

Inside-out カメラにおける眼球の輻輳量からの 注視点距離推定

後 藤 祐 斗^{†1} 藤 吉 弘 亘^{†1}

本稿では、Inside-Out カメラにおける眼球の輻輳量からの注視点推定法を提案する。Inside-Out カメラとは、人の眼球画像と視界画像に視差が発生することなく撮影可能なカメラである。従来の Inside-Out カメラを用いた注視点推定法では、視界画像のステレオマッチングによって距離を推定する。しかし、視界画像上の注視点の推定可能な範囲はカメラの画角に依存するという問題がある。そこで、本研究では注視対象が奥行き方向に変化する場合に発生する輻輳開散運動に着目し、眼球画像から注視点距離推定を推定する手法を提案する。まず、提案手法では注視点距離と眼球パラメータの対応を回帰分析により求める。そして注視点距離推定時には、回帰分析により求めた変換行列を用いて未知眼球パラメータの入力から注視点距離を推定する。提案手法の有効性を確認するために評価実験を行い、約 73 度の範囲で注視点距離の推定が可能であることを確認した。

A Method of Estimating Gaze Point from Eye Convergence Measured with an Inside-Out Camera

YUTO GOTO^{†1} and HIRONOBU FUJIYOSHI^{†1}

This paper proposes a method of estimating gaze point from eye convergence measured with an inside-out camera. The inside-out camera is capable of imaging the human eye and the visual field with no parallax. The conventional method of using an inside-out camera to measure the gaze point involves distance estimation by stereoscopic matching of visual field images. However, the range in which it is possible to measure the gaze point depends on the view angle of the camera. For that reason, the work reported here focused on the divergence that occurs as the gaze target moves in the depth direction and the result is a proposed method of estimating gaze point distance from eye images. First, the proposed method applies regression analysis to determine the correspondence of gaze point distance to eye parameters. The transformation matrix obtained by regression analysis is then used to estimate the distance to the gaze point from the unknown eye parameter input. The effectiveness of

the proposed method is confirmed through evaluation experiments that demonstrated the feasibility of estimating gaze point distance within a range of about 73 degrees.

1. はじめに

人間は視線によって視界から常に情報を収集し、それらを脳で処理する視覚系という情報処理システムを持っている¹⁾。この視覚系の働きは、人の視覚メカニズムを解析する上で有効な情報となる。視線は、注意を引く対象ごとに同一の注視経路 (Scan Path) を辿る²⁾ことから、注視経路を取得することで対象毎の認識パターンが生成できるため、一般物体認識や人の行動意図認識に有効な情報となる。また、視線検出は、医療、心理学、ヒューマンインターフェース³⁾などの分野での利用が期待され、ドライバの運転状態検知^{4),5)}や、視線を用いてコンピュータを制御する視線インターフェース⁶⁾などの応用例が報告されている。既に視線検出は製品化されており、視覚障害者の支援、人による目視検査等の作業支援、ライフログの評価等に利用されている。しかし、既存の視線検出装置はカメラの構造上、眼球とは異なる位置に Scene カメラが設置されているため、実際の人の視界と撮影される映像では視点位置が異なるという問題がある。そのため、注視対象を既知平面上に限定するなど、拘束条件を設定することが多い。

この問題に対して、清水らは人の眼球と視界映像を同時に取得する Inside-Out カメラ⁷⁾を提案した。Inside-Out カメラは、ハーフミラーを介して眼球を正面から、視界映像を眼球と同等の位置から撮影することができる。さらに、両目の眼球画像から視線情報をそれぞれの視界画像の注視点座標へ対応付けを行い、ステレオマッチングによる注視点の 3 次元位置推定を実現した。Inside-out カメラにより得られた 3 次元の注視経路は、First Person Vision^{8),9)}の研究分野において、人の潜在意識や趣味嗜好、行動意図の解析などへの利用が期待されている。

Inside-Out カメラの Scene カメラの FOV(Field Of View) は約 80 度であり、ステレオ視可能な範囲は約 53 度である。一方、人の視野角は単眼で水平角約 200 度、両眼視では約 110 度¹⁰⁾の範囲を視界に捉えることができる。人の視野角をカバーするには、Scene カメ

^{†1} 中部大学
Chubu University

ラに広角カメラを用いることが考えられるが、レンズ歪みによりステレオマッチングの精度低下を招くという問題がある。そこで本研究では、より広範囲の注視点の3次元情報を得ることを目的とし、視界画像を必要としない、眼球画像から得られる眼球パラメータのみを用いた注視点推定法を提案する。

