

共通VideoAPI対応視線位置計測システムの開発 A NEW SYSTEM FOR MEASURING EYE POSITION ADOPTS COMMON VIDEO APPLICATION INTERFACE.

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

Abstract: We have developed a new system based on on-line image processing to measure eye position noninvasively. We use infrared LED to illuminate the eye of a subject, whose head movement is lightly restricted, and record images of the subject's pupil using a CCD camera with a sampling frequency of 60Hz. The accuracy of measurement is better than 1 degree. We use Red Hat Linux 6.1 as the operating system, Video for Linux as the device driver for the video capture board, and the X Window system for display. This system can be used for both monkeys and humans.

1. はじめに

我々は、今までにサル、人間を対象にした汎用視線位置計測システムを開発してきた^[1-8]。本システムは、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、実用に足る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^[1-12]。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。画像処理により、視線位置計測を行うため、無侵襲、簡便、安価、高精度という特徴がある。

昨年より、汎用性を向上するためマルチプラットフォーム化を行った。様々なビデオ入力装置に対応できるように、共通ビデオアプリケーションインターフェース（共通VideoAPI）を作成し、その上に視線位置計測プログラムを構築した。Video for Linuxを共通VideoAPIに対応させるプログラムを書き、多くのビデオ入力装置をサポートできるようになった。

従来の視線位置計測には、瞳孔画像のみを用いていた。そのため、校正および視線位置計測の際に被験者の頭部を拘束する必要があり、被験者の負担が大きかった。今回、角膜に反射する照明光を検出することにより、CCDカメラに照明の反射点及び瞳孔が写る範囲であれば、頭部が動いても視線位置を計測できる方法を新たに導入した。これにより、従来より被験者への負担の少ないシステムが構築できた。

2. システム構成

システムは以下のものから構成される。ハードウェアは、照明用赤外線LED、CCDカメラ（Sony XC-EI50）、撮影用レンズ（距離に応じて選択）、ビデオ入力ボード（Video for Linux適合品、Interware Picpom Linux、IO data GV-VCP2/PCI等）、画像処理用コン

ピュータ（IBM-PC互換機、PentiumIII-700MHz）、視覚刺激提示装置。ソフトウェアは、OSとしてRedhat Linux6.1Jを用いた。Video for Linuxは、カーネル2.2以上には標準で含まれているので、ビデオ入力ボードを差して起動することにより自動的に使用できるようになる。視線位置計測を行うソフトウェアは、グラフィックライブラリーとして、Xlib及びX-tool kitを用いた。

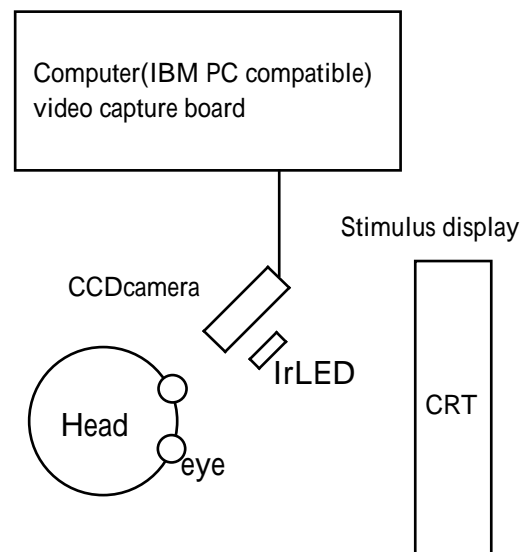


Fig.1 System outline.

3. 共通VideoAPI

視線位置計測のソフトウェアが、様々な環境で動作するように、ビデオ入力装置に依存する部分は、共通VideoAPIを介してアクセスするように設計した。ビデオ入力装置に依存するデバイスドライバーをこの共通VideoAPIに変更する部分を作成するだけで、様々なビデオ入力装置を使用することが可能となる。アルゴラフト製ビデオ入力装置用デバイスドライバー、Video for Linux、FreeBSD上におけるIBM Smart Capture Card II用デバイスドライバーを共通VideoAPIに変更するプロ

