

視線方向の検出 ——強膜結像利用の効果——

斎藤 宣俊*, 高橋 淳*, 岩村 武英*, 大木 真*, 橋口 住久*

(平成3年8月31日受理)

Detection of Gazing Direction

——Effects of Enrolling the Image due to Scleral Reflection——

by Nobutoshi SAITO*, Atsushi TAKAHASHI*, Takehide IWAMURA*, Makoto OHKI*

and Sumihisa HASHIGUCHI*

Abstract

We proposed a method of detecting the gazing direction using the images due to the scleral reflection in addition to the first Purkinje image in order to improve the accuracy of detection. It was shown that the accuracy of detection was by improved four times compared with the conventional method using the first Purkinje image only.

1. はじめに

人間の視線方向を検出できれば、OAなどのインターフェイスとして利用できる。

現在あるアイカメラでは、第1プルキンエ像を使って視線検出を行っている¹⁾。正面を見たときの像の位置を基準としているが、視線方向が変化したときには、基準位置には像が存在しないので、基準位置を常に記憶させておくことが必要である。また、光源と顔の位置関係が変化すると基準位置が移動してしまうので、正しく視線検出が行えなくなる。

ここでは、より高精度の視線検出を行うために、第1プルキンエ像に加えて強膜による像も利用して、2つの像の距離から視線検出を行う方法を提案し、検出精度について検討する。

2. 視線検出

2.1 眼球モデルと結像

眼球は、図1(a)のように、 C_W を中心とする白目(強膜)と C_C を中心とする角膜からなり、回転中心 C_R のまわりを回転する。 C_W と C_C を結ぶ方向が注視している視線方向である。いま、眼球の正面と左右に、光源 $O_0(0, 0)$ 、 $O_L(-X_L, 0)$ 、 $O_R(X_R, 0)$ を図1(a)のように配置して、眼球表面の反射によって生じる各光源の虚像につ

いて考える。角膜の反射による O_0 の像 I_{O0} (第1プルキンエ像)の横座標は $x_{O0} = 0$ である。

一方、強膜の反射による O_L 、 O_R の像 I_{L0} 、 I_{R0} の x 座標は $x_{R0} = -x_{L0}$ であり、 I_{L0} と I_{R0} は I_{O0} を中心として左右対称である。

眼球が図1(b)のように右に θ だけ回転すると、 O_0 の像 $I_{O\theta}$ は、 O_0 と $C_{C\theta}$ を結ぶ直線上にでき、 $I_{O\theta}$ の横座標 $x_{O\theta}$ は、

$$x_{O\theta} = d_C \sin \theta \left(1 - \frac{r_C}{2D - r_C} \right) \quad (1)$$

である。ここで、 $d_C = \overline{C_C C_R}$ 、 r_C は角膜の曲率半径、 D は O_0 と $C_{C\theta}$ の距離

$$D = \sqrt{(d_C \sin \theta)^2 + (Y_{CR} - d_C \cos \theta)^2}$$

である。また、 O_L 、 O_R の像 $I_{L\theta}$ 、 $I_{R\theta}$ の横座標 $x_{L\theta}$ 、 $x_{R\theta}$ は

$$x_{L\theta} = -d_W \sin \theta - \frac{r_W(X_L - d_W \sin \theta)}{2D_L - r_W} \quad (2)$$

$$x_{R\theta} = -d_W \sin \theta - \frac{r_W(X_R + d_W \sin \theta)}{2D_R - r_W} \quad (3)$$

である。ここで、 r_W は強膜の曲率半径である。

$$D_L = \sqrt{(X_L - d_W \sin \theta)^2 + (Y_{CR} + d_W \cos \theta)^2}$$

$$D_R = \sqrt{(X_R + d_W \sin \theta)^2 + (Y_{CR} + d_W \cos \theta)^2}$$

は、それぞれ、 $C_{W\theta}$ から O_L 、 O_R までの距離である。

*電子情報工学科, Department of Electrical Engineering and Computer Science

2.2 視線方向 θ (水平方向)

図2は、正面を見たときと右に θ 方向を見たときの眼球上の虚像の位置である。正面を見ているときには、 I_{L0} と I_{R0} は I_{O0} に関して左右対称であるが、右を見ているときには、左右非対称になる。

