

J-057

頭部移動を許容するステレオカメラによる較正容易な 注視点検出装置

Head-Free Eye-Gaze Detection System with Easy Calibration Using Stereo-Calibrated Two Video Cameras

海老澤 嘉伸†
Yoshinobu Ebisawa

安保 寿樹†
Kazuki Abo

西田康太郎†
Koutaro Nishida

孫麗虹†
Reikou Son

近藤祐輝†
Yuki Kondou

1. まえがき

遠隔から、頭部の運動を自由にした人間の視線方向もしくはディスプレイ上の注視点を検出する装置の開発は、重度身体障害者のPC入力や、心理物理学研究、ドライバー安全走行システムなど、多岐にわたる分野で求められている。ビデオカメラで撮影される瞳孔中心と近赤外光源の角膜反射との相対位置から、視線を検出する方法は、眼球を直接的に検出するため、顔表情などに影響を受けにくく、高精度の視線検出が期待できる[1]-[3]。

しかし、一般に高精度の注視点検出するためには、予め、ディスプレイ顔面上の座標が既知である5個や9個の視標の一つ一つを数秒ずつ注視してもらい必要がある。この較正手続き時にユーザが正確にそれらの視標を見ないと再較正しなければならない。したがって、いかに楽に、較正が正確に終了するかが重要な課題である。特に、乳幼児が被験者の場合は、特定の視標を注視させること自体が困難なため、特定の視標を注視しなくても較正できることが望まれる。

我々は、これまでに、ステレオ較正をした2台のカメラに近赤外線光源を取り付け、工夫をして顔に近赤外線を照射することで、通常の室内光条件下で瞳孔と角膜反射の検出を可能とした。さらに、瞳孔の三次元位置を計測することで、頭部の動きを許容しながら、高精度にディスプレイ画面上の注視点を検出可能にした[4]。

本報告では、まず、次のような新しい較正法を提案する。(1)画面上の座標が未知な位置を注視してもらい較正する自動較正法、そのとき、(2)眼球の光学軸と視軸のずれを補正するために、画面上の1点のみを注視してもらい1点較正法、さらに、(3)瞳孔と角膜反射の距離と視線角度との関係が非線形な被験者に対応するための2点較正法、の3種類の較正法を考案し、それらの比較実験を行う。また、従来のシステム[4]よりも光源を高輝度化したことによる頭部移動の奥行き方向の許容範囲の広範囲化を実現したので、それについて示す。

2. システム構成および瞳孔中心座標及び角膜反射座標の検出

本装置は、NTSC方式のCCDカメラ、16mmレンズ、可視光カットフィルタ、リング状近赤外線LED光源(内側リング850nm、外側リング950nm)からなる光学系を2組、同期信号発生装置、LED発光回路2台、2台のカメラ間の同期を750 μ s程度ずらすために使用するファンクションシンセサイザ、2ch画像入力ボード、PC、19インチ液晶

ディスプレイ(解像度1280 \times 1024)などから構成した(図1)。カメラから画像入力ボードに取り込む画像はグレースケール画像で、1フレームのサイズが640 \times 480画素であった。

従来の装置[4]では、光源の外側と内側は同波長のLED(890nm)を使用していたが、上述のように2波長のLEDを使用し小型化を図った。さらに、従来から外部光の影響の軽減のために、シャッターの開いている間に大きな電流を流すようにしていたが、発光期間の延長と高電流化により光源の高輝度化を図った。その結果、レンズの絞りを従来に比べ絞ることができ、被写界焦点深度を深められた。

2組の光学系のリング状近赤外線LED光源の内側リング部、外側リング部をカメラの奇数/偶数フィールドに同期させて交互に点灯させ、2台の広視野カメラで連続して明瞳孔画像(図2(a), (c))と暗瞳孔画像(図2(b), (d))を得た。瞳孔像の検出は、明瞳孔画像と暗瞳孔画像の差