グラムを作成した。これにより、それぞれの環境で同一のアプリケーションが動作している。また、共通VideoAPIを用いた視線位置計測に必要なプログラムライブラリの構築を行った。これにより、視線位置計測を任意のプログラムに組み込むことが可能となった。また、デバイスドライバーの性能に応じた運用も可能である。Video for Linuxは、60Hzのサンプリングも可能なので、従来の倍の速度での計測することができる。

4. 視線位置計測中頭部の動きを許容するシステム

眼球が回転する際の不動点を眼球回転中心とする。眼球回転中心を原点とし、CCDカメラ面に降ろした垂線をz軸、CCDカメラ面のx、y軸に平行なx、y軸を持つ座標系をカメラ座標系とする。原点から瞳孔中心に向かう長さが1のベクトルをカメラ座標系における視線ベクトルとする。従来^{[1]-[8]}は、眼球回転中心が動かないことを前提に視線ベクトルを計算していた。そのため頭部を固定する必要があり、被験者に大きな負担を掛けていた。今回は、照明用赤外線LEDの角膜上における反射点を検出することにより、反射点と瞳孔がカメラに写る範囲での頭部の動きを許容するシステムを構築した。

4.1 反射点と角膜曲率中心の位置関係

角膜(cornea)を球の一部と仮定したとき、球の中心となる位置を角膜曲率中心(cornea curvature center)とする。反射点は、照明、角膜曲率中心、カメラを結ぶ角の2等分線と角膜の交わる地点に生じる (Fig.2)。

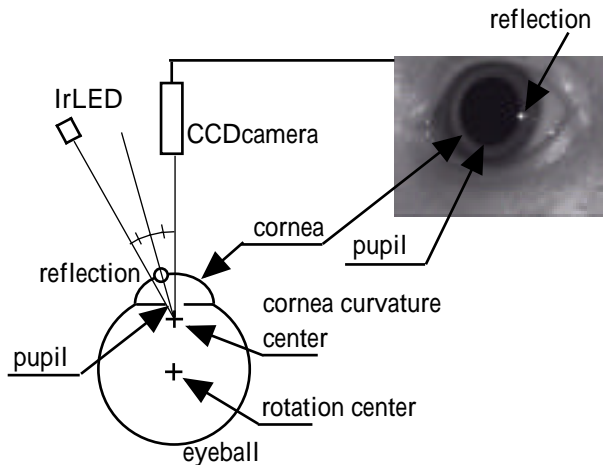


Fig.2 A reflection appeared point.

眼球の回転に伴う角膜曲率中心の移動量に比べ、CCDカメラ、照明が十分遠方にあると仮定すると、眼球が回転した場合、つまり視線が変化した場合において、照明、角膜曲率中心、カメラを結ぶ角度は同一と考えても良い。このため、撮影された画像上における角膜曲率中心(X_c, Y_c)と反射点(X_r, Y_r)の相対的位置、つまり、 $X_r - X_c$ 、 $Y_r - Y_c$ の値は、視線の向きによらず一定になる (Fig.3)。

