

意図的注視を伴わずにユーザキャリブレーションを行う視線計測手法

植木 達彦[†] 菅野 隆一^{††} 長松 隆^{††} 鎌原 淳三^{††}
 神戸大学海事科学部[†] 神戸大学大学院海事科学研究科^{††}

1. はじめに

様々な人が利用できるコンピュータの操作法として視線計測技術を用いた方法がある。しかし、現在の視線計測技術では、利用前に、ユーザによる数点の注視を伴うユーザキャリブレーションが必要である。

2つのカメラと2つの光源を用いて、ユーザキャリブレーションなしに眼球の光軸を求める手法^{1,5)}があるが、自動ユーザキャリブレーションを実現するためには、眼球の視軸と光軸のずれを求める事が必須となる。

長松らの研究⁴⁾では、注視点を、両眼の光軸とディスプレイとの交点の midpoint として求め、そこから眼球の視軸と光軸のずれを求めている。Model らの研究²⁾では、視軸と光軸のずれを線形近似により求めている。

本研究では、視軸と光軸のずれをパーティクルフィルタを用いることにより推定する。

2. 視軸、光軸とディスプレイの関係

図1は眼球の視軸、光軸とディスプレイの関係を示している。注視点 POG(Point Of Gaze)の位置ベクトルは \mathbf{X}_{POG} で表す。視軸と光軸のずれは、1つの目について2つのパラメータ（水平方向を α 、垂直方向を β ）で表す。

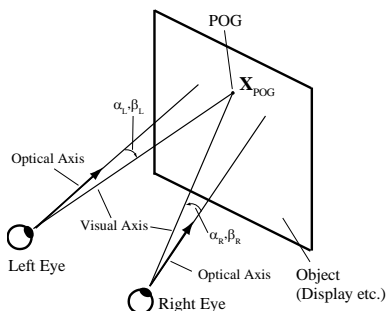


図1 視軸、光軸とディスプレイの関係

ここで重要なことは、ディスプレイ上の対象物を見ている時、2つの目の視軸はディスプレイ上で交差するということである。光軸は⁴⁾の論文に書かれた手法を用いて求めることが可能であるので、正しい $\alpha_L, \beta_L, \alpha_R, \beta_R$ を推定できれば、両眼の光軸から、 $\alpha_L, \beta_L, \alpha_R, \beta_R$ を用いて計算した両眼の視軸が、ディスプレイ上のあらゆる場所を見ているときに、ディスプレイ上で交わるはずである、というのが基本的なアイデアである。

3. リスティングの法則に従った注視点の推定

水平方向のずれは、注視点を2つの光軸とディスプレイとの交点として求めることによってほぼ推定可能である⁴⁾が、垂直方向のずれはその方法では推定できない。本研究では、眼球の回転が従うリスティングの法則⁶⁾を導入することにより、偽回旋の大きさから垂直方向のずれも求めることを提案する。

図2左は、眼球が回転したところを表した図である。 \mathbf{a}, \mathbf{b} は第一眼位における視軸、光軸ベクトルであり、 \mathbf{c}, \mathbf{d} は回転後の視軸、光軸ベクトルである。また、 \mathbf{A} は眼球の角膜曲率中心を表している。図2右は、各ベクトル $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}$ のベクトルの始点を \mathbf{O} とした図である。 \mathbf{l} は回転軸に沿った単位方向ベクトルである。リスティングの法則は以下のように書ける。

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{l} = \mathbf{c} \cdot \mathbf{l} = 0 \tag{1}$$

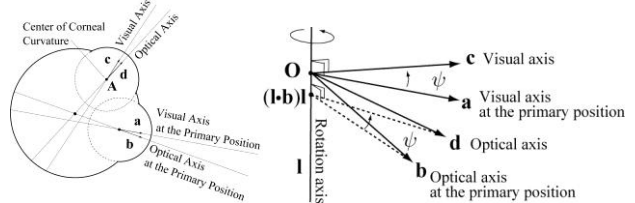


図2 眼球の回転モデル

³⁾の論文より $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{d}$ が分かれば、 \mathbf{c} は計算できる。

キャリブレーションとは、 \mathbf{a} と \mathbf{b} の関係を求めることである。 \mathbf{a} は頭部の位置に相対的に決まるものであるが、ユーザがディスプレイを見ている時は、ディスプレイに垂直であると近似することとする。よって、キャリブレーションとは、

Gaze-tracking method without intentional user calibration
 Tatsuhiko Ueki[†], Ryuichi Sugano^{††},
 Takashi Nagamatsu^{††}, Junzo Kamahara^{††}
[†] Faculty of Maritime Sciences, Kobe University
^{††} Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

\mathbf{b} を推定することと同等である。

\mathbf{b} は、 α, β を用いて以下のように書ける。

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \mathbf{a}. \quad (2)$$

以上より \mathbf{c} は α, β の関数として表される。 \mathbf{c} を用いて左右の眼球についてそれぞれ注視点を求めることが可能である。

$$\mathbf{X}_{\text{POGL}}(\alpha_L, \beta_L) \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_{\text{POGR}}(\alpha_R, \beta_R) \quad (4)$$

$\alpha_L, \beta_L, \alpha_R, \beta_R$ が正しい値の時、ディスプレイ上のどの点を見ても $\|\mathbf{X}_{\text{POGL}}(\alpha_L, \beta_L) - \mathbf{X}_{\text{POGR}}(\alpha_R, \beta_R)\| = 0$ となるはずであるので、これを満たす $\alpha_L, \beta_L, \alpha_R, \beta_R$ を探せばよい。