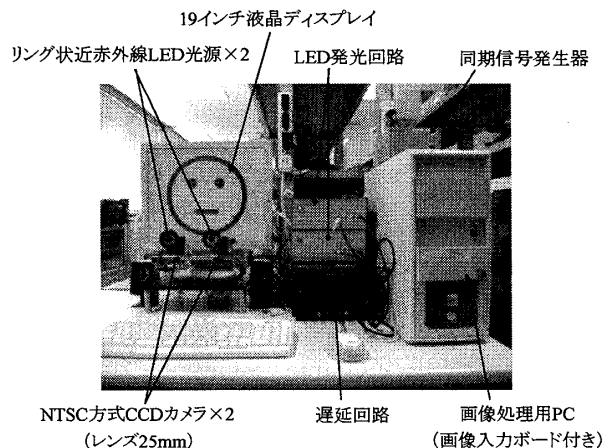


図1 装置構成

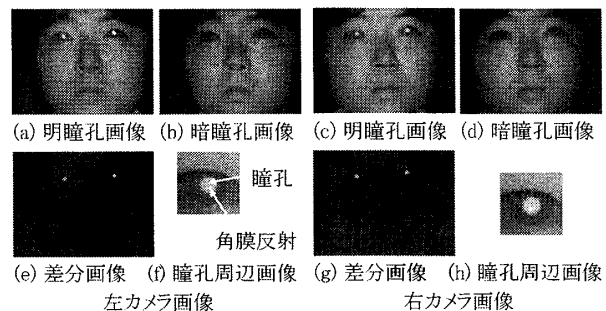


図2 瞳孔と角膜反射の検出法

† 静岡大学工学部, Shizuoka University

分画像 (図 2(e), (g)) に対して, P タイル法により閾値決定して 2 値化, 孤立点除去, ラベリングなどの画像処理を行い, 瞳孔中心を検出した. 角膜反射像の検出は, 瞳孔周辺の 70×70 画素を間の画像の平均輝度により 140×140 画素に高解像度化した明瞳孔画像 (図 2(f), (h)) と暗瞳孔画像に対して, 2 値化, ラベリングなどの画像処理を行い, 面積と輝度から判定して角膜反射位置を検出した.

3. 注視点検出理論

注視点検出の概念を図 2 に示す. まず, ステレオ校正したカメラにより瞳孔の 3 次元位置 P を得る. ここで, カメラ-瞳孔ベクトル OP と視線ベクトル PT が成す角を θ , カメラの位置を原点とする平面 (仮想視点平面) のカメラ-瞳孔ベクトル周りの回転角を ϕ と定義する. 各カメラにおいて, 光軸を Z 軸とするピンホールモデルを考え, カメラに映る光源の角膜反射の 3 次元位置 G が瞳孔 P と同じ X-Y 平面上にあると仮定し, 角膜反射-瞳孔ベクトルを r と定義する. 角度 θ , ϕ を求めるため, 次の仮定と設ける. (1) 角度 θ と $|r|$ の関係には式(1)のような線形関係が存在する. (2) 角度 ϕ と角膜反射-瞳孔ベクトル r の水平軸と成す角度 ϕ' は等しい.

仮想視点平面を導入し, これらの仮定による式(1), (2) を利用することで, (θ, ϕ) と $(|r|, \phi')$ を 1 対 1 に対応させることができる[4].

$$\theta = k|r| \quad (\text{校正関係式}) \quad (1)$$

$$\phi = \phi' \quad (2)$$

また, カメラ-仮想視点平面上の注視点 T ベクトル OT は次の式で得られる.

ここで, ディスプレイ画面の既知の一点を被験者に注視させれば, 式 (1) より k を求めることができ, 校正が終了すると考えられる. しかし, 現実には, 眼球の光学軸と視軸とのずれが存在するため, 一般に $\theta=0$ のときに, $|r| \neq 0$ とはならないために, $\theta=0$ のときの r , すなわち原点補正ベクトル r を求めなければならない. そのためには, 既知の 2 点以上の校正ための視標を注視しなければならない[5].

本研究で提案する(1)自動較正法では, ディスプレイ上の座標が未知な位置を注視している間に校正が取れる方法であり, 原点補正ベクトル $r=(0, 0)$ であると想定して, k のみを求める方法であると言える. k は次のように決定する. 今, 図 4 において, 左右のカメラから検出されるベクトル r の角度から ϕ_L', ϕ_R' を求め, それぞれを左右の仮想視点平面上の角度 ϕ_L, ϕ_R' として使用し, ベクトル $O_L T_L$ と $O_R T_R$ を各画像から得られる r から式(1)を用いて求める. このとき, k は未知であるから, k をある値に設定したときに決定される仮想視点平面上の T_L, T_R を投影仮想視点平面上(図 4)に投影したときのその平面上の点をそれぞれ T_L', T_R' をする. ここで, 投影仮想視点平面は $\angle O_L P O_R$ の二等分線を法線とする平面とする. このとき, T_L' と T_R' が一致するような k は一般に存在しないから, 二文探索法により k を変化させながら, $|T_L' T_R'|$ が最小になるときの k を求める.

