

可視光環境に対応した瞳孔径計測法の精度評価 Accuracy Evaluation of Pupil Diameter Measurement Method Adapting to Visible-light Condition

森田 悠生[†] 高野 博史[†] 中村 清実[†]
Yuki Morita Hironobu Takano Kiyomi Nakamura

1. はじめに

眠気の検知や興味の推定など、瞳孔反応を用いた様々なシステムが開発されている[1][2]。しかし、瞳孔反応の計測には、近赤外カメラ及び照明が必要である。そのため、瞳孔反応を用いたシステムは、一般的に使用できるものではない。そこで、タブレット端末等に搭載された可視光カメラを用いて、瞳孔反応が計測できれば、より多くの人が、それらのシステムを利用できる。

Romagueria らは、可視光環境で撮影した目の画像から瞳孔を検出する手法を提案した[3]。しかし、検出精度の評価に用いられた画像は、角膜反射の影響が極めて少ない理想的なものであった。瞳孔反応を用いたシステムの汎用化のためには、角膜反射の影響を受け易い環境で、被験者の目を撮影して得られる画像から、瞳孔を検出する必要がある。

本研究では、瞳孔反応を用いたシステムの汎用化を目指し、可視光カメラから取得された、角膜反射の影響を受けた画像から、瞳孔径を計測する画像処理法の開発を行った。

2. 提案手法

本研究では、可視光カメラ (LU105-IO Argo) を用いて撮影した被験者の目周辺の画像を入力画像とし、入力画像に画像処理を施すことで瞳孔領域を検出する。その後、瞳孔径を計測する。図 1 に瞳孔検出の流れを示す。

2.1 虹彩周辺の切り出し

瞳孔検出では、まず、入力画像に対し、ハフ変換を用いて虹彩領域を検出する。次に、虹彩領域周辺を正方形に切り出す。虹彩領域周辺を切り出すことにより、処理を行う範囲を限定する。

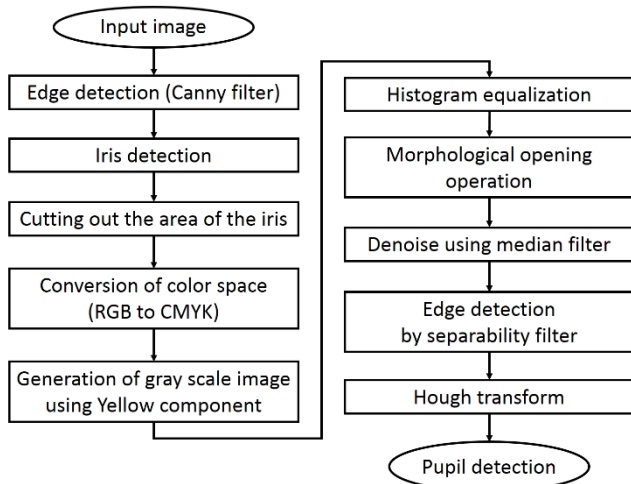


図 1 瞳孔検出の流れ

[†] 富山県立大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Toyama Prefectural University

2.2 瞳孔の輪郭点抽出のための前処理

虹彩領域周辺を切り出した後、その領域を RGB 色空間から CMYK 色空間に変換し、Y 成分を用いてグレースケール化する。Y 成分でグレースケール化することで、瞳孔と虹彩の領域の輝度差を大きくできる。その後、この輝度差をより顕著にするために、ヒストグラムの均一化を行う。次に、胡麻塩ノイズを取り除くため、2 回の膨張と 2 回の収縮を行うオープニング処理を施す。その後、メディアンフィルタにより、画像全体のノイズ除去を行う。

2.3 分離度フィルタによる瞳孔の輪郭点の検出

前処理の後、分離度フィルタにより、瞳孔の輪郭点を抽出する。分離度フィルタとは、2 つの領域を持ったエッジ検出器であり、2 領域の輝度値に関する統計的な情報に基づいて、エッジを検出する[4]。本研究では、直線型及び扇型の 2 種類の分離度フィルタを適用し、それぞれの計測精度を比較した。直線型及び扇型分離度フィルタの概要を、それぞれ図 2(a)及び(b)に示す。図 2(a)及び(b)において、O は 2.1 で特定した虹彩の中心を表す。O から分離度フィルタの領域 1 と 2 の境界までの距離を R とする。横軸と分離度フィルタのなす角を θ とする。また、青い部分を領域 1、赤い部分を領域 2 とし、扇型の中心角は 10° とする。

