

身体的インタラクション解析のための Eye-Tracking 液晶ペンタブレットの開発

佐藤 広志^{†1} 吉田 圭介^{†2} 山本 倫也^{†2}
長松 隆^{†3} 渡辺 富夫^{†4}

近年、PC や PDA で、タッチパネルやペンタブレットなど、直感的に情報機器を操作できるユーザインタフェースが普及している。本研究では、液晶ペンタブレットを対象とする身体的インタラクション解析を行うために、視線計測装置と液晶ペンタブレットを組み合わせた「Eye-Tracking 液晶ペンタブレット」を開発している。まず、身体的インタラクション解析のための課題を検討する。次に、ロバストな視線計測を実現するため、光源一体型カメラと光軸中心回転モデルを導入した視線計測手法を開発している。そして、プロトタイプシステムの開発を行い、静止マーカに対して 0.8° 、移動マーカに対して 1.6° の精度で計測可能であることを明らかにしている。最後に、インタラクションのタイミングの解析を行い、システムの有効性を示している。

Development of an Eye-tracking Pen Display for Analyzing Embodied Interaction

HIROSHI SATO,^{†1} KEISUKE YOSHIDA,^{†2}
MICHIO YAMAMOTO,^{†2} TAKASHI NAGAMATSU^{†3}
and TOMIO WATANABE^{†4}

In recent times, intuitive user interfaces such as the touch panel and pen display have become widely used in PCs and PDAs. In this paper, the authors have developed the eye-tracking pen display which has both functions of an eye-tracker and a pen display for the purpose of analysis of embodied interaction. First, they discuss on the problems for the analysis of embodied interaction. Subsequently, a robust gaze estimation method that uses an integrated-light-source camera and aspherical model of the eye is proposed. Then, a prototype of the eye-tracking pen display was developed. The accuracy of the system was approximately 0.8 degrees for static target and 1.6 degrees for moving target. At last, the effectiveness of the system was demonstrated by performing analysis of interaction timing.

1. はじめに

近年、タッチパネルやペンタブレットなど、直感的に情報機器を操作できるユーザインタフェースが普及してきた。また、人と人のコミュニケーションや人から人へのプレゼンテーションにおいて、各種情報機器やシステムが用いられるようになってきている。このような背景から、今後は、直感的に操作できるユーザインタフェースを採用した情報機器を用いて、人のインタラクション特性に基づくインタフェースを実現することで、人と人のコミュニケーションをより円滑なものにすることが期待される。

著者らは、身体性（身体のはたらき）の重要性に着目し、コミュニケーション解析やインタラクションシステムの開発を行ってきた。たとえば、CG キャラクタやエージェントを用いてインタラクション支援を行ううえで、身体動作のタイミングを制御することが重要であることを明らかにしている。具体的には、情報提示のインタラクションを合成的に解析した結果、エージェントが「こちらです」と発話しながら画面上の情報を提示する場合に、動作に対する発声のタイミングを 0.3 秒程度遅延させることで、自然なインタラクションが実現されることを示している¹⁾。また、プレゼンテーション時の身体動作の重要性に着目し、手元のモバイルデバイスで強調や指示などの動作を入力するとスクリーン上で身体が拡張されているような感覚でポインティングできる“PPTouch”を提案し、システムの有効性を明らかにしている²⁾。

今後、相手に伝えるコミュニケーションを支援する際、このような直感的入出力インタフェースを用いるインタラクションにおいても、時間的・空間的な人のインタラクション特性に基づくシステム設計が重要になると考えられる。特に、身体動作だけでなく、コミュニケーションにおいて重要な役割を果たすといわれる視線情報を導入し、身体的インタラクションを総合的に解析することが不可欠である。具体例として著者らは、e-learning のスライド共有や、メッセージャーソフトウェアのホワイトボードなどがそれほど利用されな

^{†1} 関西学院大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University

^{†2} 関西学院大学理工学部
School of Science and Technology, Kwansai Gakuin University

^{†3} 神戸大学大学院海事科学研究科
Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University

^{†4} 岡山県立大学情報工学部
Department of Systems Engineering, Okayama Prefectural University

いのは、身体性が大きく損なわれていることに起因すると考えている。今後は、マルチタッチ PC や液晶ペンタブレットを用いることで、新たな教示インタフェースなどを開発できるが、視線情報を導入することで強調や指示の身体的インタラクションを円滑化することが期待される³⁾。

そこで本研究では、液晶ペンタブレットを対象とする身体的インタラクション解析を行うために、視線計測装置と液晶ペンタブレットを組み合わせた「Eye-Tracking 液晶ペンタブレット」を開発している。本論文ではまず、身体的インタラクション解析のための課題の検討を行う。次に、ペン利用時の近距離で広視野の視線計測を実現するため、光軸中心回転体モデルを用いた視線計測手法を導入する。これに基づき、光軸中心回転体モデルを実装した視線計測装置と液晶ペンタブレットを合わせた Eye-Tracking 液晶ペンタブレットのハードウェアを開発する。さらに、開発した視線計測装置を用いて精度と追従性を評価する実験を行う。最後に、身体的インタラクション解析実験とその考察を行い、システムの有効性を明らかにする。

2. 身体的インタラクション解析のための課題

2.1 市販の視線計測装置の課題

市販の非接触式の視線計測装置は、利用者の目を撮影するためのカメラが主にディスプレイ下部に搭載されている。また、精度の良い計測のために、光源として赤外線 LED などが用いられている⁴⁾。このような装置を用いて液晶ペンタブレット使用時の視線の計測を試みると、利用者の手や腕がカメラを遮ったり、LED による赤外線照射を遮ったりして、視線を計測できない。たとえば、市販の計測装置で優れた性能を有するモニター体型の Tobii 社 T120 アイトラッカー⁵⁾に感圧センサを取り付けるような手法では、画面左上で描画する際、カメラと LED を隠してしまい、視線を計測できなくなる(図 1(a))。また、画面左下にスタンドアロン型の Tobii 社 X120 を置いたとしても、ユーザとディスプレイの距離が 70 cm、有効計測範囲が 35° であり、実際はそれほどの性能が出ないため、正確に計測することができない(図 1(b))。

2.2 本研究における課題

視線計測装置の開発では、一般に、カメラや光源の配置によって注視点を算出する手法が異なる。たとえば、Ohno は 1 台のカメラと 2 個の LED を用いたシステム⁶⁾、Chen らは、カメラ中心付近に LED を配置し、カメラと LED を一体型にしたカメラ 2 台を用いたシステムを提案しており⁷⁾、それぞれ異なった手法が用いられている。

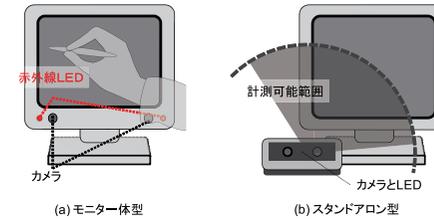


図 1 カメラと赤外線 LED の配置例
Fig. 1 Typical layout of cameras and LEDs.

