

エネルギー科学研究科  
エネルギー社会・環境科学専攻修士論文  
題目： Eye-Sensing HMD による  
視覚系指標の実時間計測と  
適応型 CAI への応用に関する研究

指導教官： 吉川 榮和 教授

氏名： 青竹 雄介

提出年月日： 平成12年2月7日(月)

## 論文要旨

**題目：**Eye-Sensing HMDによる視覚系指標の実時間計測と適応型CAIへの応用に関する研究

吉川榮和研究室, 青竹雄介

### 要旨：

人間と機械とが双方向に協調し、互いに一体となって高次機能発現を目指す相互適応型インタフェースの研究が注目されている。本研究は、そのような方式のCAIシステム実現のための要素技術として、リアルタイムで視点位置の推定や瞬目を検出できるEye-Sensing HMD (ES-HMD) を応用した視覚系指標分析システムを計算機上に構築し、その機能を評価実験により検証することを目的とする。

本論文では、研究の背景として相互適応型インタフェースの概要について述べ、その要素研究として機械システムが人間の内面状態を認識する技術の一つとして視点位置、瞬目といった視覚系指標に着目する背景について述べた。

次いで、本研究でインタフェースデバイスとして使用する眼球画像撮像機能付き Head-Mounted Display である ES-HMD の概要について述べ、新しく考案した ES-HMD を用いた視点位置計測方法について説明している。その具体的な方法として、ES-HMD に付属の CCD カメラによって撮像された瞳孔画像から瞳孔の中心位置を計算する方法については、撮像された瞳孔像に混入するノイズに対するロバスト性の向上を目指し、瞳孔の輪郭線上から任意の3点を50組選び、その3点から求められる円の中心の分布の中央の10点の重心を瞳孔中心とする方法を考案した。また、求めた瞳孔中心位置から画面上で注視している点を求める方法として、眼球の回転角を瞳孔中心の移動量から計算し、それに基づいて注視点位置を推定する方法を考案した。また、同時に瞬目を検出する方法も考案した。

次に考案した各方法の測定精度の評価実験を行い、視点位置の測定精度が昨年度まで採用していた方法と比較して向上していることを確認した。また、瞬目検出方法についても高い精度で瞬目の検出ができることを確認した。

さらに視点位置測定と瞬目検出機能を利用して、視線入力インタフェースシステムを開発し、その動作確認を行った結果、視点位置計測によるポインティング機能および瞬目検出機能によるクリック動作が可能であることを確認した。しかし、画面の周辺部分では動作しにくいことが分かり、提示画面の設計など実用に向けて課題が残った。この視線入力インタフェースシステムを適応型CAIシステムに応用することで、容易にユーザの注視対象が検出でき、人間の内面状態推定に利用することが可能になる。

最後に、結論として本研究を総括し、今後の課題を挙げている。

# 目次

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>第 1 章 序論</b>                                 | <b>1</b>  |
| <b>第 2 章 研究の背景と目的</b>                           | <b>3</b>  |
| 2.1 研究の背景                                       | 3         |
| 2.1.1 適応型 CAI の概要                               | 3         |
| 2.1.2 適応型 CAI への視点位置の利用                         | 6         |
| 2.2 視覚系指標を用いた従来研究                               | 7         |
| 2.3 研究の目的                                       | 9         |
| <b>第 3 章 Eye-Sensing HMD を用いたリアルタイム視点位置推定手法</b> | <b>10</b> |
| 3.1 Eye-Sensing HMD の概要                         | 10        |
| 3.1.1 映像表示系                                     | 12        |
| 3.1.2 眼球撮像系                                     | 14        |
| 3.1.3 撮像信号処理系                                   | 17        |
| 3.2 視点位置推定システムの概要                               | 19        |
| 3.2.1 視点位置推定システム構成                              | 20        |
| 3.2.2 昨年度までの問題点                                 | 20        |
| 3.3 リアルタイム視点位置推定手法                              | 21        |
| 3.3.1 瞳孔中心位置計算方法                                | 21        |
| 3.3.2 視点位置推定方法                                  | 34        |
| 3.3.3 瞬目検出方法                                    | 39        |
| <b>第 4 章 視点位置推定の評価実験</b>                        | <b>41</b> |
| 4.1 瞳孔中心位置測定精度の評価実験                             | 41        |
| 4.1.1 実験の目的                                     | 41        |
| 4.1.2 実験の方法                                     | 41        |
| 4.1.3 実験結果と考察                                   | 43        |
| 4.2 視点位置推定精度の評価実験                               | 46        |

|              |                                        |           |
|--------------|----------------------------------------|-----------|
| 4.2.1        | 実験の目的                                  | 46        |
| 4.2.2        | 実験の方法                                  | 48        |
| 4.2.3        | 実験結果と考察                                | 49        |
| 4.3          | 瞬目検出機能の評価実験                            | 61        |
| 4.3.1        | 実験の目的                                  | 61        |
| 4.3.2        | 実験の方法                                  | 61        |
| 4.3.3        | 実験結果と考察                                | 62        |
| <b>第 5 章</b> | <b>視点位置推定を利用した応用研究</b>                 | <b>67</b> |
| 5.1          | 視点位置推定方法の応用研究への展開                      | 67        |
| 5.1.1        | 適応型 CAI システムへの応用の可能性                   | 67        |
| 5.1.2        | 視線入力インタフェースへの応用                        | 68        |
| 5.2          | 視線入力インタフェースシステム (EGOS) の開発             | 70        |
| 5.2.1        | EGOS のシステム構成                           | 70        |
| 5.2.2        | EGOS の原子力プラント異常診断体験インタフェースシステム<br>への応用 | 72        |
| 5.3          | 動作確認実験                                 | 77        |
| 5.3.1        | 実験の目的                                  | 77        |
| 5.3.2        | 実験方法                                   | 78        |
| 5.3.3        | 実験結果と考察                                | 79        |
| 5.4          | EGOS の総合的考察                            | 82        |
| <b>第 6 章</b> | <b>結論</b>                              | <b>83</b> |
|              | <b>謝 辞</b>                             | <b>85</b> |
|              | <b>参 考 文 献</b>                         | <b>86</b> |

# 目 次

|      |                                  |    |
|------|----------------------------------|----|
| 2.1  | 相互適応型インタフェースにおける人間と機械の関係         | 4  |
| 2.2  | 機械から人間への適応に必要な要素技術               | 4  |
| 2.3  | 適応型CAIシステムのブロック図                 | 5  |
| 2.4  | 運転監視作業における視点動作の計測実験の様子           | 8  |
|      |                                  |    |
| 3.1  | ES-HMDの外観（前面シールド板を開けた状態）         | 11 |
| 3.2  | ES-HMDの概念図                       | 12 |
| 3.3  | ES-HMDの各ブロックの相互関係図               | 13 |
| 3.4  | 赤外線LEDを取り付けた様子                   | 15 |
| 3.5  | CCDカメラを取り付けた様子                   | 15 |
| 3.6  | 撮像された眼球画像                        | 16 |
| 3.7  | 撮像された瞳孔二値化画像                     | 17 |
| 3.8  | 瞳孔画像と対応するビデオ信号                   | 18 |
| 3.9  | 走査信号処理回路のブロック図                   | 19 |
| 3.10 | 視点位置推定システムの構成図                   | 20 |
| 3.11 | 昨年度までの瞳孔中心位置計算方法                 | 22 |
| 3.12 | ノイズやLED像が混入した場合の瞳孔画像             | 22 |
| 3.13 | ノイズが混入している瞳孔形状データ                | 24 |
| 3.14 | 新しい瞳孔中心算出方法のステップ                 | 24 |
| 3.15 | 計算された瞳孔中心位置の例1（五円硬貨）             | 27 |
| 3.16 | 計算された瞳孔中心位置の例2（被験者TO）            | 27 |
| 3.17 | 計算回数とx座標の標準偏差（五円硬貨 左眼用CCDカメラ座標系） | 28 |
| 3.18 | 計算回数とy座標の標準偏差（五円硬貨 左眼用CCDカメラ座標系） | 28 |
| 3.19 | 計算回数とx座標の標準偏差（五円硬貨 右眼用CCDカメラ座標系） | 29 |
| 3.20 | 計算回数とy座標の標準偏差（五円硬貨 右眼用CCDカメラ座標系） | 29 |
| 3.21 | 計算回数とx座標の標準偏差（被験者TO 左眼）          | 30 |
| 3.22 | 計算回数とy座標の標準偏差（被験者TO 左眼）          | 30 |
| 3.23 | 計算回数とx座標の標準偏差（被験者TO 右眼）          | 31 |

|      |                                                   |    |
|------|---------------------------------------------------|----|
| 3.24 | 計算回数と y 座標の標準偏差（被験者 TO 右眼）                        | 31 |
| 3.25 | 計算回数と x 座標の標準偏差（被験者 YA 左眼）                        | 32 |
| 3.26 | 計算回数と y 座標の標準偏差（被験者 YA 左眼）                        | 32 |
| 3.27 | 計算回数と x 座標の標準偏差（被験者 YA 右眼）                        | 33 |
| 3.28 | 計算回数と y 座標の標準偏差（被験者 YA 右眼）                        | 33 |
| 3.29 | CCD カメラ座標系を領域分割する方法                               | 35 |
| 3.30 | CCD カメラ座標系での瞳孔中心位置とディスプレイ座標系での視点位置                | 36 |
| 3.31 | キャリブレーション基準点                                      | 37 |
| 3.32 | 眼球回転角の計算方法                                        | 37 |
| 3.33 | 眼球回転角の計算方法                                        | 38 |
| 4.1  | 計算された中心位置（左眼側）                                    | 44 |
| 4.2  | 計算された中心位置（右眼側）                                    | 44 |
| 4.3  | 五円硬貨の穴の形状データと計算された中心位置（1）                         | 45 |
| 4.4  | 五円硬貨の穴の形状データと計算された中心位置（2）                         | 45 |
| 4.5  | ノイズを含んだ瞳孔形状データ                                    | 47 |
| 4.6  | 提示した参照点                                           | 49 |
| 4.7  | method1によって推定された視点位置（被験者 DK：左眼）                   | 50 |
| 4.8  | method2によって推定された視点位置（被験者 DK：左眼）                   | 50 |
| 4.9  | method1によって推定された視点位置（被験者 DK：右眼）                   | 51 |
| 4.10 | method2によって推定された視点位置（被験者 DK：右眼）                   | 51 |
| 4.11 | method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者 DK：左眼）        | 52 |
| 4.12 | method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者 DK：左眼）        | 52 |
| 4.13 | method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者 DK：左眼）        | 53 |
| 4.14 | method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者 DK：左眼）        | 53 |
| 4.15 | method1によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者 DK：左眼） | 54 |
| 4.16 | method2によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者 DK：左眼） | 54 |

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 4.17 method1によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者DK：左眼） | 55 |
| 4.18 method2によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者DK：左眼） | 55 |
| 4.19 method1によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者DK：右眼） | 56 |
| 4.20 method2によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者DK：右眼） | 56 |
| 4.21 method1によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者DK：右眼） | 57 |
| 4.22 method2によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者DK：右眼） | 57 |
| 4.23 キャリブレーションで取得したCCDカメラ座標における基準座標（被験者DK 左眼）         | 59 |
| 4.24 閉眼検出結果（両眼）                                       | 63 |
| 4.25 閉眼検出結果（左眼）                                       | 63 |
| 4.26 閉眼検出結果（右眼）                                       | 64 |
| 4.27 ES-HMDで検出可能な瞬目と一般的な瞬目                            | 66 |
| 5.1 思考過程推定システムのインタフェースウィンドウ例（サマリ画面）                   | 69 |
| 5.2 思考過程推定システムの監視パラメータ情報取得方法                          | 69 |
| 5.3 EGOSのハードウェア構成                                     | 71 |
| 5.4 EGOSのシステム構成図                                      | 72 |
| 5.5 構築したインタフェースシステムのシステム構成図                           | 73 |
| 5.6 構築したインタフェースシステムのハードウェア構成                          | 74 |
| 5.7 思考過程推定システムのインタフェースウィンドウの階層構造                      | 75 |
| 5.8 異常診断用のインタフェースウィンドウ例（サマリ画面）                        | 75 |
| 5.9 異常診断用インタフェースウィンドウ例（加圧器トレンドグラフ）                    | 76 |
| 5.10 システムの利用手順                                        | 77 |
| 5.11 仮想空間内に構築した仮想制御室                                  | 78 |
| 5.12 各ボタン位置におけるタスク終了までの所要時間                           | 81 |

# 表 目 次

|     |                              |    |
|-----|------------------------------|----|
| 3.1 | 映像表示系の仕様 . . . . .           | 13 |
| 3.2 | CCD カメラの仕様 . . . . .         | 14 |
| 3.3 | 眼球撮像系の仕様 . . . . .           | 17 |
| 3.4 | 計算回数と計算時間（五円硬貨計算時） . . . . . | 27 |
| 4.1 | 計算された中心位置の標準偏差 . . . . .     | 43 |
| 4.2 | 瞬目検出結果 . . . . .             | 64 |
| 5.1 | 画面切り替えタスク終了までの所要時間 . . . . . | 80 |



# 第 1 章 序論

最近の JCO での臨界事故や京都市内の大停電に見られるように、作業員の知識不足や作業ミスが原因で大事故が発生し、社会に多大な影響を与えるケースが増えている。このような人間と機械の接点（マンマシンインタフェース）での人的過誤対策として、運転員の負荷軽減、人的ミス防止のため、最近進歩の著しい計算機情報処理技術を適用した運転支援ツールの開発導入が進められているが、マンマシンインタフェースの高度化だけでなく、運転員の能力向上のための教育訓練法の向上も人的ミス防止に重要な課題となっている。本研究は、高度情報処理技術を運転員の教育訓練向上に適用することを目標としている。