分離度フィルタによるエッジ検出では、まず、 $\theta=0^\circ$ 、 $R=20[\text{pixels}]$ の状態で、式(1)~(3)を用いて分離度 η を計算する。式(1)~(3)において、 n_1 、 n_2 はそれぞれ、領域 1 及び 2 の画素数、 \bar{P}_1 、 \bar{P}_2 はそれぞれ、領域 1 及び 2 の平均輝度、 \bar{P}_m は領域全体の平均輝度、 N は領域全体の標本点の数、 P_i は領域全体の中における i 番目の輝度値である。 η の算出後、 θ の値を変更せずに R を 1[pixel]増加させ、分離度フィルタを半径方向に 1[pixel]移動させる。そして、再び η を算出する。その後、再び、 θ の値を変更せずに、R を 1[pixel]増加させ、 η を算出する。この処理を、領域 2 の右端が画像の端に到達するまで繰り返す。その後、直線型分離度フィルタの場合は、R の増加の度に算出した分離度の内、分離度が最大となる点を、瞳孔の輪郭の候補点として記録する。扇型分離度フィルタの場合は、R の増加の度に算出した分離度の内、分離度が最大となる時の、弧 AB を構成する 10 点を中心角の 1° 毎に抽出し、瞳孔の輪郭の候補点として記録する。その後、直線型の分離度フィルタの場合は、 θ を 1° 増加させ、扇型分離度フィルタの場合は、 θ を 10° 増加させ、再び、 $R=20[\text{pixels}]$ とする。そして、 $\theta=0^\circ$ の時と同様に、瞳孔の輪郭の候補点を記録する。この処理を $\theta=0^\circ$ から 359° まで繰り返し、瞳孔の輪郭の候補点を 360 点得る。

このようにして得られた 360 個の候補点を円の特徴点とし、ハフ変換によって円検出を行う。検出された円の中心を瞳孔中心、直径を瞳孔径とする。

$$\sigma_b^2 = n_1(\bar{P}_1 - \bar{P}_m)^2 + n_2(\bar{P}_2 - \bar{P}_m)^2 \quad (1)$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^{N-1} (P_i - \bar{P}_m)^2 \quad (2)$$

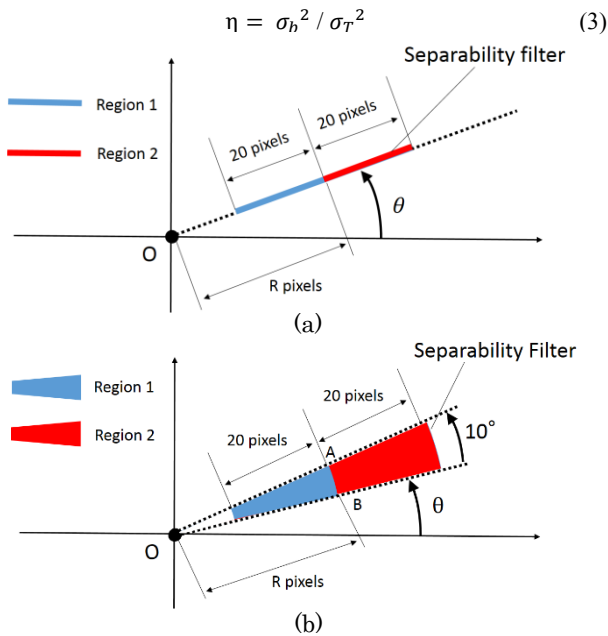


図2 分離度フィルタの概要

3. 実験方法

本実験では、可視光カメラを用いて被験者の目周辺を撮影し、その画像から瞳孔の検出及び瞳孔径の計測を行った。その後、計測した瞳孔中心及び瞳孔径の精度を評価した。

3.1 目周辺領域の撮影

入力画像として用いる目周辺画像の撮影は、白色蛍光灯照明下において行った。画像サイズは 1280×1024 [pixels] とし、被験者とカメラとの距離は 34 [cm] とした。被験者は健康な日本人の学生 12 名 (男性 8 人, 女性 4 人) である。

3.2 算出した瞳孔中心と瞳孔径の評価

瞳孔中心及び瞳孔径の算出後、算出した瞳孔中心及び瞳孔径とそれぞれの真値を比較した。真値の算出では、まず被験者の目周辺画像の瞳孔領域に、直径と中心座標を変更しながら、手動で円を当てはめた。これを 3 回繰り返す、円の中心の座標の平均値を瞳孔中心の真値、円の直径の平均値を瞳孔径の真値とした。