本研究では、身体的インタラクション解析の観点から、カメラや光源配置における課題について検討し、計測手法を開発したうえでプロトタイプシステムの開発を行う。まず、利用者の利き手や体格など、使用状況に合わせて自由に配置変更が行えることや、多数のカメラを利用することで広範囲で視線計測が行えることが必要である。これは、液晶ペンタブレットを使用してインタラクション解析を行う場合、ペンを持つ手や腕の動作範囲に応じてカメラが遮られてしまうのを防ぐため、配置を変更したり、遮られていないカメラを用いて計測を行う必要があるためである。

次に、手が届く近距離に置いたとしても高い精度とロバスト性を実現できることがあげられる。液晶ペンタブレットを用いて強調・指示動作を行う際、液晶ペンタブレットと利用者の距離が近くなるため、一般的な使用距離において運用する以上に、近距離での高い視線計測の精度が求められるためである。通常の視線計測装置は、本研究のように近距離かつ広視野で使用する場合、視野角の広がりの影響により高い精度での計測が難しい。

さらに、ペンタブレット使用時の身体的インタラクション解析に耐えうる高い追従性を実現することがあげられる。身体的インタラクション解析を行ううえで、タイミング分析が必要になるが、視線計測装置は画像処理やフィルタリング処理による遅延が必ず発生してしまい、この遅延が解析に大きく影響を及ぼすことが考えられる。そこで、視線計測装置は遅延が少なく補正が可能であるような、高い追従性が求められる。

以上をまとめると、カメラと光源配置、それに基づく注視点の算出には次の課題がある。

- 利用者に合わせてカメラと光源の配置が自由に変更可能な視線計測手法
- 近距離に置いても広視野で高い計測精度とロバスト性
- 身体的インタラクション解析のためのタイミング解析が可能な高い追従性

3. 視線計測手法の開発

3.1 身体動作とカメラ・光源配置領域の検討

ペンタブレット使用時のオクルージョンについては、隠された部分の情報提示を目的に、Vogel らが、ディスプレイ上で 2 次元的に解析を行い、腕や指のモデル化を行っている⁸⁾。本研究では、枠外などディスプレイ外の空間も含めたオクルージョンが発生しない領域を求める必要があるため、モーションキャプチャシステムを用いて 3 次元的な測定を行った。このような身体的インタラクションを解明するために、まず光学反射式モーションキャプチャシステム (Vicon Motion Systems 社 Vicon 512) を用いて、座位時 (液晶ペンタブレットの角度 60°) および立位時 (同 60° および 15°) に液晶ペンタブレット使用者の身体動作を取得した (図 2)。なお、実験協力者には液晶ペンタブレットのディスプレイの周囲を四角を描くようにペンを引かせた。

次に、カメラと赤外線 LED の配置可能範囲を求めるため、解析用ソフトウェアを開発し、右利きの実験協力者 10 人分 (身長 155 cm ~ 175 cm) の身体動作を液晶ペンタブレットを含む空間上にプロットすることで、赤い部分が右手の通過する領域を求めた。図 3 は、ユーザの視点から見た右手の通過する領域をプロットしたものである。手首や腕の外側にマーカをつけているので、実際にはもう少し広い範囲が手によって遮られる。この結果、画面上部や左部に加えて、右側の上部、下側の左部、あるいはこれらの周りのディスプレイ前後の領域にカメラや光源の設置が可能であることが分かった。ただし、利用者が左利きの場合には左右が反転するので、この点についても考慮できるようにする必要がある。

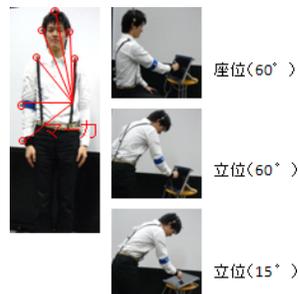


図 2 液晶ペンタブレット使用者の身体動作計測

Fig. 2 Measurement of body motion while using a pen display.

3.2 従来手法におけるカメラ・LED の配置

3.1 節の結果より、EyeTech Digital System 社の製品⁹⁾ など、カメラから光源への距離が短いシステムや、カメラと光源位置が一致しているシステムであれば、本研究が求める制約を満たしつつカメラの設置が可能である。しかし、画面上部にこのようなシステムを設置するとまぶたに遮られてしまうことが多くなり、利用可能なユーザが限られると考えられる。また、縦置き設置については、市販品では Tobii 社のようにソフトウェアが対応していない可能性が高い。

カメラから光源への距離が近いシステムである Ohno のシステム⁶⁾ もオクルージョンを避けた設置が可能であると考えられるが、2 つの光源の midpoint にカメラを設置するという制約があり、また、オートフォーカス機構から得られたフォーカスパラメータを用いており高い精度で計測できない場合もある。

本研究では、Shih ら¹⁰⁾、Guestrin ら¹¹⁾、Nagamatsu ら^{12),13)} による 3 次元モデルを用いた 1 点キャリブレーションによる最新の視線計測手法の導入を試みた。これらの手法では、ユーザキャリブレーションが容易であり、頭部移動を許容するものである。ステレオカメラを用いており、個人依存のパラメータである角膜曲率半径や角膜曲率中心と瞳孔中心との距離を求めることが可能であり、非常に精度の高い手法である。さらに、これらの手法には、カメラと光源の配置にある程度の自由度がある。この最新の手法を用いたため、オクルージョンが発生しない配置が可能であれば、ユーザの負担も少なく、精度良く視線計測ができるので、ペンタブレット利用時の視線計測装置として最適である。図 4 (a) に、Nagamatsu らによるカメラと LED の配置図を示す¹³⁾。本研究では、3.1 節の実験結果を考慮し、まず、右利き用のシステム実現を目指し、2 台のカメラを用いたプロトタイプシステムを開発した。カメラの配置は、ディスプレイの上部や下部も試したが、まぶたやまつ

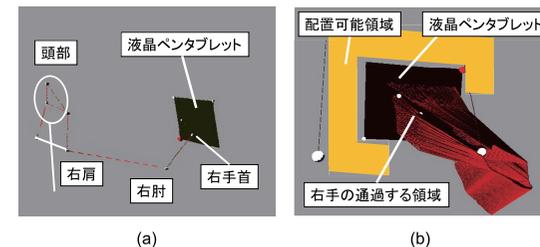


図 3 カメラと LED の配置領域

Fig. 3 Arrangement volume of cameras and LEDs.

