

## 可視光カメラを用いた PLS 回帰による瞳孔検出法 Pupil Detection Method by PLS Regression Using Visible-light Camera

館 和輝<sup>†</sup>      森田 悠生<sup>†</sup>      高野 博史<sup>†</sup>  
Kazuki Tachi    Yuki Morita    Hironobu Takano

### 1. はじめに

現在、瞳孔変動を利用した様々なシステムが開発されている[1]。瞳孔径は感情・疲労・興味によって変化するため、瞳孔変動を測定することで、これらを推定することができる。通常、瞳孔径の計測は近赤外照明と近赤外カメラを用いて撮影した目周辺の画像を用いて行う。しかし、これらは一般的な PC や携帯端末に搭載されていない。そこで、本研究では瞳孔径計測システムの汎用化を目的とし、一般的な PC や携帯端末に搭載されている可視光カメラを用いて撮影した目周辺の画像から瞳孔径計測を行うシステムを開発する。汎用の可視光カメラでの瞳孔径計測が可能であれば、視線追跡、感情推定などを PC や携帯端末によって行うことができる。

瞳孔径の計測には様々な方法が提案されている[2]。今回は、PLS (Partial Least Squares) 回帰により学習したデータから瞳孔検出を行う手法を提案する[3]。また、更なるシステムの汎用化を目指すため、瞳孔検出を行う目画像は実際の使用環境を想定し、角膜反射像が映りこんだ画像を使用する。この画像から瞳孔検出を行い、瞳孔径を計測することで、その精度を評価する。

### 2. 提案手法

本研究では、可視光カメラを用いて撮影した画像から瞳孔を検出し、瞳孔径を計測するシステムを開発する。検出において、取得した目周辺画像から、PLS 回帰を用いることでグレースケール化のための回帰式を取得する。図 1 にシステムのフローチャート、図 2 に撮影画像の例を示す。

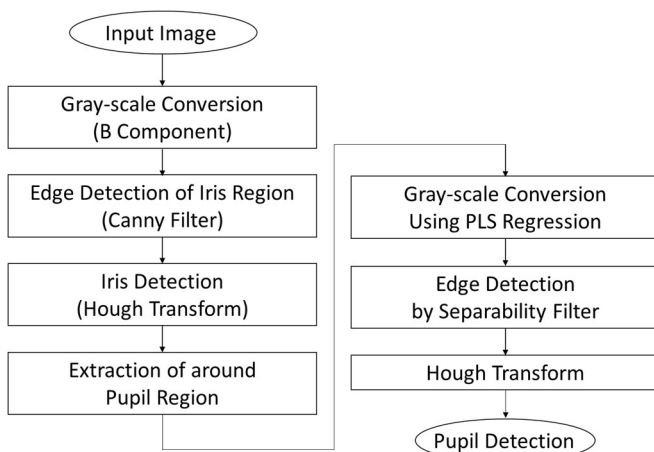


図 1 システムのフローチャート



図 2 撮影画像

### 2.1 PLS 回帰による学習

図 1 に示した提案手法について、PLS 回帰によるグレースケール化を行う際、事前に PLS 回帰による学習によって、グレースケール化のための回帰式を得る必要がある。回帰式を得る手順について、まず学習用の画像を用意する。今回用いる学習用画像は、入力画像から虹彩領域を切り出した画像である。次に、この画像中の瞳孔・虹彩それぞれの領域において、各画素の RGB, HSV, CMYK, L\*a\*b\* 色空間の計 13 種類の色成分を抽出し、瞳孔と虹彩の色情報の学習を行う。また、瞳孔部分の画素には瞳孔領域のラベル(1)、虹彩部分の画素には虹彩領域のラベル(-1)が割り当てられている。最後に、これらの特徴量から、PLS 回帰の回帰式を得る。得られた回帰式を式(1)に示す。式(1)について、 $A_R \sim A_{b^*}$  は  $R \sim b^*$  それぞれの色成分の回帰係数、 $R \sim b^*$  はそれぞれの色成分の特徴量である。式(1)より、 $\hat{y}$  の値が大きいほど、その画素が瞳孔領域として、小さいほどその領域が虹彩領域と予測される。この式(1)を用いて、虹彩領域を切り取った画像に対しグレースケール化を行う。