通常、電力プラントの運転員は、教育訓練センターのような訓練施設で、プラントの物理現象やプラント構造などに関する座学で知識を学習し、その後、プラント操作盤を模擬したモックアップモデルとプラントシミュレータを用いて、運転操作や事故時対応操作を習得している。この教育訓練には、プラントの専門知識と高度な訓練技術を持った専門のインストラクターや特別の施設が必要であり、多大な時間とコストを必要とする。

本研究室では、原子力プラント運転員の教育訓練を対象に、適応型 CAI(Computer Aided Instruction) システムの開発を進めている。

この適応型 CAI システムは、原子力プラントシミュレータを用いてプラントに何らかの異常が発生した際の原因特定作業を訓練するものであり、訓練生の発話やプラント計装情報の着目箇所から異常事象診断中の思考過程を推定し、誤りや知識の欠落を適切に指摘してアドバイスを与えることで効果的な訓練を実現しようとするものである<sup>[1]</sup>。

この適応型 CAI システムを実現するためには、その要素技術の一つとして、プラント計装情報を訓練生に提示し、訓練生が着目している箇所を特定する機能が必要となる。本研究では、Eye-Sensing HMD と名付けた特別なヘッドマウントディスプレイを用いて、この機能を実現することを目指す。Eye-Sensing HMD は、本研究室で独自に開発したデバイスであり、ヘッドマウントディスプレイを頭部に装着したユーザの両眼に 3 次元映像を提示するとともに両眼の赤外線眼球画像を撮像し、その画像を二値化して瞳孔の輪郭をリアルタイムでコンピュータに取り込むことができる。本研究室

では、これまで Eye-Sensing HMD を用いて瞳孔径や視点位置計測に関する実験を行ってきたが、適応型 CAI システムに利用するためには、これまでの機能ではリアルタイム性や視点位置計測精度が十分ではなかった。そこで本研究では、Eye-Sensing HMD による視点位置計測のリアルタイム化と計測精度向上を目指して、新しい計測手法を提案し、その計測精度を評価する。

本論文では、まず第2章で研究の背景となる適応型 CAI の概念と、人間からの情報として視覚系指標に着目した背景について述べ、従来行われてきた視点位置推定に関する研究を展望し、本研究の目的を述べる。第3章では、本研究でユーザインタフェースデバイスとして使用する、本研究室で独自に開発した Eye-Sensing HMD の概要について述べ、新たに考案したリアルタイム視点位置測定方法について説明する。第4章では、本研究で考案した視点位置測定方法、および瞬目検出方法の測定精度を評価するために行った実験と、その結果について述べる。そして、第5章ではリアルタイム視点位置推定方法の応用事例として、視点位置推定と瞬目検出を利用した視線入力システムを試作し、その動作確認を行った結果について述べる。最後に、第6章で結論として本研究を総括し今後の課題をまとめる。

## 第 2 章 研究の背景と目的

本章では、まず本研究の背景として、人間と機械の双方向の交流のあり方である「相互協調」を志向する方式の適応型 CAI システムの概念を述べる。次に、その適応型 CAI の実験的研究の枠組みの中で、視点位置と瞬目の視覚系指標の応用計測に着目した背景を述べ、最後に本研究の目的を述べる。

### 2.1 研究の背景

#### 2.1.1 適応型 CAI の概要

近年の科学技術の進展にもかかわらず、原子力プラントなどの複雑・大規模な工学システムにおいてシステムの運用を行う作業員の知識不足やヒューマンエラーがもとで大事故が発生し、社会的反響を呼んでいる。

システムの安全対策として、このような事態を回避するために、過ちを犯しやすい人間要素を排除する「完全自動化」がよくいわれている。しかし、いくら「自動化」を進めてもどこかに必ず人間の関与するところがあり、「自動化」の導入を行った分だけ複雑化、大規模化したシステムの中で、人間に残されたところがエアポケットならぬ「エラーポケット」となって思わぬ大事故が発生する。原子力プラントなどのハイリスクシステムを運用する場合、機械には期待できない適応性、経験を生かした応用力のような人間の高度な対応能力を完全に排除することは、逆にリスクを高めることになる。そこで、作業員の知識不足や操作ミスの生じる可能性をできる限り減らすために、作業員の教育訓練を十分に行うことが重要になってきている。

本研究室では人間と機械とが双方向に協調して、人間とシステムとが一体となって高次のレベルでの協調を実現することを目指し、これを「相互適応型インタフェース」と称して<sup>[2][3]</sup>、次世代のインタフェースに関する基礎研究を行ってきた。相互適応型インタフェースの基本的な理念は、「人間と機械の“協応”による高次機能発現」である。具体的に言うとやや長くなるが、(1) 機械が人間より優れている場合には、機械側から元来学習や適応に富む人間の能力を一層効果的に引き出す仕組みを創出すること。また逆に、(2) 人間の方が機械より優れている場合、人間の持つ優れた知識、経験を効

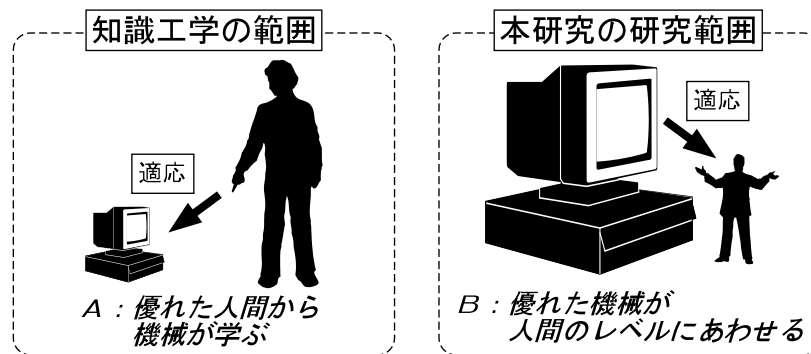


図 2.1: 相互適応型インタフェースにおける人間と機械の関係

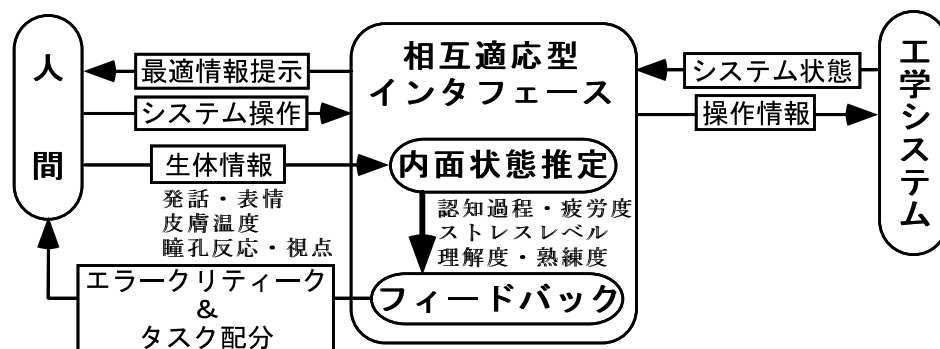


図 2.2: 機械から人間への適応に必要となる要素技術

果的に学習して機械の能力を向上させる仕組みを創出すること、と要約できる。このような人間と機械の双方の相互適応により、より高次の協調を図ろうとするものである。図2.1に相互適応型インタフェースにおける人間と機械の関係における2つの適応を示した。この図において、機械と人間の能力を比較したとき、Aでは人間>機械、Bでは機械>人間である。

このような人間と機械とが相互に適応するインタフェースの実現には、「機械が人間を知る」仕組みが必要である。本研究室では、相互適応型インタフェースで、機械が人間に適応するための技術として、図2.2に示すような機能の実現を目指して研究を進めている。その機能とは、(1)人間の各種の生体情報をリアルタイムで計測し、(2)それらの情報から的確に人間の内面状態を把握し、その時々状態に応じて(3)最適なフィードバックを行うものである。なお、生体情報には発話や表情の他に皮膚温度、脳波のような生理電気信号、瞳孔反応、視点位置のような視覚系指標など、心理生理学の領域で対象とされる広範な指標を利用している。

本研究では、相互適応型インタフェースの「機械から人間への適応」の方法論としてユーザの知識レベルと心理生理的状态に合わせた柔軟な教示を行う教育訓練システ



## 2.1.2 適応型 CAI への視点位置の利用

2.1.1で述べた特徴を持つ適応型 CAI を構成するためには、機械が人間の思考過程をリアルタイムで的確に推定することが必要不可欠である。そのため本研究では、機械が人間の生体情報から思考過程をリアルタイムで推定し、その推定された思考過程を効果的に応用することに着目している。

本研究室のこれまでの関連研究では、CRT モニタに表示されたインタフェース上でユーザがセットしたマウスカーソルの位置からその注目しているプラント計装パラメータを判断し、さらに注目するパラメータについての発話を用いてユーザの思考過程推定を行うシステムの試作を行った<sup>[5]</sup>。このシステムを用いた研究では、異常診断中のユーザの思考過程をある程度正しく追跡することが可能であった。しかし、このシステムでは、ユーザにインタフェース上の注目しているパラメータにマウスの位置をあわせることを要求する方式を採用しており、操作がどうしても不自然になってしまうという問題点があった。

そこで、本研究ではユーザインタフェースデバイスとして ES-HMD を利用することにした。ES-HMD を用いることにより、ユーザの両眼を撮像した瞳孔画像から、ユーザに違和感を与えることなくユーザのディスプレイ上での注視点を自動推定することが可能になる。また、ES-HMD は両眼に視差を与えた画像を提示することによって、3次元仮想空間を提示することが可能であるため、これを用いると臨場感の高い訓練環境の提供が可能になるという利点がある。

本研究で構築を目指している ES-HMD を利用した適応型 CAI では、具体的には、学習者であるユーザが ES-HMD に提示される仮想的な 3次元運転制御盤やインタフェース・ウィンドウ上のプラント計装パラメータなどを監視して、プラントシミュレータで発生させた、様々な異常事象の診断方法を学習することを想定している。図 2.3 に示すように、まず、ES-HMD を用いて学習者の視点位置を推定し、学習者が注目しているプラントパラメータを推定する。それと同時に、学習者の発話を音声認識パーソナルコンピュータ（Personal Computer : PC）により自動認識する。そして、この注目パラメータと発話の履歴から学習者の思考過程をリアルタイムで推定する。この CAI システムは、このような人間の思考状態のリアルタイム推定の一方、プラント異常を自動診断する機能をもたせ、常時、その診断結果と学習者の思考過程を比較することによって、学習者に適切な教示を与えるというものである。

本論文の研究では、このような適応型 CAI システムの要素技術である、ユーザの視点位置を推定し、リアルタイムで分析し、ユーザが提示された画面内のどのパラメータ

から情報を取得しているかを推定することを研究対象とする。本研究の範囲をまとめると図 2.3 に※で示す部分である。したがって適応型 CAI システムの全体構成のうち、本論文では、ES-HMD を用いた視点位置推定の新しい方法を提案し、その推定精度の評価実験と結果の分析について述べ、最後に、適応型 CAI システムの具体的な構成方法について検討する。

## 2.2 視覚系指標を用いた従来研究

本節では、視覚系指標、特に視点位置に関する従来研究について説明する。

以下に代表的な視点位置計測方法を述べる<sup>[6][7]</sup>。

- EOG 法

眼球の周囲の顔面皮膚上に固定した電極により、角膜と網膜間の定常的電位差を測定する方法である。直流増幅器で眼位を測定する。左右各約 40 度という広範囲の水平眼球運動をほぼ直線的に検出できる。しかし、この方法は垂直運動には、あまり有利な方法ではない。また、電極に顔面の筋電位が混入することがあるため、高い精度は期待できず注視点の同定などには不向きである。被験者に直接電極を貼るため、頭部運動により誤差が生じることはないが、被験者への負荷が大きいという短所がある。

- リンバストラッカー法

角膜(黒)と強膜(白)の光学的反射特性の違いを利用する方法で、比較的高い空間分解能が得られる。しかし、大きな眼球運動では入出力特性が飽和する短所もある。

- 角膜反射法

角膜を凸面鏡としてできる光源像を、TV カメラなどのセンサーで検出する方法である。2次元的な眼球運動が容易に記録でき、視野映像などと重畳することも可能である。「アイカメラ」として一般的に知られている。

以上の方法は、実世界での被験者の視点位置を測定・記録する方法として利用されている。

次に、視点位置情報を利用した研究には以下のようなものがある。

本研究室では以前、原子力プラントシミュレータを用いた異常診断タスクにおけるオペレータの視線の動きを Eye mark recorder (EMR) により追跡し、オペレータの推



図 2.4: 運転監視作業における視点動作の計測実験の様子

論の流れを推定する研究を行った<sup>[8]</sup>。この研究では、原子力プラントシミュレータ上での異常診断を対象としている。具体的には、エキスパートである被験者がモニタ画面に提示された情報からプラント異常の兆候を検知し、各パラメータを監視し一定時間内に異常原因を同定するというタスクを行う。このときの被験者の視点位置を記録しておき、事後分析により得た視点位置情報、操作履歴、およびアンケート結果から、被験者の推論過程を推定するというものである。

この研究ではEMRを用いて視点位置を計測し、画面内の視点位置をビデオテープに録画した。データ分析は人手によるビデオ起こしが必要であり、大変な労力を要した。

実際のプラント運転員のヒューマンエラー防止のための研究として、運転員訓練センターで訓練中の運転員の視点位置データの解析も行われている。図2.4に、運転監視作業における視点動作の計測実験の様子を示す<sup>[9]</sup>。ちなみに、このような訓練を適応型CAIを用いて仮想空間に構築した仮想制御室内で行い、さらにES-HMDで視点位置解析を行えば、訓練センターも訓練シミュレータも必要がなくなる。