真値の算出後、推定した瞳孔中心と瞳孔径を評価した。瞳孔中心の評価では、推定した瞳孔中心と真値のユークリッド距離 D を式(4)により算出した。式(4)において、 x_{ac} 及び y_{ac} はそれぞれ瞳孔中心の x 座標及び y 座標の真値、 x_{cc} 及び y_{cc} はそれぞれ推定した瞳孔中心の x 座標及び y 座標である。瞳孔径の評価では、推定した瞳孔径 D_{mv} と真値 D_{ac} との差 D_{pd} を式(5)により算出した。

D 及び D_{pd} の算出後、それぞれの単位を [pixels] から [mm] に変換した。この変換では、まず、実験に用いたカメラで、地面に対して水平に置かれた巻尺を撮影した。この時、巻尺とカメラの距離は、被験者とカメラの距離と同じ 34 [cm] とした。撮影した画像上において、巻尺の目盛りの 1 [mm] あたりの画素数は 34 [pixels] であった。従って、撮影した画像上における 1 [pixel] は、 $1/34$ [mm] となる。この関係を用いて、 D 及び D_{pd} の単位を変換した。

$$D = \sqrt{(x_{ac} - x_{cc})^2 + (y_{ac} - y_{cc})^2} \quad (4)$$

$$D_{pd} = D_{mv} - D_{ac} \quad (5)$$

4. 実験結果

図3に、直線型分離度フィルタによる、瞳孔検出の結果の例を示す。図3は、3.1で撮影した画像上に、検出した虹彩を紫色の円、瞳孔を黄色の線で描画したものである。図3より、角膜反射像が瞳孔領域に侵入しており、瞳孔領域の一部が白みがかっていることがわかる。しかし、提案手法により瞳孔領域を検出できていることがわかる。表1に、直線型及び扇型の分離度フィルタを用いた、被験者 12 名の D 及び D_{pd} の平均値及び標準偏差を示す。表1より、扇型分離度フィルタによる精度は、直線型に比べて低いことがわかる。今回は、扇形の中心角を 10° としたが、中心角を変更することにより、精度を向上できる可能性がある。

一般的な視線計測装置では、視線の計測に瞳孔径を用いる必要があるため、瞳孔径を計測している。その瞳孔径計測の精度は 0.1 [mm] ~ 0.5 [mm] である。よって、直線型分離度フィルタを用いた手法では、これらの装置と同等の精度が得られたと考えられる。

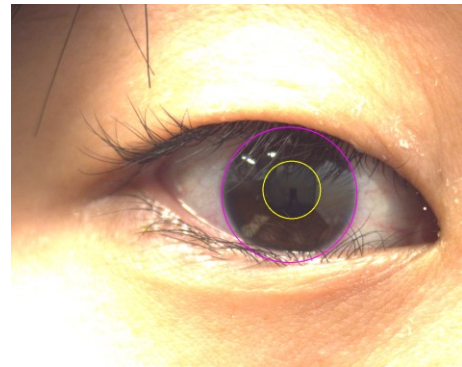


図3 瞳孔検出の結果の例

表1 全被験者の D 及び D_{pd} の平均及び標準偏差

	D_{pd} [mm]	$ D_{pd} $ [mm]	D [mm]
直線型	0.00 ± 0.07	0.05 ± 0.05	0.10 ± 0.07
扇型	-0.06 ± 0.27	0.16 ± 0.22	0.26 ± 0.40

5. まとめ・今後の課題

本研究では、瞳孔反応を用いたシステムの汎用化を目指し、可視光カメラによる瞳孔径計測法を提案した。実験の結果、可視光環境で撮影された画像から、瞳孔径を計測することが可能であり、その計測精度は、一般的な視線計測装置と同等であった。今後は、瞳孔径計測の精度がカメラの種類に依存しないかどうかを明らかにする必要がある。

参考文献

- [1] 西山 潤平, 谷田 公二, 楠見 昌司, 平田 豊, “瞳孔ゆらぎを指標とした覚醒度状態評価”, 生体医工学, Vol.46, No.2, pp.212-217, (2008).
- [2] S. Ito, Y. Kajiwara, F. Harada, and H. Shimakawa, “Touch Gesture and Pupil Reaction on Mobile Terminal to Find Occurrences of Interested Items in Web Browsing”, Scientific & Academic Publishing, International Journal of Web Engineering, Vol.5, No.1, pp.1-9, (2016).
- [3] L. V. Romaguera, F. P. Romero, C. R. V. Seisdedos, and J. E. Neto, “Pupil Segmentation Approach on Low Resolution Images”, Proc. IFMBE, Vol.49, pp.429-432, (2014).
- [4] K. Fukui, “Edge Extraction Method Based on Separability of Image Features”, IEICE TRANS. INF. & SYST., Vol.E78-D, No.12, pp.1533-1538, (1995).