

眼球形状モデルに基づく視線測定システム —視線入力デバイスの実現に向けて—

大野 健彦¹ 武川 直樹² 吉川 厚^{3†}

NTT コミュニケーション科学基礎研究所
〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1

¹takehiko@brl.ntt.co.jp, ²mukawa@eye.brl.ntt.co.jp,
³yosikawa@rd.nttdata.co.jp

本論文では、視線をユーザインタフェースの入力デバイスとして利用することを目的とする視線測定システムについて述べる。本システムは特別な設定を必要とせず、コンピュータの前に座ればすぐに視線測定が可能であるという特徴を持ち、従来存在するシステムに比べて手軽な視線測定を実現している。また、視線の屈折を補正して正確な視線方向を推定することにより、高い測定精度を実現している。予備評価実験から視野角 0.23 度から 0.46 度程度で測定可能であるという結果が得られた。

An Eye Tracking System Based on Eye Ball Model —Toward Realization of Gaze Controlled Input Device—

Takehiko Ohno¹ Naoki Mukawa² Atsushi Yoshikawa³

NTT Communication Science Laboratories
3-1 Morinosato Wakamiya, Atsugi, Kanagawa, 243-0198 JAPAN

¹takehiko@brl.ntt.co.jp, ²mukawa@eye.brl.ntt.co.jp
³yosikawa@rd.nttdata.co.jp

We describe a gaze tracking system that is developed as the input device for gaze based user interface system. This system measures the eye movement without configuring the parameters at the beginning of measurement, so that it is possible to use the system as soon as sitting in front of the computer. The system calculates their gaze direction by modifying the refraction on the surface of their pupil. This algorithm realizes the high-accurate gaze detection. The preliminary evaluation test indicated that its accuracy was between 0.23 degree and 0.46 degree in the view angle.

[†]現所属: NTT データ 開発本部 (NTT DATA Research and Development Headquarters)

1 はじめに

我々は外界から眼を通して多岐に渡る情報を取得している．そのため視線を検出して何を見ているかを知ることができれば，取得している情報の特定が可能となり様々な利用方法が考えれる．

利用方法の一つとして，視線を用いてコンピュータを操作する，視線インタフェースに関する研究が挙げられる．例えばコンピュータの画面上にメニューやボタン，アイコンなどを表示し，視線で選択・操作する様々な方法が提案されている ([2, 3, 4, 7, 8]．文書を読むユーザの支援法として，視線による自動画面スクロールシステムも試作されている [15]．筆者は視線位置に表示された情報の種類を記録，蓄積することで，過去に利用した情報を再利用する手法を提案している [9]．

これらのインタフェースはユーザの視線を視線測定装置で測定することが前提となる．初期の視線測定装置は人の眼球運動を測定することが主目的であったが，装置が進歩して使いやすさや精度が向上し，近年では視線インタフェースへの利用を目的とする視線測定装置も開発されている．視線測定においては，近赤外線 eyeball に照射し，角膜表面での反射光 (第 1 プルキニ工像，以下プルキニ工像と略) および瞳孔の位置を検出して視線方向を決定する角膜反射法が広く用いられている (眼球の構造については図 1 参照)．当初は頭部に測定器具を装着し，眼球近辺から近赤外線を照射する方法が用いられてきたが，近年は頭部に何も装着せず，机の上など離れた個所に装置を設置して視線を測定する，非接触式の視線測定装置も登場している．

これらの視線インタフェースをマウスやキーボードと同様に日常的に利用するためには，視線装置は以下に挙げる条件を満たす必要がある．

1. 簡易性．必要なおきにはすぐに視線を測定できる．測定前の調整などは不要である．
2. 頑強性．連続して視線を測定しても，安定して視線を測定することができる．
3. 非拘束性．ユーザは何も装着する必要はない．

ところが，既存の視線測定装置はこれらの条件を必ずしも満たしていない．非拘束性については何も装着せずに視線測定が可能なシステムが各種登場しているが，簡易性と頑強性の 2 点については様々な問題がある．

以下，視線測定を画像処理プロセス と視線算出プロセスの 2 種類の過程に大別し，視線測定装置を視線インタフェースに利用する上での問題点を整理する．なお，画像処理プロセスとは，カメラで撮影した画像