注視点検出時には, 校正で決定した k を利用して, 左右の各カメラにつき, 計測される r から式(1)に基づき θ を求

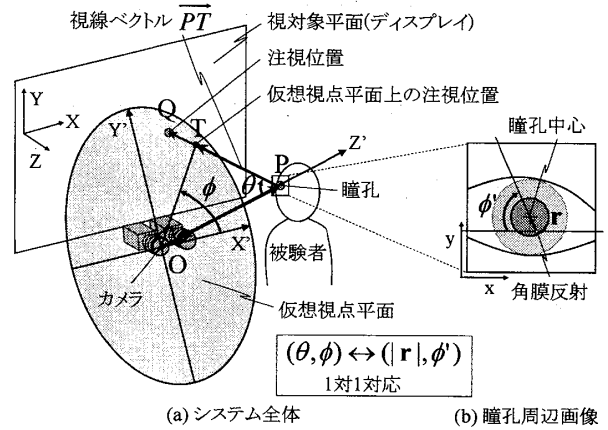


図 3 注視点検出理論の基本

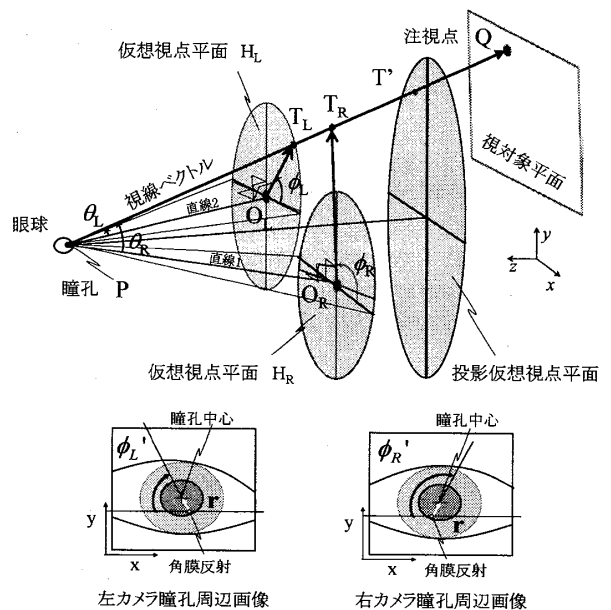


図 4 自動較正法の概要

める. また, P が算出されるから T_R, T_L を求め, 続いてこれらの投影仮想視点平面上の T_L', T_R' の中点 T' を求める. 最後に PT' とディスプレイ平面との交点を注視点として求める.

上述の自動較正法では, 原点補正をしていないため, 一般に, 注視点結果が真の注視点とずれて算出される. そこで, (2) 1 点較正法では, 座標が既知の 1 つの較正用視標 Q' をディスプレイに表示し, 注視させる. そのとき, 自動較正法で k を求める. それを利用し, 投影仮想視点平面上での仮の注視点 T' を算出すると同時に, 直線 PQ' と投影仮想視点平面上の交点と T' とのずれ量であるベクトル ΔQ を求める. これを補正ベクトルとして, 注視点結果を補正する.

一般に, θ が大きくなると, θ と $|r|$ の関係は非線形になりやすい. そこで, (3) 2 点較正法では, 図 5 と式(3)に示すような途中で折れ曲がる非線形の較正式を, 式(1)の代わりに使用した.

$$\theta = \begin{cases} k_1|r| & k_1|r| \leq \theta_B \\ \theta_B + k_2(|r| - |r_B|) & k_1|r| > \theta_B \end{cases} \quad (3)$$

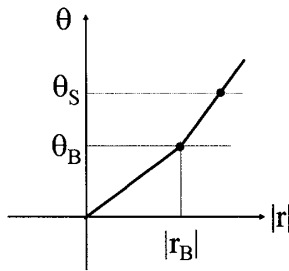


図5 2点較正法に用いた θ と $|r|$ の関係式

4. 較正方法比較実験

自動較正法, 1点較正法, 2点較正法による注視点検出結果の比較, 検討を行なった. 健康な3名の被験者(KY, HK, IT)には, PC画面正面80cmに座ってもらい, 頭部を顎台に軽くのせた姿勢で行った.

比較のため, 自動較正法, 1点較正法ではディスプレイの中央位置の視標を注視させ, 較正を行った. 2点較正法では, 1個目の視標は, 自動較正法および1点較正法と同じ位置に表示し($\theta = \theta_B$), 2個目の視標は画面の上部中央($\theta = \theta_S$)に表示させた.

各較正後, 注視点検出精度評価のため, 画面上に3×3に配置した視標9点を順に1秒間ずつ見もらった. 図6には注視点検出結果を示す. 被験者3名の平均の注視点平均誤差は, 自動較正法では 2.16 ± 0.80 deg, 1点較正法では 1.37 ± 0.89 deg, 2点較正法では 0.93 ± 0.26 degであった. また, 被験者3名の平均の注視点平均誤差について有意差検定($p < 0.05$, t検定)を行ったところ, 自動較正法と1点較正法, 自動較正法と2点較正法の間には統計的な有意差が認められた. また, 顎台無し状態で注視点の検出を行なっても, 精度は維持することができた.