2. Inside-Out カメラとステレオマッチングによる注視点推定

本章では、画像によって処理が可能な視線計測装置と視線計測法について述べる。視線計測装置には頭部装着型と視点固定型があり、その特徴と比較を示し、本研究で用いる Inside-Out カメラについて述べ、その問題について述べる。

2.1 従来の視線計測装置

頭部装着型の視線計測装置は、頭部に眼球を計測するカメラと視界を撮影するカメラによって構成された計測装置を装着することにより、両目と視界の画像を撮影することができる。被験者が自由に移動できるが、人体に装着する装置は被験者に負担がかかるため、計測される視線が日常のものとは異なる可能性がある。頭部装着型は、スポーツ選手の視線解析やヘッドマウントディスプレイを介するコンピュータゲーム等に利用されている。

従来の視線計測装置は、図1に示すように、視界を撮影する Scene カメラが眼球とは異なる位置に設置されているため、実際の人の視界と撮影される映像では視点位置が異なるという問題がある。そのため、従来の視線計測装置は、注視対象をある程度離れた対象に設定する、あるいは注視対象を既知の平面上に限定するなど、注視点に関して何らかの拘束条件を設定することが一般的であった。一方で、Inside-Out カメラ⁷⁾では、視界映像を眼球と同等の位置から撮影することを可能にしている。

2.2 Inside-Out カメラ

本研究で用いる Inside-Out カメラは、図2に示すように、ゴーグル型のフレーム上部に眼球撮影用の Eye カメラ2台と、下部に配置した視界撮影用の Scene カメラ2台で構成された頭部装着型の視線計測装置である。寸法は $W160 \times H80 \times D100\text{mm}$ であり、重量は約 200g である。材質は木を使用しており、カメラが発する熱を被験者に伝えにくいため、長時間の計測が可能である。

2.2.1 Eye カメラ

Eye カメラは、左右の眼球を撮影する2台の赤外カメラとカメラの周りに配置される6個の赤外 LED で構成される。赤外カメラは、Inside-Out カメラ中央に位置する赤外ミラーを介することで、目の前から人の眼球を解像度 $640 \times 480\text{pixel}$ の近赤外画像で撮影するがで

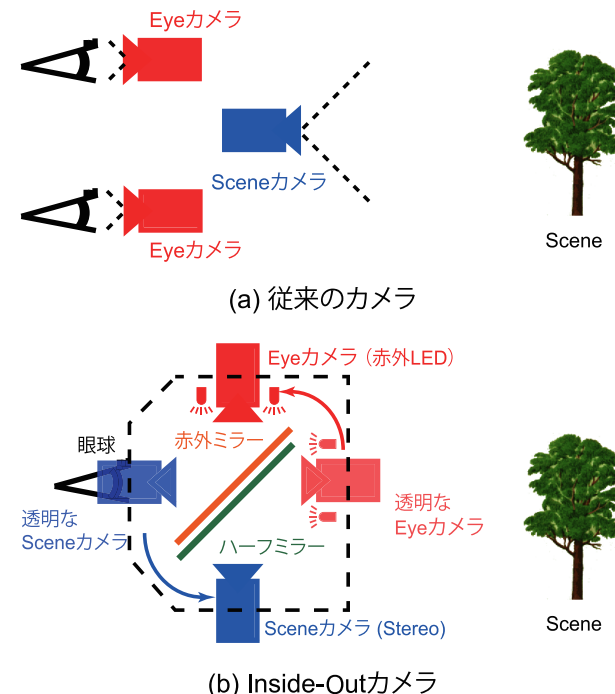


図1 従来の視線計測装置との比較

Fig. 1 Comparison of conventional camera and Inside-Out camera

きる。また、LED は 750~900nm の近赤外光を発している。この赤外光は人に不可視であるため、人の視覚に影響を与えることなく眼球が撮影できる。

2.2.2 Scene カメラ

Scene カメラは、左右の視界を撮影する2台の小型 CCD カメラを使用している。CCD カメラの画角は約 80 度、焦点距離は 4mm である。Eye カメラと同様に Inside-Out カメラ中央に位置するハーフミラーを介することで、人の視点とほぼ同一の位置から映像を撮影することができる。また、ステレオカメラであるため、Tsai¹¹⁾ のキャリブレーションモデルを用いてキャリブレーションを容易に行うことができる。