眼球が θ だけ右を見ているときの像間距離 L_1 と L_2 の差は、式(1)~(3)より

$$\begin{aligned} L_1 - L_2 &= (x_{O\theta} - x_{L\theta}) - (x_{R\theta} - x_{O\theta}) \\ &= 2d_C \sin \theta \left(1 - \frac{r_C}{2D - r_C}\right) + 2d_W \sin \theta \\ &\quad + \frac{r_W(X_L - d_W \sin \theta)}{2D_L - r_W} - \frac{r_W(X_R + d_W \sin \theta)}{2D_R - r_W} \end{aligned}$$

$$\approx 2(d_C + d_W) \sin \theta \tag{4}$$

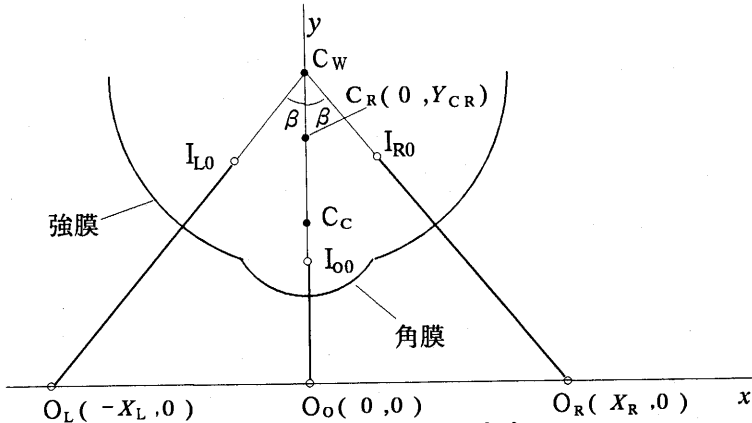
である。ある基準方向 α を見たときの像間距離 $L_{1\alpha}$ 、 $L_{2\alpha}$ の測定値から眼球パラメータ($d_C + d_W$)の値は、

$$d_C + d_W = \frac{L_{1\alpha} - L_{2\alpha}}{2 \sin \alpha} \tag{5}$$

と求められるので、これを用いて、視線方向 θ は、次のようになる。

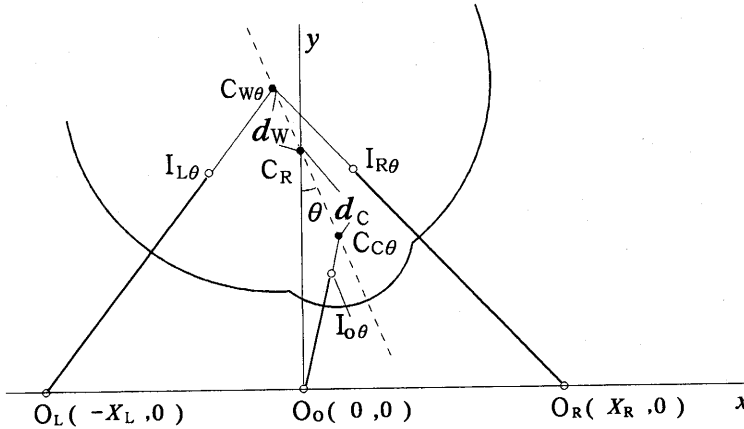
$$\theta = \arcsin \left(\frac{L_1 - L_2}{L_{1\alpha} - L_{2\alpha}} \sin \alpha \right) \tag{6}$$

したがって、像間距離 L_1 、 L_2 を測定すれば、視線方向 θ を知ることができる。



(a) 眼球が正面を向いているとき

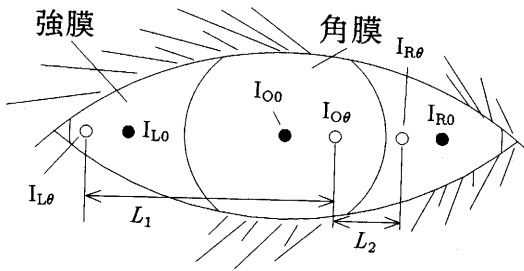
- C_R : 眼球の回転中心
- C_W : 強膜の曲率中心
- C_C : 角膜の曲率中心
- I_{O0} : O_0 の第1プルキンエ像
- I_{L0}, I_{R0} : O_L, O_R の強膜による像
- $d_W = \frac{C_W C_R}{C_C}$
- $d_C = \frac{C_C C_R}{C_C}$



(b) 眼球が θ だけ右を向いているとき

- $C_{W\theta}$: 強膜の曲率中心
- $C_{C\theta}$: 角膜の曲率中心
- $I_{O\theta}$: O_0 の第1プルキンエ像
- $I_{L\theta}, I_{R\theta}$: O_L, O_R の強膜による像

