

ステレオカメラを利用した 1 点キャリブレーションによる視線計測手法

長松 隆[†] 鎌原 淳三[†] 伊香 拓真[†] 田中 直樹[†]神戸大学大学院海事科学研究科[†]

1. はじめに

一般に、視線計測装置は、眼球を撮影した画像と、ディスプレイとの対応を取るために、5～20 点のマーカを注視するキャリブレーション作業を行わなければならないが、本論文では、1 点を眺めるだけで済むキャリブレーション手法について述べる。

提案する手法では、単にディスプレイとの対応をとるのではなく、ステレオカメラを使って、眼球の位置と向きを計測することにより視線方向を求める。1 点のキャリブレーション作業が必要なのは、計測できる眼球の光軸(光学的な中心軸)と視線(網膜上の最も対象物がはっきり見える場所(中心窩)とレンズの中心を結ぶ線)のずれを校正するためである。

1 点キャリブレーションの視線計測装置の研究はいくつか行われている[1-3]が、本手法の特長は、光軸から視線方向を計算する際に、人間の眼球が実際に行う動き(リスティングの法則に従う)を考慮したところである。

2. 眼球のモデル

図 1 に本研究で仮定した眼球のモデルを示す。眼球は、二つの球が組み合わさったような形状になっている。小さい球が角膜部分を示す。角膜の曲率中心にレンズの中心があるとし、外から来た光は角膜の曲率中心を通るものとする。光軸と視線はずれており角膜の曲率中心で交わるものとする。

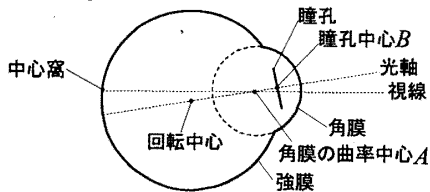


図 1 眼球のモデル

3. 光軸の推定

眼球の光軸は、カメラ 2 台と点光源 2 個により求めることができる [2]。すなわち、角膜の曲率中心位置、瞳孔中心位置を求めそれを結ぶ線を光軸とする。

(1) カメラ画像の処理

各カメラで撮影した眼球画像から楕円フィッティングにより瞳孔中心座標を求める。加えて瞳孔中心付近にある明るい点を 2 点検出し、点光源 2 つの角膜表面での反射像(第 1 プルキニエ像)とする。

(2) 角膜曲率中心の位置

点光源、カメラの光学中心、イメージセンサ上の第 1 プルキニエ像、角膜の曲率中心は、同一平面にある。このことを利用すると、カメラと光源の組み合わせを変えて、角膜の曲率中心を含む平面を 4 つ求めることができる。その交点として、角膜の曲率中心の位置 A が求まる。

(3) 角膜の曲率半径

角膜の曲率中心が求まれば、光源から出た光が角膜表面で反射する点を求めることができる。その点と角膜曲率中心との距離として角膜の曲率半径を求めることができる。

(4) 瞳孔の位置

カメラにより観察される瞳孔は角膜表面での屈折があるため、実際の瞳孔の位置からずれて見える。レイ 트레이シングの技法を利用して、カメラから瞳孔中心に向かうレイが角膜表面で屈折した直線を求める。二つのカメラについてその直線を求め、二つの直線の交点を真の瞳孔の位置 B とする。

以上より、光軸 x は、 t をパラメータとして、 $x = A + t(B - A)$ と表せる。

4. キャリブレーション

光軸と視線のずれは個人毎に異なるため、そのずれを求める。具体的には、眼球が第 1 眼位(正面を見たときの眼球の位置)にあるときの光軸を推定する。

4.1. リスティングの法則

眼球は実行可能な全ての動きをするわけではなく、通常は次に述べるリスティングの法則に従って運動している。「(a) 眼球は第 1 眼位から単一の回転で到達できる位置しかとらない、そして (b) この回転軸は第 1 眼位の視線方向に垂直な平面に存在する」[4]。また、この平面をリスティング平面という。

4.2. 第1眼位の時の光軸の推定

ディスプレイ上にキャリブレーション用の点を表示し、ユーザにはその点を見てもらう。このときの眼球の光軸は3章の方法により計測する。一方、視線は、角膜の曲率中心とキャリブレーション用の点を結ぶ線として求めることができる。キャリブレーション時、眼球はリスティングの法則に従い、第1眼位からリスティング平面内の軸 l の周りに角度 ϕ で回転している。この l と ϕ はキャリブレーション時の視線から求めることができる。そして、キャリブレーション時の光軸を、 l の周りに $-\phi$ 回転すれば、第1眼位の時の光軸を求めることができる。