$$\hat{y} = A_R R + A_G G + A_B B + A_H H + A_S S + A_V V + A_C C + A_M M + A_Y Y + A_K K + A_{L^*} L^* + A_{a^*} a^* + A_{b^*} b^* \quad (1)$$

### 2.2 瞳孔検出手順

瞳孔検出手順について、まず入力した目周辺画像に対し B 成分によるグレースケール化を行う。これは、目周辺画像内の虹彩部分を検出するために、虹彩とその周りの輝度差を大きくするためである。次に、グレースケール化後の画像に対し Canny フィルタを用いてエッジ検出を行い、Hough 変換による円検出を行う。この円検出により、虹彩部分が検出される。虹彩部分の検出後、虹彩領域周辺を正方形に切り取り、瞳孔周辺部分の画像を作成する。そして、PLS 回帰によるグレースケール化を行うことで、瞳孔と虹彩部分の輝度差を大きくする画像を作成する。PLS 回帰後の画像を図 3 に示す。その後、図 3 の画像に対し分離度フィルタ[4]を用いて瞳孔部分のエッジ検出を行う。最後に、虹彩部分を検出したときと同様に、Hough 変換による円検出を行うことで、瞳孔部分を検出する。

<sup>†</sup> 富山県立大学大学院 工学研究科  
Graduate School of Engineering, Toyama Prefectural University



図3 PLS回帰後の瞳孔画像

### 3. 実験方法

本実験では、可視光カメラ (ARGO Lw115C) を用いて被験者の目周辺を撮影した。撮影方法や評価方法について、以下に記す。

#### 3.1 撮影方法

本研究では、システムの汎用化を目指すため、角膜反射像が映りこんだ画像を用意する。撮影環境は、室内で被験者の周りをパーテーションで囲い、白色蛍光灯以外の外光を遮断した環境である。被験者は20代の健常な学生30名 (男性24名、女性6名) である。被験者の横にLED点灯装置を設置し、LEDによる光刺激を与えることで、被験者1人につき150枚の時系列的な目画像を取得した。

#### 3.2 使用画像

今回撮影した画像は1人あたり150枚、計4500枚である。画像サイズは1280×1024[pixels]とした。瞳孔検出段階における虹彩領域周辺を正方形に切り取った画像について、縦・横の長さはそれぞれ虹彩領域の直径×0.8である。撮影画像では、虹彩径が400[pixels]前後で撮影されているため、切り取った画像の辺の長さは320[pixels]前後である。

PLS回帰での学習に使用する画像について、これは2章でも述べたように、虹彩領域周辺を切り取った画像である。各画像における各色成分の抽出方法について、まず撮影画像から学習用の画像セットを作成する。学習用の画像セットは、取得した150枚の画像セットそれぞれから、時系列的に5枚ずつ画像を抽出し作成する。つまり、学習用の画像は1人につき30枚なので、合計900枚となる。PLS回帰による学習は、瞳孔径を計測する被験者以外の画像を用いて行う。よって、1人の被験者の瞳孔径計測には、870枚の画像を学習用画像として用いる。また、PLS回帰の学習における色成分の抽出は、画像全体を縦横5[pixels]ごとに走査を行った。