視点位置計測に関する研究は、本研究室では昨年度までに2つの方法が試みられている。

- ES-HMDを利用した視点位置推定<sup>[10][11]</sup>

眼球画像撮像機能付きHMDであるES-HMDを用いて、CCDカメラにより撮像さ



れた瞳孔画像の位置変化によって、提示された画面内における視点位置を推定する方法。この方法に関しては、次章で詳しく説明する。

- 強膜反射法による視点位置測定<sup>[12]</sup>

眼球に赤外線LEDからの赤外線を照射し、眼球からの赤外線の反射光を赤外線フォトトランジスタによって受光させる方法。強膜(白眼)の多い部分に赤外線LEDから照射される赤外線が入射しているときは、反射光量が多いため赤外線フォトトランジスタの出力値は高くなる。一方、角膜(黒目)の多い部分に赤外線LEDから照射される赤外線が入射しているときは、反射光量が少いため赤外線フォトトランジスタの出力値は低くなる。この原理を利用して赤外線受光量から視線方向を推定する方法である。この方法では、詳細な視点位置推定は困難であり、中央、左右上下の5方向の検出をするのみであった。

## 2.3 研究の目的

本研究では、適応型CAIシステム実現のための要素技術として、リアルタイムで視点位置推定、瞬目の検出が可能な方法を考案し、その方法を応用した視覚系指標分析システムを計算機上に構築し、その測定精度を評価実験により検証することを目的とする。

また、構築したシステムの応用例として、原子力プラントに異常が発生した場合の原因診断知識の専門教育を対象とした適応型CAIに応用し、ユーザがインタフェース上でどの計装パラメータを注目しているかを知るために、画面上の視点位置を検出し、ユーザの思考過程の推定に利用する方法について検討する。さらに視点位置推定と瞬目検出を利用して視線入力インタフェースとしての利用法についても検討する。

## 第 3 章 Eye-Sensing HMD を用いたリアルタイム視点位置推定手法

本章では、まず本研究で使用する ES-HMD の概要について述べる。次いで ES-HMD を用いた視点位置推定方法に関し、本研究室で昨年度まで用いた方法とその問題点について述べ、その問題点を解決するために本研究で新たに考案した方法について説明する。

### 3.1 Eye-Sensing HMD の概要

本節では、ES-HMD の仕様について述べる。本研究で用いた ES-HMD は島津製作所製の STV-E をベースに本研究室で独自に開発したものであり、CRT を用いた映像表示系に加えて、眼球を照射するための赤外線 LED と撮像用の赤外線モノクロ CCD カメラ（垂直走査周波数約 60 Hz）およびレンズによって構成される眼球撮像系、撮像した瞳孔画像をリアルタイム処理する撮像信号処理系、および瞳孔位置、瞬目などの計算を行う PC から構成される<sup>[13]</sup>。ES-HMD の外観を図 3.1 に、ES-HMD の概念図を図 3.2 に、ES-HMD の各ブロックの相互関係を図 3.3 に示す。



図 3.1: ES-HMD の外観（前面シールド板を開けた状態）

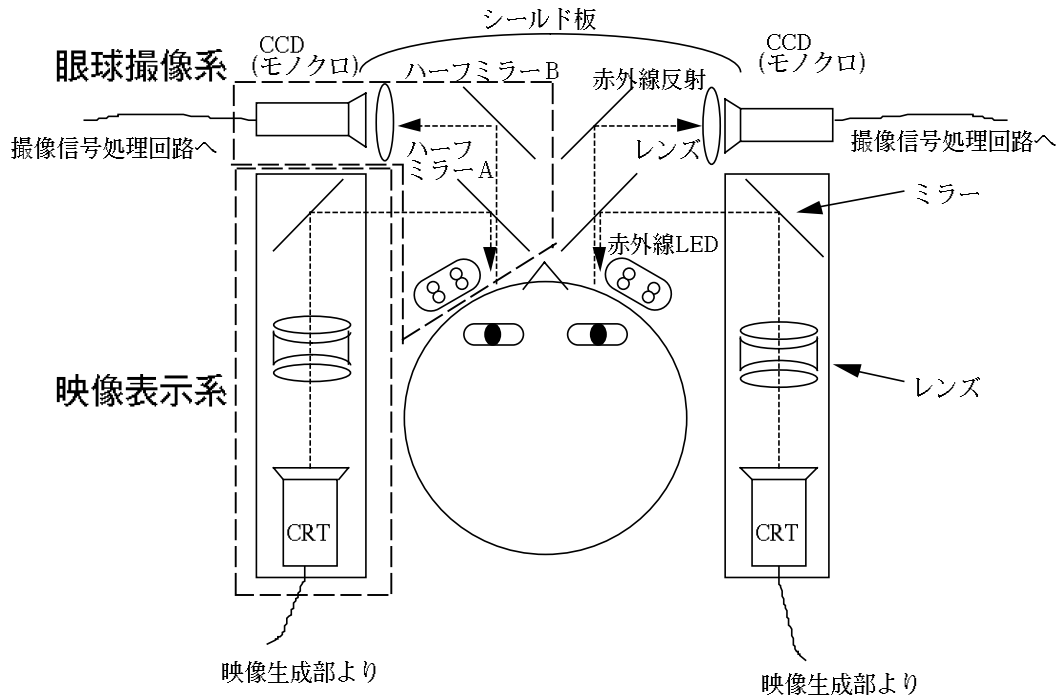


図 3.2: ES-HMD の概念図

以下では、各ブロックについて順に説明する。

### 3.1.1 映像表示系

映像表示系の機能は、ES-HMDの装着者への映像の提示を行うことである。映像表示系の仕様を表3.1に示す。表示管として用いたCRTは左右両眼用に各1つずつ両側頭部に配置され、瞳孔間距離に対応した視差を持つ映像を両眼に提示することにより立体視が可能である。CRTへの入力信号フォーマットはNTSCビデオ信号である。

CRTに表示された映像は、レンズおよびハーフミラーからなる光学系によって映像の虚像位置が装着者の1m先になるように設計されている。提示される映像の画角は水平方向が48 deg、垂直方向が36 degであり、これは約43.5 inchのTV画面を見るのと同等の視野を有する。また、CRTを左右側頭部に配置し、ハーフミラーを用いることによって、ES-HMDを装着した状態で前面のシールド板を開けることで、CRTの映像と外界の両方を見ることが可能となるシースルー機能を持つ。

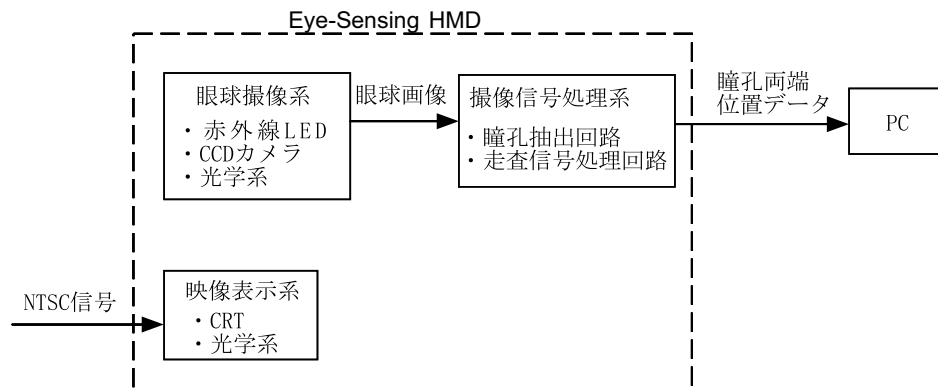


図 3.3: ES-HMD の各ブロックの相互関係図

表 3.1: 映像表示系の仕様

|       |                       |
|-------|-----------------------|
| 表示管   | CRT                   |
| 視野角   | 水平 48 deg × 垂直 36 deg |
| 輻輳角   | 0 deg 固定              |
| 焦点距離  | 1 m                   |
| 水平解像度 | 350 TV 本以上            |
| 表示輝度  | 10 $f_L$ 以上           |

表 3.2: CCD カメラの仕様

|            |                             |
|------------|-----------------------------|
| CCD の有効解像度 | 水平 6.54 mm × 垂直 4.89 mm     |
| CCD の有効画素  | 水平 768 × 垂直 494             |
| CCD の解像度   | 水平 570 TV 本 × 垂直 350 TV 本   |
| 走査方式       | 2:1 インタレース                  |
| 走査周波数      | 水平 15.734 kHz , 垂直 59.94 Hz |
| レンズ焦点距離    | 24.0 mm                     |
| レンズ・眼球間距離  | 145 mm                      |

### 3.1.2 眼球撮像系

眼球の撮像は、赤外線 LED により眼球を照射し、その反射光を CCD カメラで撮像することにより実現している。これは、人間の網膜は赤外光に対して感受性がないことから、網膜に入射する赤外光により CRT の映像に影響を及ぼさないためである。赤外線 LED は両眼直前の視界外の位置に上下各 5 個ずつ配置し、眼瞼による影が極力小さくなるようにした。CCD カメラはシースルー機能実現のため、顔の両側に配置し、撮像レンズとハーフミラーによって眼球の撮像を行う。使用した CCD カメラと撮像レンズは東芝製の LK-M41MR と JK-L24M2 である。

CCD カメラの仕様を表 3.2 に、赤外線 LED の配置を図 3.4 に、CCD カメラの配置を図 3.5 に、撮像された眼球画像を図 3.6 にそれぞれ示す。

表 3.2 に示した CCD カメラの仕様のうち有効撮像領域、分解能、走査周波数およびレンズの焦点距離により、視覚系指標の時間分解能や空間分解能が決定される。

#### 時間分解能

時間分解能は、表 3.2 より垂直走査周波数が 59.94 Hz であることから、約 16.7 msec となる。人間の眼球運動の中で最も高速なサッケード運動は約 20～100 msec の間持続するので、サッケード中の眼球状態を解析するのは困難であるが、視点位置や比較的低速である眼球運動や瞳孔の収縮・散大や瞬目（まばたき）生起を計測対象とする場合は、この時間分解能で十分である。