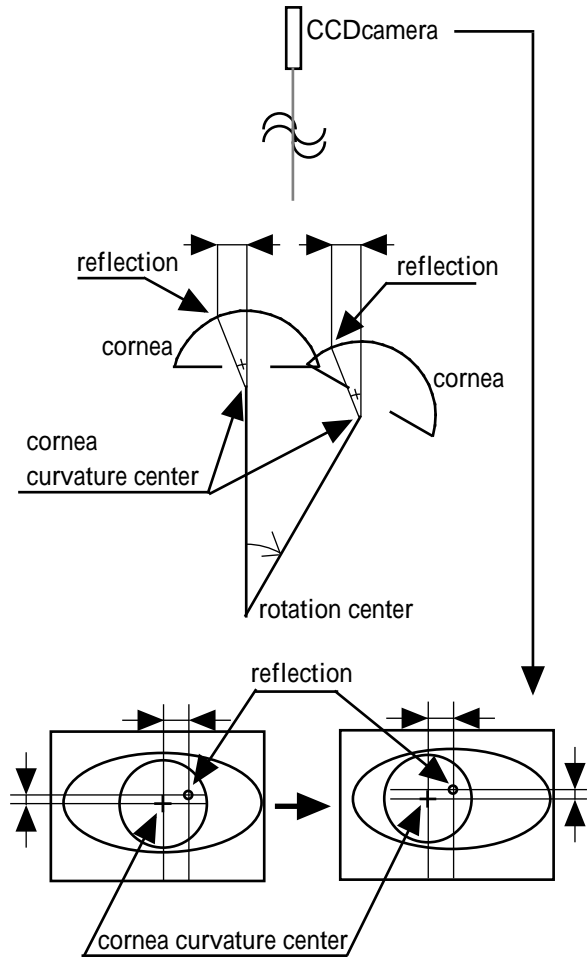


Fig.3 Relation between reflection and cornea curvature center.

瞳孔中心、角膜曲率中心、眼球回転中心は直線上に存在すると仮定すると、撮影された画像においてFig.4に示されるように、瞳孔中心(X_p, Y_p)と眼球回転中心(X_o, Y_o)を結んだ直線上に角膜曲率中心(X_c, Y_c)が存在することになる。

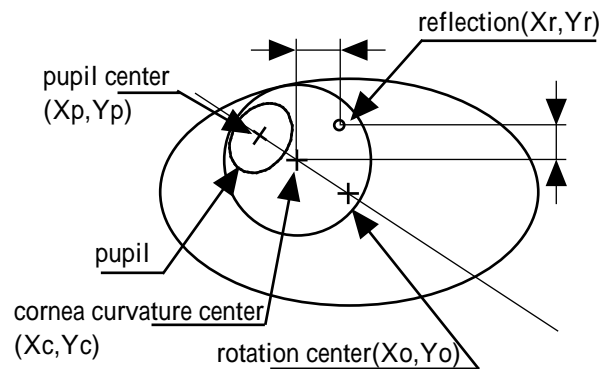


Fig.4 A cornea curvature center is located on pupil center-rotation center line.

瞳孔中心-眼球回転中心を結ぶ直線の式は、次の2つの方法で求めることができる。

1) 校正時に頭部が固定されている場合

従来^[8]の方法で眼球回転中心を複数の画像より求める。瞳孔の中心座標は、瞳孔を楕円で近似することに

より求める。この2点を結ぶ直線の式を求める。

2) 校正時に頭部が固定されていない場合

瞳孔を楕円で近似し、楕円の中心を通り楕円の短軸の傾きを持つ直線の式を求める。

1)、2)の方法により求めた*i*番目の画像における直線の式を、eq.1 に示す。

$$a_i x + b_i y + c_i = 0 \dots \text{eq.1}$$

*i*番目の画像における角膜曲率中心(X_{ci}, Y_{ci})と反射点(X_{ri}, Y_{ri})の位置関係は、今まで述べた理由によりeq.2で表すことができる。

$$\begin{cases} X_{ci} = X_{ri} - \\ Y_{ci} = Y_{ri} - \end{cases} \dots \text{eq.2}$$

eq.1の直線上に角膜曲率中心(X_{ci}, Y_{ci})が存在するので、eq.3における直線と角膜曲率中心の距離の自乗和Qが最小なるはずである。

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{\{a_i X_{ci} + b_i Y_{ci} + c_i\}^2}{a_i^2 + b_i^2} \dots \text{eq.3}$$

eq.2、eq.3より導いた連立方程式eq.4を解くことにより、 X_{ci} 、 Y_{ci} を求めることができる。

$$\begin{cases} Q = \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2 X_{ci}^2 + a_i b_i X_{ci} Y_{ci} + b_i^2 Y_{ci}^2 + 2a_i c_i X_{ci} + 2b_i c_i Y_{ci} + c_i^2}{a_i^2 + b_i^2} = 0 \\ Q = \sum_{i=1}^n \frac{a_i b_i X_{ci}^2 + b_i^2 X_{ci} Y_{ci} - a_i b_i X_{ri} - b_i^2 Y_{ri} - b_i c_i}{a_i^2 + b_i^2} = 0 \end{cases} \dots \text{eq.4}$$

