ビデオ式注視点検出システムにおける瞳孔間距離一定を仮定した瞳孔検出のロバスト性向上

—眼鏡反射問題への対処法—

Improvement of Robustness in Pupil Detection Assuming a Constant Interpupillary Distance in a Video-Based Eye-Gaze Detection System

—A Solution of Glasses Reflection Problem—

福元 清剛[†], 正会員 海老澤 嘉伸[†]

Kiyotaka Fukumoto[†] and Yoshinobu Ebisawa[†]

Abstract In the pupil-corneal reflection detection-based eye-gaze detection method, glasses reflection of near-infrared LED light sources for producing the corneal reflection is misdetected as the pupil when a user wears eyeglasses. To improve the robustness of the pupil detection, we propose novel pupil searching and tracking methods using two stereo-calibrated cameras and light sources. The pupil searching method detects the true pair of the right and left pupils under the constraints of the suitable 3-D interpupillary distance and 3-D position of the pair, which are given in advance. Even if one pupil is not detected in the image of either camera owing to the glasses reflections, the pupil tracking method estimates the 3-D coordinates of the undetected pupil by using the constant interpupillary distance and the temporal continuity of the 3-D coordinates of the moving pupil. The experimental results show that the accuracy of pupil searching and tracking was better than that of the conventional one-camera method.

キーワード：瞳孔検出，眼鏡反射，瞳孔間距離，瞳孔中心，視線検出

1. ま え が き

瞳孔検出の技術は，視線検出装置¹⁾²⁾，ドライバー用の眠気検知³⁾⁴⁾，医療分野⁵⁾⁶⁾などに広く応用されている．中でも近赤外線 LED 光源とビデオカメラを用いて，明瞳孔画像と暗瞳孔画像を交互に取得し，それらの差分画像から瞳孔を検出する方法はロバストな瞳孔検出技術であると考えられる⁷⁾．この方法では，差分画像中の瞳孔部分が背景画像に対して強調されるため，瞳孔を容易に検出することができる．

差分画像を用いた瞳孔検出において，明瞳孔画像と暗瞳孔画像との取得時間には差が存在している．このため，この間に注視点検出システム使用者の頭部や視線が移動した場合，明・暗瞳孔画像内における瞳孔像の位置にずれが生じ，差分画像から瞳孔が正しく検出できないことがあった．そこで LED 光源から照射される光が角膜上で反射し，明・

図 1 差分画像中の眼鏡反射
Glasses reflection in difference image.

暗瞳孔画像上に現れる角膜反射を利用して，瞳孔の画像位置関係を補正してから差分を行う角膜反射に基づいた差分位置補正法が考案された⁸⁾．次に，この補正法の詳細について述べる．我々の開発した注視点検出システムでは，明・暗瞳孔画像を作成するために 2 重リング状の近赤外線 LED 光源とビデオカメラから成る光学系を用いている¹⁾．この二つの LED リングは同心円であるため，明・暗瞳孔画像上のほぼ同じ位置に角膜反射像が現れる．明瞳孔画像に現れた角膜反射の位置に対し，暗瞳孔画像の角膜反射を合わせるように移動させてから差分を行うことで，差分画像が

2012 年 7 月 20 日受付，2012 年 9 月 20 日再受付，2012 年 10 月 3 日採録

[†] 静岡大学 工学部

(〒 432-8561 静岡県浜松市中区城北 3-5-1, TEL 053-478-1244)

[†] Faculty of Engineering, Shizuoka University

(3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatsu-shi 432-8561, Japan)

図 2 瞳孔検出の基礎
Basis of pupil detection.