5. 頭部移動許容実験

前の実験と同じ3名の被験者に頭部がモニター位置から頭部位置が前後±10 cm, 左右5 cm移動した位置で9点注視点実験を行った.

図7には, 各頭部位置における, 従来装置における被験者5人の両眼の注視位置検出誤差の平均, 提案装置における被験者3人の両眼の注視位置検出誤差の平均を示す(バーは標準偏差). 従来装置では, 平均誤差は, 1.42 ± 0.50 degで前後±10 cmの位置で誤差が増大したが, 頭部が前後±10 cm, 左右±5 cm移動させても平均誤差は, 0.92 ± 0.40 degになり, 頭部を移動しても精度が維持できる範囲が広がった.

6. おわりに

本論文では, 光源付きのステレオカメラによる注視点検出装置において, 様々な被験者が使用できるように自動較正法, 1点較正法, 2点較正法の3種類の方法を検討し, 0-2点の視標を注視することで較正を行うことがで

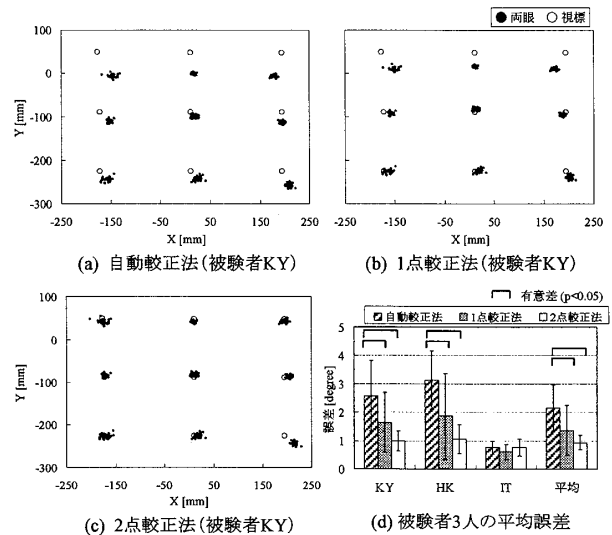


図6 較正法の比較

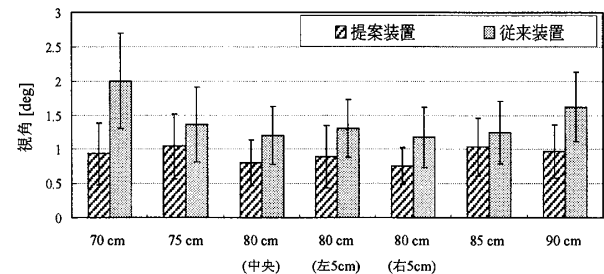


図7 頭部移動による注視点検出平均誤差

きることを示した. 自動較正では, 指定した視標の注視が困難な被験者でも, 注視点が算出できるようになった. 1点較正法では, 視標1点を注視することで原点補正を行ない, カメラから近い位置では注視点が正確に求まるようになった. さらに, 2点較正法では, 視標をもう1点注視することでカメラから遠い較正関係式の非線形成分の較正を行なった. 実験では, 頭部位置が前後方向に20 cm, 左右方向に10 cm移動しても精度を維持することを示した. また, 顎台の有無に関わらず注視点の精度は維持した.

参考文献

- [1] T. Ohno, N. Mukawa: A Free-head, Simple Calibration, Gaze Tracking System that Enables Gaze-Based Interaction, Proc. of the symposium on ETRA 2004, 2004.
- [2] E.D. Guestrin, M. Eizenman: General Theory of Remote Gaze Estimation Using the Pupil Center and Corneal Reflections, IEEE Trans on Biomed & Eng, 53, 6, pp.1124-1133, 2006.
- [3] Z. Zhu, Q. Ji: Novel Eye Gaze Tracking Techniques Under Natural Head Movement, IEEE Trans on Biomed & Eng, 54, 12, pp.2246-2260, 2007.
- [4] 近藤祐輝, 中根尚仁, 安保寿樹, 西田康太郎, 海老澤嘉伸, “ステレオカメラを利用した3次元注視点検出システム”, ViEW2009講演論文集, 1-52, pp.343-348(2009).
- [5] 近藤祐輝, 中根尚仁, 海老澤嘉伸, “遠隔注視点検出装置における容易な較正法の検討”, ViEW2008 ビジョン技術の実用ワークショップ講演論文集, 1-19, pp.140-145(2009).