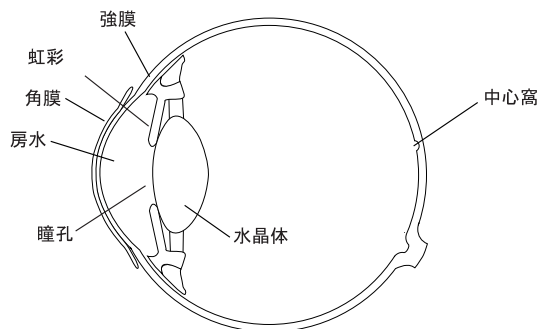


図 1: 眼球の構造

から瞳孔およびプルキニ工像の検出をおこない，視線算出プロセスとは，検出した瞳孔およびプルキニ工像から視線を算出するものとする．

まず簡易性における問題点は，現在の視線測定装置では測定前にさまざまな調整が必要であるということなどが挙げられる．画像処理プロセスにおいては，瞳孔等を検出するための閾値設定などが必要となる装置が多い．また視線検出プロセスにおいては，ユーザの個人特性や誤差を補正するために画面上の数点を注視する作業が必要である (個人キャリブレーション)．これらの操作は最低限であることが望ましい．

次に頑強性に関しては，さまざまな要因で視線測定精度が低下するという問題がある．まず画像処理プロセスにおいては，発汗などによる皮膚表面の反射率変化，照明条件の変化などが発生しても安定して瞳孔，プルキニ工像を検出できる必要がある．また，眼鏡，コンタクトレンズなどを装着した状態でも視線を測定できる必要がある．ところが測定条件が変化すると，検出精度が低下したり，検出に失敗して測定が不可能になる場合が多い．視線インタフェースでは実時間処理が必要であるため，高速かつ頑強な検出方法が必要である．

また視線算出プロセスにおいては，頭部が動いて眼球位置が変化することを前提とし，眼球位置が変化しても理論的に測定誤差が増大しない視線算出法が必要である．しかしながら個人キャリブレーションの方法によってはキャリブレーション時と比べて条件が変化する時に誤差が増大する原因となる．

我々は非拘束性を満たした上で，簡易性，頑強性を実現した視線測定システムを作成した．本システムは簡易性および頑強性において以下の特徴を持つ．

簡易性

画像処理プロセスでは瞳孔の形状特徴および瞳孔と虹彩間の輝度差を利用することで，視線測定前に特に

事前調整を必要とすることなく瞳孔およびブルキニエ像を安定して検出する。

また視線測定プロセスでは、個人別にパラメータを一度算出することで、二度目からは高い精度で視線測定が可能である。

頑強性

画像処理プロセスでは、閾値を定めた二値化処理をおこなっていないため、近赤外線の光量が変化した場合でも安定して瞳孔の検出が可能である。

また視線測定プロセスでは、眼球表面での光の屈折補正を考慮した視線算出方法を提案する(眼球形状モデルによる視線測定法)。本手法は眼球位置が変化した場合でも理論的に精度低下は発生しない。

以下ではまず2節で関連研究について述べ、次に3節で本視線測定システムで用いている視線測定アルゴリズムを示し、4節で実装した視線検出システムおよびその評価結果について述べ、最後に5節でまとめと今後の課題について述べる。

2 関連研究

角膜反射を利用した視線測定法に関する研究は古くからおこなわれてきた[5, 10]。近年では1節で述べた3種類の条件を満たすことを目指した様々な研究が行われている。以下ではこれまでに提案されてきた非接触の視線測定法を紹介する。

伴野らは眼鏡にマーカを装着し、ステレオカメラを利用してマーカ位置を検出し、さらにカメラを駆動してマーカを追尾することで、頭部を移動してもトラッキング可能な視線測定がおこなえることを原理的に示した[1]。筆者らは同様の方法でマーカ位置を検出し、さらに別の追尾用ミラー駆動機構を備えた瞳孔撮影用カメラを用いることで、自由に顔を動かしても視線を測定できるシステムを実現した[14]。しかしながらこれらは眼鏡にマーカを装着する必要があり、ユーザへの負担は少ないものの完全な非接触ではない。

