

# 人間の視覚特性を考慮した視線検出の安定化

新井 健太郎<sup>†</sup> 杉本 晃宏<sup>††</sup> 井宮 淳<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 千葉大学 自然科学研究科

<sup>††</sup> 国立情報学研究所

<sup>†††</sup> 千葉大学総合メディア基盤センター

<sup>†</sup> araike@graduate.chiba-u.jp <sup>††</sup> sugimoto@nii.ac.jp <sup>†††</sup> imiya@media.imit.chiba-u.ac.jp

**概要** 人と協調して作業するシステムを実現するためには、システム自身が自律的に人の意図・注意・興味を推定することが必要である。人間の意図・注意・興味を計算機に推定させるための入力として、視線を用いることが考えられる。その際、視線を安定して検出することが重要な問題となる。これまで視線検出に誤差が含まれる要因として、人間の視覚特性が考慮されてきていなかった。そこで本研究では、視線を安定して検出するために、人間の視覚特性を考慮した視線検出安定化手法を提案する。

**キーワード** : 視線検出, 固視微動, 視覚特性, 視線測定装置, ヒューマン・マシン・インタラクション.

## Stabilizing Detection of Viewing Lines with Visual Perception Properties

Kentaro ARAI<sup>†</sup> Akihiro SUGIMOTO<sup>††</sup> Atsushi IMIYA<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>School of Science and Technology, Chiba University

<sup>††</sup>National Institute of Informatics

<sup>†††</sup>IMIT, Chiba University

<sup>†</sup> araike@graduate.chiba-u.jp <sup>††</sup> sugimoto@nii.ac.jp <sup>†††</sup> imiya@media.imit.chiba-u.ac.jp

**Abstract** To realize versatile real-time man-machine interactions based on understanding human intention and activities, we develop a method for stably detecting viewing lines of a person. Existing methods to detect viewing lines of a person do not pay attention to human visual perception properties while our method employ human visual perception properties to enhance stableness in detection of viewing lines. Our experimental results show that our method significantly improves the accuracy in detection of viewing lines.

*keywords* : detection of a viewing lines, small involuntary eye movement, visual perception properties, eye mark recorder, human-machine-interaction.

## 1 はじめに

### 1.1 研究の背景

計算機をはじめ、道具とは人間の機能を拡張するためのものとして捉えることができる。元来、道具とは、人間からの明示的な命令により人間の活動を支援するものであった。しかし、近年のコンピュータの機能のめざましい発展に伴い、人間と計算機との関係の新たなあり方が注目をあびつつある。すなわち、人間からの命令を明示的ではなくより自然な形で受け取り、人と協調作業するシステムの需要が高まってきている [4]。

人と協調作業をする機械の構築のためには、人間の意図・注意・興味などをシステム自身が自律的に推定する機能が求められる。人間は、環境の中で視線を動かすことで意図・興味・注意の対象を認識している。したがって、人間の意図・興味・注意を機械に認識させるための入力として、視線情報を用いることが考えられる。視線情報には、次のような特徴がある [13]。

- ある時刻において視線を測定する際に、過去の視線履歴情報を必要としない。
- 視線情報は人が意識しなくても取得することがで

きる情報であり、長時間用いていても人にかかる負担は少ない。

- 視線情報は、その人の意図・注意・興味を、顔の向きや体の向きなど身体の他の部位から得られる情報に比べて、より強く反映している。

人間の意図・注意・興味をシステムに判断させるための入力として視線を用いる場合、そのインターフェースは現在主流である GUI(Graphical User Interface)ではなく PUI(Perceptual User Interface)[12] であることが求められる。PUI とは、人間の身振り、声、視線等を機械の入力とするもので、これにより、現在のインターフェースと比べ、より自然な形で機械との協調作業が可能となる。PUI を搭載するシステムの例として、その人の見ている方向の進路情報を提供するようなシステムや、見ているものを理解し、情報を提供するようなシステムなどが考えられる。