ら正確に瞳孔を検出することができる。さらに、1 フレーム前と 2 フレーム前に検出された瞳孔領域から、カルマンフィルタを用いて現フレームにおける瞳孔領域位置を推定し、推定された位置に狭い解析領域（小ウィンドウ）を与え、その中だけを探索することで、さらに高速かつロバストな瞳孔検出が可能となった。

しかしながら、近赤外線 LED 光源を用いた瞳孔検出法では、光源の光を使用者の顔に照射するため、使用者が眼鏡を装着している場合、眼鏡のレンズやフレームで光が反射（眼鏡反射）し、それがカメラ画像中の瞳孔と重なることで瞳孔と眼鏡反射の区別ができず、誤検出になることもあった。また、瞬きなどで瞳孔がカメラ画像中から一時的に消失すると、画像全体から瞳孔を再探索することになるが、眼鏡反射を瞳孔として誤検出したまま小ウィンドウによる追跡が続き、正常に瞳孔の追跡ができないことがあった。さらに光学系の問題として、明・暗瞳孔画像中の瞳孔における明暗の違いをより強調させるために、内側 LED リングの径を小さくし、カメラの開口径部に近づけた新しい光源を導入した。この結果、内側と外側リングの距離が開き、従来の光源では差分によって除去することのできた眼鏡反射が差分画像中に残りやすくなった（図 1）。

そこで本研究では、2 台のデジタルカメラを用いて、(1) 眼鏡反射が存在する状況で画像全体から瞳孔を探索する場合、画像中の瞳孔と予測される画素成分を総当りでステレオマッチングし、瞳孔間の 3 次元距離を用いて真の瞳孔を決定する「瞳孔探索法」と、(2) 眼鏡反射により片方の瞳孔が検出できない状況でも、瞳孔間の 3 次元距離が一定であるという拘束条件によって、瞳孔の 3 次元位置における連続性から現フレームでの瞳孔 3 次元位置を推定し、本来瞳孔が現れるべき位置に小ウィンドウを与え、差分位置補正を行う「瞳孔追跡法」の二つの手法を提案し、その有効性を示す。

2. システム構成

本装置は、カメラ（ステレオ）較正された 2 組の光学系（ノンインターレース方式デジタルカメラ、16 mm レンズ、可視光カットフィルタ、2 重リング状近赤外線 LED 光源から成る）、発光回路、パソコン（PC）などで構成される。カメラからの取得画像は 60 fps グレースケール画像で、1 フレームのサイズは 640×480 pixel とした。

図 3 瞳孔間距離を一定と仮定した瞳孔検出
Detection of pupils using constant interpupillary distance.

リング状 LED 光源の内側 LED および外側 LED をカメラのストロボ信号により交互に点灯させ、明瞳孔画像と暗瞳孔画像をそれぞれ取得し、これらから差分画像を得た（図 2）。このとき、片方の光源から照射された光が他のカメラに干渉しないように、カメラの露光時間を $500 \mu\text{s}$ 、光源の発光時間を $375 \mu\text{s}$ とした上で、2 台のカメラ間の同期を $650 \mu\text{s}$ ずらした。

カメラはピンホールモデルを仮定し、カメラ座標系はカメラのピンホール位置を原点とし、カメラの光軸を Z 軸として設定された。世界座標系およびカメラ座標系における特徴点 3 次元座標をそれぞれ P_w 、 P_c とすると、世界座標系とカメラ座標系間には、次式で変換できる。

$$P_c = R \cdot P_w + T \quad (1)$$

ここで、 R は回転行列、 T は並進ベクトルであり、Tsai のカメラ較正法⁹⁾により決定される。カメラ座標系から世界座標系への変換は (1) の逆変換である。

$$P_w = R^{-1}(P_c - T) \quad (2)$$

2 台のカメラを用いているため、ステレオ法を用いて世界座標系における対象の 3 次元座標が決定され、その座標がそれぞれのカメラ座標系へ変換される。

3. 瞳孔間 3 次元距離を拘束条件とした瞳孔探索法

カメラ画像全体から瞳孔を探索する場合、差分画像に対して、P タイル法により決定された閾値で 2 値化し、孤立点除去、ラベリングを順に行う。ラベル付けされた画素の連結成分の中から、瞳孔と考えられる面積、縦横のサイズ、面積比、正方形度、瞳孔特徴量といった形状パラメータを用いて左右それぞれの瞳孔について、最大で五つの瞳孔候補ラベルを選択する。使用者が眼鏡を装着している場合は、

図 4 左瞳孔を中心とする球面モデル
Spherical model centered around left pupil.