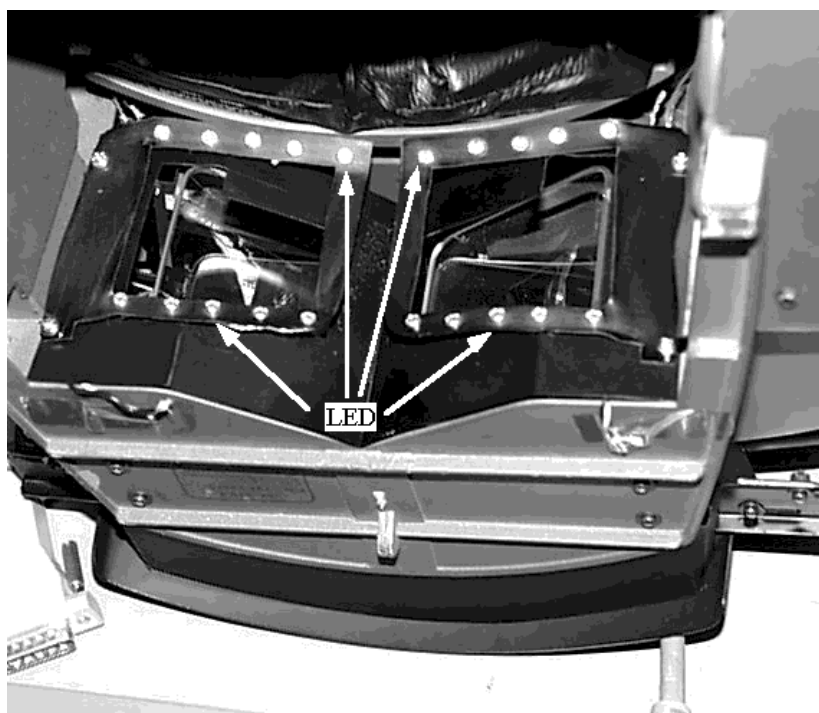


図 3.4: 赤外線LEDを取り付けた様子

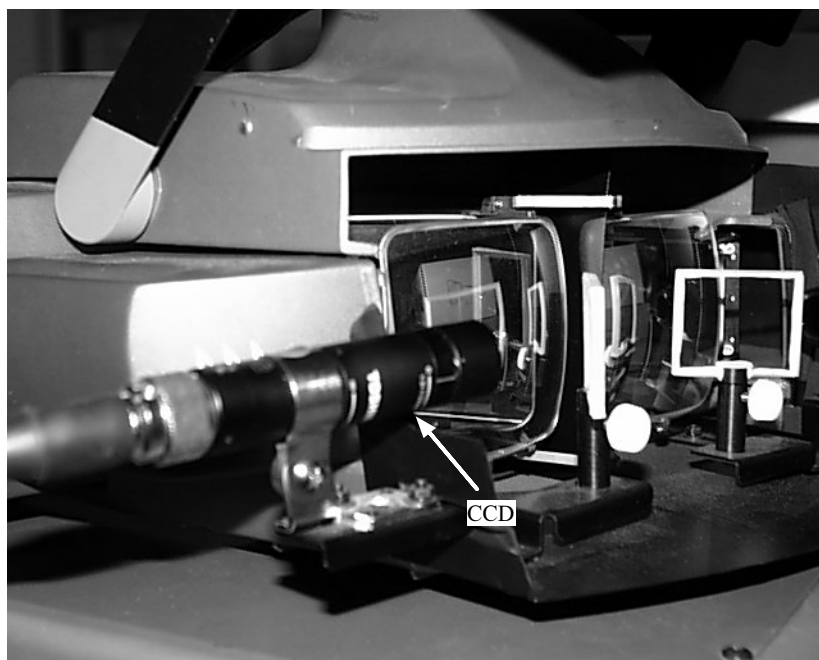


図 3.5: CCDカメラを取り付けた様子

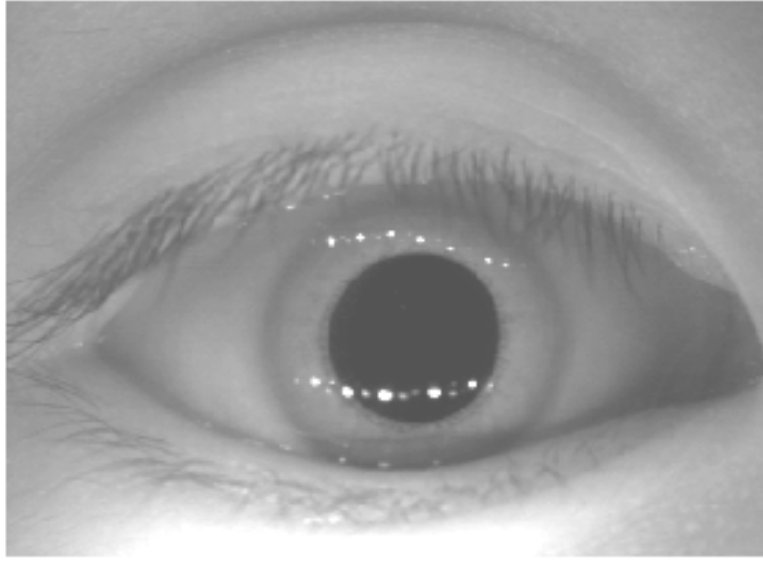


図 3.6: 撮像された眼球画像

### 空間分解能

空間分解能は水平方向と垂直方向とで異なる。水平方向に関しては、表 3.2 より、CCD カメラの水平解像度が 570TV 本であるので、画面の縦横比が 3:4 である NTSC ビデオ信号仕様では、

$$570 \times \frac{4}{3} = 760[\text{本}] \quad (3.1)$$

が水平解像度となる。CCD カメラの水平撮像領域は実測により 35.5 mm であるので

$$H_{res} = \frac{35.5}{760} = 0.0467[\text{mm}] \quad (3.2)$$

が眼球撮像系における水平位置分解能である。

垂直方向に関する位置分解能は、NTSC 仕様の水平走査線数によって決まり、垂直帰線期間を除いた 1 フィールドあたりの有効走査線 242.5 本であることと、表 3.2 の有効解像度より

$$V_{res} = \frac{4.89}{6.54} \times \frac{35.5}{242.5} = 0.109[\text{mm}] \quad (3.3)$$

が垂直位置分解能となる。眼球撮像系の仕様をまとめたものを 表 3.3 に示す。



表 3.3: 眼球撮像系の仕様

|       |                            |
|-------|----------------------------|
| 撮像範囲  | 水平 35.5 mm × 垂直 26.5 mm    |
| 位置分解能 | 水平 0.0467 mm × 垂直 0.109 mm |
| 時間分解能 | 16.7 msec                  |

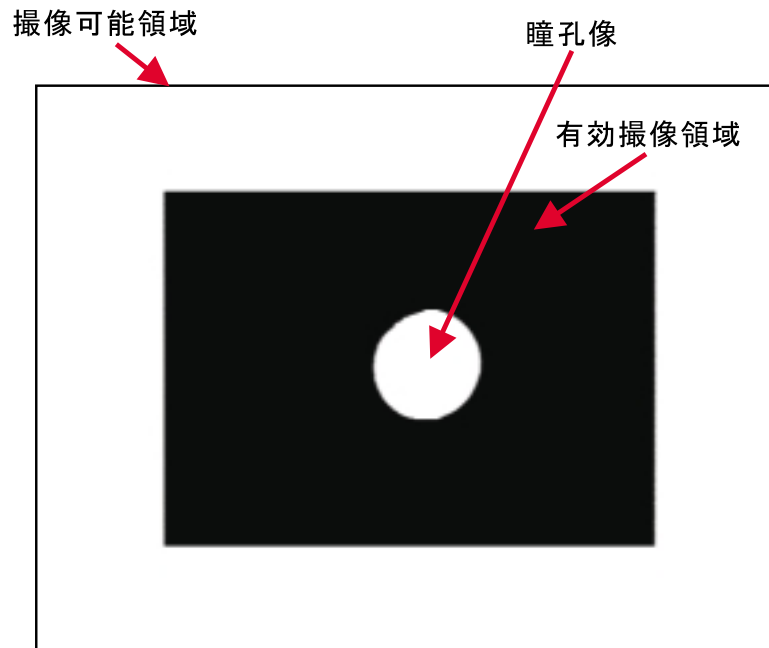


図 3.7: 撮像された瞳孔二値化画像

### 3.1.3 撮像信号処理系

撮像信号処理系では、眼球撮像系で得られた眼球画像より瞳孔部分を抽出し瞳孔形状に関する情報を算出する。CCD カメラにより得られる NTSC ビデオ信号をハードウェア処理することにより計算機の負荷を軽減してリアルタイム化を実現し、CCD カメラによる瞳孔の形状情報を PC に出力する。眼球表面において瞳孔部分では赤外光の反射率がそれ以外の部分と比較して小さいため、眼球撮像系の出力では黒い部分として現れ、閾値を適切に設定することにより、眼球画像から瞳孔部分を抽出することが可能である。図 3.7 にハードウェア処理により反転二値化した瞳孔像を示す（反転二値化したため瞳孔部分が白くなっている）。

白黒反転後の瞳孔画像と走査信号の様子を図 3.8 に示す。図のように、得られた瞳孔画像における各水平走査信号中の瞳孔部分に相当する位置を抽出し、次の水平走査を

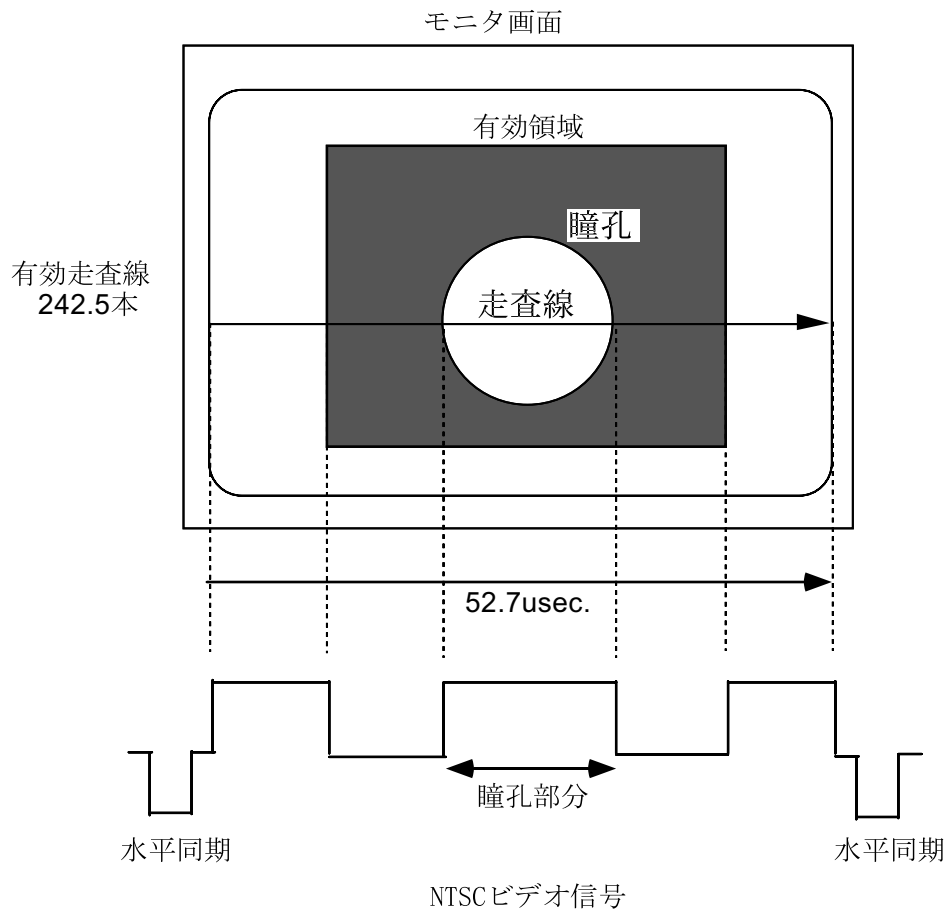


図 3.8: 瞳孔画像と対応するビデオ信号

行っている間にそれらの位置データをPCに送信する。走査信号処理回路は、図3.9に示すように、画像同期分離ブロック、白黒反転ブロック、コンパレータブロック、カウンタブロック、ドットクロックブロック、タイミング生成ブロック、有効領域設定ブロックからなる。画像同期ブロックでは、NTSCビデオ信号の水平・垂直同期部を検出し分離する。タイミング生成ブロックでは、上の同期信号を基準として各種タイミングを決定する。コンパレータブロックでは、各水平走査信号中の瞳孔部分の両端点のトリガを生成し、カウンタブロックのカウント制御信号とする。カウンタブロックではドットクロックブロックで生成される高周波クロックのカウントをカウント制御信号に制御される形でカウントする。ドットクロックブロックでは、オシレータによってクロックを生成する。このクロック周波数は空間位置分解能を決定する要因となる。有効領域設定ブロックでは、眼球周辺の影を排除するために、眼球運動範囲に合わせてCCDカメラの撮像領域から信号処理の対象とする有効領域を図3.7のように設定する。

図3.9のドットクロックブロックは瞳孔端点位置の計数単位となる。クロック周波数

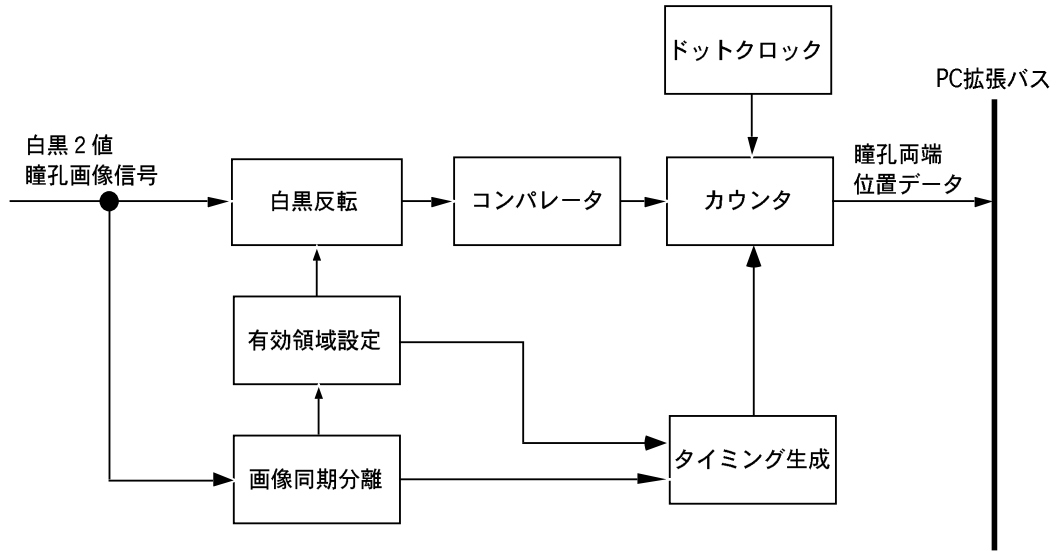


図 3.9: 走査信号処理回路のブロック図

が小さすぎると式 (3.2) で示される CCD カメラの最高分解能を生かせなくなり、大きすぎると高周波ノイズの対策が必要となる。クロック周波数  $f$  は、1 水平走査線上から水平帰線期間を除いた時間  $52.7 \mu\text{sec}$  を用いて

$$f \geq \frac{35.5}{52.7 \times 0.0467} = 14.4 [\text{MHz}] \quad (3.4)$$

を満たせば CCD カメラの解像度を十分に生かせる。ここでは  $16.0 \text{ MHz}$  に固定した。このときの計数単位  $T_h$  は次のようになる。

$$T_h = \frac{35.5}{52.7 \times 16.0} = 0.0421 [\text{mm/dot}] \quad (3.5)$$

一方、垂直方向に関する計数単位  $T_v$  は、眼球撮像系の垂直分解能  $V_{res}$  に相当し、

$$T_v = 0.109 [\text{mm/dot}] \quad (3.6)$$

となる。本研究では、dot から mm への変換を行う際の計数単位として、上記の値を用いることとする。また CCD カメラ上の各位置データは水平・垂直方向共に単位を mm とする。