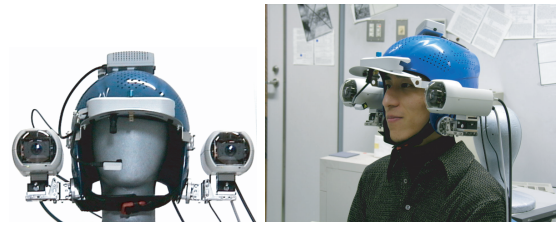
視線を解析することで人間の意図・興味・注意などを推定する従来の研究には、HMM(Hidden Markov Model)を用いて視線から人間の意図を自動的に推定する手法を提案した研究 [8] や、人間の「迷い」の状況において典型的に現れる視線パターンを解析した研究 [10] などがある。また、視線情報とステレオ視を用いて注視対象や注視領域を抽出する手法 [9] が提案されている。

## 1.2 研究の目的

視線情報の取得には、一般に視線測定装置が用いられる。視線測定装置によって得られるのは眼球の回転角度であり、眼球の回転角度だけでは視線の先の対象を特定することができず、有益な情報とはならない。そこで、周りの環境と眼球の回転角度とを対応付けることにより、視線の先の対象を特定する必要がある。

本研究では、装着型視線検出システム (図 1)[9] を用い、視線測定装置により取得される眼球の回転角度から、カメラにより得られる画像上の座標を推定することで視線を検出する。装着型視線検出システムでは、カメラと視線測定装置とがヘルメットに固定されているため、身体の移動や頭部の動きによってカメラと視線測定装置との相対的位置関係は変化しない。

本稿では、視線測定装置により得られる眼球の回転角度を眼球角度と呼ぶ。また眼球角度とカメラにより得られる画像上の座標との対応関係を用いて、眼球角度から視線の先の空間の点の像の画像上での座標を算出することを視線検出と呼ぶ。



(a) 外観図

(b) 装着図

図 1: 装着型視線検出システム

装着型視線検出システムによって視線を検出するには、被測定者別の眼球角度とカメラにより取得される視線の先の空間の点の画像上での座標との対応関係を求めることが必要である。本稿ではこの対応関係を求めることをキャリブレーションと呼ぶ。キャリブレーションにより眼球角度から視線の先の空間の点の画像上での座標を算出することが可能となる。

キャリブレーションの際、推定された眼球角度と視線の先の空間の点の画像上での座標の対応関係には誤差が含まれる。この誤差を対応関係推定誤差と呼ぶこととする。また、視線検出の際、眼球角度は正確に測定できないため、視線の先の空間の点の像の推定座標には誤差が含まれる。この誤差を座標推定誤差と呼ぶこととする。座標推定誤差は、瞬間的な視線検出にのみ影響を及ぼすのに対し、対応関係推定誤差は、全ての視線検出結果に影響を及ぼす。したがって、視線検出の精度向上のためには対応関係推定誤差を考慮することが重要である。

対応関係推定誤差の要因には、画像座標に起因する誤差と眼球角度に起因する誤差とがある。画像座標に誤差が含まれる原因として、従来のモデルではカメラを理想的なピンホールカメラと仮定している点が挙げられる。この誤差は、カメラの内部校正を行うことで軽減する手法 [9] が提案されている。一方、眼球角度に誤差が含まれる原因として、眼球を球と仮定している点、注視時に眼球が静止していると仮定している点が挙げられる。眼球を球と仮定していると、実際の眼球との差異から誤差が生じる。この誤差を解決するためには、被測定者ごとに眼球のモデルを作成する必要があり、眼球角度のみを用いてこの誤差を軽減することは困難である。これに対し、注視時に眼球が静止していると仮定している問題では、注視状態における人間の視覚特性を考慮することで、誤差を軽減することができると期待される。具体的には、注視状態における人間の視覚特性である固視微動 (small involuntary eye movement) を考慮することで、実際の眼球角度から、よりモデルに近い眼球角度を推定することが可能となる。本研究では、キャリブ

レーションの際に人間の視覚特性である固視微動を考慮することで、より安定した視線検出を行う手法を提案する。

## 2 装着型視線検出システム

### 2.1 システム構成

本研究で用いる装着型視線検出システム [9] について説明する。

本研究では、視線測定装置により得られる眼球角度と1台のカメラにより得られる画像上の座標との対応を考え、視線検出精度の向上を目指す。カメラは被測定者の右側についているカメラを用い、以降、カメラとはこのカメラを指す。

視線測定装置として、Nac 製 EMR-8 Eyemark Recorder を用い、カメラは Sony 製 EVI-G20 を用いた。各機器の基本的仕様は表 1 の通りである。