瞳孔候補ラベルに真の瞳孔だけでなく、眼鏡反射が含まれる可能性がある。得られた瞳孔候補ラベルに対して楕円フィッティングを施し、その中心座標を瞳孔候補座標として定義した。そして、これらの座標は世界座標系における3次元座標に変換され、左右のカメラで選択した全ての瞳孔候補座標において総当りでステレオマッチング(5点×5点=25組)を行う。瞳孔候補座標ごとに算出された3次元位置のペアリング(以下、瞳孔対の候補とする)が本来の瞳孔であるかは以下の条件によって判断する(図3)。

(i) 3次元瞳孔候補座標のZ座標における距離

使用者の瞳孔がカメラから約80 cm離れた位置にあるとし、ステレオマッチングにより算出された瞳孔候補座標の世界座標系におけるZ座標が、カメラから70~90 cmの距離に存在しなければ、真の瞳孔ではないと判断し、ペアリングを解除する。

(ii) 瞳孔対の候補間における3次元距離

(i)の条件を満たした瞳孔対の3次元瞳孔候補座標から、瞳孔間の3次元距離をそれぞれ求める。瞳孔間距離は標準値が約65 mmであることから、今回は得られた瞳孔間距離が63~70 mmであるものを世界座標系における真の瞳孔対とし、左右の瞳孔座標を決定した。最終的に決定された瞳孔間距離の値を以後の瞳孔探索および追跡において用いる。

4. 瞳孔間3次元距離を拘束条件とした瞳孔追跡法

一例として、図4に示すような、カメラ較正が行われた2台のカメラ O_L および O_R を想定する。カメラ O_L では左瞳孔 P_L および右瞳孔 P_R が検出されており、カメラ O_R では左瞳孔 P_L のみ検出されているとする。この場合、 P_L の3次元座標はステレオマッチングにより求めることができる。 P_R の3次元位置は未知であるが、直線 $O_L P_R$ 上に存在する。これと瞳孔間の3次元距離 l (線分 $P_L P_R$)が一定という条件から P_R の3次元位置を算出することができる。つまり、 P_L を中心とした半径 l の球面と直線 $O_L P_R$ との交点が P_R となる。

このとき、図5に示すように、 P_R の座標として(i)実数解がただ一つ求まる場合、(ii)解が共役複素数として求ま

図 5 P_R を決定するための条件分岐
Conditional branch for determination of P_R .

図 6 現フレームにおける瞳孔位置の推定
Estimation of pupil position in current frame.

る場合、(iii)実数解が二つ求まる場合に分かれる。(i)では直線 $O_L P_R$ と球面との交点を、(ii)では直線 $O_L P_R$ に対し、 P_L からの垂線を求め、その垂線と球面との交点を P_R の3次元座標とした。(iii)では二つの実数解のうち、瞳孔の連続性から前フレームにおける P_R の3次元位置に近い方を現フレームの3次元座標とした。

次に前フレームにおいて瞳孔座標が予測できていた場合、現在のフレームにおける瞳孔位置を予測する。まず瞳孔の3次元位置における連続性を利用し、現在フレームの瞳孔位置を推定する。図6に示すように、左瞳孔 P_L と右瞳孔 P_R の中点を瞳孔間重心 G とし、 P_L から G へ向かう単位方向ベクトルを m と定義する。このとき G および m はそれぞれ3自由度を持つため、計6自由度になる。六つの座標成分に対し、次式を用いて時刻 t における瞳孔中心の予測3次元座標 $w(t)$ を求める。

$$w(t) = w(t-1) + w'(t)\Delta T \quad (3)$$

$$w'(t) = \frac{w(t-1) - w(t-2)}{\Delta T} \quad (4)$$

ここで $w'(t)$ は、 ΔT 間に2フレーム前の瞳孔が1フレーム前の瞳孔位置に移動した際の移動量(速度)を示す。予測された3次元座標は2次元画像上に投影され、その位置に解析用の小ウィンドウを与え、角膜反射を基にした瞳孔の差分位置補正を行う⁸⁾。