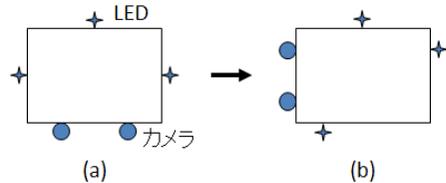


図 4 従来手法におけるカメラと LED 配置図

Fig. 4 Arrangement of cameras and LEDs in previous studies.

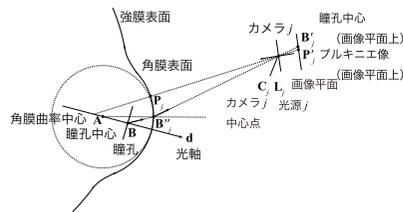


図 5 光軸の推定

Fig. 5 Estimation of the optical axes.

毛の影響が少ない左部が最も計測しやすかった。これにともない、LED をディスプレイ上部・下部・右端に配置した (図 4(b))。しかし、このように配置した場合、どうしても上部 LED がまぶたで遮られてしまう。場合によって、右手で LED が遮られてしまうこともあり、安定した視線計測を実現することができなかった。

3.3 光軸中心回転体モデルを用いた視線計測手法

3.2 節に述べた手法は角膜の球面モデルを利用しているが、このモデルが実際の角膜形状とずれているために生じる視線の推定誤差を減らす手法として、著者らは眼球の光軸中心回転体モデルを用いた視線計測手法の研究を行っている¹⁴⁾。

この手法におけるカメラ画像からの光軸の推定方法を図 5 に示す。計算は以下のように行う。まず、2 台のカメラより、それぞれの光源およびカメラ中心の座標 C_j ($j = 0, 1$)、画像平面上の瞳孔中心 B'_j とブルキニエ像 P'_j の 3 点より得られる平面を 2 つ求める。この 2 平面の交線が推定した光軸 $B-A$ である。ただし、光源 L_j とカメラ中心 C_j は同一位置にあるとし、事前にカメラキャリブレーションにより求めておく。ここでボールド体は 3 次元ベクトルを示す。視線計測前には、個人依存のパラメータである眼球の光軸と視軸のずれを求めるキャリブレーションを行う。キャリブレーション後は、上記の方法で求めた眼球の



図 6 光軸中心回転体モデルにおけるカメラと LED 配置図

Fig. 6 Arrangement of cameras and LEDs in aspherical model of the eye.

光軸を眼球の光軸と視軸のずれを用いて修正し、視軸の向きを求める。視軸と液晶面の交点が推定した注視点である。

この手法のモデルでは、カメラ中心と光源が同じ位置にある必要があり、カメラと光源が一体化したシステムとなる。先行研究¹⁴⁾では、通常の視線計測装置のようにカメラをディスプレイの下に設置していたが、理論上は 2 台のカメラは、自由に配置を変更できる。この手法を用いれば、液晶ペンタブレットに導入した場合、図 6 のように、赤外線 LED とカメラを一体化し、オクルージョンの起こりうる場所を減少させる構成とすることができる。

光源一体型カメラを用いれば、LED とカメラを同時に移動することができ、自由な配置変更が可能となり、応用範囲も広がる。この手法は、3 次元モデルに導入されている従来の球面モデルと比較し、眼球の光軸中心回転体モデルを用いた精度の高い計測手法であるが、同時に本研究の要求する配置を満たしている。

4. ハードウェア開発

4.1 システム構成

3 章で述べた視線計測手法のために、図 7 に示すシステムを構成した。本システムでは、液晶ペンタブレット (Wacom 社 DTI-520, 15 型, 1,024 × 768)、視線計測のために、焦点距離 35 mm のレンズ (ViewPLUS 社 VP-LE-C-35S, 35 mm) と赤外線 LED と赤外線フィルタを装着したデジタルモノクロカメラ (POINT GREY 社 FFMV-03 MTM, 752 × 480) を組み合わせた光源一体型カメラ 2 台、画像処理などを行う計測用 PC (HP 社 Workstation xw4600) を用いた。これにより、カメラ中心から赤外線 LED を照射し、瞳孔中心と角膜表面で反射してできるブルキニエ像の位置を求め、光軸中心回転体モデルを用いて高精度に視軸を推定した。ここで、3.3 節の手法を導入するために、瞳孔中心とブルキニエ像の画像平面上の位置を画像処理で求めている。また画像処理には、OpenCV 1.0 を用いた。

4.2 光源一体型カメラ (明瞳孔) の開発

光源一体型カメラとして、赤外線 LED をカメラのレンズ中心に装着した光源一体型明瞳



図 7 システム構成

Fig. 7 System configuration of eye-tracking pen display.

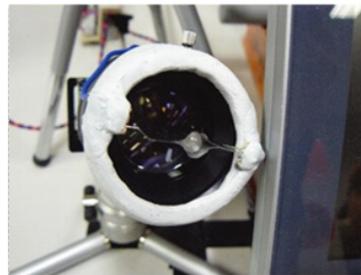


図 8 光源一体型カメラ（明瞳孔）

Fig. 8 Integrated-light-source camera (bright pupil technique).