表 1: 各機器の基本的仕様

視線測定装置 (EMR-8 Eyemark Recorder)	
検出手法	瞳孔/角膜反射法
仕様センサ	1/4 インチ B/W イメージセンサ
検出レート	60Hz
検出分解能	眼球運動 0.1°, 瞳孔径 0.02mm
被測定者特性	検出精度をあげるためには裸眼
連続測定時間	原理上は無制限
カメラ (EVI-G20)	
CCD	1/4 インチ
レンズ	f=4.5 ~ 13.5mm, F2.3 ~ 4.1
有効画素数	38 万画素

### 2.2 システム記述に必要な座標系

視線測定装置により得られる眼球角度とカメラにより得られる画像上の座標との対応関係を求めるためには、各機器から出力されるデータの対応を記述する必要がある。そこで、視線測定装置により得られる眼球角度、カメラにより得られる画像の座標系をそれぞれ次のように定義する。

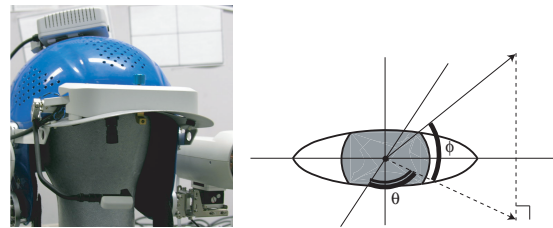
#### 2.2.1 眼球角度極座標系

本研究で採用した視線測定装置は瞳孔/角膜反射法を用いて眼球の回転角度を検出している。すなわち、前頭部から近赤外線を下方の鏡に反射させ眼球に照射し、

その反射光を前頭部のアイカメラにより取得することで眼球の回転角度を求めている。

この視線測定装置の出力は極座標系で表される。すなわち、眼球を球と仮定し、その中心を座標の原点とし、眼球の左右方向の回転角度を  $\theta$ 、上下方向の回転角度を  $\phi$  で表している。

この視線測定装置で得られる眼球角度の極座標系を眼球角度極座標系と呼ぶこととし、 $(\theta - \phi)$  と表す。各方向を図 2(b) に示す。



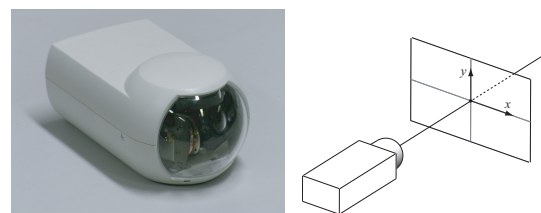
(a) 外観図

(b) 眼球角度極座標系

図 2: 視線測定装置

#### 2.2.2 画像座標系

カメラにより得られる画像上の座標系を画像座標系と呼ぶこととし、図 3(b) のようにカメラで撮影した画像の横軸、縦軸で定義し、光軸と画像面が交わる点を座標系の原点とする。ここでは、カメラの光軸は画像面に垂直であるとしている。また、視点固定型カメラを用いた手法 [15] によって、カメラの内部パラメータは校正されているとする。



(a) 外観図

(b) 画像座標系

図 3: カメラ

### 2.3 キャリブレーション

本稿におけるキャリブレーションとは、眼球角度極座標系を画像座標系へと変換するための関係式のパラメータを求めることである。眼球角度極座標系と画像座標系との幾何学的な関係は図 4 のようになる。

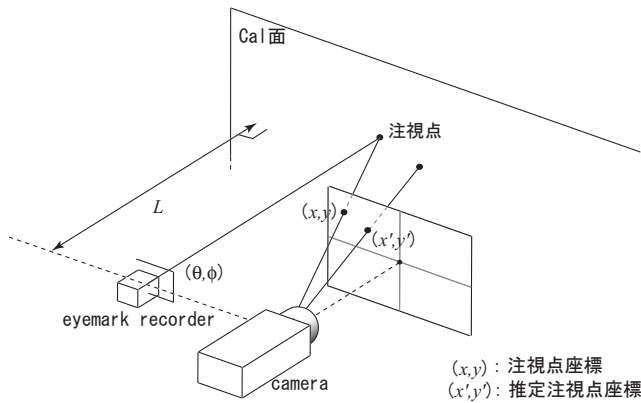


図 4: 眼球角度極座標系と画像座標系との関係

キャリブレーションを行う平面を Cal 面と呼ぶこととし、この面はカメラの光軸に垂直で、かつカメラのレンズ中心からあまり離れていない(1-2m)とする。また、視線の先にある注視している点を注視点、注視点を投影した画像上での座標  $(x, y)$  を注視点座標、キャリブレーションすることで眼球角度から推定される注視点の画像上での座標  $(x', y')$  を推定注視点座標とそれぞれ呼ぶこととする。