求められた X_{ci} 、 Y_{ci} をeq.2に代入することにより、画像上の反射点から、角膜曲率中心を求めることができる。

4.2角膜曲率中心-眼球回転中心距離

校正時に頭部が固定されている場合は、カメラ座標空間における角膜曲率中心-眼球回転中心距離Rcを求めることができる。従来の方法^[9]より、瞳孔中心-眼球回転中心距離Rpを求める。Rc/Rpは一定であることを利用し、画像に投影されたRc、RpよりRc/Rpの平均値を求める。求められた値にRpを掛けることにより、角膜曲率中心-眼球回転中心距離Rcを求める(eq.5)。

$$R_c = \frac{R_p}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(X_{ci} - X_o)^2 + (Y_{ci} - Y_o)^2}}{\sqrt{(X_{pi} - X_o)^2 + (Y_{pi} - Y_o)^2}} \dots \text{eq.5}$$

4.3瞳孔中心-角膜曲率中心距離

校正時に頭部が固定されていない場合は、眼球回転中心が定まらないため、角膜曲率中心-眼球回転中心距離Rcを求めることができない。しかし、カメラ座標系における視線ベクトルを計算するのに必要な、瞳孔中心-角膜曲率中心距離R_{pc}(=Rp-Rc)を求めることはできる。z軸と視線ベクトルのなす角度を θ としたとき、と瞳孔を楕円で近似したときの短軸sと長軸lの関係は、eq.6 で表すことができる。

$$\theta = \arccos\left(\frac{s}{l}\right) \dots \text{eq.6}$$

また、瞳孔中心-角膜曲率中心距離をR_{pc}としたとき、と画像に投影されたR_{pc}とR_{pc}の関係は、eq.7で表すことができる。

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\sqrt{(X_p - X_c)^2 + (Y_p - Y_c)^2}}{R_{pc}}\right) \dots \text{eq.7}$$

複数の画像より、eq.6、eq.7を用いて、R_{pc}を求める(eq.8)。

$$R_{pc} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(X_{pi} - X_{ci})^2 + (Y_{pi} - Y_{ci})^2}{1 - \left(\frac{s_i}{l_i}\right)^2}} \dots \text{eq.8}$$

4.4カメラ座標系における視線ベクトル

ある画像において、瞳孔中心が(X_p, Y_p)、反射点が(X_r, Y_r)であったときの、カメラ座標系における視線ベクトルは、eq.9で表すことができる。

$$\left(\frac{X_p - X_r}{R_{pc}}, \frac{Y_p - Y_r}{R_{pc}}, \frac{\sqrt{R_{pc}^2 - (X_p - X_r)^2 - (Y_p - Y_r)^2}}{R_{pc}} \right) \dots \text{eq.9}$$

4.5頭部の動きの検出

校正の際に頭部を固定して計測を行い、角膜中心-眼球回転中心距離Rcと瞳孔中心-眼球回転中心距離Rpを求めることにより、瞳孔中心(X_p, Y_p)と反射点(X_r, Y_r)から眼球回転中心(X_o, Y_o)を求めることができる(eq.10)。眼球回転中心は、眼球の回転に関して不動点なので、この位置を検出することにより、カメラに対する頭部の動きを検出することができる。

$$\begin{cases} X_o = \frac{R_c X_p - R_p (X_r -)}{R_c - R_p} \\ Y_o = \frac{R_c Y_p - R_p (Y_r -)}{R_c - R_p} \end{cases} \dots \text{eq.10}$$

4.6まとめ

CCDカメラに反射点及び瞳孔が写る範囲であれば、頭部が動いても、カメラ座標系における視線ベクトルを計測できる方法を開発した。頭部を固定して校正を行うことにより、視線位置計測中の頭部の動きを計測することができる。カメラ座標系における視線ベクトルを求めるだけならば、被験者に対し能動的な動作(視標を提示して、凝視するように求める)を要求しない。動物や幼児などを対象とした心理実験に用いる際に有効である。対象物のどの位置を見ているかを計測するためには、従来と同じ方法^[9]を用いる。眼球回転中心を原点とし、対象物面に降ろした垂線をz軸、対象

物面のx、y軸に平行に平行なx、y軸を持つ座標系を対象物座標系とする。被験者に視標を提示し座標系変換行列を求める。カメラ座標系における視線ベクトル、変換行列、対象物までの距離から対象物のどの位置を見ているかを計測する。