なお本節では、カメラ O_R において瞳孔 P_R が未検出である状況を想定したが、左右のカメラおよび瞳孔の組合わせにより四つの場合が存在する。

図 7 閉眼および開眼時における瞳孔検出画像
Sample images when searching for pupils.

5. 瞳孔探索および追跡実験

瞳孔探索および追跡実験には同一のプログラムを用いた。被験者の瞳孔がカメラ画像中に検出されていない場合は、瞳孔探索が繰り返され、瞳孔が見つかりと追跡に移行する。また瞳孔が消失した際は再度、カメラ画像全体から瞳孔対の探索が行われる。

5.1 瞳孔探索実験

(1) 方法

被験者は眼鏡装着者 5 名とした。被験者をカメラから約 80 cm 離れた位置に座らせ、眼の高さが PC 画面中心の高さとほぼ同等となるようにした。2 台の光学系は PC 画面の下部に取り付けられており、被験者の顔をやや下側から撮影した。瞳孔検出用のリング状 LED 光源以外に、200 W の電球により被験者の顔に光を照射した状況で瞳孔の探索を行った。瞳孔周りの照度は 366～751 lx であった。被験者には 300 フレーム間、頭を動かさずに、まばたきを数回行うように指示し、その間の顔画像を撮影した。撮影された画像を 1 フレームごとに確認し、被験者が眼を閉じている、もしくは、まばたきにより瞳孔の大部分が欠損している状態（閉眼時）のフレーム数を視認によって計数した。また全フレーム数から閉眼時のフレーム数を差し引いた残り

表 1 各被験者における閉眼および開眼時のフレーム数
Number of frames when subjects' eyes are closed and opened.

Subject	Number of frames	
	Eyes are closed	Eyes are opened
A	136	164
B	126	174
C	136	164
D	117	183
E	121	179

を開眼時と定義した。なお、瞳孔の輪郭が正確に表示されていない場合でも、眼鏡反射を瞳孔として誤検出していない限りは、瞳孔が正しく検出ができたと見なした。そして提案法と従来法（ステレオマッチングを用いず、カメラ 1 台ごとの画像から独立して行われる角膜反射に基づく差分位置補正による瞳孔検出方法⁸⁾）との比較を行った。

(2) 結果と考察

図 7 に閉眼時および開眼時における同フレームでの従来法および提案法の瞳孔探索画像を示す。図中における 4 枚の画像はそれぞれ大きく四つの領域に分割されており、左下・右下が明・暗瞳孔画像、左上が差分画像、右上が左右の眼の拡大画像および検出された瞳孔像を示している。なお拡大画像中の瞳孔には輪郭が表示され、瞳孔が画像中に存在しないと判断された場合は何も表示されない。

図 8 閉眼および開眼時の右カメラにおける瞳孔検出率
Detection ratio when searching for pupil in right camera.