Shihらは一組のカメラおよび光源から視線の含まれる平面を一意に定められることを利用し、複数カメラおよび複数光源から視線を算出する方法を提案している[11]。本手法は角膜表面における光の屈折も考慮しており、原理的に個人キャリブレーションをおこなうことなく高精度に視線測定が可能であることをコンピュータシミュレーションによって示している。しかしながら、複数の光源およびカメラが必要であるために装置が大規模になると予想される。また、実装した場合の精度については不明である。

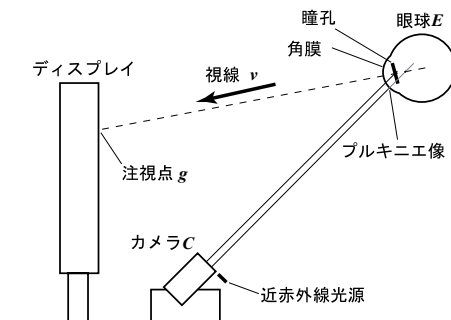


図2: 視線検出法のシステム構成

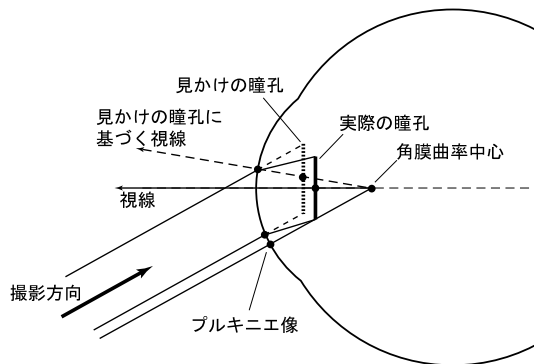


図3: 眼球モデルに基づく視線の算出

瞳孔は外部照明等で大きさが変動する。そこで竹上らは瞳孔の変わりに虹彩を利用する方法を提案している[12]。虹彩は大きさが変動せず、また瞳孔に比べて大きい精度向上が期待される。しかしながら虹彩は瞼等でかなり隠れる場合があり、またその色には大きな個人差があるため、頑強性について問題が発生する可能性がある。

松本らは2台の可視光カメラによるステレオ計測をおこない視線方向を検出するシステムを提案している[6]。本手法はく眼、口、眉毛の特徴点から顔の方向を検出し、さらに虹彩輪郭を利用することで、おおまかではあるが口バストに視線方向の検出をおこなっている。車を運転するドライバの視線測定に成功するなど、角膜反射法による視線測定とは異なった利用方法が考えられる。

3 アルゴリズム

本視線検出システムでは、カメラの光軸からやや外れた位置から近赤外線を照射し、瞳孔の検出をおこなっている。その結果、瞳孔は虹彩等に比べて暗い像として得られる(暗瞳孔法*)。

