

高速楕円近似による汎用視線位置計測システム MEASUREMENT SYSTEM OF THE EYE POSITIONS BY USING OVAL FITTING .

松田圭司*、永見武司**、山根茂***
Keiji Matsuda, Takeshi Nagami*, Shigeru Yamane

*電子技術総合研究所 情報科学部 脳機能研究室

**電子技術総合研究所 知能情報部 自然言語研究室

***電子技術総合研究所 大阪ライフエレクトロニクス研究センター

*Neuroscience Section, **Natural Language Section, ***Life Electronics Research Center ,
Electrotechnical laboratory

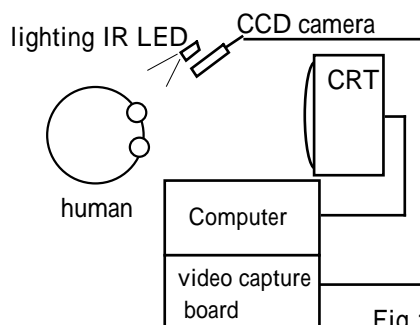
We have developed a new system that is able to measure the eye positions with a noninvasive method. This system consists of an infrared LED, a CCD camera, a video capture board and a personal computer. We apply infrared ray to an eye so that we can take a picture of a pupil black. The computer obtains the oval shape of the pupil in the camera coordinates. The system measures the absolute direction of the eye from the expression of the oval. The sampling frequency of this system is 30 Hz. And the accuracy is better than ± 0.7 degree.

1. はじめに

我々は、今までにサル慢性実験における視線検出システム開発を行ってきた^{[1][2]}。現在この技術を用い、人間を対象とするシステムを開発している。本システムは、人間の視覚に関する心理学的研究や医療検査、マンマシンインターフェースへの応用を目的としている。これらの目的のためには、ある程度の精度を維持した上で、特別な技術が必要としない操作性、コンパクトな装置環境、コストの低減などが要求される。従来より、赤外線照明とCCDカメラを備えたシステムが開発されている^{[1][2][3][4][5][6]}。我々が開発したシステムにおいても、赤外光で照明した目をカメラで撮影し、画像処理によって視線位置を検出する。瞳孔の一部がまぶたで隠れるような場合でも瞳孔を正確に楕円で近似できるアルゴリズムを新たに考案し、システムに組み入れた。これによりカメラに対する視線位置を直接求めることが可能となった。また、従来の方法とは異なり、カメラ位置は任意の場所に設置が可能である。加えて、測定に入る前の校正手続きを半自動化し、測定の準備を短時間かつ簡便に行なえるようにした。また、頭部の動きを許容する視線位置検出システムについても検討した。

2. システムの構成

システムは、赤外線LED、CCDカメラ、ビデオ入出力ボード、パーソナルコンピュータよりなる(Fig.1)。固定バーを啜めることにより、頭部を固定する。CCDカメラの側方から赤外線LEDで眼球を照射し瞳孔が黒く撮影できるようにしている。コンピュータのCRTは視標提示用である。



CCD camera	: SONY XC-75 (IR filter is removed) 45mm MACRO LENS
lighting LED	: TLN-201 880nm 50mA
video capture board	: Canopus SuperCVI 8bit 320x240
computer	: PC-9821AP

Fig.1 System outline.

3. 視線位置検出の方法

3-1. 瞳孔を楕円によって近似する

画像をある閾値で切ると、瞳孔は黒い楕円になる。しかし、照明用のLEDの映り込みや、瞳孔の上の部分がまぶたで隠れるなどのノイズがあるため、瞳孔の画像のエッジの部分は正確な楕円ではない。エッジの座標を検出し最小二乗法で楕円を近似するのだが、ノイズを含む座標を用いて計算すると正確に楕円近似をすることができない。そこで以下のような楕円の性質を用いノイズを除去する。

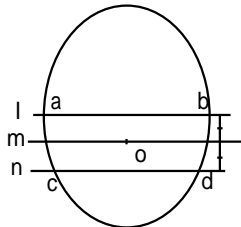


Fig.2 The principle of the noise reduction.

Fig.2で、直線l,m,nは各々平行で、l,nはmから等距離にある。楕円と直線lとの交点をa,bとし、楕円と直線nの交点をc,dとする。楕円と直線mの交点の midpoint をoとする。a,bの midpoint とc,dの midpoint を結ぶ線の midpoint をo' とすると、o'はoと重なるという性質がある。瞳孔の画像について瞳孔画像のほぼ中央に引いた直線mから等距離にあるN個の平行線の組のo'_i (i=1-N)に当たる点を求める。求められた点は、直線mの上に分布する。ノイズが十分少ないときは、最も多くの点o'が集まった位置がoの位置に相当する。その位置から離れている点は、楕円の軌跡上にない点を含んでいることになるので、それらを除外する。oに十分近いo'_iを持つ点a,b,c,dは、楕円の軌跡上の点なので、それらを用ることにより、正確な楕円近似を行うことができる。