Cal 面上に存在する点でキャリブレーションを行うとき、眼球角度  $(\theta, \phi)$  と画像座標  $(x, y)$  は、

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1\theta^2 + a_2\theta\phi + a_3\phi^2 + a_4\theta + a_5\phi \\ y = b_0 + b_1\theta^2 + b_2\theta\phi + b_3\phi^2 + b_4\theta + b_5\phi \end{cases} \quad (1)$$

という共 2 次方程式で表すことができる [9]。

$v := (\theta, \phi, 1)^T$  とおくと式 (1) は

$$\begin{cases} x = v^T Q_x v \\ y = v^T Q_y v \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_x := \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_3 & a_5 \\ 0 & 0 & a_0 \end{pmatrix}, \quad Q_y := \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & b_4 \\ 0 & b_3 & b_5 \\ 0 & 0 & b_0 \end{pmatrix}$$

と表される。以降  $Q_x, Q_y$  を変換行列と呼ぶ。本稿におけるキャリブレーションとは、この変換行列  $Q_x, Q_y$  を求めることに相当する。

変換行列の未知パラメータは 12 個である。このパラメータ  $a_n, b_n (n = 0, \dots, 5)$  をそれぞれ決定するために  $(\theta, \phi)(x, y)$  の組が最低 6 組必要になる。本稿では、この組を 9 点測定して与え、線形最小二乗法により変換行列を決定している。

## 3 人間の視覚特性

### 3.1 眼球運動

視線の方向は、眼球運動、また頭部の動きによって変化する。この節では、眼球運動について整理する。

主な眼球運動は、次の 5 種類となる [3][12]。

#### 1. 固視微動

一点を注視するときに発生する微細振動の眼球運動。固視微動は網膜上の視細胞を活性化する役割を果たしている。

#### 2. 衝動性眼球運動

ものを見ようとして、注視点を変えるときに発生する眼球運動。サッケードとも呼ばれる。衝動性眼球運動中には、ほとんど外界を知覚することができないという現象(サッケード抑制)が知られている。

#### 3. 滑動性眼球運動

ゆっくり移動する対象を視線が追尾するときにおきる眼球運動。対象の移動速度が 45deg/s 程度までしか追尾できず、それ以上速い場合には衝動性眼球運動が起きる。また、追尾対象がない場合には、意識的に滑動性眼球運動を行うことはできない。

#### 4. 代償性眼球運動

網膜像を安定させるために、逆方向へ発生する反射的な眼球運動。代償性眼球運動には、前庭動眼反射と視運動性眼球運動という 2 つの反射が関わっている。

- 前庭動眼反射  
頭部の回転が刺激となって反射が生じる。頭部の回転は、前庭器官の半器官によって検知される。
- 視運動性眼球運動  
視界の動きそのものが刺激となり、網膜上の像のずれを検知する。

#### 5. 輻輳性眼球運動

両眼で対象を注視するとき、対象が前後に動くとき発生する眼球運動。物体が遠ざかると両眼は外側に回転し、近づくと内側に回転する。両眼の視線を同時に測定することで、輻輳性眼球運動の測定が可能である。

固視微動は、頭部を固定し静止した点を注視している場合にも発生するのに対し、固視微動以外の眼球運動は、頭部や注視点が移動する場合にのみ発生する。通

常，これらの眼球運動を厳密に分離して測定することは困難である．しかしながら，本研究において被験者は静止し，指定された一点を注視しているので，上記の眼球運動のうち固視微動のみを考慮すればよいと考えられる．

### 3.2 固視微動

この節では，固視微動についてさらに詳しく説明する．

固視微動とは，前述した通り一点を注視したときに発生する微小振動の眼球運動である．被測定者が静止した対象を意識的に注視しても，視線は不規則な方向に揺れ動いている．また固視微動の動きの方向に相関はなく，一般に  $(\theta, \phi)$  は独立である．