*視線方向と同一方向から近赤外線を照射すると、網膜での反射光によって瞳孔が虹彩より明るくなり、瞳孔の検出が容易となる

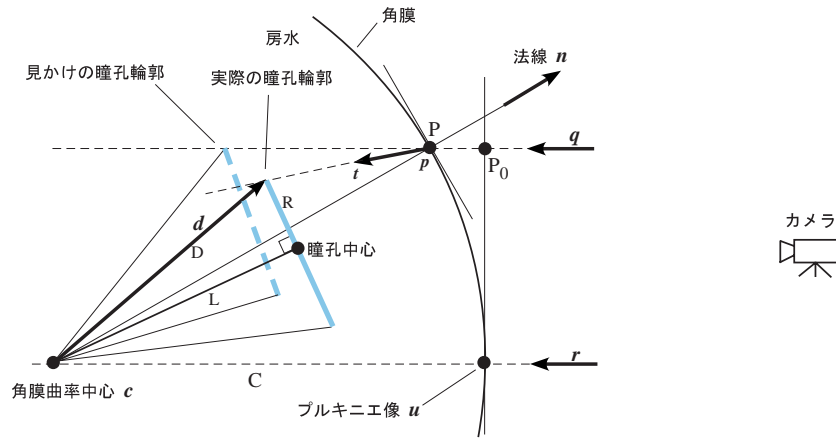


図 6: 角膜および瞳孔の模式図．角膜の輪郭位置は角膜表面で屈折するため，見かけの輪郭位置は実際の輪郭位置に対してずれている．

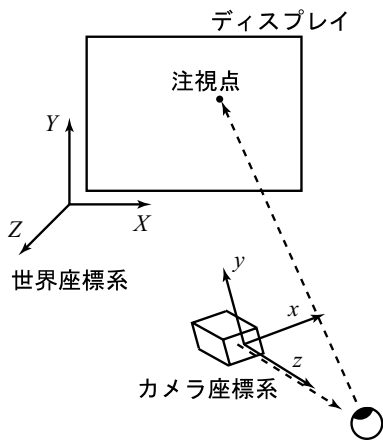


図 4: 世界座標系およびカメラ座標系

視線は角膜の曲率中心，および視線ベクトルから算出される．角膜の曲率中心はプルキニエ像の位置から，また視線ベクトルはプルキニエ像および瞳孔中心の位置から求められる．

この中で測定精度にもっとも大きく影響するのは視線ベクトルである．例えば画面からユーザまでの距離を 70cm と仮定すると，視線ベクトルが 1 度ずれた場合，画面上の距離で 1.22cm の誤差となる．これは本システムで利用しているモニタでは 43 ピクセルに相当する．

そこで視線ベクトルを高精度で求めるために以下の 3 点の処理をおこなう．

1. 瞳孔中心およびプルキニエ像のサブピクセル単

(明瞳孔法)．この場合カメラの光軸と近赤外線光源の位置をハーフミラー等で一致させるか，レンズ周囲に光源を分布させるなどの方法が必要となる．

位での算出．

2. プルキニエ像位置決定におけるカメラと近赤外線光源のずれ補正．
3. 角膜表面での屈折補正．

以下では具体的な視線測定の実アルゴリズムについて述べる．なお，カメラ座標系および世界座標系を図 4 に示す通り設定する．またカメラはあらかじめ Tsai のカメラキャリブレーションアルゴリズム [13] によってカメラの内部パラメータ (焦点距離，レンズ歪み，画像の光軸中心位置，CCD 画素の縦横比) および外部パラメータ (カメラの位置，回転角) を求めておく．その結果，キャプチャ座標系における位置ベクトル $p_0 = (x_0, y_0)^T$ ，世界座標系における位置ベクトル $p' = (x', y', z')^T$ およびカメラ座標系における位置ベクトル $p = (x, y, z)^T$ は，Tsai のカメラキャリブレーションによって得られる変換行列 R_w および R_c によって，

$$R_w (x_0, y_0, z')^T = (x', y', z')^T \quad (1)$$

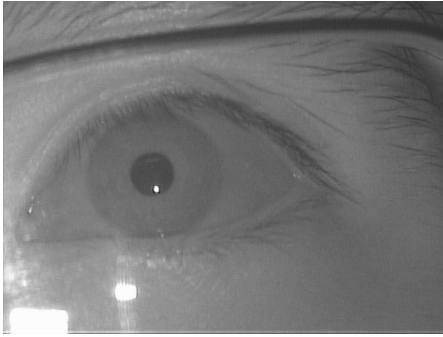
$$R_c (x', y', z')^T = (x, y, z)^T \quad (2)$$

と変換することが可能である (その逆も可)．ただし $(x, y, z)^T$ は (x, y, z) の転置である．

3.1 瞳孔およびプルキニエ像の検出

まず，カメラ画像で撮影した画像をコンピュータでキャプチャし，以下の手順でキャプチャ画像における瞳孔およびプルキニエ像の検出をおこなう (図 5)．

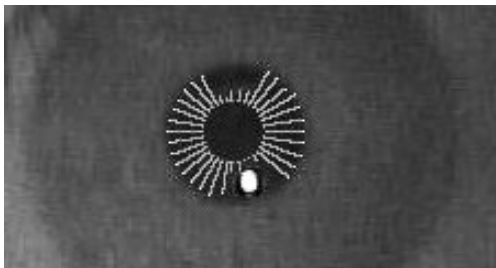
1. 画像の平滑化．ユーザによっては睫毛や瞼が瞳孔に重なったり，眼鏡を装着している場合はレンズ表面で反射する場合があります (図 5 (a))，瞳孔検出に失敗する原因となる．そこで 4 ピクセル