## 3.2 視点位置推定システムの概要

本節では、3.1 で説明した ES-HMD を用いて構成した視点位置推定システムの概要について説明する。

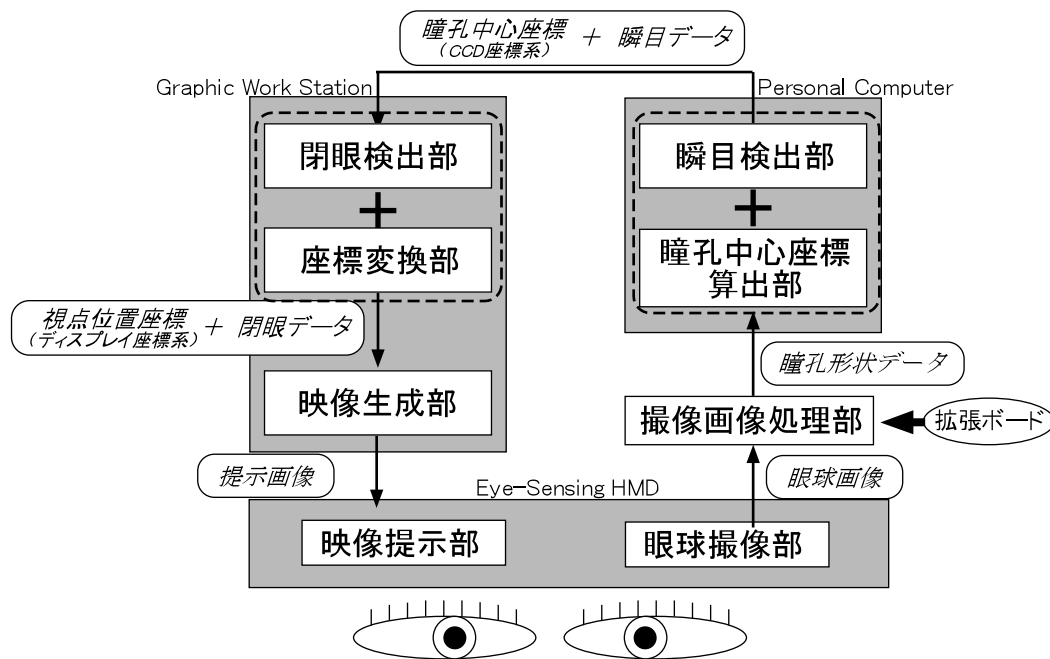


図 3.10: 視点位置推定システムの構成図

### 3.2.1 視点位置推定システム構成

視点位置推定システムの構成を図3.10に示す。ES-HMDの眼球撮像部で撮像された眼球画像は撮像画像処理部でハードウェア処理され、瞳孔形状データとしてPCに入力される。PCでは入力された瞳孔形状データから、CCDカメラ上での瞳孔中心位置（CCDカメラ座標系での瞳孔中心座標）を計算、さらに瞳孔形状データから瞬目生起のタイミングを検出する。次に、算出されたCCDカメラ座標系での瞳孔中心座標はグラフィックワークステーション（Graphic Work Station：Graphic WS）に送られる。Graphic WSはES-HMDに提示する画像を作成すると共に、入力されたCCDカメラ座標系での瞳孔中心座標を提示画像上の（ディスプレイ座標系での）視点位置に変換する。このようにして求められた提示画像上の視点位置はユーザの思考過程推定に利用される。また、瞳孔形状データの有無で瞬目を検出し、瞬目を利用した視線入力などの処理を行う。

### 3.2.2 昨年度までの問題点

昨年度までのシステムはリアルタイムで瞬目、瞳孔径、視線方向などのデータの計測は可能であったが、視点位置はリアルタイムで推定できず、計測後の事後分析によって視点位置を解析していた。さらにGraphic WSで生成された提示画像と視点位置と

の対応もとれていなかった。

本研究では、視点位置推定を適応型CAIシステムに応用することを目指しているため、ユーザの視点位置を利用してユーザの思考過程をリアルタイムで推定することが前提となる。したがって、ES-HMDで撮像された瞳孔像から、CCDカメラ座標上での瞳孔の中心位置を計算し、その瞳孔中心位置からリアルタイムで提示画像上（ディスプレイ座標系）の視点位置を推定するために、CCDカメラ座標系での瞳孔中心位置とES-HMDのディスプレイ座標系での視点位置との対応を計算する新しい方法が必要となる。以下、本研究で考案した新しい視点位置推定方法を3.3で詳しく説明する<sup>[15]</sup>。

### 3.3 リアルタイム視点位置推定手法

視点位置推定を実現させるためには、3.2で述べたように、大きく分けて以下の2つの処理をリアルタイムで行う必要がある。

1. CCDカメラ座標系における瞳孔中心座標の算出
2. CCDカメラ座標系における瞳孔中心座標のディスプレイ座標系への座標変換

以下に、それぞれの段階について説明する。

#### 3.3.1 瞳孔中心位置計算方法

##### 昨年度までの方法とその問題点

ES-HMDの撮像信号処理系では、CCDカメラによる撮像画面を水平走査して瞳孔の輪郭を抽出している。昨年度まで瞳孔中心位置は、図3.11に示すように、1画面ごとにすべての水平走査終了時における各水平走査線中の瞳孔検知開始位置 $(x_{li}, y_i)$ と終了位置 $(x_{ri}, y_i)$ の差 $(x_{li} - x_{ri})$ が最大となるものを瞳孔径を与える水平走査線とし、その中点の座標 $(\frac{x_{li} + x_{ri}}{2}, y_i)$ を瞳孔中心位置としていた。

この方法では、撮像信号処理系によりPCへ入力されたデータから、瞳孔中心位置を求める方法を実現することは容易である。しかし、図3.12に示す画像のように、瞳孔径を与える瞳孔中心付近にLEDの輝点や睫毛の影などのノイズ成分が混入した場合に、正確な瞳孔中心位置が推定できない可能性がある。

そこで、本研究では瞳孔中心位置計算時のノイズに対するロバスト性を向上するため、瞳孔中心位置をリアルタイムで計算する新たな方法を考案した。以下でこの方法について説明する。

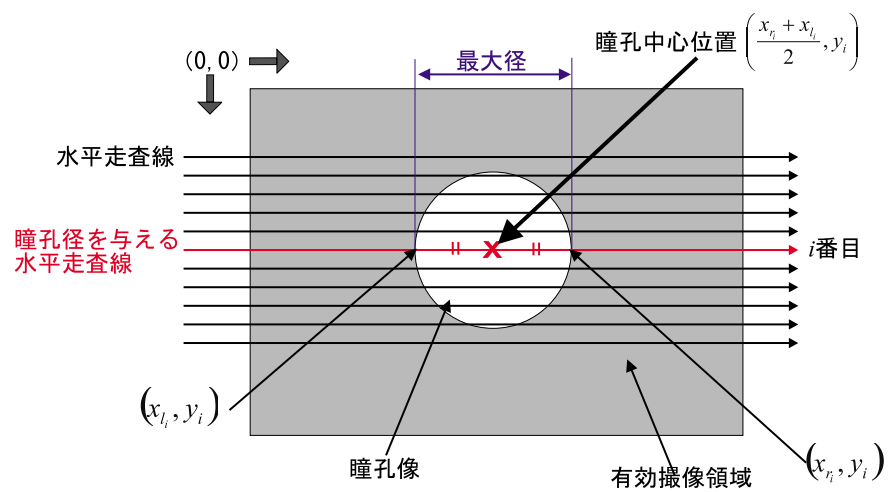


図 3.11: 昨年度までの瞳孔中心位置計算方法

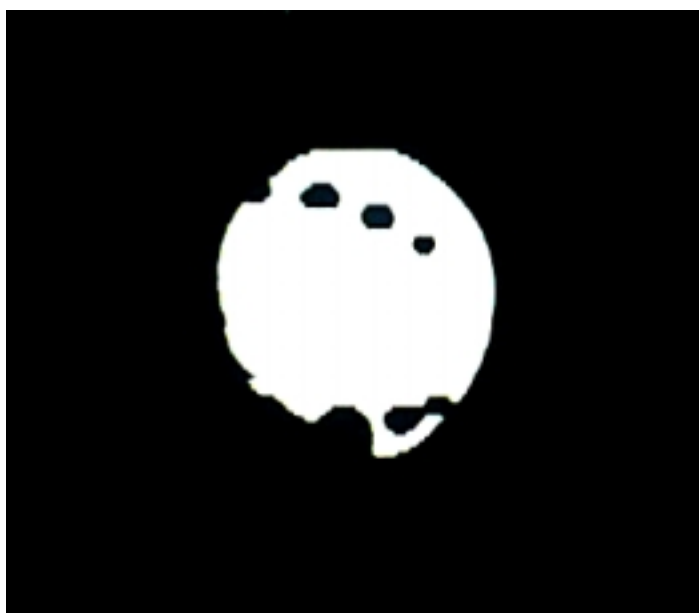


図 3.12: ノイズやLED像が混入した場合の瞳孔画像

## 新しい瞳孔中心位置計算方法

CCD カメラによって撮像される人間の瞳孔はほぼ円形である。また、撮像された瞳孔像にノイズが混入している場合に撮像信号処理系から PC に入力される瞳孔形状データは水平走査時の瞳孔検知開始位置座標と終了位置座標であり、瞳孔像の輪郭部分の座標である。実例を示すと図 3.13 のようなデータである。これは、ノイズ成分の影響を受けていない円形の輪郭部分に、一部ノイズの影響を受けた部分が含まれている形状になっている。

そこで、CCD カメラによって撮像された瞳孔像が円形であると仮定し、以下のよう手順で瞳孔の中心座標を計算する。

1. 瞳孔の輪郭線上から無作為に 3 点を抽出する。
2. その 3 点から決定される円の中心座標を求める。
3. 1 と 2 の処理を  $n$  回繰り返し、円の中心座標の分布を求める。
4. 3 で求めた円の中心座標の分布うち、水平方向の両端から  $n/5$  個ずつを削除する。
5. 4 で残った円の中心座標の分布のうち、さらに垂直方向の両端から  $n/5$  個ずつを削除する。
6. 最終的に残った  $n/5$  の座標群の重心座標を、CCD カメラ座標上での瞳孔中心座標とする。

具体的な手法を以下に説明する。

式 (3.5)、(3.6) より、CCD カメラの位置分解能の計数単位は水平分解能が 0.0421 mm/dot、垂直分解能が 0.109 mm/本であるので、検出された CCD カメラ座標系での輪郭部分の  $x$ 、 $y$  座標とそれらの値の積を求めることにより、実際の眼球の大きさが抽出できる。

1 では、計数単位によって変換された輪郭線上の点から無作為に 3 点を選択し、それぞれの座標を  $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$  とする。

2、3 では、選択された 3 点から、その 3 点によって決定される円の中心位置  $(X, Y)$  を次の式 (3.7)、式 (3.8) より求める。

$$X = \frac{(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)(y_2 - y_3) + (y_2^2 - y_3^2 + x_3^2 - x_2^2)(y_1 - y_2)}{2\{(x_2 - x_1)(y_2 - y_3) - (x_3 - x_2)(y_1 - y_2)\}} \quad (3.7)$$

$$Y = \frac{(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)(x_2 - x_3) + (y_2^2 - y_3^2 + x_3^2 - x_2^2)(x_1 - x_2)}{2\{(x_3 - x_2)(y_1 - y_2) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3)\}} \quad (3.8)$$

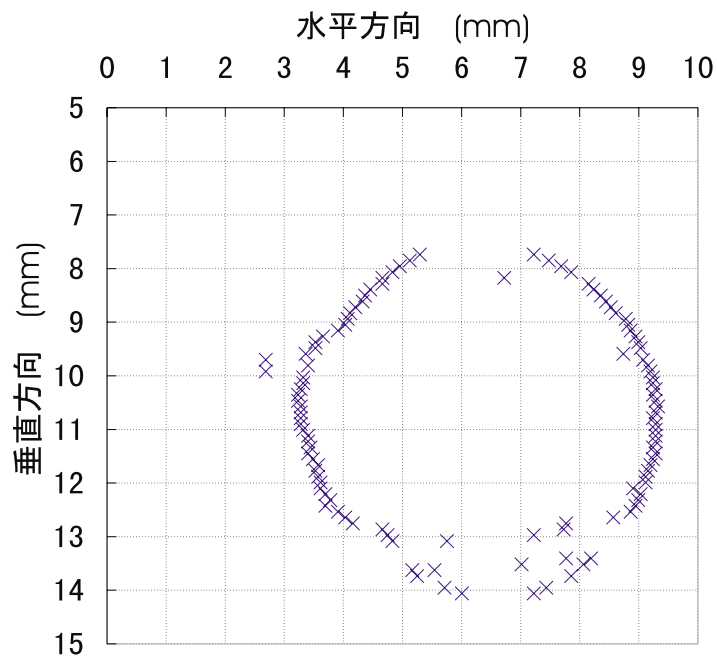


図 3.13: ノイズが混入している瞳孔形状データ

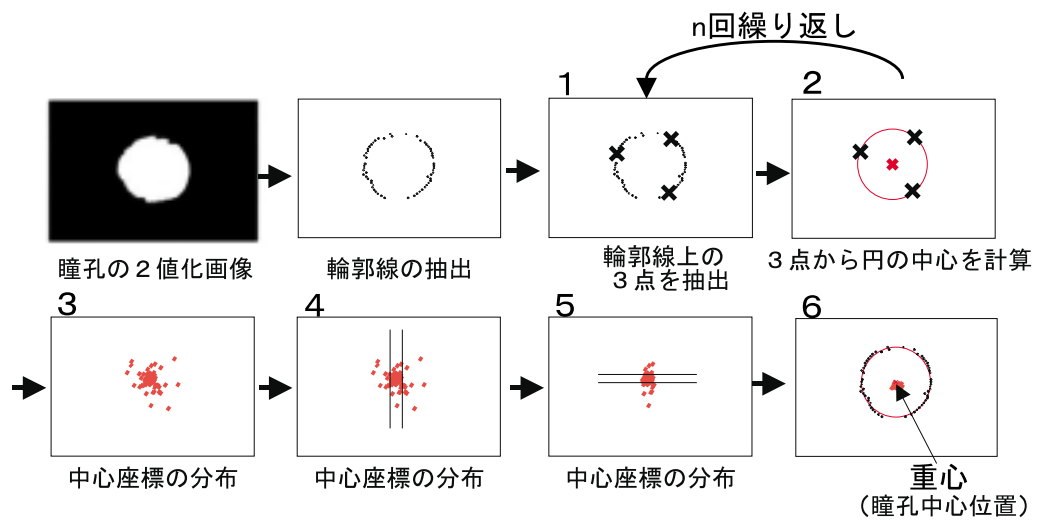


図 3.14: 新しい瞳孔中心算出方法のステップ



そして以上の手順、すなわち、無作為に3点抽出し、円の中心位置を求める計算を  $n$  回繰り返して、 $n$  個の円の中心座標  $(X_i, Y_i)$ 、 $(i = 1, 2, 3, \dots, n)$  を求める。