固視微動は，実生活においてほとんど感知されることはないが，ジター錯視と呼ばれる錯覚 [5] が報告されている．また，固視微動は視覚系にとってノイズと見なされることもあるが，固視微動による解像度の向上 [7] や，固視微動を利用した単眼での 3 次元情報の取得なども報告され，人間の視覚系にとって重要な役割を果たしている．

固視微動の最も重要な役割とは，網膜上の視細胞の活性化である．人間の視細胞は光の変化に反応する．人間の眼球を麻酔などにより静止させた状態で静止画を注視した場合，眼球に入射する光に時間的変化がないため，視細胞は反応しない．すると網膜上の映像は，時間の経過につれて不鮮明な画像となることが知られている．人間は眼球を絶えず細かく動かすことで，眼球への入射光の変化から網膜上の映像を鮮明に保ち，静止画を注視した状態でも周りの環境を視覚情報によって理解できる．

固視微動には以下の 3 種類 [14] の動きに分類できる<sup>1</sup>．

- ドリフト (drift) : 小さな滑らかな動き．
- トレマー (tremor) : 非常に小さな高周波の振動．
- フリック (flick) : 小さな飛ぶような動き．マイクロサッケード (micro-saccade) とも呼ばれる．

トレマーやドリフトが両眼無相関で発生するのに対し，フリックは両眼で相関がある．また，ドリフトとトレマーが注視点の近傍に視線が向くのにに対し，フリックではドリフトやトレマーと比べ注視点と離れた点へ視線を向ける (図 5)．またフリックが発生する割合は，全体の  $\frac{1}{20}$  から  $\frac{1}{60}$  程度，約 2 秒間に 1 回程度の割合で起

<sup>1</sup>本研究では，注視状態での眼球運動を固視微動と呼んでいるが，フリックを指して固視微動と呼ばれることもある．

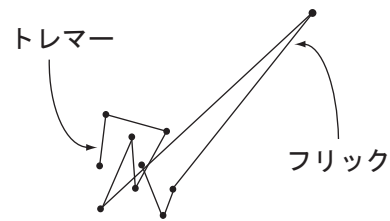


図 5: 注視時の視線の動きのモデル図

こる．しかしながら，フリックの発生する割合には個人差があり，また状況によっても変化する．

## 4 人間の視覚特性を考慮したキャリブレーション

### 4.1 既存手法の問題点

既存手法 [9] では，ある 1 点を注視したとき，注視している時間の中である一時点での瞬間的な眼球角度を利用している．換言すれば，視線を注視点に向けることができると仮定して，眼球は注視状態では静止しているものとしている．しかし，実際には注視状態でも，人間の眼球は微細振動を繰り返している．したがって，キャリブレーションの結果には固視微動による誤差が含まれる．さらに，フリック時のデータを用いてキャリブレーションを行った場合，推定された変換行列に含まれる誤差は大きくなる．

### 4.2 固視微動を考慮したキャリブレーション

精度良くキャリブレーションを行うためには，固視微動を考慮する必要がある．フリックは，トレマーやドリフトと比べ注視点から離れた位置に視線を向けているので，フリック時の眼球角度を用いてキャリブレーションを行うと，キャリブレーション結果に含まれる誤差は大きくなる．したがって，フリック時のデータを識別・除去し，トレマー，ドリフト時のデータのみを用いてキャリブレーションを行うことで，キャリブレーションの精度が向上し，ひいては視線検出が安定化すると期待できる．

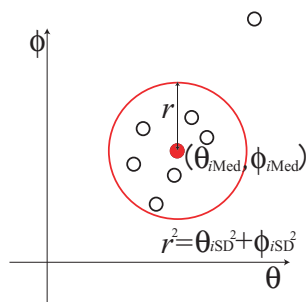
フリック時のデータは他のデータとの相対関係でのみ認識することができ，フリック時のデータを識別・除去するためには，視線の履歴情報をなんらかの形で処理することが必要となる．本研究では，後述するアルゴリズムにしたがって眼球角度の時系列データを統計処理し，ある注視点座標に対応する眼球角度を決定する．