2.3 Inside-Out カメラによる注視点推定法

注視点を推定するためには視線ベクトルが必要であり、眼球回転中心や角膜曲率中心、瞳

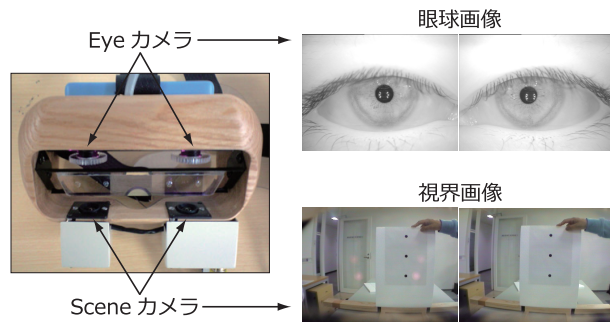


図 2 Inside-Out カメラ
Fig. 2 Inside-Out camera

孔中心により推定する手法が提案されている^{12),13)}。視線ベクトルは、注視するランドマークに依存して動くため、視線ベクトルと注視対象には相関関係があることがわかる。視線ベクトルと注視対象の関係を確認することができるため、視線ベクトルにより、視界画像中の注視点を推定することが可能になる。

2.3.1 注視点推定のための瞳孔抽出

視線により注視点を推定する場合、注視点の推定精度は瞳孔の検出精度に依存する。そのため、瞳孔抽出は注視点位置推定の前処理として非常に重要な処理となる。瞳孔は視線方向とカメラ位置の関係から楕円状に観測されるため、楕円検出を行う必要がある。提案手法では、坂下らの平行四辺形の成立条件を用いた楕円フィッティング¹⁴⁾を用いて、抽出された瞳孔から瞳孔中心を推定する。楕円検出手順は以下のようになる。

Step1. 楕円に内接する平行四辺形を求めて楕円中心候補から中心を算出

Step2. 照明の反射のような楕円の輪郭の欠損によるアウトライアを除去

Step3. 楕円パラメータを推定し楕円の長軸、短軸、長軸の回転角を算出

2.3.2 視線ベクトルの推定

視線ベクトルは、角膜反射像（以下、プルキニエ像）から角膜曲率中心を求め、その角膜曲率中心と瞳孔中心を結ぶ直線である。視線ベクトル $\mathbf{V} = [V_u, V_v]^T$ の算出は、大野らの手法¹⁵⁾により角膜曲率中心 $\mathbf{P}_p = [u_p, v_p]^T$ を抽出し、坂下らの手法¹⁴⁾により推定される瞳孔中心 $\mathbf{P}_c = [u_c, v_c]^T$ を用いて式 (1) から算出できる。

$$\mathbf{V} = \mathbf{P}_c - \mathbf{P}_p \quad (1)$$

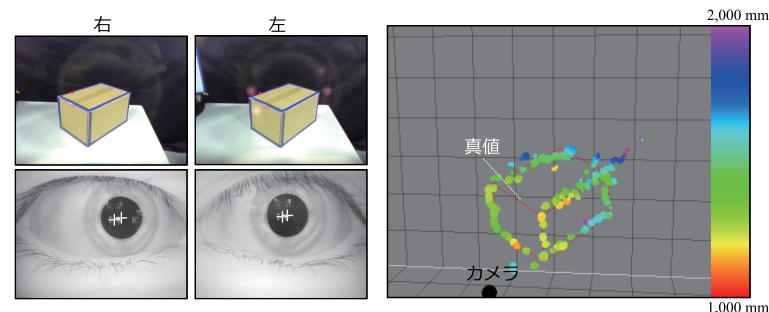


図 3 注視点の 3 次元位置推定
Fig. 3 Estimation of 3D position of the gaze points

2.3.3 注視点の算出

2.3.2 により推定した視線ベクトルを用いて画像平面上の注視点を推定する。注視点 $\mathbf{L} = [L_u, L_v]^T$ と視線ベクトル $\mathbf{V} = [V_u, V_v]^T$ の各 u, v 成分を抽出し、その点に対して最小 2 乗法により式 (2) から直線を算出する。注視点と視線ベクトルの各成分における関係は、比例関係にあることから、数点のキャリブレーションデータを用いて、直線方程式の傾き $\mathbf{a} = [a_u, a_v]^T$ と切片 $\mathbf{b} = [b_u, b_v]^T$ を算出しておくことにより、視線ベクトルを入力とした際の注視点 $\mathbf{L} = [L_u, L_v]^T$ を算出することが可能になる。ここで、清水らの手法⁷⁾では、両方の視界画像における注視点をステレオ視の問題に置き換えることで、図 3 のようにステレオマッチングによって 3 次元の注視点位置を推定する方法を提案している。

$$\begin{aligned} L_u &= a_u V_u + b_u \\ L_v &= a_v V_v + b_v \end{aligned} \quad (2)$$