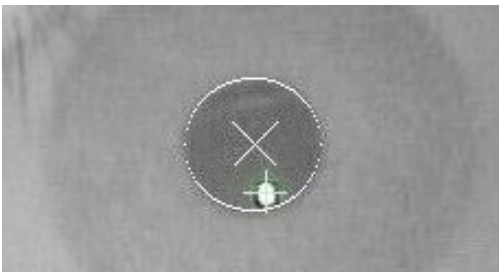
(a). 撮影した眼球像. 瞳孔内部にある輝点がプルキニエ像. 眼鏡のガラス表面において反射光が発生している.



(b). セグメント化した結果.



(c). エッジの検出結果. 放射状に探索した範囲が示されている. 瞳孔上部は眼鏡のノイズ, 下部はプルキニエ像の影響で探索が中断している.



(d). 検出された瞳孔およびプルキニエ像.

図 5: 瞳孔およびプルキニエ像の検出過程.

四方単位で平滑化をおこない, 睫毛やノイズの影響を抑える.

2. セグメント化. 隣接する 2 点の輝度差が一定値以下の領域を連結してセグメント化をおこなう (図 5 (b)).
3. 瞳孔領域の決定. セグメント化された領域の中から輪郭形状で判定して瞳孔領域を決定する. このとき, 形状が一定条件を満たした上で輝度の低い領域から選択するとともに, 髪の毛の特定のパターン, 眼鏡の金具等の誤検出を防ぐため, 周辺部分の輝度 (虹彩領域) も判定条件に用いる.
4. 楕円近似. 平滑化前の画像に対して, 円の中心から輪郭方向に放射状に輪郭探索をおこない, 輪郭を決定する (図 5 (c)). 次に得られた輪郭集合に誤差二乗最小による楕円近似をおこなう (図 5 (d)). 検出した楕円を E と置く.
5. プルキニエ像の検出. 瞳孔中心から一定範囲内を対象として, プルキニエ像の検出をおこなう. プルキニエ像の中心座標は, 得られた領域の重心とする.

瞳孔およびプルキニエ像の検出精度は最終的な視線検出精度および分解能に大きく影響する. そこで瞳孔については楕円近似, プルキニエ像については検出された領域の重心を用いることで, サブピクセル単位での位置検出をおこなっている.

3.2 眼球形状モデルを用いた瞳孔中心の算出

次に眼球形状モデルを用いて世界座標系における瞳孔中心を算出する. 図 6 に, 角膜および瞳孔の模式図を示す.

個人パラメータとして

- 角膜の曲率半径 C
- 角膜の曲率中心から瞳孔中心までの距離 L

を与える.

3.1 節でキャプチャ画像における瞳孔の近似楕円 E が得られているので, 近似楕円から複数の点 p_1, \dots, p_n をサンプリングし, その各点について屈折補正をおこなう. 得られた屈折補正後の瞳孔輪郭点について再び楕円近似をおこない, その楕円中心を実際の瞳孔中心とする. 以下に詳細を示す.

角膜曲率中心の算出

まずカメラ座標系における角膜の曲率中心を, 以下の手順で求める (以降は特に断らない限りカメラ座標系を用いる).

キャプチャ画像におけるプルキニエ像の位置ベクト

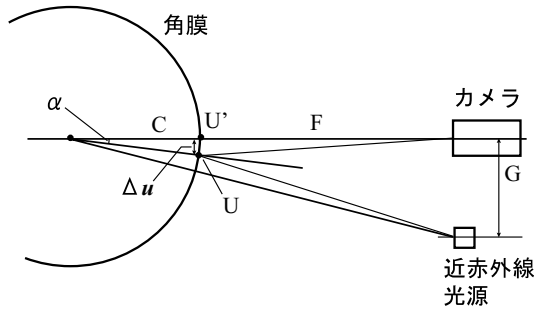


図 7: プルキニエ像の位置補正

ル $u_0 = (u_{0x}, u_{0y})^T$ からカメラ座標系におけるプルキニエ像の位置ベクトル $u = (u_x, u_y, u_z)^T$ を求める。世界座標系におけるプルキニエ像の位置ベクトル $u' = (u'_x, u'_y, u'_z)^T$ と置く。この時、式 (1) より u_0 から u' を求めるには世界座標系におけるプルキニエ像の Z 座標 u'_z が必要となる。そこでプルキニエ像の Z 座標をカメラのフォーカス値から求める (depth from focus 法)。プルキニエ像は球面に写る点光源であるため、点光源の大きさが最小になる位置にフォーカスを合わせた時のフォーカス値から u'_z が得られる。