3-2. 近似された楕円より視線方向を求める

視線の方向を眼球の回転中心を原点とし、CRTのx,y軸に平行なx,y軸をとり、眼球の回転中心とカメラを結ぶ線をz軸とする座標系をカメラ座標系と呼ぶことにする。以下の2つの方法により、撮影された画像からカメラ座標系における視線の方向ベクトルを求めることができる。

a. 楕円より直接視線方向ベクトルを求める

瞳孔を3次元空間に浮かぶ円盤と考える。カメラに映った楕円から円盤の法線ベクトルを計算することができる。法線ベクトルと、xy平面が作る角度を θ で表すと、 $\theta = \arcsin(\text{楕円の短径}/\text{楕円の長径})$ となる。また、楕円の短径の傾きをaとすると、法線ベクトルの単位ベクトルは、以下の式で表すことができる。

$$\left(\frac{1}{\sqrt{1+a^2+(a^2+1)\tan^2}}, \frac{a}{\sqrt{1+a^2+(a^2+1)\tan^2}}, \frac{\sqrt{a^2+1} \tan}{\sqrt{1+a^2+(a^2+1)\tan^2}} \right)$$

この法線ベクトルは、そのまま、視線の方向ベクトルを示している。これにより、画像より直接視線の方向を求めることができるのである。瞳孔がカメラに映っていれば、頭部の動きに左右されず、視線方向が検出できる。

b. 眼球の回転中心座標と回転半径、および楕円の中心座標から視線方向ベクトルを求める

頭部が固定されているとき、眼球の回転中心は動かないと考えられるので、下記の方法により、眼球の回転中心座標と眼球の回転半径が求めることができる。瞳孔が楕円で近似されたとき、眼球の回転中心座標(x₀,y₀)は、楕円の短径(a)の傾きを持ち、楕円の中心(x_i,y_i)を通る直線 (y=ax+b_i但しb_i=y_i-ax_i) 上にある。2枚以上の画像より最小二乗法によって眼球の回転中心座標を求めることができる。求められた回転中心座標および楕円の長径と短径の比より眼球の回転半径(r)を求めることができる。回転中心座標と回転半径が求められると、楕円の中心座標(x_i,y_i)から、視線方向を求めることができる。視線方向の単位ベクトルは、以下のように求めることができる。

$$\left(\frac{x_i-x_0}{r}, \frac{y_i-y_0}{r}, \frac{\sqrt{r^2-(x_i-x_0)^2-(y_i-y_0)^2}}{r} \right)$$

3-3. 別の座標系への座標変換

a、bの方法で求められたのは、カメラ座標系における視線方向のベクトルである。被験者が何を見ているかを知るために、対象物に対する視線ベクトルに変換する必要がある。対象物への座標変換行列を求めるために、被験者の前に置かれたディスプレイにFig3のような注視点を順に表示し、被験者にそれらを注視させる。ここでは、被験者の前に置いたディスプレイの中心と眼球の中心を結ぶ線がz軸、ディスプレイのx,y軸に平行なものがx,y軸にあたるものをディスプレイ座標系とする。

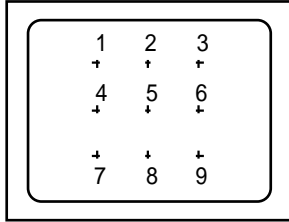


Fig.3 Stimulus on display.

被験者が注視点を見たときのカメラ座標のベクトル (x_i, y_i, z_i) と、ディスプレイ座標におけるベクトル (X_i, Y_i, Z_i) を用い、最小二乗法によって変換行列を求めることができる。ディスプレイ座標におけるベクトル (X_i, Y_i, Z_i) は、目とディスプレイ上の注視点の位置関係によって求めることができる。

$$\begin{bmatrix} a & d & g \\ b & e & h \\ c & f & i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n z_i x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n z_i x_i & \sum_{i=1}^n y_i z_i & \sum_{i=1}^n z_i^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i X_i & \sum_{i=1}^n x_i Y_i & \sum_{i=1}^n x_i Z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i X_i & \sum_{i=1}^n y_i Y_i & \sum_{i=1}^n y_i Z_i \\ \sum_{i=1}^n z_i X_i & \sum_{i=1}^n z_i Y_i & \sum_{i=1}^n z_i Z_i \end{bmatrix}$$

上式の左辺の転置行列が座標変換を行うための行列になる。 $n > 2$ ならば、変換行列を求めることができる。よって、最低3組のベクトルがあれば、提示物に関する座標系で視線方向を提示できる。

4. 実験

被験者（1名、裸眼）に、Fig.3で示される注視点を数字の順に注視する実験を5回行った。注視点の間隔は縦横10cm、ディスプレイまでの距離は34.5cmであった。これは、中心から上下左右に16.2度に相当する。カメラを、被験者の左前方に設置し、被験者の左目を撮影した。a、bそれぞれの方法によって、視線方向と変換行列を求めた。5試行目の2つの方法における視線位置計測の結果をFig.4に示す。目の動きは、原点をディスプレイの中心とする水平方向と垂直方向の角度である。a、bの方法の計算時間は十分短く、1秒間に30回の視線位置の計測が可能であった。