2.3.4 Inside-Out カメラにおけるステレオマッチングの問題点

Inside-Out カメラの Scene カメラによって取得される視界画像には、図 4 に示すように、注視対象が画像内に存在していない場合がある。これは、人の両眼視野角が約 110 度であるのに対し、Scene カメラの視野角が約 53 度と狭いためである。このような対応がとれない点は、ステレオマッチングにより視差を求めることはできない。Scene カメラを広角カメラに変更すれば視野角が広がるが、レンズ歪みによりステレオマッチングの精度が落ちる問題がある。以上より、従来の Inside-Out カメラにおける 3 次元注視点の推定可能な範囲は、Scene カメラの FOV に依存するという問題がある。そこで、本研究では眼球画像から得られる眼球パラメータを用いた注視点位置推定を実現する。

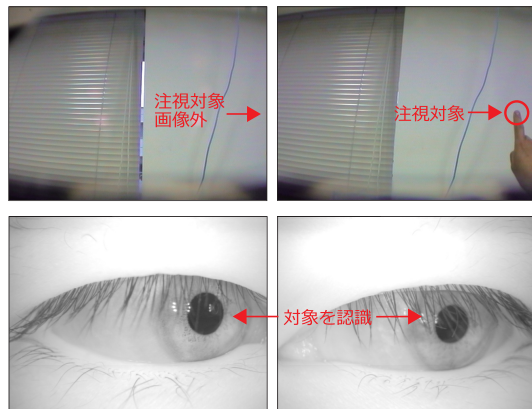


図 4 ステレオマッチングでは推定不可能な場所

Fig. 4 The point that is impossible to estimate by stereo matching

3. 輻輳開散運動による注視点推定

本研究では、視界画像を用いずに注視対象の奥行き変化によって生じる輻輳開散運動から、注視点の距離を、瞳孔位置から視線方向を求める注視点の 3 次元位置推定を行う。まず、Inside-Out カメラにより眼球パラメータを取得し、注視点距離と回帰分析によって変換行列を求める。算出した変換行列に未知の眼球パラメータを入力することで注視点距離と方向を推定することが可能となる。

3.1 輻輳開散運動と注視点

眼球運動における輻輳開散運動は、注視対象の奥行きが変化した場合のみ生じる眼球運動である¹⁾。図 5 に示すように、注視対象が近い場合には両目の瞳孔は内側に寄り、遠い場合には外側に開く運動をする。また、図 6 には注視対象の水平方向へ変化する場合に発生する瞳孔とその向きの変化を示す。

3.2 眼球パラメータ

眼球画像から画像処理により得られるパラメータを以下に示す (図 7 参照)。

- 瞳孔中心座標 $P_C = [u_C, v_C]^T$
2.3.1 で述べた楕円検出により算出される瞳孔の中心座標
- 視線ベクトル $V = [V_u, V_v]^T$

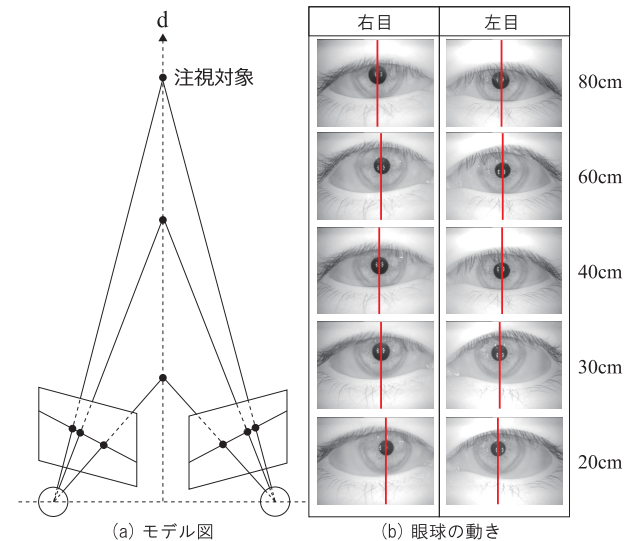


図 5 瞳孔と注視対象の距離変化

Fig. 5 Pupil for Images for distance of gaze point

瞳孔中心 P_C と角膜曲率中心 P_p を結ぶ直線 (式 (1))

- 瞳孔の輻輳量 S
画像座標 u 軸上での左目瞳孔中心 u_L と右目瞳孔中心 u_R の輻輳による変化量 (式 (3))
$$S = u_L - u_R \quad (3)$$

- 瞳孔の長径 a , 短径 b
2.3.1 で述べた楕円検出により算出される瞳孔の長径と短径
- 瞳孔の長径の回転角 r
瞳孔中心の u 軸を 0 度とした画像上の長径の傾き