$$R_c R_w (u_{0x}, u_{0y}, u'_z)^T = (u_x, u_y, u_z)^T \quad (3)$$

カメラの光軸と光源が一致している場合はこれで正確なプルキニエ像の位置が得られるが、本システムでは暗瞳孔法を利用しているためカメラの光軸と光源がずれており、プルキニエ像の実際の位置もずれている。そこで、以下の方法でカメラ光軸と光源が一致している場合のプルキニエ像の位置を算出する (図 7)。

カメラからプルキニエ像までの距離を F 、カメラと光源の距離を G 、観察されたプルキニエ像の位置 U に対して、カメラ光軸と光源が一致した場合のプルキニエ像の位置を U' とすると、 $F \gg G$ であるから補正量 Δu は

$$\Delta u \approx C \sin \alpha \approx \frac{C \cdot F}{2G} \quad (4)$$

である。以降、プルキニエ像の位置 u は補正後のものとする。

プルキニエ像は角膜表面における反射光である。そこで u および角膜の曲率半径 C から角膜曲率中心の位置ベクトル c を以下の手順で求める。

$$c = u + C \cdot u / \|u\| \quad (5)$$

ただし $\|u\|$ は u のノルムである。

角膜表面における瞳孔輪郭像の算出

次にキャプチャ画像における瞳孔輪郭のサンプリング点から角膜表面における瞳孔輪郭像を求める。まず

プルキニエ像を含み角膜に接する平面上に射影された瞳孔輪郭像 p_0 を求める (キャプチャ画像におけるサンプリング点の座標および世界座標系におけるプルキニエ像の座標から得られる)。

得られた p_0 に加えてプルキニエ像 u から p_0 までの距離 (キャプチャ画像において得られる)、および角膜の曲率半径 C を用いることで角膜表面上における見かけの瞳孔輪郭位置 P が得られる。またその位置ベクトルを p と定める。

角膜表面における屈折の補正

カメラからの光線は P において屈折する。そこで P における屈折後のベクトルが得られれば、屈折補正が可能となる。

屈折後の光線の単位ベクトルを t 、点 P において角膜表面に接する平面の法線ベクトルの単位ベクトルを n と置く。また、カメラから p_0 までの方向ベクトルの単位ベクトルを q とする。

この時、 t は

$$t = \frac{n_1}{n_2} \left\{ q - \left((q, n) + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - 1 + (q, n)^2} \right) n \right\} \quad (6)$$

と示される。ただし、 n_1 は空気の屈折率、 n_2 は房水の屈折率である。また、 (q, n) は q と n の内積をあらわす。

実際の瞳孔輪郭は t の延長上にあるため、角膜曲率中心から瞳孔輪郭までの距離 D を与えれば、実際の瞳孔輪郭が得られる。ただし D を外界からの観測で算出することは難しいため、角膜曲率中心 c から瞳孔までの距離 L および瞳孔の半径 R から以下の通り求める。

$$D = \sqrt{L^2 + R^2} \quad (7)$$

角膜曲率中心から実際の瞳孔輪郭へのベクトルを d と置くと、

$$p + mt + d = 0 \quad (8)$$

の関係がある (ただし m は定数)。ここで

$$\|d\| = D \quad (9)$$

であるから、 m は以下の通り算出可能である。

$$m = -(p, t) + \sqrt{(p, t)^2 - (\|p\|^2 - \|d\|^2)} \quad (10)$$

ここで得られた m を式 (8) を変型した式

$$d = -p - m t \quad (11)$$

に代入することで、 d が得られる。以上の手順で、屈折補正後の瞳孔輪郭位置を推定できる。



図 8: 試作した視線測定装置．上部に近赤外線カメラ，その下に近赤外線 LED がある．

瞳孔中心の算出

サンプリングした瞳孔輪郭の各点において以上の手続きをおこない，得られた瞳孔輪郭座標の集合に対して再び楕円近似をおこなうと，その中心がカメラ座標系における屈折補正後の瞳孔中心 e となる．

