

汎用視線位置計測システム ALL-PURPOSE MEASUREMENT SYSTEM OF THE EYE POSITIONS.

松田圭司、永見武司
Keiji Matsuda, Takeshi Nagami
電子技術総合研究所
Electrotechnical laboratory

Abstract: We have developed a new system that is able to measure the eye positions noninvasively. 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 of a subject whose head movement is restricted, and take a picture of a pupil as a black oval by the CCD camera. The image of the pupil is transferred to the personal computer and the absolute direction of the eye in the camera coordinates is calculated from the expression of the oval. Furthermore, easy re-calibrate function is now added to the system. As a result, the system has acquired much improved convenience. We investigate relationship between image resolution and accuracy. And we discuss about head free measurement system of the eye positions.

1.はじめに

我々は、今までにサルの慢性実験における視線検出システムを開発した^[1-4]。現在この技術を応用し、人間を対象とするシステムを開発を行ってきた。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、特別な技術を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^[1-8]。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計測する方法を採用している。従来のシステムは、校正の後に頭部が動いた場合、正確な測定ができないという欠点があった。今回、心理実験をする際に、刺激提示前に凝視点を提示する機会が多いことに注目し、この時点において、簡易校正を行う機構を組み入れた。様々な画像入力装置に対応するため、画像の解像度と精度の関係を調べた。また、これらの結果から頭部の動きを許容する視線位置計測システム検証を行ったので報告する。

2. 視線検出の方法

システムは、赤外線LED（東芝TLN201）、CCDカメラ（SONY XC-75、45mm macro lens）、ビデオ入出力ボード（カノープス

SuperCVI、320x240pixels）、視線位置計測用パーソナルコンピュータ（PC-9821Xa10/C12）、視覚刺激提示用コンピュータ（PC-9821Ap）よりなる(Fig.1)。被験者は固定バーを啜めることにより頭部を固定する。サンプリング周波数はビデオレートと同じ30Hzである。

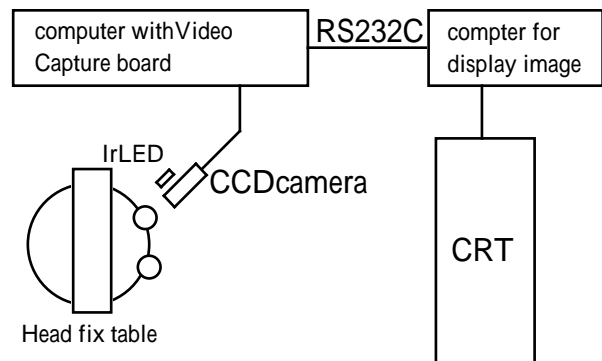


Fig.1 System outline.

CCDカメラの側方から赤外線LEDで眼球を照射し、瞳孔を黒く撮影できるようにする。撮影された瞳孔を楕円で近似し、瞳孔の中心座標 (x_i, y_i) を、Eq.1に代入し、CCDカメラに対する視線ベクトル (v_x, v_y, v_z) を求める。

$$(v_x, v_y, v_z) = \left(\frac{x_i - x_0}{r}, \frac{y_i - y_0}{r}, \frac{\sqrt{r^2 - (x_i - x_0)^2 - (y_i - y_0)^2}}{r} \right) \text{ Eq.1}$$

CCDカメラに対する視線ベクトル (v_x, v_y, v_z) をEq2に代入し、CRTに対する視線のベクトル (c_x, c_y, c_z) に変換する。このベクトルと目からCRTまでの距離LをEq3に代入し、CRT上

の視線位置(x,y)を求めることができる。

$$(c_x, c_y, c_z) = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad \text{Eq.2}$$

$$(x, y) = \left(\frac{c_x}{c_z} L, \frac{c_y}{c_z} L \right) \quad \text{Eq.3}$$

あらかじめ校正によって、求めておかねばならない値は、Eq.1における、コンピュータに入力される画像における眼球回転中心(x₀, y₀)、回転半径r、Eq.2における変換行列、Eq.3の距離Lである。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、楕円の短軸(a_i)の傾きを持ち、楕円の中心(x_i, y_i)を通る直線 (y=a_ix+b_i、但しb_i=y_i-a_ix_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(x₀, y₀)を求めることができる。回転中心座標(x₀, y₀)および楕円中心座標(x_i, y_i)、楕円の長軸lと短軸sの比からEq.4によって眼球の回転半径rを求めることができる。

$$r = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} \sqrt{l^2 - s^2}}{l} \quad \text{Eq.4}$$