3.3 回帰分析によるパラメータの対応付け

提案手法では、注視点の推定に回帰分析の最小 2 乗法を用いてパラメータの対応付けを行う。Inside-out カメラから取得できる両目併せて 15 次元からなる眼球パラメータを $\mathbf{x} = [u_{CL,R}, v_{CL,R}, V_{uL,R}, V_{vL,R}, a_{L,R}, b_{L,R}, r_{L,R}, S]$ とすると、サンプル数 n の場合に行列 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n]^T$ と表す。また、求める注視点距離または視線の方向角度を行列 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ として表す。式 (4) から各入力パラメータに対応する変換パラメータ

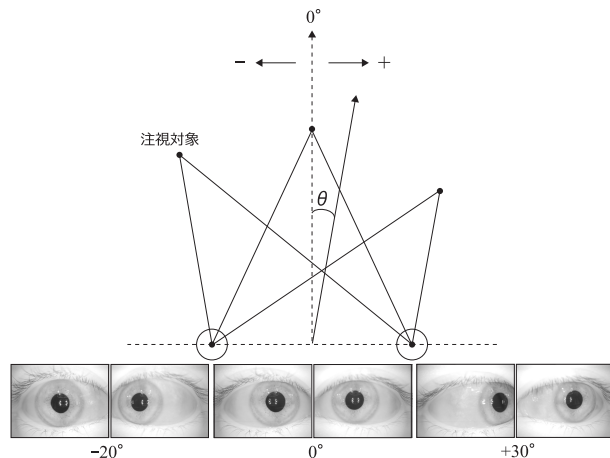


図 6 瞳孔と向きの角度変化
Fig. 6 Pupil image for direction of gaze point

の変換行列 $\mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_{15}]^T$ を定義する.

$$\mathbf{Y} = \mathbf{XA} \quad (4)$$

変換行列 $\mathbf{A}$ を式 (5) に示す入力パラメータ行列 $\mathbf{X}$ の逆行列を用いて求める.

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (5)$$

3.4 回帰分析による注視点の距離と方向の推定

式 (5) より求めた変換行列 $\mathbf{A}$ を用いて, 入力画像から得られる眼球パラメータを行列 $\mathbf{X}$ に入力し, 式 (4) により注視点の推定をする. 同様に, 視線の方向角度も推定する.

4. 評価実験

提案手法の有効性を確認するために評価実験を行う. 被験者から眼球パラメータを注視点の距離毎に取得する. 眼球画像と画像から注視点の距離と方向を推定する.

4.1 実験概要

Inside-Out カメラにより取得した被験者 10 人の眼球パラメータを用いる. 頭部を固定したヒトの眼球位置から図 8 に示すように 20cm~80cm の距離にランドマークを配置する. 注視点距離は Z 軸方向へ 10cm 間隔で移動させる. 被験者 1 人から取得される眼球パラメータは, 20cm~80cm の間を 1 セット全 63 点,、それを 3 セットの計 192 点である. 推定精

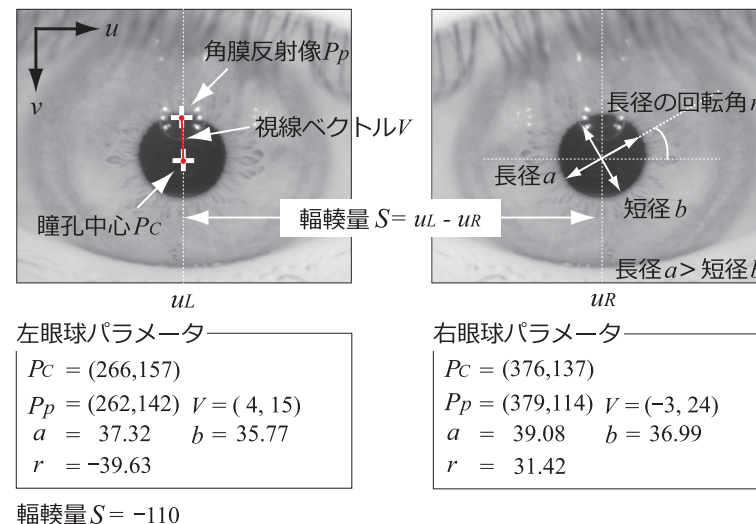


図 7 画像処理から得られる眼球パラメータ
Fig. 7 Parameters of eyeball by image processing

度は, 評価する被験者以外の被験者の眼球パラメータを学習サンプルとして用いるクロスバリデーションにより評価し, 推定誤差の平均を結果として示す.