孔カメラを開発した（図 8）。これは、赤外線 LED をレンズ中心にできるだけ近く配置することで、カメラ中心と光源がほぼ同一の位置となり、光軸中心回転モデルを用いることで、ほぼ理論値で眼球の光軸を推定できるカメラである。この場合、赤外線 LED の光が網膜で反射し、カメラで撮影すると瞳孔が白く写る明瞳孔と呼ばれる状態になる。

明瞳孔を用いた瞳孔検出は、網膜の反射率の違いによる個人差や、光源やカメラの配置などの計測環境の影響を強く受けてしまい、それによって、瞳孔の検出を安定して行うことができず、ロバスト性が失われて、高精度な視線計測が行えない場合がある（図 9）。具体的には、視線方向がカメラから大きく離れた場合、網膜における反射光が弱まることから、二値化の際に明瞳孔と検出できない場合がある、瞳孔径が大きい場合、明瞳孔が大きくなりブルキニエ像と重なりブルキニエ像の検出が難しい、瞳孔径が小さい場合は明瞳孔が暗くなり光彩と区別が難しいなどの問題があり、瞳孔検出が不安定になってしまう。

4.3 光源一体型カメラ（暗瞳孔）の開発

3.3 節の手法で安定的に瞳孔を検出するために、暗瞳孔による方法について検討し、複数

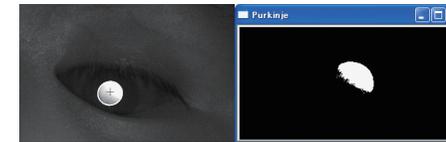


図 9 画像処理失敗例

Fig. 9 Example of image processing error.

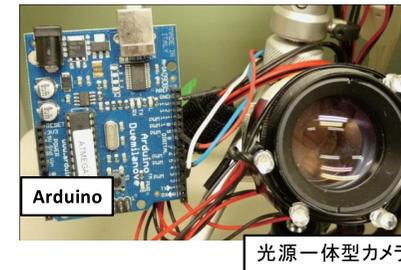


図 10 光源一体型カメラ（暗瞳孔）

Fig. 10 Integrated-light-source camera (dark pupil technique).

の赤外線 LED をレンズ周囲に装着した光源一体型暗瞳孔カメラを開発した（図 10）。これは、赤外線 LED をレンズ周囲に配置することで、瞳孔が暗い状態（暗瞳孔）を検出し、安定した瞳孔検出を実現するためのカメラである。

赤外線 LED の位置は明瞳孔にならないようにレンズの中心から十分離している。暗瞳孔カメラを使用した場合は、カメラ中心が同一位置にあることを前提とした 3.3 節の手法において、理論上の光源位置と実際の光源位置が異なるため、計算手法との間に誤差が生じてしまい、高精度な計測ができなくなる。そこで、この光源一体型暗瞳孔カメラでは、以下の 3 種類のパターンで発光できるようにした。

- (1) LED がレンズの脇で発光（誤差を無視できるものとする）
- (2) 2 個の LED がレンズの外側対角線上で発光（中点をレンズ中心と一致させる）
- (3) 3 個の LED がレンズの外側の正三角形上で発光（重心をレンズ中心と一致させる）

いずれのパターンも、光源一体型カメラに用いた赤外線 LED は Arduino Software の Arduino Duemilanove¹⁵⁾ を用いて制御することで、光量が自由に調整できるように設定している。

5. 広視野における計測精度とロバスト性の評価

5.1 実験方法

開発した光源一体型カメラにおいて、どのような光源配置が最も適しているのかを調べるために、明瞳孔カメラを使用した場合と暗瞳孔カメラを用いた場合の精度比較実験を行った(図 11)。

実験に用いる計測機器として、開発した Eye-Tracking 液晶ペンタブレットを用いた。実験環境は、前方に配置された液晶ペンタブレットを右手に持ったペンで書き込み動作が行える距離を想定し、ディスプレイとあご台の距離を約 30 cm とした。また、本実験で用いる赤外線 LED は、1 個(明瞳孔)、1 個(暗瞳孔)、2 個(暗瞳孔)、3 個(暗瞳孔)の 4 パターンとした。ここで、フォトトランジスタを用いて計測することで、LED の総光量を一定とした。なお、LED が 2 個の場合は、カメラのレンズ中心を原点とし点対称に LED を配置し、3 個の場合は、カメラレンズに内接する正三角形のそれぞれ頂点に対応するように配置した(図 12)。

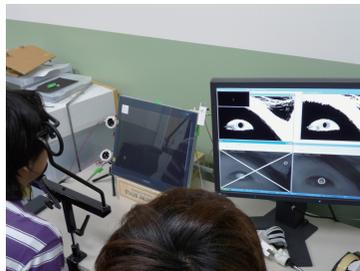


図 11 実験の配置
Fig. 11 Experimental setup.

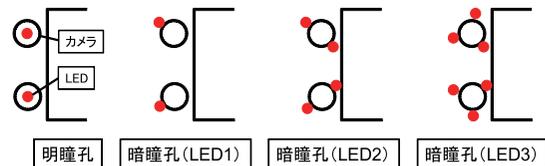


図 12 赤外線 LED の発光パターン
Fig. 12 Layout patterns of IR LEDs.

実験では、まず実験協力者の光軸と視軸の個人差の修正を行うため、画面左部に表示したマーカを注視させ、個人キャリブレーションを行わせた。次に、ディスプレイに十字のマーカを表示し、それを注視させ、協力者の注視点を計測した。ここで、計測点は画面左部に 6 点、画面右部に 8 点、合計 14 点とした。これは、カメラ位置から遠く、誤差が大きくなると予想される画面右端には、左端より多く計測点を置くことで、LED の違いによる誤差をより正確に計測できるようにするためである。なお、実験時液晶ペンタブレットには測定点のみを表示し、意識的にマーカをあわせてしまうことを防止し、より正確なデータの計測を行った。実験では、実験協力者に数秒間ディスプレイ上のマーカを注視するように指示を出し、その間に 50 フレームの記録を行い、まばたきなどで計測が失敗している範囲以外の連続した 10 フレームの平均を測定値とした。実験では、これを 1 セットとし、暗瞳孔時の計測を LED 1, 2, 3 個のパターンで切り替えて行い、続いて、使用するカメラを明瞳孔カメラに変更し、同様のマーカを用いて合計 4 セットの計測を行った。ただし、明瞳孔カメラ測定時に、環境光や瞳孔の個人差の影響などで瞳孔検出が安定しない場合は、手動で画像処理のパラメータの調整を行った。本実験はインタラクション実験を想定し、右利きの裸眼の 20 代男性 5 人を対象に行った。