距離Lは、実測によって求める。本実験においては、L=360mmである。座標変換のための行列は、次のような方法で求める。被験者の前に置かれたCRTにFig.2のような注視点を順に表示する。被験者にそれらを注視させることによって得るCCDカメラに対する視線ベクトルと、実測によって得られるその時のCRTに対する視線ベクトルを用い、最小二乗法により対象物座標系への変換行列を求める。

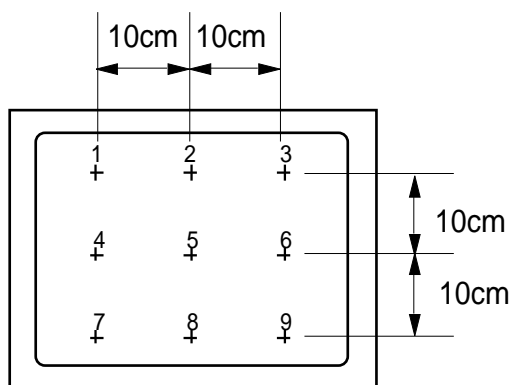


Fig.2 Target points on the CRT.

3. 簡易校正

準備段階での校正により、眼球回転中心座

標(x₀, y₀)、眼球回転半径r、座標変換行列、距離Lが決定する。しかし、視線計測開始後、頭部が微動してしまい、これらの値に狂いが生じてしまうことがある。CCDカメラの面に平行に1mmずれたことを考える。眼球回転半径に変化はない。1mm程度ならば、カメラ、眼球、CRTの位置関係はほとんど変わらないので、変換行列に変化はないと考えられる。距離Lも誤差の範囲である。最も影響を受けるのは、眼球回転中心座標である。1mmのずれはおよそ20pixelsに相当する。このずれを簡易な方法で補正することにより、準備段階と同じ校正をすることなく正確な測定を行うことができる。

3.1 簡易補正方法

心理実験中の凝視点注視において補正処理を行う。このときの瞳孔の中心座標と、準備段階の校正中に注視させたときの中心座標のずれを、補正值として用いる。

3.2 実験

1)被験者に、Fig.2における刺激を提示し、各種パラメータを測定する。次に、被験者の頭部を微小量動かし、再びFig.2における注視点を順次を提示し視線位置の計測を行う。また、その際の目の画像をビデオテープに録画する。CRT上の注視点を順次見るときの視線の軌跡をFig.3に示す。5番目の注視点が原点になるようにグラフを設定している。最初に校正した値によって測定しているため、実際の軌跡と大きく異なる結果になっている。

2)最初の校正を行った際、5番目の注視点を見ているときの瞳孔の中心座標(x_{before}, y_{before})と頭部を微小量動かし後に、5番目の注視点を見ているときの瞳孔の中心座標(x_{after}, y_{after})を測定する。Eq.5に代入し、新しい眼球中心座標を計算する。

$$(x_0, y_0) = (x_0 - (x_{\text{before}} - x_{\text{after}}), y_0 - (y_{\text{before}} - y_{\text{after}})) \quad \text{Eq.5}$$

新しい眼球中心座標に変更した後、先ほど取ったビデオテープを再生し、Fig.2における注視点を順次見ているときの目の動きを測定する。視線の軌跡をFig.4に示す。

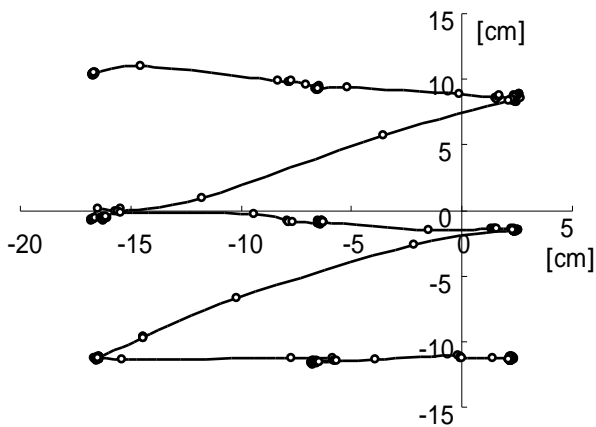


Fig.3 Eye movements (before correct).