5. 従来のシステムとの比較

従来^[8]の頭部を固定して瞳孔中心と眼球回転中心から視線ベクトルを計算する方法と今回開発した頭部の動きを許容する方法の計測結果を比較する。

5.1 実験方法

頭部を固定した被験者に、Fig.5 で示される視標を1から5まで順番に提示する（視標は1が対象物座標系におけるz軸上の点、2-5は、それぞれ、x、y方向に4度の位置にある）。CCDカメラで眼球の動きを撮影し、VTRに記録する。それぞれの方法において校正を行い、再度VTRを再生し、対象物座標系における視線の動きをそれぞれの方法で計測する。

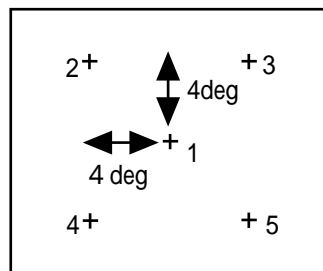


Fig.5 Stimulus for calibration.

5.2 実験結果

実験結果をFig.6に示す。

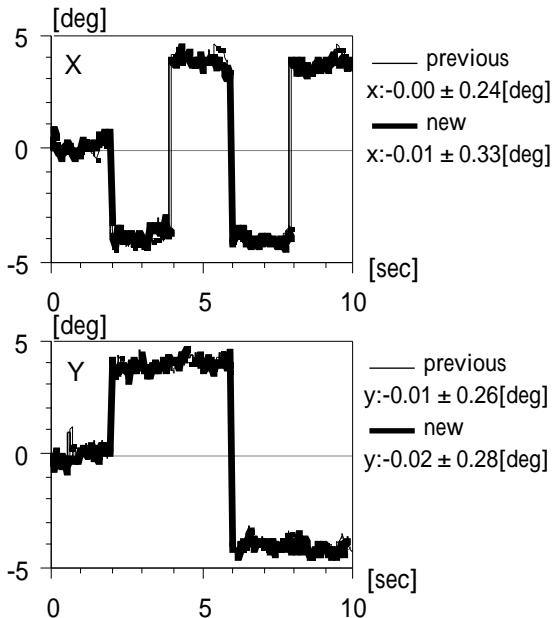


Fig.6 Eye movements measured by two methods

視線の動きをx、y方向の角度で表した。x、y方向における視標位置と計測値の差の平均値、標準偏差をFig.6に示した。ただし、計測値には視標を凝視している際の眼の動きにも含まれているため、標準偏差が直

接計測誤差を表しているわけではない。

この結果より、頭部の動きを許容するシステムにおいても従来と変わらない精度が得られているといえる。

6. まとめ

共通VideoAPIに対応したプログラムを作成することで、より柔軟なシステム構築が行えるようになった。本システムは、市販品のみで構成されており入手しやすくかつ従来よりも安価に構築できるようになった。Video for Linuxを用いることにより、従来の2倍の速度（60Hz）での計測が可能になった。1度以下の精度で、反射点と瞳孔がカメラに写る範囲での頭部の動きを許容する視線位置計測システムが構築できた。被験者に対する負担が大きく軽減され、応用の範囲が広がった。本ソフトウェアは、<http://www.etl.go.jp/matsuda/eye>より、入手が可能である。

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、(1995)
- [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、(1996)
- [5]松田圭司、永見武司：「汎用視線位置計測システム」、第12回生体・生理工学シンポジウム論文集、p173-p176、(1997)
- [6]松田圭司、永見武司：「異機種実装を考慮した視線位置計測システムの開発」、第13回生体・生理工学シンポジウム論文集、p253-p256、(1998)
- [7]松田圭司、永見武司：「遠隔操作に対応した視線位置計測システムの開発」、第14回生体・生理工学シンポジウム論文集、p57-p60、(1999)
- [8]松田圭司、永見武司、山根茂：「視線位置計測システムの開発」、信学技報Vol.100 No.47 TL2000-2、p9-p16、(2000)
- [9]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)
- [10]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)
- [11]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)
- [12]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)