4. パーティクルフィルタを用いた推定

時刻 k での i 個のパーティクル $\mathbf{s}_{k|k}^{(i)} = \{s_{k|k}^{(1)}, \dots, s_{k|k}^{(N)}\}$ の内部状態を $\mathbf{s}_{k|k}^{(i)} = (\alpha_{Lk}^{(i)}, \beta_{Lk}^{(i)}, \alpha_{Rk}^{(i)}, \beta_{Rk}^{(i)})$ とする。

初めに、全てのパーティクル $\mathbf{s}_{0|0}^{(i)}$ の内部状態を、 α は -7.0° から 7.0° 、 β は -3.0° から 3.0° の間で一様分布させる。次に、各パーティクルについて予測パーティクルを次の式に従って計算する。

$$\mathbf{s}_{k|k-1}^{(i)} = \mathbf{s}_{k-1|k-1}^{(i)} + \mathbf{v}_k^{(i)} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{v}_k^{(i)}$ はシステムノイズである。 $\mathbf{s}_{k|k-1}^{(i)}$ は時刻 k での予測パーティクルである。尤度 $p_k^{(i)}$ は以下である。

$$p_k^{(i)} = \frac{1}{\|\mathbf{X}_{\text{POGL}}(\alpha_{Lk}^{(i)}, \beta_{Lk}^{(i)}) - \mathbf{X}_{\text{POGR}}(\alpha_{Rk}^{(i)}, \beta_{Rk}^{(i)})\|} \quad (6)$$

次に $\mathbf{s}_{k|k}^{(i)}$ を $\mathbf{s}_{k|k-1}^{(i)}$ から重み $w_k = p_k^{(i)} / \sum_{i=1}^N p_k^{(i)}$ に比例して抽出する。そして、予測パーティクルの計算に戻る。

最終的に、時刻 k での $\alpha_L, \beta_L, \alpha_R, \beta_R$ は以下の式で推定される。

$$\mathbf{x}_k = (\alpha_{Lk}, \beta_{Lk}, \alpha_{Rk}, \beta_{Rk}) \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{s}_{k|k}^{(n)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_k^n \mathbf{s}_{k|k-1}^{(n)} \quad (7)$$

5. シミュレーション

光軸は既知であるとして、正解の $\alpha_L, \beta_L, \alpha_R, \beta_R$ を変えて 4 回シミュレーションを行った。その際、ディスプレイ上の 25 点を順番に見る過程を模擬し、パーティクルの数は 8000 個に設定した。推定した $\alpha_L, \beta_L, \alpha_R, \beta_R$ と正解の $\alpha_L, \beta_L, \alpha_R, \beta_R$ を以下の表に記す。水平方向のずれは精

度良く推定できた。垂直方向については、ずれが大きい場合は精度よく推定できた。

表 1 シミュレーション結果

回数	角度(°)							
	開発した手法				正解			
	α_L	β_L	α_R	β_R	α_L	β_L	α_R	β_R
1	-3.05	-0.572	2.94	-0.565	-3.00	1.00	3.00	1.00
2	-3.09	0.637	2.92	0.627	-3.00	-1.00	3.00	-1.00
3	-4.13	1.64	3.86	1.64	-4.00	2.00	4.00	2.00
4	-4.16	-1.3	3.85	-1.31	-4.00	-2.00	4.00	-2.00

6. 実装

図 3 に示すプロトタイプの実装を行った。

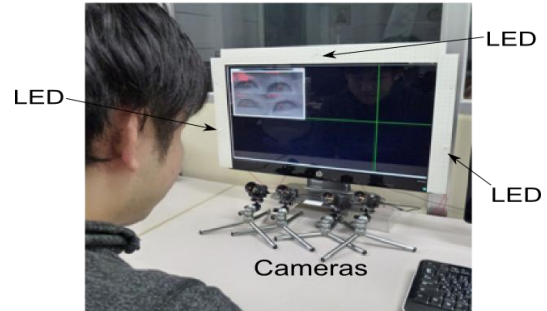


図 3 プロトタイプシステム

7. まとめ

意図的注視を伴わずにユーザキャリブレーションを行う視線計測手法を提案した。シミュレーションでは、垂直方向のずれが少ない場合以外は精度よく推定できた。プロトタイプシステムを実装したので、今後は被験者実験を行う。

謝辞

本研究の一部は科研費 (23300047) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Guestrin, E.D., and Eizenman, M. General theory of remote gaze estimation using the pupil center and corneal reflections. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 53, 6 (2006), 1124-1133.
- 2) Model, D., and Eizenman, M. An automatic personal calibration procedure for advanced gaze estimation systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 57, 5 (2010), 1031-1039.
- 3) Nagamatsu, T., Kamahara, J., and Tanaka, N. 3D Gaze tracking with easy calibration using stereo cameras for robot and human communication. In *Proc. 17th International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (IEEE RO-MAN)*, (2008), 59-64.
- 4) Nagamatsu, T., Kamahara, J., and Tanaka, N. Calibration-free gaze tracking using a binocular 3D eye model. *Ext. Abstracts CHI*, (2009), 3613-3618.
- 5) Shih, S.-W., and Liu, J. A novel approach to 3-D gaze tracking using stereo cameras. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 34, 1 (2004), 234-245.
- 6) Wong, A.M.F. Listing's law: clinical significance and implications for neural control. *Survey of Ophthalmology*, 49, 6 (2004), 563-575.