4.2 各眼球パラメータの信頼度

眼球パラメータには, 注視点距離推定と相関関係のないパラメータが含まれるため, 各眼球パラメータと注視点距離を回帰分析し, 推定誤差から求められる信頼度を用いて注視点距離の推定に有効であるパラメータを調査する. 有効なパラメータを用いて変換行列 $\mathbf{A}$ を求め, 推定用の変換パラメータとして扱う. 信頼度の算出方法は, 実測値を y , 推定値を $\hat{y}$ としたとき, 実測値の変動 S_y , 推定値の変動 $S_{\hat{y}}$, 誤差の変動 S_E とすると, 信頼度 $R^2 = 1 - \frac{S_E}{S_y}$ が算出できる. 各眼球パラメータの信頼度の算出結果を図 9(a), 10(a) に示す. 図 9(a), 10(a) から, 注視点距離に対して最も有効とされるパラメータは輻輳量と瞳孔径, 長径の回転角の組み合わせからなるパラメータであり, 視線の方向角度に対しては視線ベクトルと瞳孔径の組み合わせが最も有効であることがわかる.

次に, 信頼度が高いパラメータから注視点距離と視線の方向角度の推定を行った結果をグラフ図 9(b), 10(b) に示す. 図 9(b), 10(b) より, 信頼度が高いパラメータでも 1 つのパラ

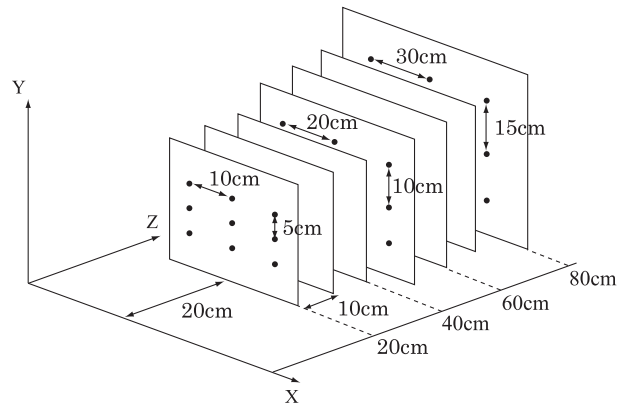


図 8 ランドマーク配置図
Fig. 8 Land mark schematic

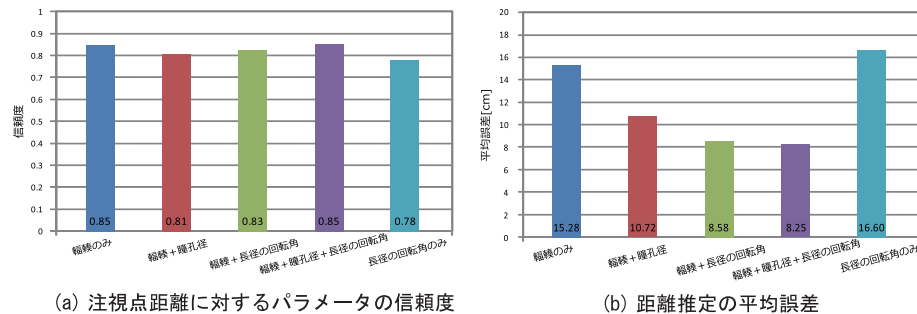


図 9 注視点距離推定
Fig. 9 Estimation results for each distance of gaze point

メータのみで推定を行った結果よりも複数の組み合わせから推定を行った方が平均誤差が低くなる傾向がある。従って注視点距離推定の入力パラメータとするのは、幅輦量と瞳孔径、長径の回転角を入力とするパラメータが最適であるということが確認できた。同様に、視野角の信頼度による入力パラメータから推定を行った結果、図 10(b) に示すように、視野角の推定には視線ベクトルと瞳孔径を入力とするパラメータが最良のパラメータであると確認できた。