#### 3.3 計測精度評価方法

瞳孔検出、瞳孔径計測後の精度評価方法について、これは計測した瞳孔中心座標と瞳孔径を用いて行う。まず、撮影した全4500枚の画像に対し、瞳孔部分に手で円を当てはめることで、瞳孔中心座標及び瞳孔径の真値を算出する。そして、検出した瞳孔中心座標及び瞳孔径を、算出した瞳孔中心座標及び瞳孔径の真値と比較する。瞳孔中心の評価は、計測した瞳孔中心と真値のユークリッド距離 $E_c$ を用いる(式(2))。式(2)において、 $x_{ac}, y_{ac}$ はそれぞれ計測した瞳孔中心の $x$ 座標及び $y$ 座標の真値、 $x_{cc}, y_{cc}$ はそれぞれ計測した瞳孔中心の $x$ 座標及び $y$ 座標である。瞳孔径の評価は、計測した瞳孔径 $D_{mv}$ [pixels]とその真値 $D_{ac}$ [pixels]との差の

絶対値 $|E_{pd}|$ [pixels]を式(3)により算出した。 $E_c$ 及び $E_{pd}$ の算出後、それぞれの単位を[pixel]から[mm]に変換した。

また、瞳孔の検出結果から、PLS回帰における潜在変数の最適な数を決定する必要がある。本研究では、潜在変数の数を1~13まで変化させ、それぞれの場合で瞳孔径計測を行った。そして、最も精度が良い場合を瞳孔径計測における最適な潜在変数の数とした。

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

$$|E_{pd}| = |D_{mv} - D_{ac}| \quad (3)$$

### 4. 検出結果

今回は、全13成分での瞳孔検出結果を他の検出結果と比較するため、13成分の中から瞳孔と虹彩部分を分離することを妨げていると考えられる色成分B, K, a\*を除いた全10成分、さらにRGBの3成分での瞳孔検出も行った。表1にそれぞれの瞳孔検出結果を示す。

瞳孔検出の結果、13成分、10成分、3成分それぞれの最適な潜在変数の数は13個、10個、3個であった。表1より、全13成分と比べ3成分の方が誤差が大きいことから、色成分を増やすことで検出精度が向上すること、また、全13成分と比べ10成分の方が誤差が小さいことから、瞳孔検出に適切な色成分を選択することでも検出精度が向上することが判明した。図4に13成分、10成分それぞれで瞳孔検出を行った場合の、PLS回帰後の画像を示す。

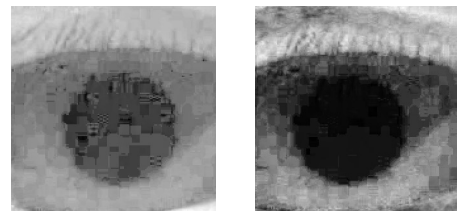


図4 画像処理後の瞳孔画像

表1 全被験者の $E_c$ 及び $|E_{pd}|$ の平均及び標準偏差

	3成分	10成分	13成分
$E_c$ [mm]	0.91±0.87	0.14±0.17	0.41±0.60
$ E_{pd} $ [mm]	1.14±0.66	0.14±0.15	0.33±0.32

### 5. まとめ・今後の課題

本研究では、瞳孔径計測システムの汎用化を目標とし、可視光カメラによって撮影された目周辺画像から、PLS回帰を用いて瞳孔径を計測する方法を提案した。実験の結果、近赤外カメラと同等の計測精度で検出することができた。今後の予定として、更なる精度の向上や、他の撮影環境においても対応するシステムを開発する必要がある。

#### 参考文献

- [1] A. Babiker, I. Faye, K. Prehn and A. Malik, "Machine Learning to Differentiate Between Positive and Negative Emotions Using Pupil Diameter," *Frontiers in Psychology*, Vol.6 (2015).
- [2] M. Soltany and H. R. Pourreza, "Fast and Accurate Pupil Positioning Algorithm Using Circular Hough Transform and Gray Projection," *Proc. CSIT*, Vol.5, pp.556-561 (2011).
- [3] N. Y. Schwartz, A. Kembhavi, D. Harwood, and L. S. Davis, "Human Detection Using Partial Least Squares Analysis," *Proc. CVPR 2009*, pp.24-31 (2009).
- [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).