5.2 実験結果

比較実験の結果を図 13, 図 14, 図 15, 図 16, 図 17 に示す。また、実験協力者ごとに最も良かった値・悪かった値、平均の値を表 1 に示す。最も良かった精度は明瞳孔、暗瞳孔 LED 1 個、2 個、3 個について、それぞれ 0.25° (実験協力者 5), 1.0° (実験協力者 4), 0.29° (実験協力者 1), 0.41° (実験協力者 1) であった。また最も悪かった精度は、それぞれ 1.11° (実験協力者 2), 2.49° (実験協力者 3), 1.14° (実験協力者 2), 1.26° (実験協力

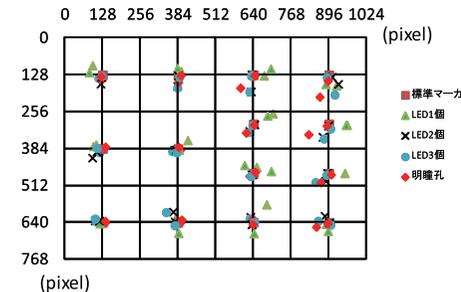


図 13 実験結果 (実験協力者 1)
Fig. 13 Result of evaluation experiment 1.

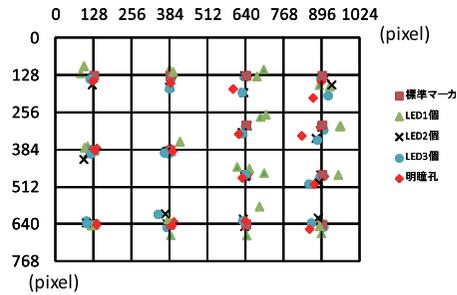


図 14 実験結果 (実験協力者 2)

Fig. 14 Result of evaluation experiment 2.

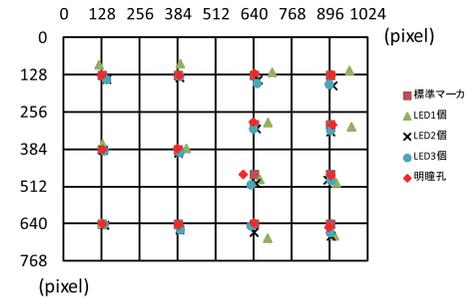


図 17 実験結果 (実験協力者 5)

Fig. 17 Result of evaluation experiment 5.

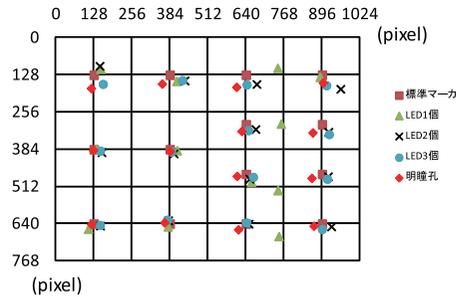


図 15 実験結果 (実験協力者 3)

Fig. 15 Result of evaluation experiment 3.

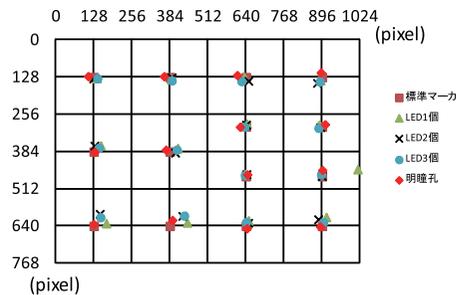


図 16 実験結果 (実験協力者 4)

Fig. 16 Result of evaluation experiment 4.

表 1 実験協力者ごとの最も良かった点と悪かった点, 平均値の精度
Table 1 Accuracy of the best point, the worst point and average of every subject.

	カメラ	実験協力者 1	実験協力者 2	実験協力者 3	実験協力者 4	実験協力者 5
良	明瞳孔	0.13°	0.04°	0.12°	0.09°	0.05°
	暗瞳孔 (LED1)	0.20°	0.28°	0.32°	0.21°	0.12°
	暗瞳孔 (LED2)	0.05°	0.16°	0.32°	0.03°	0.33°
	暗瞳孔 (LED3)	0.08°	0.11°	0.14°	0.19°	0.19°
悪	明瞳孔	0.71°	2.86°	1.82°	1.05°	1.29°
	暗瞳孔 (LED1)	9.90°	2.65°	6.51°	4.24°	8.63°
	暗瞳孔 (LED2)	0.79°	2.02°	2.72°	1.89°	1.43°
	暗瞳孔 (LED3)	1.00°	2.47°	1.57°	2.07°	1.29°
平均	明瞳孔	0.31°	1.11°	1.00°	0.51°	0.25°
	暗瞳孔 (LED1)	1.92°	1.36°	2.49°	1.00°	1.95°
	暗瞳孔 (LED2)	0.29°	1.14°	1.12°	0.62°	0.72°
	暗瞳孔 (LED3)	0.41°	1.26°	0.90°	0.51°	0.64°

者 2) であった。平均誤差は明瞳孔カメラで視野角 0.64° (18.5 pixel, 5.5 mm) 標準偏差 1.34° となり, 暗瞳孔カメラの場合, LED 1 個で視野角 1.32° (50.3 pixel, 14.9 mm) 標準偏差 0.56°, LED 2 個で視野角 0.78° (22.5 pixel, 6.7 mm) 標準偏差 0.54°, LED 3 個で視野角 0.78° (22.4 pixel, 6.6 mm) 標準偏差 0.62° であった。

暗瞳孔カメラと明瞳孔カメラの精度を定量的に評価するため, この実験から得られた平均誤差に一元配置分散分析を行った (図 18)。ここでは, 事後検定のため, 全標本の誤差分散を使用して t 検定を行っている。この結果, LED 3 個, 2 個, 明瞳孔の間に有意差が見られず, LED 1 個とそれ以外の場合において有意差が見られた ($p < 0.01$)。

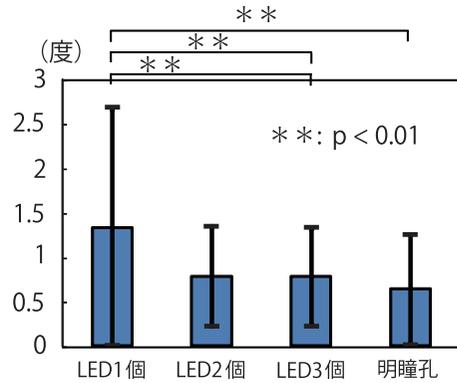


Fig. 18 Result of one-way analysis of variance.