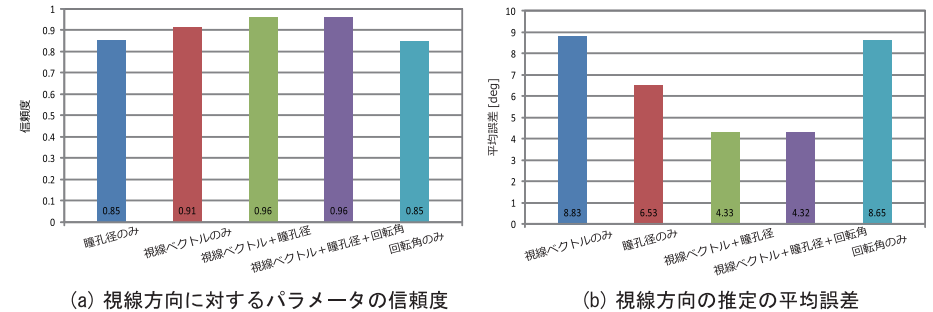


図 10 注視方向推定
Fig. 10 Estimation results for angle of gaze point

4.3 従来法と提案手法の比較

比較手法として清水らの手法⁷⁾を用いる。提案手法に入力する眼球パラメータは、4.2 の信頼度により決定したパラメータを用いる。注視点距離の推定には幅輦量と瞳孔径、長径の回転角を、視線の方向角度の推定には視線ベクトルと瞳孔径のパラメータを用いて推定を行う。

提案手法と比較手法それぞれの、距離推定における平均誤差の比較を図 11 に示す。従来法では、ステレオマッチングを行うため近距離の精度が高く、遠距離になるにつれて線形に精度が低下する。それに比べて提案手法は注視点距離によらず常に一定の誤差を含む形で推移する。全距離の誤差を平均したところ、従来法で 100.62mm、提案手法では 147.61mm となり距離推定の精度は 50mm ほど低下する。次に、推定可能な視線の方向角度について考える。視線の方向角度を推定し、その平均誤差を計測した結果を図 12 に示す。しかし、推定可能な範囲は、ランドマークを正面視する位置を 0 度としたとき、提案手法の推定可能な範囲は水平角 -36.8° から 36.8° の間の約 73° であり、従来法の 53° を上回る。

これらの結果から、提案手法は従来法に比べ精度がやや低下するが、より広範囲な視線方向検出に対応した手法であると言える。図 13 に注視点推定結果例を示す。図 13 より、提案手法では、従来法のステレオマッチングでは対応できない角度の点に対しても推定が可能である。