図1 眼球表面の反射による結像
Fig.1 Images by the reflection at the eye ball surface



- 視線が正面を向いているときの像
- 視線が右に θ の方向を向いているときの像

図2 眼球上の虚像

Fig.2 Images on the eye

3. 光源の設置位置

光源 O_L, O_R の位置によっては、強膜反射による像に加えて、角膜反射による像もできる場合があるが、ここでは、強膜反射による像のみを使用する。強膜反射による像を作るためには、強膜の曲率中心 C_W と光源 O_L, O_R とを結ぶ線分が角膜と交差ししないという条件を満足しなければならない。このとき、 $\angle O_L C_W O_O = \angle O_O C_W O_R = \beta_{\min}$ とすると、角膜のみかけの半径は 6mm、強膜の曲率半径は 12mm であるから $\beta_{\min} = 50$ 度である。視線が θ だけ右を向いたときにも強膜反射による像ができるためには $\beta_{\min} = (50 + \theta)$ 度でなければならない。したがって、最大左右 20 度までの視線の動きを捉えるには $\beta = 70$ 度とすることが必要である。

4. 検討

眼の左右の幅は約 24mm であるので、これを 2/3 インチ形 CCD (受光面 8.8mm × 6.6mm) 上に結像させるとすると、像倍率は約 1/3 である。CCD の水平方向の画素数は約 750 であるので、画素の間隔は 0.01mm である。したがって、眼球上 0.03mm の距離が分解できることになる。したがって、視線方向の分解能 θ_{\min} は

$$\theta_{\min} = \arcsin \frac{(L_1 - L_2)_{\min}}{2(d_C + d_W)} \quad (7)$$

である。眼球パラメータを $d_C = 6\text{mm}$ 、 $d_W = 6.5\text{mm}$ とすると⁴⁾、 $(L_1 - L_2)_{\min} = 0.03\text{mm}$ となる。方向分解能は $\theta_{\min} = 0.07$ 度となる。従来の第 1 プルキンエ像を用いる方法では、正面を見たときの第 1 プルキンエ像の位置から現在の第 1 プルキンエ像の位置までの距離 L は、

式 (1) を近似して、

$$L = d_C \sin \theta \quad (8)$$

であるので、第 1 プルキンエ像を用いる方法の視線方向の分解能 $\theta_{\min 1}$ は

$$\theta_{\min 1} = \arcsin \frac{L_{\min}}{d_C} \quad (9)$$

である。 $L_{\min} = 0.03\text{mm}$ として、方向分解能は $\theta_{\min 1} = 0.3$ 度となる。本方法の方向分解能は従来の第 1 プルキンエ像を用いる方法の約 4 倍である。第 1 プルキンエ像を用いた視線検出装置の分解能は 2 度¹⁾ と報告されているので、本方法の実際の方向分解能も 0.5 度程度になると予想される。たとえば、0.6m の距離から 29 型のディスプレイを見るとき、1 行当たり 80 文字の表示では、文字間隔は 0.6 度であるので、実用上 0.6 度の分解能がひとつの目標となる。本方法によれば、この値を実現することができる。なお、眼球が球面でないこと、近軸近似が成立しないことによる式 (4) の誤差は、基準方向を見たときの像間距離 $L_{1\alpha}, L_{2\alpha}$ の測定値から求めた眼球パラメータの値に取り込まれるので、分解能への影響は致命的ではない。なお、眼球が非球面であることの影響は、さらに検討を要する。

本方法は、強膜反射による像と第 1 プルキンエ像との相対的な位置関係から視線検出を行うので、光源と顔の位置関係が変化しても、視線方向を検出することができる。基準方向を見たときの像間距離から眼球パラメータ $d_C + d_W$ の値が求められるので、眼球の寸法の個人差の影響を排除することができるという特徴がある。

5. むすび

強膜反射による像と第 1 プルキンエ像の相対的な位置関係から視線検出ができることを示した。

この方法は、第 1 プルキンエ法に比べて水平方向で約 4 倍の精度が得られること、光源と顔の位置関係によらず視線方向の検出が可能であること、眼球寸法の個人差を排除できることなどの特長がある。

参考文献

- 1) 瀬谷正男, 波岡 武, 光と生体, 共立出版, pp.117-137, 1972.10.20
- 2) 石原 忍, 鹿野信一, 小眼科学, 改訂 18 版, p.215, 金原出版, 1979.1.30
- 3) 石原 忍, 鹿野信一, 小眼科学, 改訂 20 版, p.95, pp.130-131, 金原出版, 1985.4.10
- 4) 田中直彦, 所敬, 現代の眼科学, 第 2 版, pp.168-171, 金原出版, 1985.4.10