4では、3で求めた  $n$  個の円の中心位置のサンプルを  $x$  座標について昇順に並べ替え、その両端から  $n/5$  個ずつサンプルを取り除く。

5では、さらに残った  $3n/5$  個のサンプルを今度は  $y$  座標について昇順に並べ替え、両端から  $n/5$  個ずつを取り除くことによって、中央付近の  $n/5$  点を得る。

6では、この残った  $n/5$  個のサンプルについてその重心位置を求めて、その重心位置を撮像された瞳孔の中心位置とする。

以上の処理により、元の  $n$  個のサンプルの  $(X, Y)$  分布の周辺部のノイズ成分が取り除かれて、ノイズの影響にロバストな瞳孔中心位置の推定が行えることが期待される。

以上の各ステップの計算手順の実行例を図3.14に示した。この場合赤色でプロットしたものが各ステップで計算した結果であり、ステップ6の図より、本手法で求めた瞳孔中心位置から推定した瞳孔形状が瞳孔の二値化画像から求めた輪郭によく一致すればよい。

## 円の計算回数の評価

3.3.1で述べた瞳孔中心座標の計算方法において、瞳孔の輪郭線上の3点から円の中心を  $n$  回計算するとしたが、この  $n$  はある程度大きくないとロバスト性の向上は期待できないが、一方、リアルタイム処理を実現するには計算回数を抑える必要がある。そこで、3.3.1で述べた方法を用いた瞳孔中心位置算出システムを作成し、最適な  $n$  を決定するための実験を行った。

### (実験方法)

瞳孔中心座標の計算回数を10、30、50、70、100回の計5種類設定し、各計算回数に対してそれぞれ200フレームずつ瞳孔中心を計算する。測定対象としては、A：擬似瞳孔（直径5mmで均一である五円硬貨の穴を利用）およびB：裸眼で視覚異常のない男子大学院生2名（被験者TO、YA）に対して行った。A、Bそれぞれの実験方法は以下である。

- Aでは擬似瞳孔をES-HMDを装着したときに眼球が配置される位置に固定し、各計算回数について瞳孔中心位置を計算した。
- Bでは被験者の瞳孔中心位置の測定は、ES-HMDのCRTディスプレイの中央部分

に十字カーソルを提示し、そのカーソルを注視しているときの瞳孔中心位置を計算した。被験者には測定中は瞬目をしないように指示し、測定中に瞬目の発生がないことをCCDカメラにより撮影された映像で確認した。

#### （実験結果と考察）

計算された瞳孔中心の200フレーム分のCCDカメラ座標系での分布の例を、A、Bについてそれぞれ図3.15、図3.16に示す。ここでは算出された200フレーム分の瞳孔中心座標について、連続する過去3フレームの中央値をとるメディアンフィルタ処理を行っている。これは、ES-HMDからPCに入力されたデータ数が少ない場合やデータが入力されていない場合に発生するノイズを抑えるためである。計算回数を10回から100回まで変えた場合の200フレームの中央位置の測定計算に要した時間を表3.4に示す。

一方、測定された200点の瞳孔中心座標の $x$ 座標、 $y$ 座標のそれぞれに対し標準偏差を求めた。この場合、標準偏差は中央位置測定の際のばらつきを表す指標となる。メディアンフィルタ処理を行わない場合と行う場合について、A、Bそれぞれの場合の中心位置の標準偏差 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ を求めた結果を図3.17～3.28に示す。五円硬貨の計算結果はES-HMDの撮像画像処理系の処理ボードが左眼用と右眼用で仕様が若干異なるため、左眼、右眼それぞれの結果を示した。

図3.15、図3.16より、計測された瞳孔中心座標にメディアンフィルタ処理を施していない場合には、200点中数点明らかにノイズを含んだ点が含まれている。これは実際の瞳孔を測定した場合だけでなく、眼瞼の影やLEDの輝点の写り込みなどの生じることのない擬似瞳孔についても同様の結果がみられる。しかし、図3.15、図3.16では、メディアンフィルタ処理を施した場合には、これらのノイズ成分が除去されていることが分かる。また、標準偏差 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ のデータを見ても、明らかにメディアンフィルタ処理を施すことによって、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ が小さくなっており、ノイズ成分が抑えられていることがわかる。なお、メディアンフィルタ処理のため、計算時間が余分にかかる可能性があるが、表3.4から、メディアンフィルタ処理を施した場合についても、処理速度は50Hz程度で、リアルタイム性にも影響はない。以上より、実際に瞳孔中心位置算出にメディアンフィルタ処理を施すことにした。

一方、算出された瞳孔中心位置の標準偏差 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ の計算回数に対する依存性では、計算回数が50回以下では $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ は若干大きくなるが、それより回数が大きくなると、あまり差もみられず、計算時間も約57Hzでほぼ一定になっている。以上より、本研究では計算回数 $n$ を50とした。

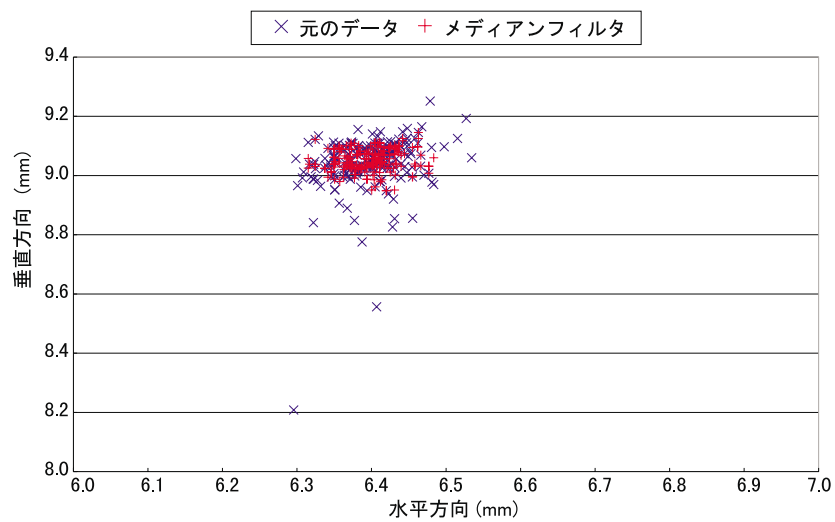


図 3.15: 計算された瞳孔中心位置の例1（五円硬貨）

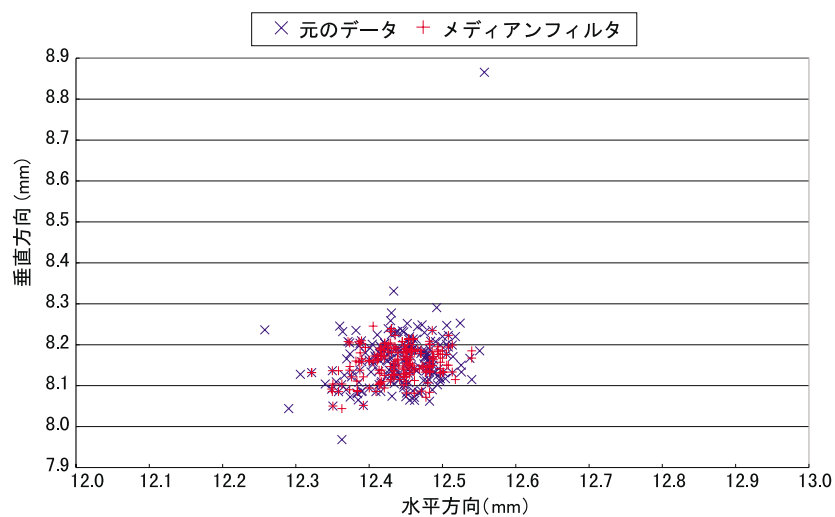


図 3.16: 計算された瞳孔中心位置の例2（被験者 TO）

表 3.4: 計算回数と計算時間（五円硬貨計算時）

| 計算回数 (回) | 計算時間 |
|----------|------|
| 10       | 3秒56 |
| 30       | 3秒53 |
| 50       | 3秒41 |
| 70       | 3秒53 |
| 100      | 3秒47 |