具体的なアルゴリズムを以下に示す．

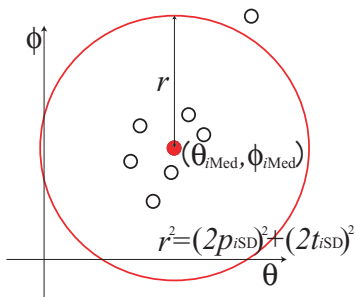
## — アルゴリズム —

ある注視点座標  $(x_i, y_i)$  に対応する眼球角度の時系列データを  $(\theta_{it}, \phi_{it}, (t = 0, 1, \dots))$  とするとき,

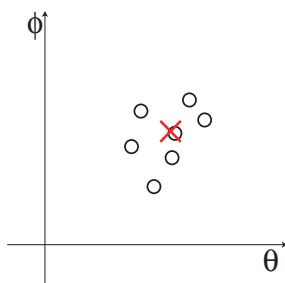
1. 眼球角度時系列データの中央値  $(\theta_{iMed}, \phi_{iMed})$  と標準偏差  $(\theta_{iSD}, \phi_{iSD})$  を求める．(図 6(a))
2. 標準偏差の 2 倍を閾値として、閾値以上のデータをフリック時のデータと判断して除去する．(図 6(b))
3. 閾値以内のデータの平均値を、注視点座標に対応する眼球角度とする．(図 6(c))



(a) 手順 1



(b) 手順 2



(c) 手順 3

図 6: アルゴリズム

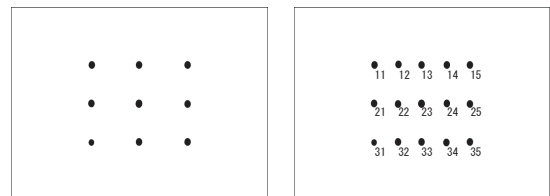
フリックの発生する割合には個人差があり、一定の閾値によって判断することは適切ではない．したがって、閾値は視線情報の標準偏差に依存するものとする．また、中央値ではなく平均値を注視点座標に対応する視線情報としたのは、取得できる時系列データの数に制限があるためである．取得する時系列データの数を多くすると、無意識に生じる頭部の動きを無視できず、注視点座標が変化してしまう．よって、頭部の動きが無視できる程度の時間内において時系列データを取得する．少ないデータ数でよりロバストに注視点座標に対応する眼球角度を求めるために平均値を用いた．

## 5 実験

### 5.1 実験状況

約 2m 離れたカメラの光軸に垂直な平面を Cal 面として、既存手法 [9]、提案手法でキャリブレーションを行った．

カメラ画像上で図 7(a) となる 9 点を用いてキャリブレーションを行った．その結果を用いてカメラ画像上で図 7(b) となる 15 点を注視点座標の試行点として、推定注視点座標を求めた．図 7(b) における各試行点を図のように番号をつけて呼ぶこととする．



(a) キャリブレーションの点

(b) 実験の試行点

図 7: 実験に用いる各点

注視点座標と推定注視点座標との差  $(dx, dy) = (x - x', y - y')$  を誤差と定義する．推定注視点座標は、正確にキャリブレーションが行えたとしても、前述した固視微動により座標推定誤差が含まれ、時系列で一定の座標とはならない．したがって 1 つの試行点に対応する視線情報の時系列データを約 2 秒間 (約 60frame<sup>2</sup>) 取得し、時系列データから算出される座標の重心を各手法での推定注視点座標とした．この実験を 23 人に対して行い、各試行点と両手法での各推定注視点座標との誤差が

<sup>2</sup>視線測定装置の仕様は 60Hz であるが、カメラのフレームレートが約 30fps のため、カメラに合わせて視線測定装置の出力は約 30Hz となる．

(50, 50)pixel 以内の被験者を，キャリブレーションが正しく行われたと判断した．キャリブレーションが正しく行われたとみなせる 18 人について誤差の平均と標準偏差とを評価した．

