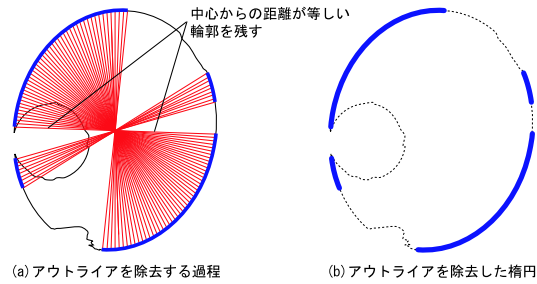


図 3: アウトライアの除去

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

となる。(2) 式に LM 法を適用し、各パラメータ (A ~ F) を推定する。LM 法は非線形最小 2 乗法であり、解から遠い場合は最急降下法に、解に近づいた場合は Gauss-Newton 法に切り替わり、収束領域が広く収束速度が速いという特性をもつ。アウトライアを除去した輪郭点に対して、約 20 回の反復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、式 (1) と式 (2) の関係から長軸の回転角を、次式で求める。

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{B}{A - C} \right) \quad (3)$$

3. 評価実験

評価実験として、実画像 500 枚よりアウトライアを除去する前と、除去した後の輪郭点から楕円パラメータを求め、真値を比較した。図 4 に瞳孔検出例を示す。表 1 に楕円検出率、長軸の測定誤差、短軸の測定誤差を示す。

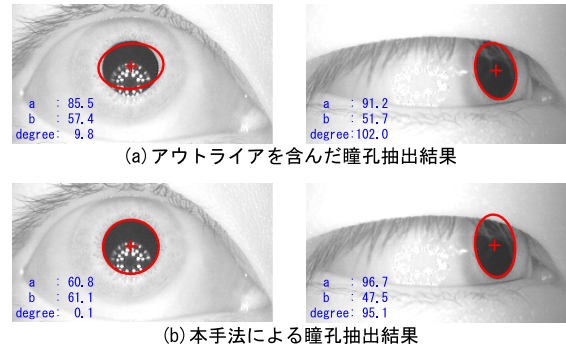


図 4: 実画像での結果

表 1: 楕円検出精度の比較

	検出率 [%]	長軸誤差 [pixel]	短軸誤差 [pixel]
アウトライアあり	37.3	23.2	15.7
アウトライアなし	97.8	1.9	1.4

表 1 より、アウトライアを除去しないでパラメータを推定すると、欠損した輪郭点の影響を受けるため推定誤差が大きい。一方、アウトライアを内接する平行四辺形により除去した本手法では、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。

また、輪郭にアウトライアを含む割合が 0%, 10%, 20%, 30% の場合、検出率はそれぞれ 100%, 99.8%, 92.5%, 77.5% であった。

長軸が約 200 pixel、短軸が約 150 pixel の楕円に対して処理時間は、楕円中心の算出に 3 ms、アウトライア除去に 4 ms、LM 法に 0.5 ms、合計 8 ms 以下 (120 fps) であり、本手法は従来のハフ変換等を用いた手法では困難であったリアルタイム処理が可能であることがわかる。

4. まとめ

本研究では、アウトライア除去と LM 法を適用したパラメータ推定による楕円検出法を提案し、リアルタイムアプリケーションにおける有効性を検出精度と処理時間により示した。今後は、視線方向の推定を行う予定である。