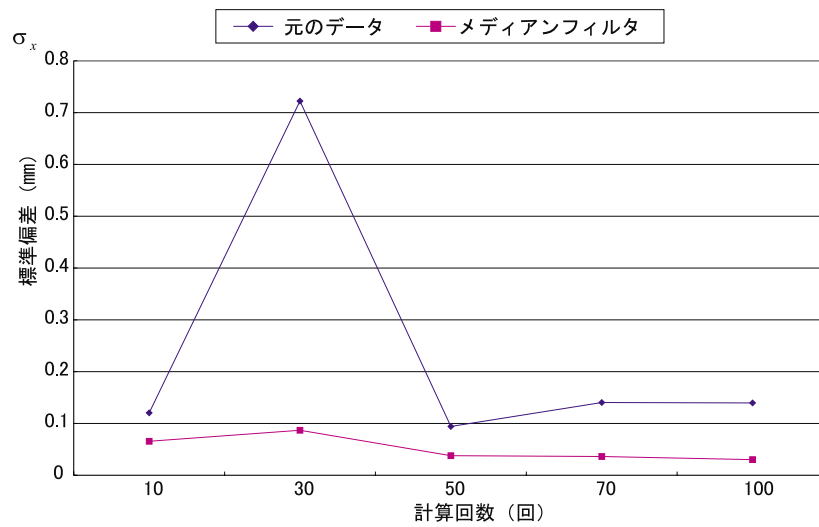


図 3.17: 計算回数と x 座標の標準偏差（五円硬貨 左眼用 CCD カメラ座標系）

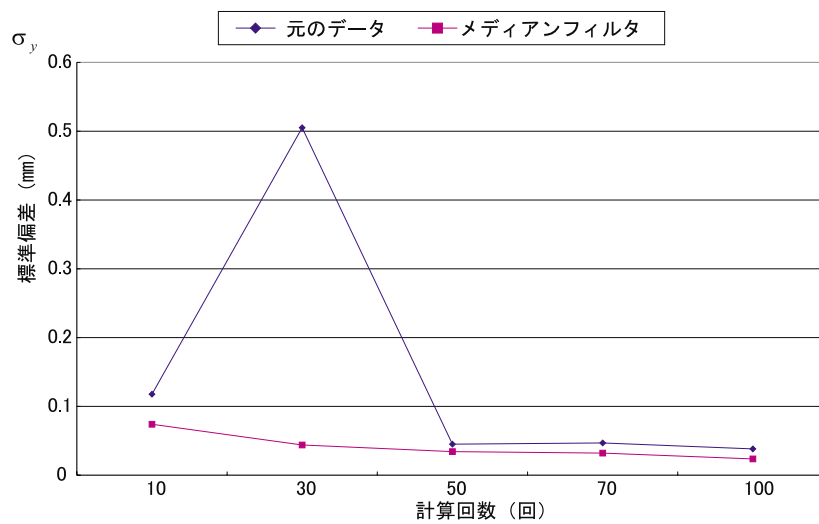


図 3.18: 計算回数と y 座標の標準偏差（五円硬貨 左眼用 CCD カメラ座標系）

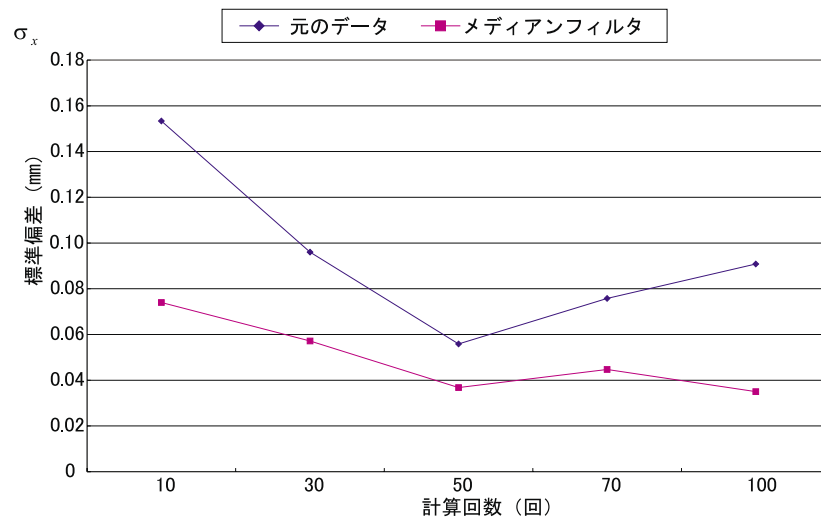


図 3.19: 計算回数と x 座標の標準偏差（五円硬貨 右眼用 CCD カメラ座標系）

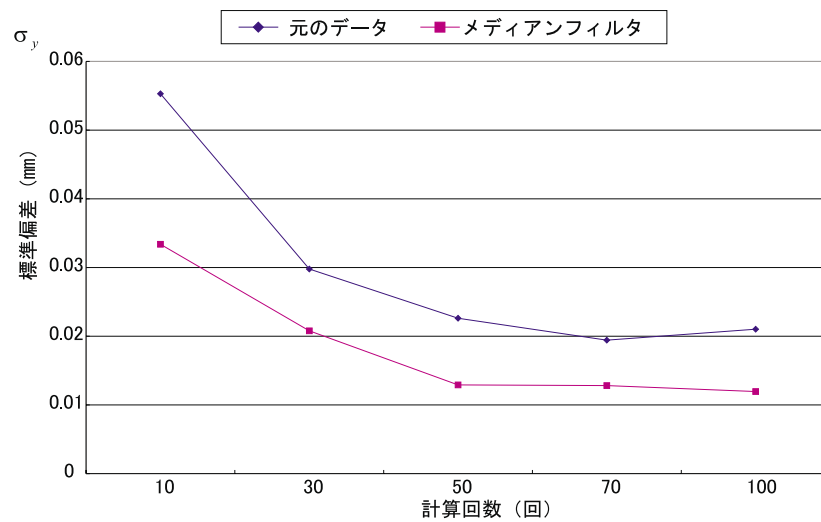


図 3.20: 計算回数と y 座標の標準偏差（五円硬貨 右眼用 CCD カメラ座標系）

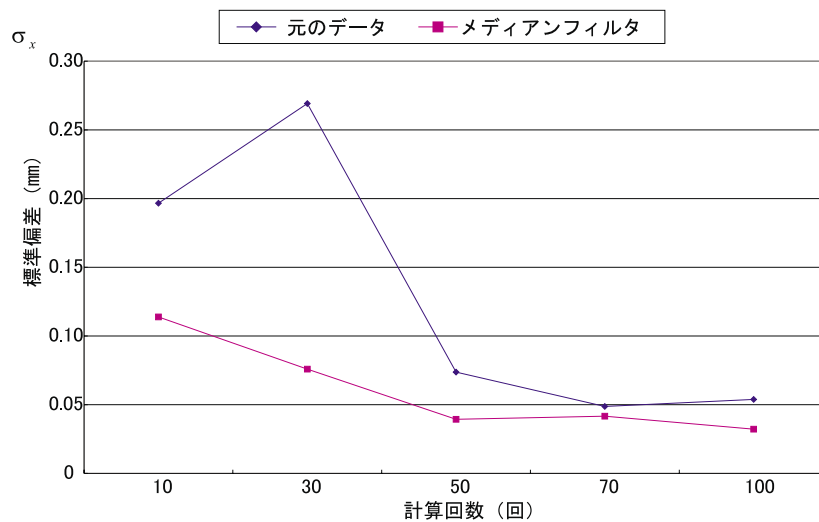


図 3.21: 計算回数と x 座標の標準偏差 (被験者 TO 左眼)

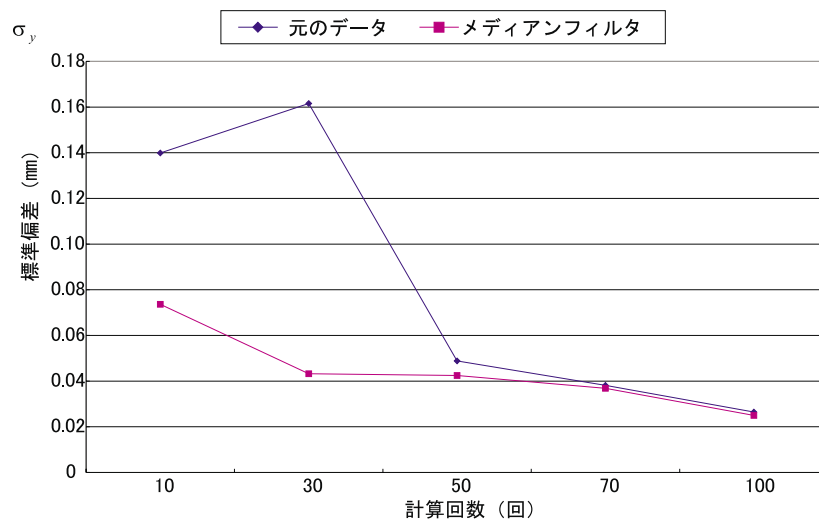


図 3.22: 計算回数と y 座標の標準偏差 (被験者 TO 左眼)

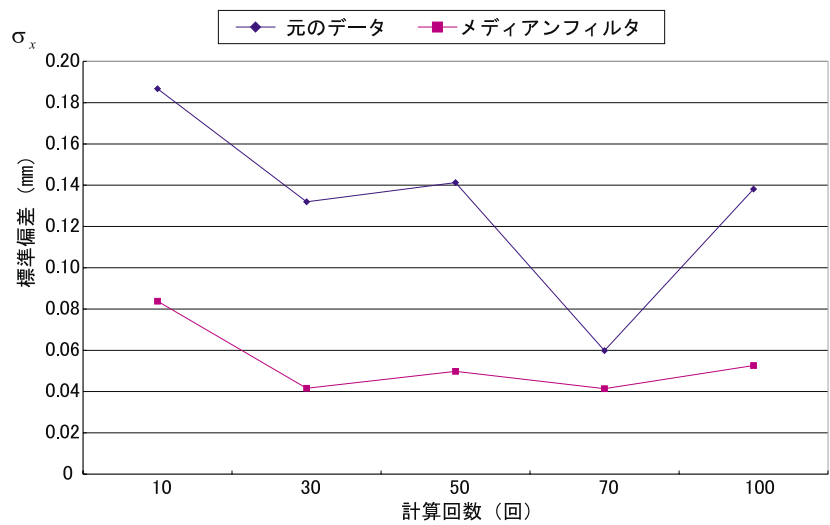


図 3.23: 計算回数と x 座標の標準偏差 (被験者 TO 右眼)

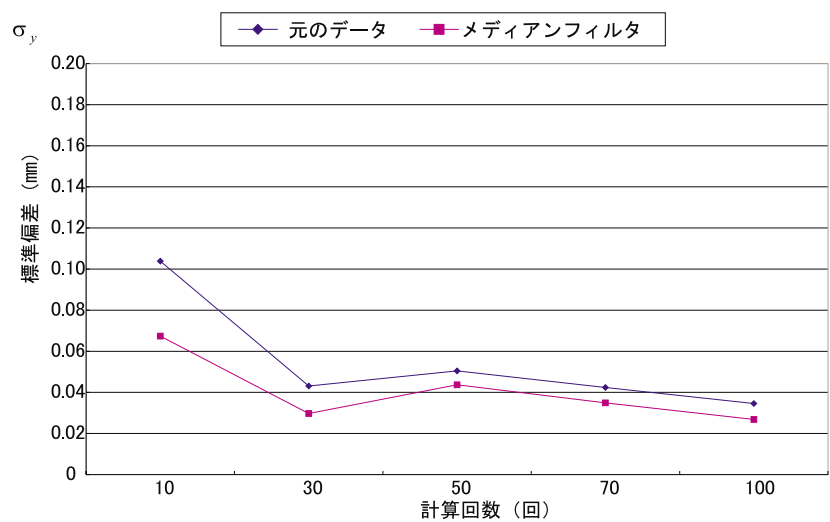


図 3.24: 計算回数と y 座標の標準偏差 (被験者 TO 右眼)

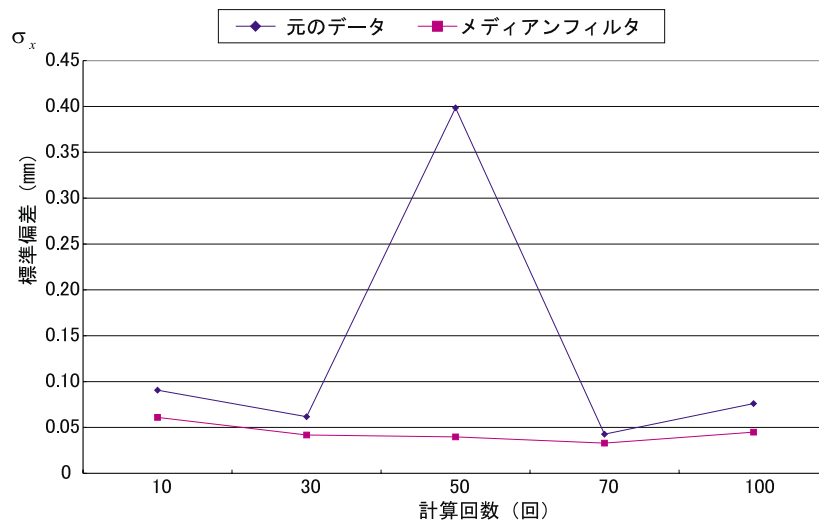


図 3.25: 計算回数と x 座標の標準偏差 (被験者 YA 左眼)

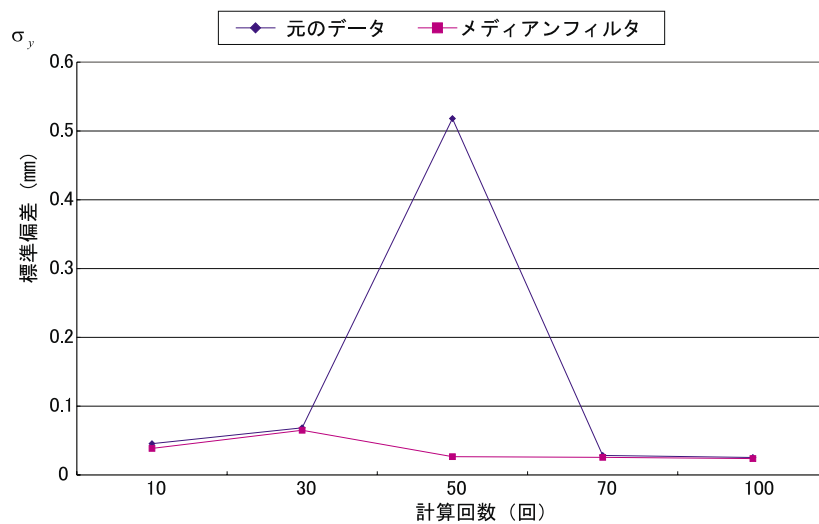


図 3.26: 計算回数と y 座標の標準偏差 (被験者 YA 左眼)



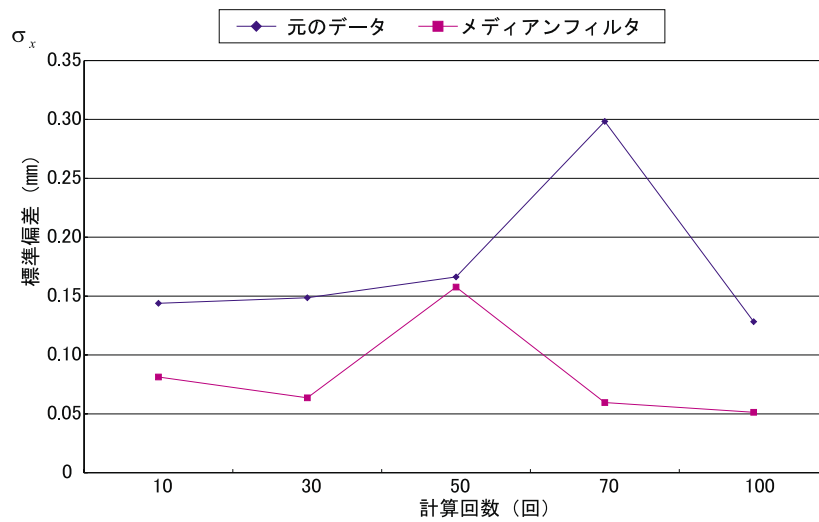


図 3.27: 計算回数と x 座標の標準偏差 (被験者 YA 右眼)

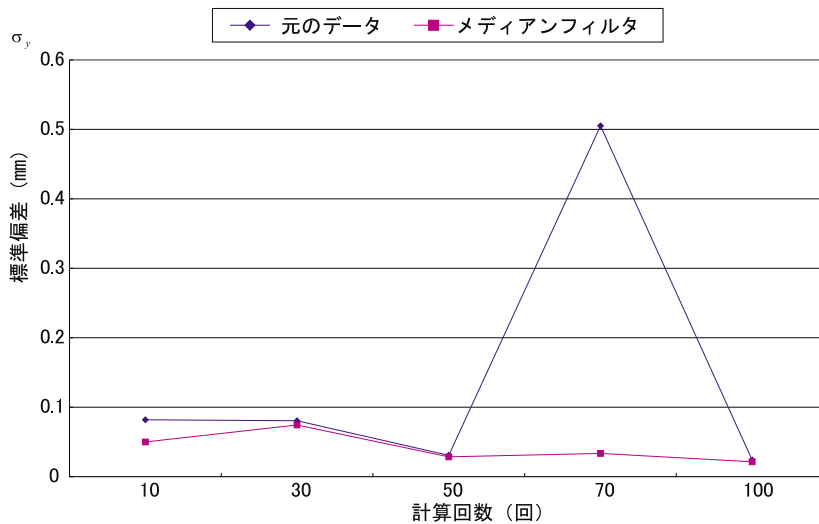


図 3.28: 計算回数と y 座標の標準偏差 (被験者 YA 右眼)

### 3.3.2 視点位置推定方法

次に、3.3.1で求めたCCDカメラ座標系における瞳孔中心座標からディスプレイ座標系での視点位置座標への座標変換を行う方法について説明する。

#### キャリブレーション

視点位置推定への応用を考えた場合、人間の個人差により、また同じ人間でもES-HMDの装着の具合により、映像表示系の映像上でユーザが注視している位置とCCDカメラ座標系での瞳孔中心位置の対応関係は、装着するごとに常に変化していると考えなければならない。そのためにはES-HMDを装着するたびに対応関係を表すパラメータを記録し、そのパラメータに基づいた座標系の変換を行う必要がある。この作業をキャリブレーションという。