## 5.2 実験結果と考察

ある被験者に対して，15 点の誤差を提案手法と既存手法とで比較した．図 8 に結果を示す．

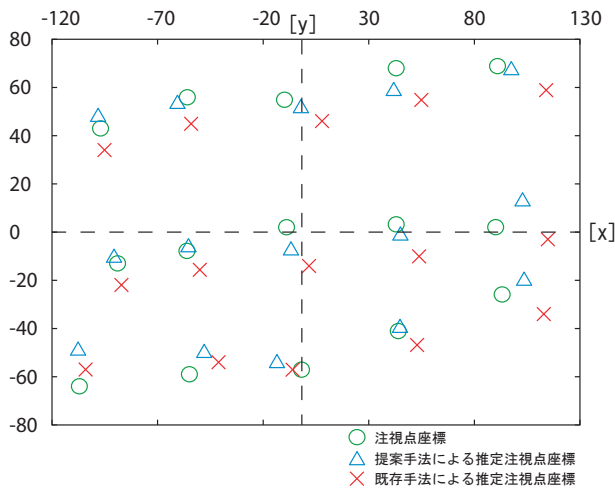


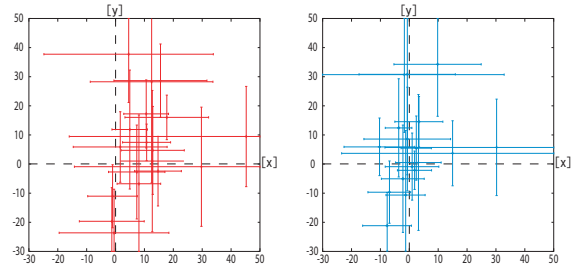
図 8: 提案手法と既存手法とでの推定注視点座標の比較 (単位:pixel)

図 8 は，各手法での推定注視点座標をプロットしたものである．○は注視点座標，△は提案手法での推定注視点座標，×は既存手法での推定注視点座標をあらわす．

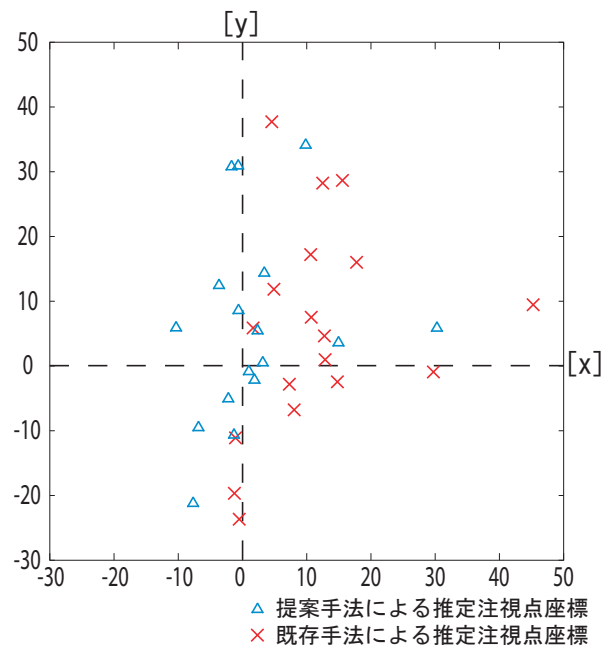
この被験者によるキャリブレーション結果では，既存手法に比べ 15 点のうち 13 点で提案手法の方が誤差が小さくなった．既存手法での 15 点の誤差の平均は (10.771, 7.445)pixel であったのに対し，提案手法での 15 点の誤差の平均は (1.825, -2.176)pixel となった．

また，15 点の各注視点座標との差を，各手法で算出した座標の平均値と標準偏差から，Welch の検定法 [11] を用い 5 %水準で検定したところ，15 点すべてで有意差があるとの結果が得られた．なお，Welch の検定法とは，比較する 2 つの群をそれぞれある母集合の標本点とみなし，その母集合がどの程度の確率で等しいものとみなせるかを検定する手法である．5 %水準とは，95 %以上の確率で，平均値の差が今回と同程度になることを意味している．

18 人の被験者に対して実験を行った結果を図 9 に示す．



(a) 既存手法 (b) 提案手法



(c) 各手法での誤差の平均値

図 9: 人に対する頑健性 (単位:pixel)

図 9(a)，図 9(b) は誤差 (0,0) を原点とし，各手法での誤差と標準偏差を表している．また図 9(c) は △が提案手法，×既存手法での誤差の平均値を示す．図から，提案手法の方が全体的に誤差が小さいことがわかる．18 人の平均の誤差は提案手法では (1.177, 3.839)pixel，既存手法では (11.283, 5.106)pixel となった．