閉眼時において従来法では眼鏡反射を瞳孔と誤検出し、小ウィンドウを与えているが、提案法では眼鏡反射を瞳孔として誤検出することはなかった。開眼時でも同様の結果となった。表 1 に各被験者における閉眼および開眼時のフレーム数をそれぞれ示す。いずれの被験者においても開眼時のフレーム数が閉眼時よりも多くなっていたが、被験者間での大きな違いは見られなかった。また図 8 に閉眼時と開眼時の右カメラにおける瞳孔の正検出率（正しく瞳孔が検出された割合）、非検出率（瞳孔が検出されなかった割合）および誤検出率（眼鏡反射を瞳孔として誤検出した割合）をそれぞれ示す。図 8(a)において、閉眼時には、従来法において瞳孔が存在しないにもかかわらず、眼鏡反射を瞳孔として捉える誤検出率が高くなったが、提案法では誤検出がまったく存在しなかった。また図 8(b)のように、開眼時も全被験者において、提案法では瞳孔の誤検出が完全になくなっていた。このことから、被験者の顔に電球の光を照射し、眼鏡反射が瞳孔付近に現れやすい厳しい条件下であっても、誤検出のないロバストな瞳孔検出が可能であることが示唆された。一方で、被験者 A, B および D のように、提案法において非検出率が高くなる場合があった。これは、瞳孔探索時に眼鏡反射と画像中の瞳孔とが完全に

重なることで、瞳孔が判別できなかったためであると考えられる。また、実験が開始されてから最初に得られた瞳孔間距離を固定値として設定し、以後の瞳孔検出において瞳孔が消失し、再検出された際も、この値を常に使用し続けるという強い拘束条件を設けたことで、非検出と判断されやすくなった可能性もある。今回の実験においては、拘束条件の厳しさと各検出率との関係性を明らかにしていないが、両者のバランスを調整することが安定した瞳孔の検出において重要になると考えられる。

5.2 瞳孔追跡実験

(1) 方法

眼鏡装着者 4 名をカメラから約 80cm 離れた位置に座らせ、電球により被験者の顔に光を照射した状況で実験を行った。4 名の被験者の内、3 名は度が入っていない眼鏡を使用し、1 名は度が入っている眼鏡を着用した。瞳孔周りの照度は 262~345 lx であった。カメラ画像中の瞳孔と眼鏡反射が重なるときがあるように顔を左右に振らせ、その画像をそれぞれ 300 フレーム撮影した。なお解析は瞳孔探索実験と同様に行った。

(2) 結果と考察

度が入っていない眼鏡を着用した 3 名の被験者では、従来法および提案法いずれの検出率においても大きな違いは見られなかった。これは度のない眼鏡を用いた場合は眼鏡反射の大きさが瞳孔よりも小さく、瞳孔と眼鏡反射が重なっても瞳孔との区別がなされ、従来法でも誤検出にならなかったと考えられる。このため瞳孔探索の段階で瞳孔が正しく検出されていれば、追跡においても良好な結果が得られることが示唆された。

もう 1 名の被験者について、図 9 に従来法および提案法の瞳孔追跡画像を示す。図の被験者は顔を左側へ動かしている最中であり、その際、カメラ画像における瞳孔の上を眼鏡反射が横切っている。従来法では被験者の顔が (a)(b)(c) の順にゆっくりと動いた（約 8 cm/sec）際、(b)において瞳孔と眼鏡反射が重なると、(c)において瞳孔と眼鏡反射が遠ざかったにもかかわらず、瞳孔の輪郭線が解除されており、このことから眼鏡反射の追跡が開始されてしまったことがわかる。しかしながら提案法では、顔が (d)(e)(f) の順に動き、(e)で瞳孔と眼鏡反射が重なり、両者が重なっている間は瞳孔が検出できないものの、その後、(f)では瞳孔を追跡続けた。このように瞳孔が正しく追跡可能となったため、従来法において瞳孔の誤検出率はそれぞれ左眼が 42.3%、右眼が 22.0%であったが、提案法ではいずれも 0%となり、大きく改善された。なお左カメラにおいても右カメラと同様の結果が得られた。

6. む す び

本研究では、「瞳孔探索法」および「瞳孔追跡法」について提案した。「瞳孔探索法」では、カメラ画像内に眼鏡反射が存在する状況で画像全体から瞳孔を探索する場合に、画像

図 9 顔を動かした場合の瞳孔追跡画像
Sample images when tracking pupils in movement of user's face.