5. おわりに

本稿では、奥行き変化によって生じる幅輦開散運動により眼球画像から注視対象の距離と

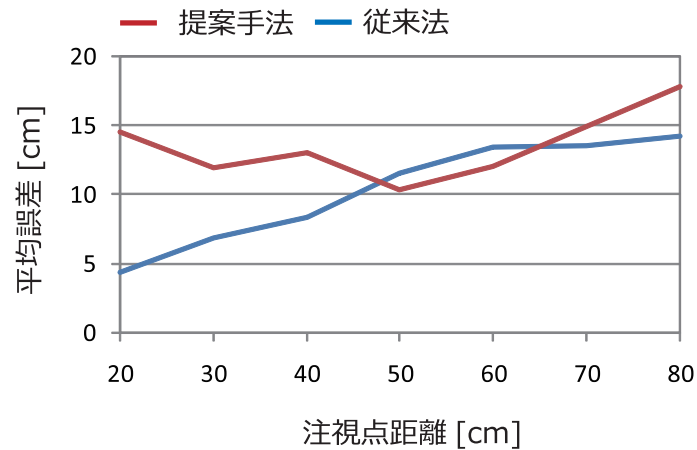


図 11 被験者全員の距離の平均誤差
Fig. 11 Mean error of the distance of all the subjects

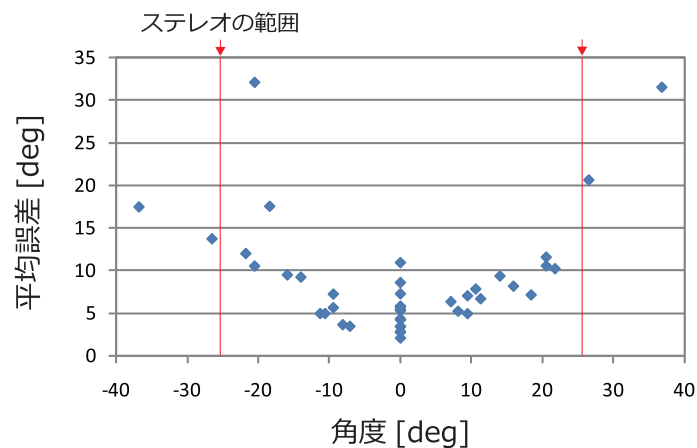


図 12 被験者全員の視線方向の平均誤差
Fig. 12 Mean error of the view angle of all the subjects

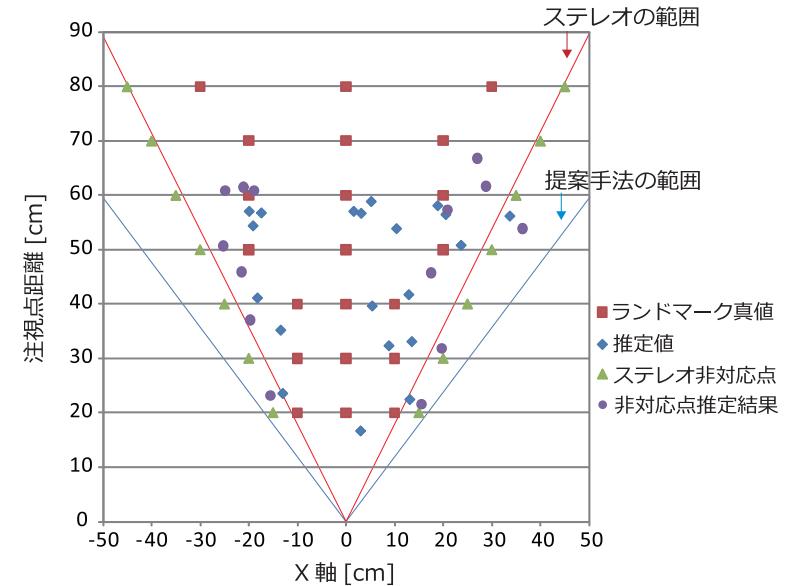


図 13 注視点推定例
Fig. 13 An example of gaze point estimation

方向角度を推定する手法を提案した。Inside-Out カメラを用いた注視点推定の従来法のステレオマッチングでは、対応点の探索範囲は Scene カメラの FOV に依存する問題があるため、提案手法では眼球画像のみを用いた注視点の距離と方向角度の推定を行った。取得された眼球パラメータを用いてパラメータの信頼度を求め、距離推定には瞳孔の幅狭変化と、瞳孔径とその回転角のパラメータが、方向角度推定には、視線ベクトルと瞳孔径が必要であることがわかった。最も有効であるとされるパラメータを用いて提案手法と従来法の比較実験を行った。結果より、提案手法は平均誤差 50mm で精度は劣るが、方向角度の推定結果より、従来法では推定不可能な方向角度である約 73 度の範囲においても注視点の推定が可能である。

今後は、提案手法の推定精度の向上を検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本視覚学会：視覚情報処理ハンドブック (2000-9).

- 2) Noton, D. and Stark, L.: Eye movements and visual perception., *Scientific American*, Vol.224, No.6, p.35 (1971).
- 3) ナックイメージテクノロジー：アイマークレコーダー EMR-9.
- 4) 白井 了, 井東道昌, 乗松 有, 足立和正, 中野倫明, 山本 新：ドライバの運転状態検知のための視線方向の検出, 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol.103, No.453, pp.67–72 (2003).
- 5) 三浦利章：運転時の視覚的注意と安全性, 映像情報メディア学会誌：映像情報メディア, Vol.61, No.12, pp.1689–1692 (2007).
- 6) 大野健彦：視線を用いた高速なメニュー選択作業, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.2, pp.602–612 (1999).
- 7) 清水彰一, 西尾和晃, 木村 誠, 藤吉弘亘：First Person Vision のための Inside-Out カメラの提案, 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol.110, No.27, pp.47–52 (2010).
- 8) Kanade, T.: First-Person, Inside-Out Vision, *Keynote Speech on First Workshop on Egocentric Vision in conjunction with CVPR* (2009).
- 9) 亀田能成, 藤吉弘亘, 羽下哲司, 山口晃一郎, 中村裕一：First Person Vision への挑戦 (First Person Vision のための認識・理解), 電子情報通信学会技術研究報告. MI, 医用画像, Vol.110, No.28, pp.37–38 (2010).
- 10) 原島 博：3次元画像と人間の科学, オーム社 (2000-4).
- 11) Tsai, R.: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, Vol.3, No.4, pp.323–344 (1987).
- 12) 松田圭司, 永見武司, 山根 茂：視線位置計測システムの開発, 電子情報通信学会技術研究報告. TL, 思考と言語, Vol.100, No.47, pp.9–16 (2000).
- 13) 竹上 健, 後藤敏行：角膜反射像と虹彩輪郭情報を併用した視線検出法, 電子情報通信学会論文誌. D-I, 情報・システム, I-情報処理, Vol.82, No.10, pp.1295–1303 (1999).
- 14) 坂下祐輔, 藤吉弘亘, 平田 豊：面像処理による 3 次元眼球運動計測, 実験力学 : journal of JSEM, Vol.6, No.3, pp.236–243 (2006).
- 15) 大野健彦, 武川直樹, 吉川 厚：2点補正による簡易キャリブレーションを実現した視線測定システム, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.4, pp.1136–1149 (2003).