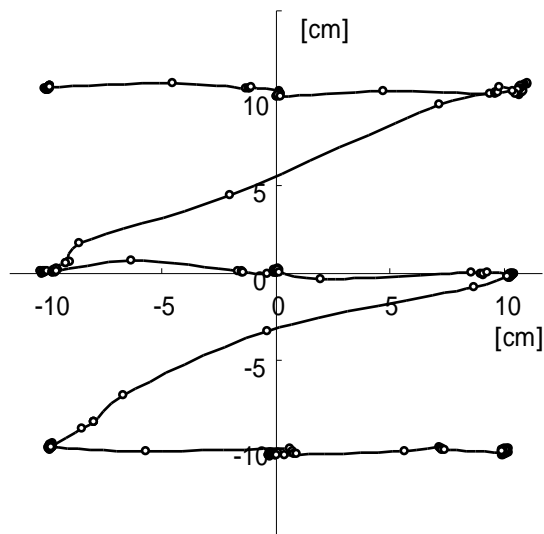


Fig.4 Eye movements (after correct).

4.入力画像の解像度

ビデオ入力画像をフィールド毎にディタイズした場合、垂直解像度は、240本程度になる。縦横比が1:1に近くなるように、これまで、320x240pixelsの解像度でディタイズし、画像解析を行ってきた。現在はパーソナルコンピュータに入力装置が附属している場合がある。これら、既存の装置を用いることにより、より手軽に安価に使用することができる。その際に問題になるのが、処理速度によって入力画像の大きさが限られてしまうことである。ここでは、入力画像の解像度と精度の関係を検証する。

4.1 実画像による精度の検証

被験者に、Fig.2における刺激を提示、その後、文章を提示しそれを読んでもらう。その際の目の画像をビデオテープに録画する。ビデオテープを再生し、96x72、128x96、160x120、192x144、224x168、

256x192、288x216、320x240pixelsの解像度の目の画像をコンピュータに入力し校正を行う。再度ビデオテープを再生し、各注視点における誤差を測定する。誤差は、角度で表す。9点における誤差の平均と標準偏差をFig.5に表す。この範囲ではほぼ同じ精度の測定が可能であった。また、解像度が、96x72pixelsと320x240pixelsにおける、文章を読んでいるときの視線位置の時間変化をFig.6に表す。(高解像度の時のみ測定できた点の一部に印を付けた。)

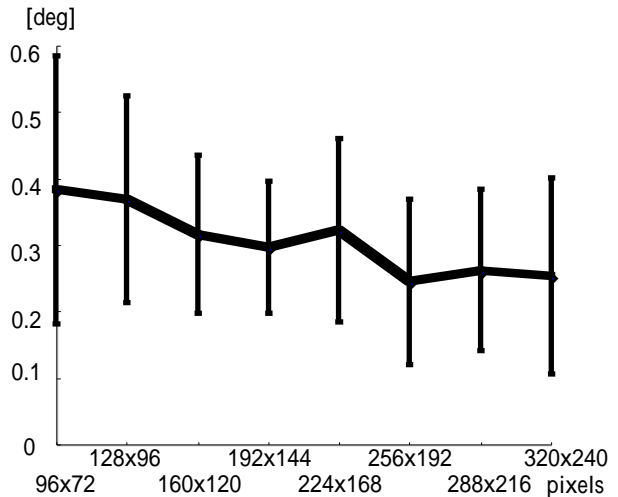


Fig.5 Relation between resolution and accuracy.

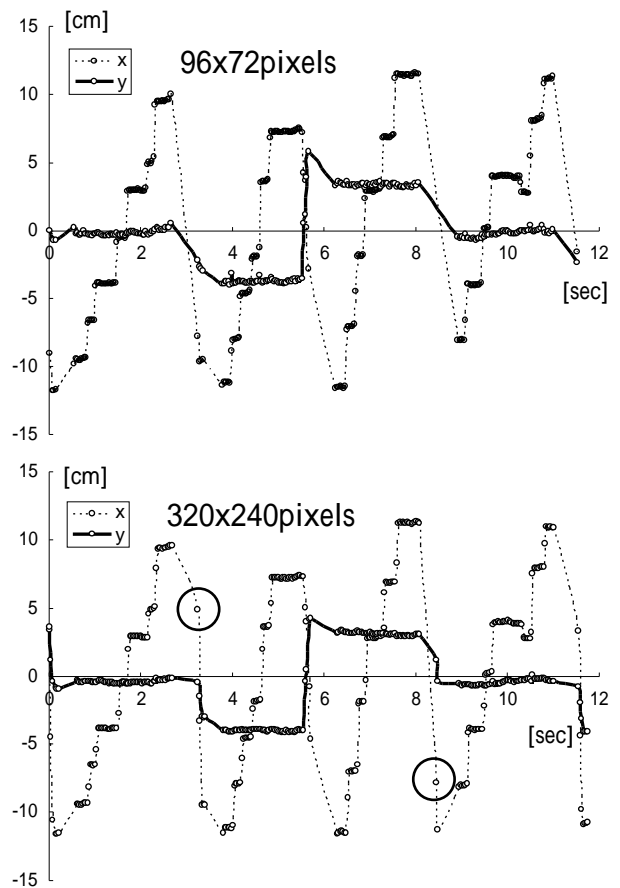


Fig.6 Eye movements for each resolution.