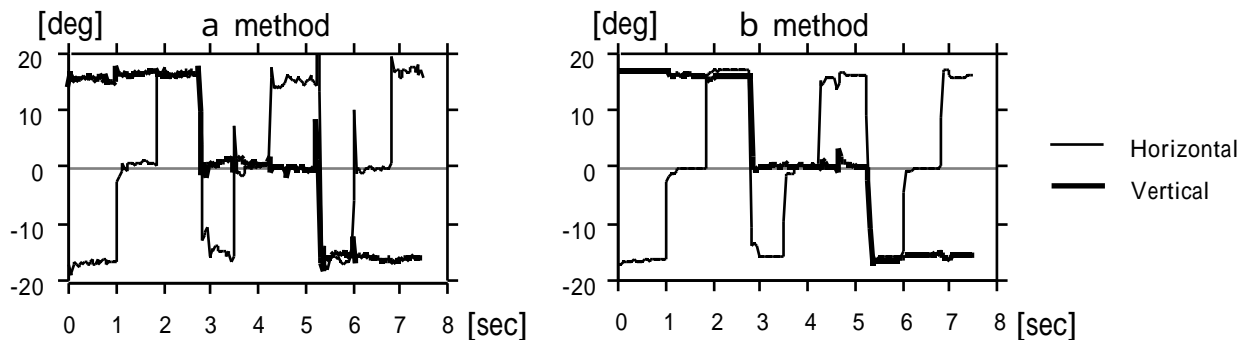


Fig.4 Movements of an eye measured by two methods.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
a Horizontal	0.84 ± 0.90	0.06 ± 0.65	-0.06 ± 0.66	-1.57 ± 0.56	-0.45 ± 0.45	0.69 ± 0.39	0.42 ± 0.55	0.28 ± 0.26	-0.12 ± 0.62
a Vertical	-0.90 ± 1.02	0.38 ± 0.24	0.06 ± 0.30	0.03 ± 0.99	0.32 ± 0.34	-0.14 ± 0.48	0.73 ± 0.82	-0.21 ± 0.70	-0.31 ± 0.40
b Horizontal	0.26 ± 0.23	-0.06 ± 0.27	-0.38 ± 0.43	0.12 ± 0.37	-0.05 ± 0.34	0.21 ± 0.26	-0.40 ± 0.17	0.15 ± 0.12	0.12 ± 0.34
b Vertical	0.38 ± 0.14	-0.02 ± 0.16	-0.35 ± 0.20	-0.16 ± 0.18	-0.30 ± 0.26	0.01 ± 0.16	-0.11 ± 0.21	0.06 ± 0.21	0.51 ± 0.17

[deg]

Table.1 Errors of each stimulus measured by two methods.

Table 1に、5回の試行によって得られた注視点毎の視線ベクトルと、理論上の視線ベクトルとの差の平均値とその標準偏差を、水平、垂直の角度の誤差（度）としてまとめた。カメラで撮影できる範囲内で頭部の動きを許容するaの方法においても±2度以下の精度が出ることが確認できた。しかしながらbの方法に比べるとまだ誤差が大きい。とくに、1、4、7の場所において顕著である。これは、瞳孔画像が真円に近くなると、aの方法においては、誤差が大きくなるためである。精度を向上させるためには、画像をより精密にデジタイズする必要がある。この方法で視線を計測する際は、カメラの位置、デジタイズするときの解像度について、さらに検討を加える必要がある。bの方法については、±0.7度以下の精度で視線位置を計測することできた。

5.まとめ

頭部が固定されている場合はbの方法を用いることにより、任意の位置にカメラを設置し、およそ30秒間の校正によって、視線の位置を十分な精度で検出できることが確認できた。本方法は無侵襲、安価、簡便という利点があり、視線位置検出の新しい方法として活用できると考えられる。

実験によって、カメラで撮影できる範囲内での頭部の動きを許容するシステムの可能性が示された。しかしながら、実用にはさらなる改良が必要であると考えられる。

参考文献

[1]松田圭司、山根茂：「慢性実験サルの視線位置を計測する簡便なシステム」、第8回生体・生理工学シンポジウム論文集、p5-p10、1993

[2]松田圭司、山根茂：「高速楕円近似による視線位置計測システム」、第9回生体・生理工学シンポジウム論文集、p127-p130、1994

[3]松島純一、熊谷雅彦、伊福部達、原田千洋：「固体撮像素子(CCD)イメージセンサを用いた眼球運動記録(CCD-EOG)について」、Equilibrium Res. Vol.47 (2);169-173 1988

[4]伴野明：「視線検出のための瞳孔撮影光学系の設計法」、電子情報通信学会論文誌 Vol.J74-D-II No.6 736-747 1991

[5]伴野明、岸野文郎：「顔と瞳孔の3次元位置計測に基づく注視点検出アルゴリズム」、電子情報通信学会論文誌 Vol.J75-D-II No.5 861-872 1992

[6]伴野明、岸野文郎、小林幸雄：「瞳孔抽出と頭部の動きを許容する視線検出装置の試作」、電子情報通信学会論文誌 Vol.J76-D-II No.3 636-646 1993