3.3 視線の算出

以上の手順でカメラ座標系における角膜曲率中心 c および瞳孔中心 e が得られた．そこでこの 2 点を世界座標系に変換して c' および e' とすると，世界座標系における視線ベクトル v' が得られる．

$$v' = e' - c' \quad (12)$$

最後に e' を基準とする視線ベクトル v' をディスプレイ平面 S に射影することで，ディスプレイ面上の注視点が得られる．

4 実装

3 節で示したアルゴリズムに基づき，視線測定装置の実装をおこなった．実装したシステムのサンプリングレートは 30Hz であり，1 フレーム以内の遅延でリアルタイムに

- 画面上の注視点
- 視線ベクトル
- プルキニエ像位置
- 瞳孔面積
- プルキニエ像面積

が得られる．

図 8 に実装した視線測定装置の外観を示す．視線測定装置はカメラユニットおよびそれをコントロールす

るソフトウェアから構成されている．ソフトウェアは Pentium III 1GHz を 2 個搭載した PC 上で動作しており，OS として Windows 2000 を用いている．プログラムは C++ で記述されており，2001 年 4 月時点で 2.5 万行程度である．

カメラユニットには近赤外線カメラおよびその下部に近赤外線 LED が内蔵されている．撮影した像はフレームグラバ Matrox Meteor II で 640×480 ドット，256 階調のグレイイメージで毎秒 30 フレームキャプチャされる．カメラユニットと PC は RS-232C インタフェースで接続されており，フォーカスの制御，フォーカス値の取得，LED の光量制御などをおこなっている．

カメラの撮影範囲は，カメラから 60cm 程度離れた状態で 4cm 四方程度である．カメラは固定されているので，視線測定時には眼がカメラの撮影範囲内に位置する必要がある．

ディスプレイには 18 インチ液晶ディスプレイ NANA O FlexScan L675 を用いている．なお，ディスプレイと視線測定装置の相対位置関係，画面のサイズ，画素数を与えることで，任意のフラットディスプレイを利用可能である．

4.1 予備評価実験

実装したシステムについて，2 名のユーザに対して予備評価実験をおこなった．

標準個人パラメータとして

- 角膜の曲率半径 $C = 7.7mm$
- 角膜曲率中心から瞳孔中心までの距離 $L = 4.5mm$

を与え，また，空気の屈折率 n_1 を 1.000，房水の屈折率 n_2 を 1.336 とした．これらのパラメータは [16] を参考にして決定した．

ユーザ A は眼鏡装着者，ユーザ B は眼鏡非装着者である．それぞれのユーザに対して，以下の作業をおこなった．

1. 画面上の 9 箇所に表示された点を 1 秒間注視する．
2. 標準個人パラメータによる視線検出をおこなう．
3. 測定結果を元に個人別に X 方向および Y 方向のずれ補正をおこなう．

表 1: 2 名の被験者における視線測定結果の誤差平均 (ピクセル)

被験者	補正なし (X,Y)	ずれ補正後 (X,Y)
A	96.7 34.5	11.4 18.1
B	73.9 266.9	14.0 23.7

標準個人パラメータを利用した結果、特に被験者 B において大きな誤差が発生している。これは視線ベクトルの方向が眼鏡の屈折によって変化したものと思われる。ずれ補正をおこなうと、両者とも誤差平均は小さくなった。

また、1 秒間注視した時の平均注視位置に対してずれ補正をおこなうと、誤差はさらに小さくなり、被験者 A は X 方向 8.4 ドット、Y 方向 15.5 ドット、被験者 B は X 方向 10.2 ドット、Y 方向 15.6 ドットとなった。これは視野角にして 0.23 度から 0.46 度であり、非常に高い精度で視線を測定可能であるという結果が得られた。

4.2 議論

試作したシステムは、ユーザが顔を視線測定装置の撮影範囲内に近づけるだけで視線測定が可能であり、測定に先立つ設定は不要である。そのため、今まで一般に利用されていた視線測定装置に比べて手軽な視線測定が可能となった。