4.2 CGによる精度の検証

ビデオ入力ボードのハードウェアの制約により96x72pixels以下の画像を取り込むことができなかった。そこで、C.G.によって、Fig.2における注視点を提示したときの9枚の瞳孔画像を作成する(Fig.7)。カメラの位置は正面から45度の位置、瞳孔の大きさは6mm、眼球回転半径12mmとした。64x48、96x72、128x96、160x120、192x144、224x168、256x192、288x216、320x240pixelsの大きさの画像を作成した。これらを用いて校正を行った。それぞれの画像を再度入力し、各解像度における誤差を測定した。9点における誤差の平均と標準偏差をFig.8に示す。

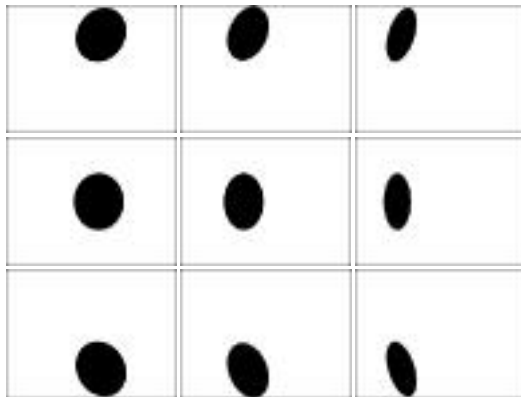


Fig.7 C.G. images of pupil.

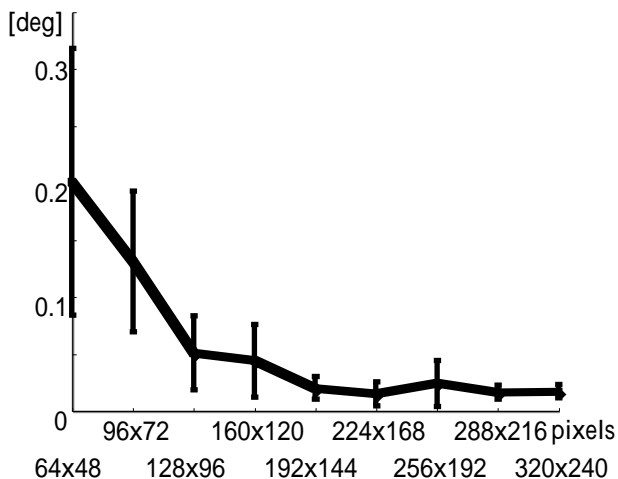


Fig.8 Relation between resolution and accuracy.

5.まとめ

頭部の動きが微量(<2mm)ならば、測定中の簡易校正が可能なが確認できた。心理実験などに使用する際、頭部の拘束が厳密でなくとも、試行毎に再校正が可能なの

で、より精度の高い測定が可能となる。今回は、再校正の手がかりに同一注視点を見ているときの、瞳孔の中心座標を用いた。十分広い範囲を撮影できる場合は、目の近傍に頭部の動きに連動するマークを設置し、そのマークを用いて校正することも可能である。デジタイズする解像度は、実画像による実験と、C.G.による検証から96x72 pixelsあれば、1度以下の精度で測定することがわかった。しかし、Fig.6の丸で囲んだ部分のように解像度の違いにより、計測値の異なる場合がある。これは、解像度が粗いため、ノイズの影響により十分な瞳孔のエッジの検出ができず、計測に失敗したためと考えられる。瞳孔が瞼で隠れてしまう場合などを考慮に入れると、160x120pixels以上の解像度が望ましいといえる。現在市販されている頭部の動きを許容する視線計測装置は非常に高価であるが、今回報告した2つの結果を組み合わせることにより、320x240 pixelsで入力できるビデオボードとそのビデオボードにアクセスできるデバイスドライバーが用意できれば、パーソナルコンピュータとCCDカメラのみで、頭部の微小の動きを許容する視線位置計測システムの構築できる可能性がある。

参考文献

- [1]松田圭司、山根茂：「慢性実験サル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]松田圭司、永見武司、山根茂：「高速楕円近似による汎用視線位置計測システム」、第10回生体・生理工学シンポジウム論文集、p401-404
- [4]松田圭司、永見武司：「閾値自動検出方式を用いた視線位置計測システム」、第11回生体・生理工学シンポジウム論文集、p161-164
- [5]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
- [6]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
- [7]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
- [8]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