中の瞳孔候補を総当りでステレオマッチングを行い、瞳孔間の3次元距離を拘束条件とし、真の瞳孔を決定した。この結果、従来法では眼鏡反射を瞳孔として誤検出することが多かったが、提案法では誤検出が閉眼・開眼時いずれにおいてもまったく存在しなかった。「瞳孔追跡法」では、眼鏡反射などにより片方の瞳孔が検出できない場合でも、瞳孔間の3次元距離を拘束条件として本来瞳孔が現れると考えられる位置に小ウィンドウを与え続けた。一方の瞳孔が非検出であっても、検出されている瞳孔を中心とした半径が瞳孔間距離の球面を考えることで、小ウィンドウを与え続けることが可能となった。この手法は、瞳孔追跡中に瞳孔と眼鏡反射が重なった場合に、特に有効であることが明らかになった。今後は、瞳孔間距離の拘束条件と誤検出率などの関係を考慮した瞳孔間距離に、柔軟性を持たせる手法の提案が必要である。また、より広い範囲での頭部移動を許容するシステムや、提案した瞳孔探索および追跡法を注視点検出システムに導入することを目指している。本実験では、眼鏡反射を瞳孔として誤検出していない限り、正しく瞳孔が検出できたと評価したが、注視点検出システムでは瞳孔の正確な検出が重要となるため、瞳孔探索のさらなる精度向上も求められる。

【文 献】

- 1) 海老澤嘉伸, 安保寿樹, 福元清剛: “1点を注視するだけで較正可能な遠隔注視点検出システム”, 映情学誌, **65**, 12, pp.1768-1775 (2011)
- 2) D. Model, and M. Eizenman: “An Automatic Personal Calibration Procedure for Advanced Gaze Estimation Systems”, IEEE

Trans. Biomed. Eng., **57**, 5, pp.1031-1039 (2010)

- 3) C.C. Chiang, and C.L. Huang: “A Neuro-based Surveillance System for Detecting Dangerous Non-frontal Gazes for Car Drivers”, IEICE Trans. Inf. & Syst., **E87-D**, 9, pp.2229-2238 (2004)
- 4) 山城賢二, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬 洋, 樋口和則, 内藤貴志: “ドライバの注視行動を利用した視線計測システムの自動校正”, 信学論, **J92-D**, 8, pp.1308-1316 (2009)
- 5) U. Lahiri, Z. Warren, and N. Sarkar: “Design of a Gaze-Sensitive Virtual Social Interactive System for Children With Autism”, IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., **19**, 4, pp.443-452 (2011)
- 6) T.D. Gedeon, D. Zhu, and B.S.U. Mendis: “Eye Gaze Assistance for a Game-Like Interactive Task”, International Journal of Computer Games Technology, **2008**, 3 (2008)
- 7) Y. Ebisawa: “Improved video-based eye-gaze detection method”, IEEE Trans. Instr. and Meas., **47**, 4, pp.948-955 (1998)
- 8) 海老澤嘉伸, 中島 彩: “角膜反射を利用した瞳孔位置検出の高精度化”, 映情学誌, **62**, 7, pp.1122-1126 (2008)
- 9) R.Y. Tsai: “A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses”, IEEE Journal of Robotics and Automation, **RA-3**, 4, pp.323-344 (1987)

ふくもと きよたか
福元 清剛 2006年, 広島工業大学工学研究科博士前期課程修了。2010年, 九州大学大学院芸術工学府修了。同年, 同大学院の学術研究員を経て, 静岡大学工学部の助教となり, 現在に至る。加齢にともなう体組成の変化, デジタル画像認識などの研究に従事。工学博士。

えびさわ たかしのぶ
海老澤嘉伸 1984年, 慶應義塾大学工学部電子工学科卒業。1989年, 同大学院博士課程修了。同年, 静岡大学工学部助手, 2004年, 教授となり, 現在に至る。この間, 視覚-眼球運動系の研究および視線入力もしくは頭部運動によるマシンインターフェイスの研究などに従事。工学博士。正会員。