すなわち、LED 1 個を使用した場合は、大きく精度が落ちており、計算手法との誤差による影響が大きく現れた。一方、LED 2 個と 3 個の場合、明瞳孔との間には有意差は見られなかった。これにより、仮想的に光源の位置を中心にすることができたと考えられるため、LED 2 個が精度と機器の複雑さの観点から最良である。

6. インタラクションの追従性評価実験

6.1 実験方法

5章の精度評価の結果をふまえて、ディスプレイ上を移動するマーカーを視線で追従するときの注視点位置データを記録する追従性評価実験を行った。

実験環境は5章と同じで、LED 2 個の光源一体型カメラを用いた Eye-Tracking 液晶ペンタブレットを用いて、ディスプレイからあご台までの距離を約 30 cm とした。

実験では、まず個人キャリブレーションを行った。次に、画面左上、左下、右上、右下に表示される十字のマーカーを注視させ、注視点の計測が行えていることを確認した。その後、実験協力者に画面上に移動するマーカーを注視するよう伝え、移動するマーカーを表示し計測を行った。移動マーカーは、画面左端 (128 pixel) に停止している状態から右端 (896 pixel) までを右横方向に移動し、移動後停止した後、128 pixel 下の位置から再度移動を開始するマーカーを上部から順に 5 本線表示する「5 本線マーカー」と、画面左上 (128, 128) に停止している状態から右横方向に移動し、右端 (896 pixel) で停止せず Z 状に折り返し、ディス

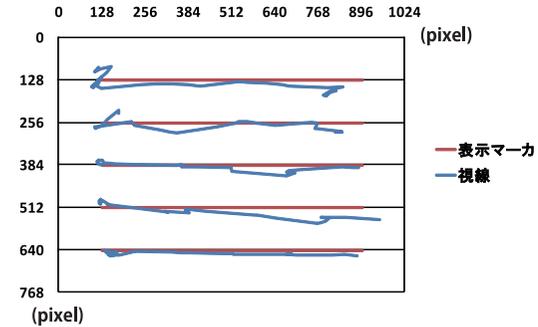


図 19 実験結果 (5 本線マーカー)

Fig. 19 Example of results of x-axis of 5-line pattern.

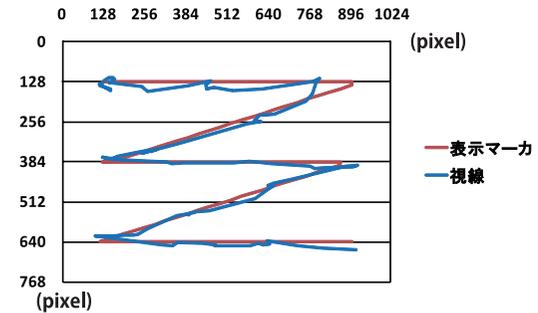


図 20 実験結果 (Z 字マーカー)

Fig. 20 Results of figure "Z" pattern.

レイ上を 2.5 往復した後停止する移動マーカー「Z 字マーカー」の 2 パターン用意した。移動マーカーの速度は人が線を引く速度の一例である 284 pixel/sec とした¹⁶⁾。これは、使用したディスプレイ (304 × 228 mm, 1,024 × 768) では、中心付近での角速度が約 0.21 rad/sec (約 12°/sec) となり、10 ~ 20° の振幅で 350 ~ 500°/sec とされるサッケード¹⁷⁾ の生じない速度である実験は、右利きの 20 代男性 10 人 (裸眼) を対象に行った。

6.2 実験結果

実験結果の一例をそれぞれ図 19, 図 20 に示す。5 本線マーカーでは、視線がマーカーを追従する精度は平均 1.45° (42.9 pixel, 12.4 mm) であった。また、Z 字マーカーでは、精度は平均 1.63° (48.1 pixel, 14.3 mm) であった。これらの結果より、実験を行ったほぼすべて

の場合において移動マーカーに追従している様子が確認できた。なお、眼球とディスプレイを同時に撮影したビデオ映像を 1 frame ずつ検証した結果、眼球が実際に動いてから光源一体型カメラが認識し、注視点を算出するまでの処理時間が約 7/30 秒であった。

7. 身体的インタラクション解析のための下線引きタイミング解析実験

7.1 実験方法

実際に身体的インタラクションを解析する例として、ペンを用いて下線を引くインタラクション解析実験を行った(図 21)。実験では、本研究で開発した Eye-Tracking 液晶ペンタブレットに加えて、Microsoft 社の PowerPoint 2007 のプレゼンテーション用スライドの出力とペンデータの取得用 PC (HP 社 Workstation 8730w) を用いた。ここで、液晶ペンタブレットはリフレッシュレート 60 Hz データ転送速度 100 ポイント/秒のペンモードで使用した。

まず液晶ペンタブレットを使用して線を引く動作の練習を約 30 分行わせ、十分に使い慣れた状態にさせた。次に、実験協力者ごとに個人キャリブレーションを行い、視線計測が正確に行えていることを確認した。その後、液晶ペンタブレットにスライドを表示し、スライド上に数カ所ある赤字で強調された部分に下線を引かせ、その間の視線・ペン座標の記録を行った。スライドは 3 枚用意し、これを 1 セットとして、合計 5 セットの下線引きを行わせた。なお、ペンによるデータ取得は約 30 frame/sec でタイムスタンプとともに記録しており、視線計測システムは約 10 frame/sec で、視線計測データは処理時間である 7/30 秒前のペンデータと統合して記録した。



図 21 実験風景
Fig. 21 Experimental setup.

実験協力者は、右利きで液晶ペンタブレットに表示されたスライドがはっきりと見える視力の 20 代男性 3 人(裸眼)を対象に行った。

7.2 実験結果

図 22 は、計測した実験時の実験協力者の注視点位置とペン座標をスライド上にプロットした例である。このように、線を引く動作を行うときの視線データが計測できた。

次にインタラクションの解析例として、下線引きのタイミングを解析した。図 23 は、x 軸方向の書き込みと視線座標のタイミングについて解析を行った一例で、視線が先に移動し、次にペンが動く様子が見て取れる。これより、書き込みタイミングと視線の動作に関係性があるのではないかと考え、実験協力者全員の測定値についてこのタイミング解析を行っ

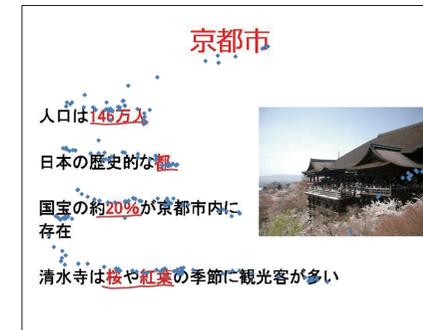


図 22 スライド上の視線推移とペン座標

Fig. 22 Process of coordinates of the gaze and the pen on the slides.