現在は個人パラメータをユーザ別に変えることはおこなっていない。個人パラメータとしては、角膜曲率半径 C および角膜曲率中心から瞳孔中心までの距離 L の 2 種類を用いているが、特に L が初期値として与えている値からずれると誤差の原因となる。この補正方法については検討中である。

5 まとめと今後の課題

本論文では視線をユーザインタフェースの入力デバイスとして利用することを目的とした視線測定システムについて述べた。今後はより大規模な評価実験をおこない、個人別の補正をおこなわない、あるいは最低限の補正にとどめてどの程度視線の測定が可能であるかを検証する。

非接触かつ個人キャリブレーションを必要としない視線測定が可能となれば、用途はコンピュータの入力デバイスだけでなく、様々な分野が期待される。今後はシステムの完成度を向上させ、入力デバイスとしての信頼性を向上させると共に、他の場面における利用方法についても検討を進めていく。

謝辞

日頃本研究をサポートして頂く NTT コミュニケーション科学基礎研究所の石井健一郎所長、同研究所メディア研究部の萩田紀博部長および所員の皆様に感謝すると共に、これまでご指導いただいたマルチモーダル対話研究グループの相川清明グループリーダー、メディア認識グループの村瀬洋グループリーダーに感謝します。

参考文献

- [1] 伴野明, 岸野文郎: 顔と瞳孔の 3 次元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, pp. 861-872 (1992).
- [2] Hansen, J. P., Anderson, A. W. and Roed, P.: Eye-Gaze Control of Multimedia Systems, *Symbiosis of Human and Artifact* (Anzai, Y., Ogawa, K. and Mori, H.(eds.)), Vol. 20A, Elsevier Science, pp. 37-42 (1995).
- [3] Jacob, R. J. K., Leggett, J. J., Myers, B. A. and R.Pausch: Interaction Styles and Input/output Devices, *Behaviour and Information Technology*, Vol. 12, pp. 69-79 (1993).
- [4] Jacob, R. J. K.: What You Look At Is What You Get: Eye Movement-Based Interaction Techniques, *Proceedings of CHI'90*, ACM Press, pp. 11-18 (1990).
- [5] 古賀一男: 眼球運動実験 ミニ・ハンドブック, 労働科学研究所出版部 (1998).
- [6] 松本吉央, Zelinsky, A., 小笠原司: ステレオビジョンを用いた顔・視線計測システムの開発, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2000), pp. II-217-II-222 (2000).
- [7] 大野健彦: 視線インタフェースにおける選択過程と取得過程の識別, インタラクティブシステムとソフトウェア V (尾内理紀夫 (編)), 近代科学社, pp. 65-70 (1997).
- [8] 大野健彦: 視線を用いた高速なメニュー選択作業, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 2, pp. 602-612 (1999).
- [9] 大野健彦: IMPACT: 視線情報の再利用に基づくブラウジング支援法, インタラクティブシステムとソフトウェア WISS 2000 (暦本純一 (編)), 近代科学社, pp. 137-146 (2000).
- [10] 苧阪良二, 中溝幸夫, 古賀一男 (編): 眼球運動の実験心理学, 名古屋大学出版会 (1993).
- [11] Shih, S.-W., Wu, Y.-T. and Liu, J.: A Calibration-Free Gaze Tracking Technique, *Proceedings of the International Conference on Pattern Recognition (ICPR'00)* (2000).
- [12] 竹上健, 後藤敏行: 角膜反射像と虹彩輪郭情報を併用した視線検出法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J82-D-I, No. 10, pp. 1295-1303 (1999).
- [13] Tsai, R. Y.: A versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 4, pp. 323-344 (1987).
- [14] 吉川厚, 大野健彦: 視線を読む -ユーザにやさしい視線測定環境-, *NTT R & D*, Vol. 48, No. 4, pp. 399-408 (1999).
- [15] 大和正武, 門田暁人, 高田義広, 松本健一, 鳥居宏次: Masatake Yamato, 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 2, pp. 613-622 (1999).
- [16] 魚里博: Hiroshi Uosato, *O plus E*, pp. 418-430 (2000).