18 人に対して Welch の検定法を用い，5 %水準で検定したところ，18 人全てで有意差があるとの結果が得られた．

以上のように，実験結果より，提案手法の方が既存手法に比べ誤差が小さくなっていることが確認された．

各被験者別にみると、画像の中心に近い点では提案手法の方が精度良く注視点座標が推定され、画像の外側では、幾つかの点で既存手法の方が精度が良い結果となった。これは、視線測定装置が、眼球を球と仮定していることに起因する考えられる。眼球を球と仮定していることで、画像の外側に近い点の眼球角度には、中央付近の点の眼球角度に比べ誤差が大きくなる。この誤差は両手法に影響を与えるが既存手法に有利になるように働いた試行点で、既存手法の方が精度良く推定されたと考えられる。

また、提案手法の方が良い結果の出た11人では、既存手法と比べ距離にして平均9.20pixelの精度が向上したのに対し、悪い結果の出た7人では、平均2.18pixel精度が悪化した。フリックがトレマーやドリフトに比べ非常に少ない確率で起こることを考慮すれば、すべての被験者においてフリック時のデータをキャリブレーションに用いたとは考えられない。9点を用いたキャリブレーションを行うとき、フリックの起こる確率が全体の $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{60}$ の割合で起こるとすると、キャリブレーションの際に用いる視線情報にフリック時の情報が含まれる確率は14~37%程度になる。したがって、既存手法に比べ提案手法の方が大きく精度の向上した人に対しては、既存手法ではフリック時の情報を用いて変換行列を推定したと考えられる。

提案手法の方が既存手法と比べ誤差が小さく、また有意差があるとの検定結果が得られたことで、キャリブレーションの際フリック時のデータを除去したことによって、視線検出が安定化したと結論するに充分であると考えられる。

## 6 おわりに

本稿では、人間の視覚特性である固視微動を考慮したキャリブレーション手法を提案した。また、キャリブレーションにより導出される変換行列を用いて算出される推定注視点座標を、提案手法、既存手法で比較することにより、本研究で提案したキャリブレーション手法の優位性を示した。なお、本研究の一部は、科学研究費補助金13224051、14380161の補助を受けて行った。

## 参考文献

[1] 金谷健一: これなら分かる応用数学教室 最小二乗法からウェブレットまで, 共立出版, 2003.

[2] 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.

[3] 小松崎篤, 篠田義一, 丸尾敏夫: 眼球運動の神経学, 医学書院, 1985.

[4] 松山隆司, 杉本晃宏, 佐藤洋一, 川嶋宏彰: 人間と共生する情報システムの実現を目指して, 人工知能学会誌, Vol. 19, No. 2, pp. 257-266, 2004.

[5] Murakami I, Cavanagh P: A Jitter After-effect Reveals Motion-based Stabilization of Vision, Nature 395(6704), pp. 798-801, 1998.

[6] 大野健彦: 視線から何がわかるか-視線測定に基づく高次認知処理の解明, 日本認知科学会『認知科学』, 9巻, 4号, pp. 565-576, 共立出版, 2002.

[7] 大山正: ひと目で何個のものが見えるか, 日経サイエンス, 別56, pp. 31-41, 1978.

[8] Salvucci, Dario D: Inferring Intent in Eye-Based Interfaces: Tracing Eye Movements with Process Models, CHI99 Conference Proceedings, pp. 254-261, 1999.

[9] A.Sugimoto, A.Nakayama and T.Matsuyama: Detecting a Gazing Region by Visual Direction and Stereo Cameras, Proc. of the 16th ICPR, Vol. 3, pp. 278-282, 2002.

[10] 高木啓伸: 視線の移動パターンに基づくユーザの迷いの検出-効果的な作業支援を目指して, 情報処理学会論文誌, Vol. 41, No. 5, pp. 1317-1327, 2000.

[11] 東京大学教養学部統計学教室: 基礎統計学 統計学入門, 東京大学出版会, 1991.

[12] M. Turk: Moving from GUIs to PUIs, Proc. Fourth Symposium on Intelligent Information Media, 1998.

[13] 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 and D, Vol. 48, No. 4, pp. 399-498, 1999.

[14] 吉松浩: ウェブレットを用いた注視時眼球運動の平滑化, テレビジョン学会誌, Vol. 50, No. 12, pp. 1903-1912, 1996.

[15] 和田俊和, 浮田宗伯, 松山隆司: 視点固定型パンチルトズームカメラとその応用, 信学論 D-II, Vol. j81-D-II, No. 6, pp. 1182-1193, 1998.