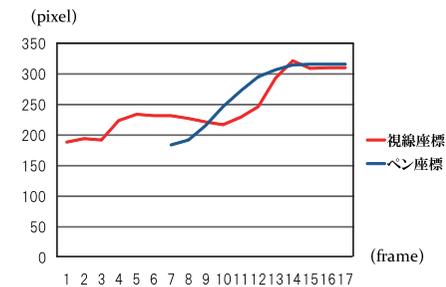


図 23 書き込みタイミングと視線の動作の解析例

Fig. 23 Example of gaze and timing of drawing lines.

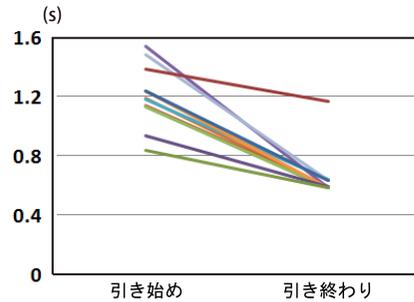


図 24 注視点位置と線引タイミグ (実験協力者 1)

Fig. 24 Points of gaze and timing of drawing lines (evaluation experiment 1).

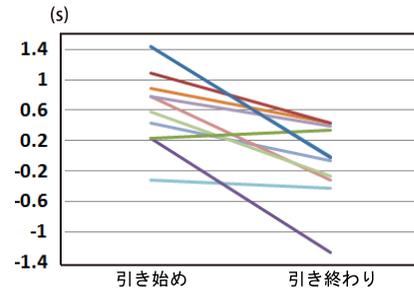


図 25 注視点位置と線引タイミグ (実験協力者 2)

Fig. 25 Points of gaze and timing of drawing lines (evaluation experiment 2).

た．この結果を図 24，図 25，図 26 に示す．1 人目の実験協力者の場合，線の引き始めに対して平均 23.8 frame (約 1.20 秒) 視線移動が先行しており，引き終わりで平均 19.2 frame (約 0.64 秒) 先行していた (図 24)．また 2 人目は，引き始めで平均 20.7 frame (約 0.69 秒) 視線が先行しており，引き終わりで平均 2.1 frame (約 0.07 秒) 視線が先行していた (図 25)．3 人目は，引き始めで平均 18.6 frame (約 0.62 秒) 視線が先行しており，引き終わりで平均 0.3 frame (約 0.01 秒) 視線が先行していた (図 26)．このように，個人差はあるが，線引き動作の際に文字の先を見て引き，引き終わりの視線とペン引きの時間が近くなるという傾向があることが分かった．

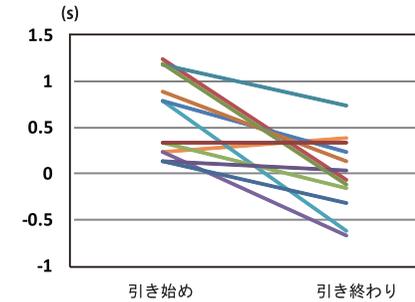


図 26 注視点位置と線引タイミグ (実験協力者 3)

Fig. 26 Points of gaze and timing of drawing lines (evaluation experiment 3).

8. 考 察

本研究では，1 台のカメラと 2 個の LED とを一体化した光源一体型暗瞳孔カメラと，1 点キャリブレーションによる光軸中心回転体モデルにより，静止マークで平均誤差約 0.8 度，移動マークで平均誤差約 1.5 度で計測可能であり，下線引きなどの身体的インタラクション時のタイミング解析が可能な Eye-Tracking 液晶ペンタブレットを開発できた．

本システムは，現状ですでに，10～15 fps で視線計測が可能で，著者らがあいさつなどの身体的インタラクションの研究において行っていた 100 ms オーダでのタイミング解析や制御に十分である．今後，処理 PC の高速化やアルゴリズムの改善などで，30 fps 程度で動作することが見込まれるため，本システムを身体的インタラクション解析実験に用いる場合，空間・時間分解能ともに身体的インタラクション解析を行うには十分である．

本システムは右利きのみという条件下で行ったが，カメラを置き換えるか両側に配置することで左利きにも対応できる．一般に市販されている頭部装着型の視線計測装置とモーションキャプチャを併用すれば同様の計測が可能である．しかしこの場合，計測する際の身体動作を妨げてしまう，複数のシステムそれぞれの誤差が大きくなってしまふなどの問題が考えられ，身体的インタラクションの解析を行うことが容易ではない．広角・高精細のカメラの導入により，あご台を用いる必要もなくなることから，非接触でかつ高精度に身体的インタラクション解析が可能で，PC の性能向上とともに，より高精度な解析も可能となるシステムを開発できた．

今後，本システムを用いることで，従来の視線のみ・身体動作のみの計測だけでなく，視

線・ペン・音声をマルチモーダルな解析を行うことができる。具体的には、本システムを用いてプレゼンテーション時にどのような身体的インタラクションを行っているかプレゼンテーションを行っている人の視線と情報提示の関係を明らかにし、聴講者の理解が深まるビジュアルエフェクトの開発など、様々なアプリケーション開発にも応用できると考えられる。

9. おわりに

本研究では、液晶ペンタブレット使用時に視線の計測が可能な身体的インタラクションの解析を行うために、「Eye-Tracking 液晶ペンタブレット」を開発した。

本論文では、まず市販の視線計測装置の課題や本研究における課題を述べた。3章では、利用者に合わせてカメラと光源の配置が自由に変更可能な視線計測手法を開発した。次に4, 5章では、広視野における高い計測精度とロバスト性の両立のため、明瞳孔・暗瞳孔それぞれの光源一体型カメラの開発・精度評価を行った。そして6, 7章では、開発した Eye-Tracking 液晶ペンタブレットを用いて、身体的インタラクション解析のためのタイミング解析が可能な追従性を確認するため、追従性の評価実験を行い、追従している様子を確認した後、身体的インタラクション解析に向けた下線引きタイミング解析実験を行った。具体的には、追従性の評価実験において、平均誤差が5本線マーカ・Z字マーカでそれぞれ約42 pixel, 48 pixel という結果が得られ、移動マーカに追従している様子が確認できた。さらに、下線引きタイミング解析実験では、人は引き始めにペンより視線が先行し、引き終わりに視線と線の引き終わりの時間が近くなるという傾向があることが分かった。