5. 視線の推定

キャリブレーション後は光軸のみが計測可能であり、それはリスティング平面内の回転軸の周りに、第1眼位の時の光軸が回転したものである。その関係を利用して、回転軸 l' と回転角度 ϕ' を求める。求めた回転軸と回転角度で正面方向のベクトルを回転することにより視線を求めることができる。

6. 開発と評価

図2に示すようにプロトタイプシステムを構築した。ハードウェアは、IEEE-1394 デジタルカメラ (Point Grey Research Inc. 製 Firefly MV (1/3" CMOS イメージセンサ利用)) × 2、50-mm レンズ × 2、赤外線フィルタ × 2、赤外発光ダイオード × 2、17" LCD、Windows PC を用いた。ソフトウェアは、OpenCV を利用して開発した。二つのカメラは、ディスプレイから 575mm 離れたところで、カメラの軸が交わる形に配置した。

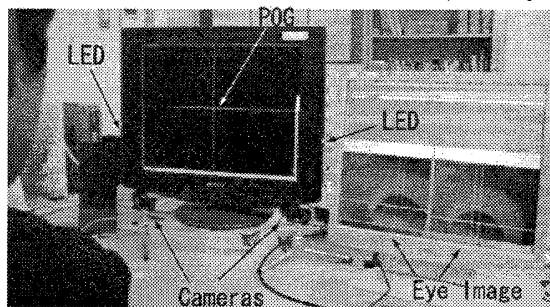


図2 プロトタイプシステム

裸眼の被験者3人に対して計測を行った。キャリブレーションは画面の中央に出現する十字を見ることにより行った。マウスを押している間十字が表示され、離れたときに視線を計測する。被験者は25点(図3中の格子)を注視し、各点について20フレーム以上のデータを取得し平

均値を計算した。結果を図3に示す。

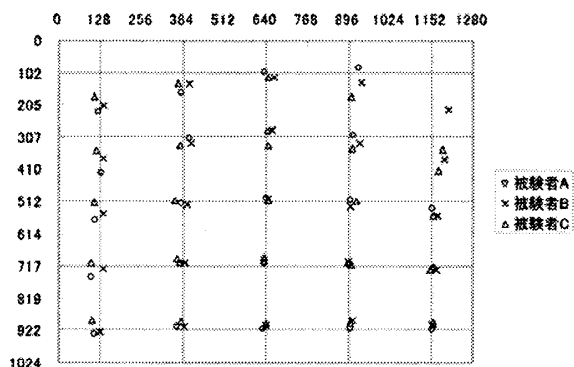


図3 視線の計測結果

図のように中心部と下方においては、十分な精度 (1° 以下) が得られている。画面の右上、左上で計測精度が劣る原因については、その時の眼球画像を見ると、眼球が右上、左上を向いたときに角膜上でLEDの光が反射する位置が中央からずれて角膜表面のカーブがゆるくなる部分で反射したことが、または、強膜(白目の部分)で反射したことが、原因であると推測される。これを改善するためには、適切な位置で反射するようにカメラやLEDの位置を変更する、LEDを追加するなどの対策を考えている。

7. まとめ

1点を注視することによりキャリブレーションを行い、リスティングの法則に従って視線を推定する視線計測手法を開発した。通常5点以上の注視を必要とするキャリブレーションが非常に簡便にできるようになった。

参考文献

- 1) 大野健彦: 1点キャリブレーションによる視線計測とその応用, 情報処理学会研究報告. ヒューマンインタフェース研究会報告, Vol. 2006, No. 3, pp. 67-74 (2006).
- 2) Shih, S.-W., J. Liu: A novel approach to 3-D gaze tracking using stereo cameras, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Vol. 34, No. 1, pp. 234-245 (2004).
- 3) Guestrin, E. D., M. Eizenman: General Theory of Remote Gaze Estimation Using the Pupil Center and Corneal Reflections, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. 53, No. 6, pp. 1124-1133 (2006).
- 4) Zatsiorsky, V. M., 身体動作の運動学, ナップ (1999)