今後は、視線と動作に加え、音声も含めたマルチモーダルな解析実験を行っていく予定である。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金特定領域研究「情報爆発時代に向けた新しいIT 基盤技術の研究」における公募研究「一体感が実感できる身体的コミュニケーションインタフェース」の支援による。

参 考 文 献

- 1) 山本倫也, 渡辺富夫: 身体的エージェントの情報提示インタラクションにおける動作に対する発声タイミング制御の効果, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.10, No.2, pp.135-143 (2008).
- 2) 大谷尚弘, 安保翔太, 山本倫也, 渡辺富夫: 携帯型タッチスクリーンデバイスを用いた身体拡張型プレゼンテーション支援システム, ヒューマンインタフェースシンポジウ

- ム 2010 論文集, pp.329-332 (2010).
- 3) 高尾裕也, 山本倫也, 岡田知之, 渡辺富夫: 強調・指示のプレゼンテーション動作を拡張する身体的ビジュアルエフェクトの開発, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.12, No.3, pp.19-24 (2010).
- 4) Duchowski, A.T.: *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*, 2nd ed., Springer-Verlag, London (2007).
- 5) Tobii 社 web サイト, 入手先<<http://www.tobii.co.jp/>>.
- 6) Ohno, T.: One-point calibration gaze tracking method, *Proc. 2006 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, p.34 (2006).
- 7) Chen, J., Tong, Y., Gray, W. and Ji, Q.: A Robust 3D Eye Gaze Tracking System using Noise Reduction, *Proc. 2008 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, pp.189-196 (2008).
- 8) Vogel, D., Cudmore, M., Casiez, G., Balakrishnan, R. and Keliher, L.: Hand Occlusion with Tablet-sized Direct Pen Input, *Proc. CHI 2009 Non-traditional Interaction Techniques*, pp.557-566 (2009).
- 9) EyeTech Digital System 社 web サイト, 入手先<<http://www.eyetechds.com/>>.
- 10) Shih, S.-W. and Liu, J.: A Novel Approach to 3-D Gaze Tracking using Stereo Cameras, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics Part B*, Vol.34, No.1, pp.234-235 (2004).
- 11) Guestrin, E.D. and Eizenman, M.: Remote Point-of-Gaze Estimation with Free Head Movements Requiring a Single-Point Calibration, *Proc. 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pp.4556-4560 (2007).
- 12) Nagamatsu, T., Kamahara, J., Iko, T. and Tanaka, N.: One-Point Calibration Gaze Tracking Based on Eyeball Kinematics Using Stereo Cameras, *Proc. 2008 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, pp.95-98 (2008).
- 13) Nagamatsu, T., Kamahara, J. and Tanaka, N.: 3D Gaze Tracking with Easy Calibration Using Stereo Cameras for Robot and Human Communication, *Proc. 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, pp.59-64 (2008).
- 14) Nagamatsu, T., Iwamoto, Y., Kamahara, J., Tanaka, N. and Yamamoto, M.: Gaze Estimation Method Based on an aspherical model of the cornea: Surface of revolution about the optical axis of the eye, *Proc. 2010 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, pp.255-258 (2010).
- 15) Arduino, available from (<<http://www.arduino.cc/>>).
- 16) 岡田知之, 渡辺富夫, 山本倫也: 下線引きを伴うプレゼンテーションの身体化における発話音声と書き込み動作タイミングの計測, 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.1937-1938 (2009).
- 17) 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).

(平成 23 年 3 月 19 日受付)

(平成 23 年 9 月 12 日採録)



佐藤 広志

2010 年関西学院大学工学部情報科学科卒業。現在、同大学大学院博士課程前期課程在学中。視線と身体動作の関係性、視線インタフェースについて興味を持つ。ヒューマンインタフェース学会学生会員。



吉田 圭介

2011 年関西学院大学工学部情報科学科卒業。同年同大学大学院博士課程前期課程入学予定。視線インタフェース、身体的インタラクション、コミュニケーション支援の研究に興味を持つ。ヒューマンインタフェース学会学生会員。



山本 倫也 (正会員)

2002 年京都大学大学院エネルギー科学研究科博士後期課程修了。同年岡山県立大学情報工学部情報システム工学科助手、2007 年同助教、2009 年関西学院大学工学部人間システム工学科准教授、現在に至る。身体的インタラクション、コミュニケーション支援の研究に従事。2005 年ヒューマンインタフェース学会論文賞、2005 年情報処理学会第 66 回全国大会大会奨励賞等受賞。ヒューマンインタフェース学会、日本バーチャルリアリティ学会、日本原子力学会 ACM 各会員。博士 (エネルギー科学)。



長松 隆 (正会員)

1996 年京都大学大学院工学研究科電気工学第二専攻修士課程修了。同年三菱重工業 (株) 入社。1999 年京都大学大学院エネルギー科学研究科寄附講座教員 (助手相当)。2000 年神戸商船大学商船学部助手。2003 年神戸大学海事科学部助手。2007 年同大学院海事科学研究科助教、2009 年同講師。ヒューマンインタフェース、視線インタフェースの研究に従事。ヒューマンインタフェース学会、日本原子力学会、ACM 各会員。博士 (エネルギー科学)。



渡辺 富夫 (正会員)

1983 年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年山形大学工学部情報工学科助手、1984 年同専任講師、1989 年同助教。1992~1993 年米国ブラウン大学客員研究員、1993 年岡山県立大学情報工学部情報システム工学科教授、現在に至る。身体的コミュニケーション、ヒューマンインタラクションの研究に従事。1998、2003 年 IEEE ROMAN, the Best Paper Award, 2001、2002、2004、2005 年ヒューマンインタフェース学会論文賞、日本機械学会設計工学・システム部門業績賞等受賞。日本機械学会フェロー、ヒューマンインタフェース学会、計測自動制御学会、日本バーチャルリアリティ学会、日本ロボット学会、日本赤ちゃん学会、日本子ども学会、IEEE 各会員。工学博士。