キャリブレーションは以下の方法で行う。ES-HMDの表示ディスプレイの中心および画面の4ヶ所の計5つの十字カーソル（以下、基準点）を番号順に表示し、ユーザにその基準点を注視してもらう。ここで、各点のディスプレイ上での座標位置は固定されており、ディスプレイ座標系の画面中心座標、左右上下の座標をそれぞれ $(X_c, Y_c)$ 、 $(X_1, Y_1)$ 、 $(X_2, Y_2)$ 、 $(X_3, Y_3)$ 、 $(X_4, Y_4)$ とする。座標上の各基準点を注視している間の瞳孔中心位置座標をそれぞれ $(x_c, y_c)$ 、 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ 、 $(x_4, y_4)$ とする。ユーザが各基準点を注視している間のCCDカメラ座標系での瞳孔中心位置を記録して、CCDカメラ座標系での注視点座標と画面上に提示しているディスプレイ座標系での視点位置の対応関係を求める。

#### 座標系の変換

キャリブレーションによって求めた対応関係を利用して、CCDカメラ座標系における瞳孔中心座標からディスプレイ座標系での視点位置座標に変換する方法について説明する。

#### 昨年度までの方法とその問題点

昨年度までの座標変換の方法では、図3.29の左に示すようにキャリブレーション用の基準点をディスプレイ画面の中央および左上、左下、右上、右下隅の計5点とする。このとき各基準点を注視している際のCCDカメラ座標系での瞳孔中心位置は図3.29の右のようになる。そこで、図3.29を例にすると、対象とするCCDカメラ座標系の領域を

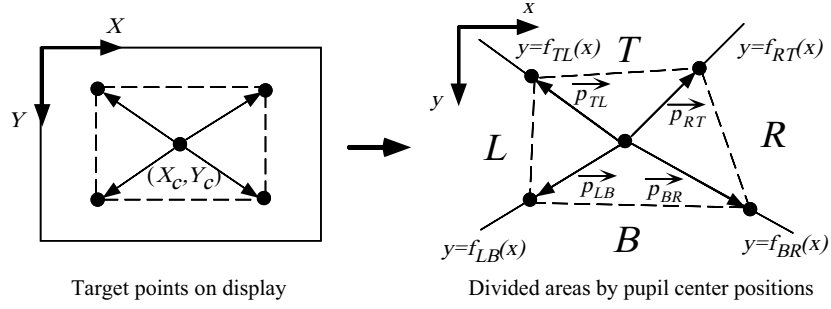


図 3.29: CCD カメラ座標系を領域分割する方法

4つの三角形に分割し、各境界線上に4つの基本ベクトル  $\vec{p}_{TL}$ 、 $\vec{p}_{LB}$ 、 $\vec{p}_{BR}$ 、 $\vec{p}_{RT}$  を定義する。これら4つの基本ベクトルを用いると領域  $T$ 、 $L$ 、 $B$ 、 $R$  内のすべての点が表現できる。任意の瞳孔中心位置がどの領域に属するかの領域判定を行った後、その瞳孔中心位置が属する領域を構成する基本ベクトル成分に分解する。それらの基本ベクトルに対応するディスプレイ座標系のキャリブレーション用の基準点から構成されるベクトルに対して、成分比に応じて比例配分を行うことにより視点位置を計算する。

瞳孔中心位置  $\vec{p} = (x, y)^T$  が領域  $T$  に属する場合を考える。キャリブレーション時の基準点に対する瞳孔中心位置を表す位置ベクトルを  $\vec{p}_{TL} = (x_{TL}, y_{TL})^T$ 、 $\vec{p}_{RT} = (x_{RT}, y_{RT})^T$  とし、これに対応するディスプレイ上の基準点を表すベクトルを  $\vec{P}_{TL} = (X_{TL}, Y_{TL})^T$ 、 $\vec{P}_{RT} = (X_{RT}, Y_{RT})^T$  とする。そして、

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} x_{RT} \\ y_{RT} \end{pmatrix} + l \begin{pmatrix} x_{TL} \\ y_{TL} \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

を満たす  $k, l$  を求め、得られた  $k, l$  を用いて視点位置  $\vec{P} = (X, Y)^T$  が次のように求められる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = k \begin{pmatrix} X_{RT} \\ Y_{RT} \end{pmatrix} + l \begin{pmatrix} X_{TL} \\ Y_{TL} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

ここで、 $X_c, Y_c$  はディスプレイ座標系での中央の基準点の位置ベクトルである。

この方法では、座標変換の際に領域境界ベクトル成分に分け、その成分比に応じた線形補間を行っている。しかし、この方法では、図3.30に示すように、ユーザの視点位置が画面中央から離れるほど、実際にユーザが注視している位置と CCD カメラで得

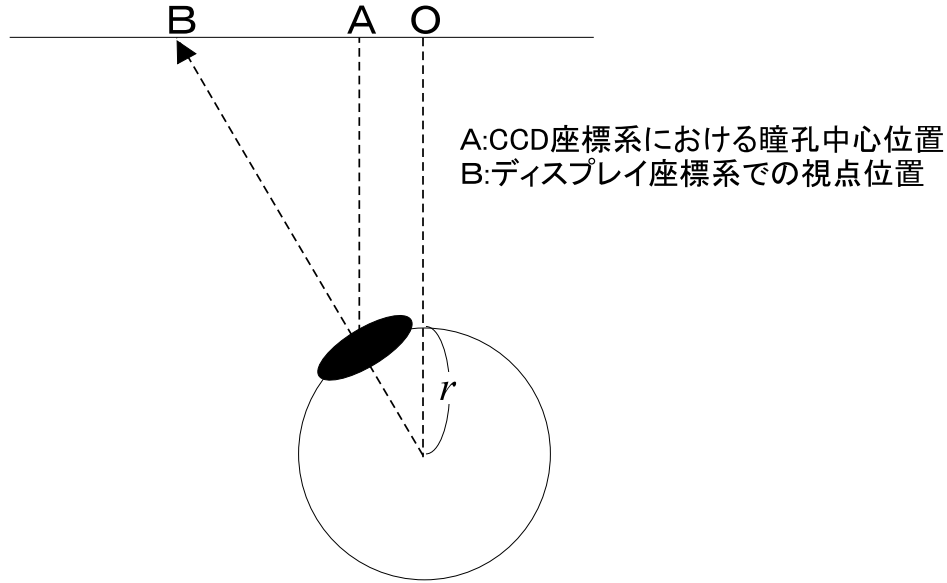


図 3.30: CCD カメラ座標系での瞳孔中心位置とディスプレイ座標系での視点位置

られる視点位置座標との差が大きくなってしまいうという問題点があり、視点位置推定精度が粗くなってしまいう。

そこで、本研究では視点位置推定精度の向上を目的として、CCD カメラ座標系での瞳孔中心位置座標からディスプレイ座標系での視点位置座標にリアルタイムで変換する方法を新たに考案した。以下でこの方法について説明する。

### 新しい座標変換方法

今回の方法では、瞳孔中心位置から水平、垂直方向の眼球回転角をそれぞれ求め、その回転角からディスプレイ上の視点位置を計算する方法を用いた。

キャリブレーションのための基準点として、ディスプレイに図3.31に示すような中央および左右上下の計5点を用いた。ここでES-HMDの映像表示系は1m先に43.5 inchの虚像となるように設計されているため、中央の基準点と眼球中心を結ぶ線が虚像に垂直であると仮定すると、図3.32に示すように、左右、上下の基準点を見ているときの眼球の回転角 $\theta_{sh}$ 、 $\theta_{sv}$ が式(3.11)より計算できる。

$$\theta_{sh} = \tan^{-1} \frac{100}{\Delta X_{sh}}, \quad \theta_{sv} = \tan^{-1} \frac{100}{\Delta X_{sv}} \quad (3.11)$$

この回転角 $\theta_{sh}$ 、 $\theta_{sv}$ と基準点1を見ているときのCCDカメラ座標系での瞳孔中心位置と基準点2～5を見ているときの瞳孔中心位置の移動量 $\Delta x_l$ 、 $\Delta x_r$ 、 $\Delta x_t$ 、 $\Delta x_b$ から、

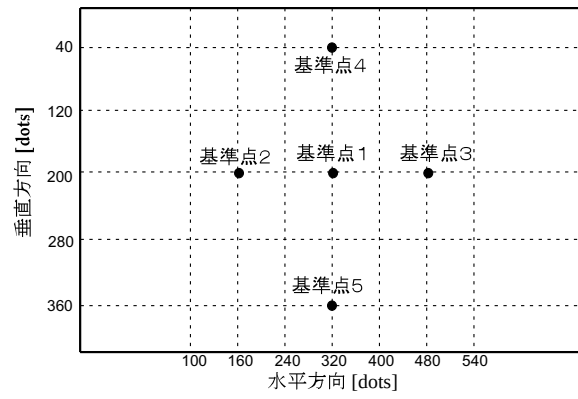


図 3.31: キャリブレーション基準点

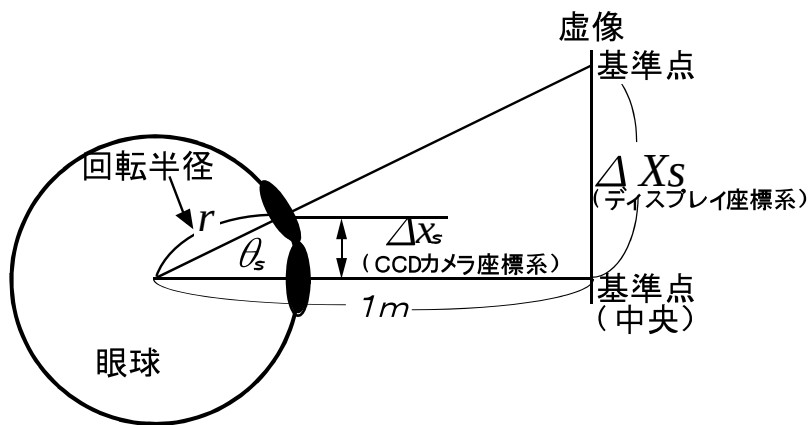


図 3.32: 眼球回転角の計算方法

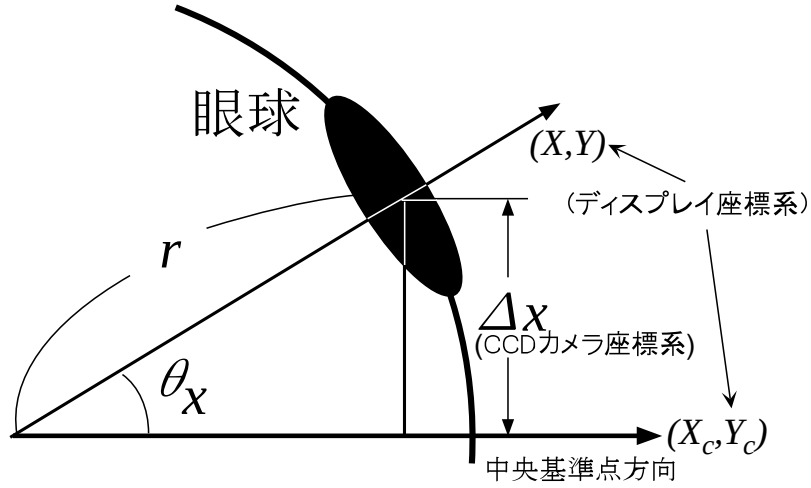


図 3.33: 眼球回転角の計算方法

眼球の回転半径を左右は式 (3.12)、上下は式 (3.13) によりそれぞれの方向について求める。

$$r_h = \frac{\Delta x_s}{\sin \theta_{sh}} \quad (3.12)$$

$$r_v = \frac{\Delta y_s}{\sin \theta_{sv}} \quad (3.13)$$

左右の平均を水平方向の回転半径  $r_h$ 、上下の平均を垂直方向の回転半径  $r_v$  として求める。

次に、この  $r_h$ 、 $r_v$  を用いて、図3.33に示すように基準点以外の点  $(X, Y)$  を見ているときの CCD カメラ座標系での中央の基準点からの移動量  $(\Delta x, \Delta y)$  を求め、式 (3.14) より眼球の縦、横方向それぞれの回転角  $\theta_h$ 、 $\theta_v$  を求める。

$$\theta_h = \sin^{-1} \frac{\Delta x}{r_h}, \quad \theta_v = \sin^{-1} \frac{\Delta y}{r_v} \quad (3.14)$$

この眼球の回転角を式 (3.15) により、ディスプレイ座標系に変換し実際にユーザが注視している点  $(X, Y)$  を求める。

$$X = \frac{\tan \theta_h}{\tan \theta_s} \cdot \Delta X_s + X_c, \quad Y = \frac{\tan \theta_v}{\tan \theta_s} \cdot \Delta Y_s + Y_c \quad (3.15)$$

### 3.3.3 瞬目検出方法

本節では、ES-HMDを用いて計測できる瞳孔中心以外の視覚系指標の1つとして、瞬目タイミングの検出方法について述べる。

3.1で述べたように、ES-HMDはCCDカメラによって撮像された瞳孔画像を処理することによって、視点位置推定のためのデータとなる瞳孔中心座標の算出を行っている。したがって、ユーザが瞬目をした場合、眼瞼の赤外線反射率が瞳孔部分のそれと比較して高いため、眼瞼によって瞳孔部分が隠されている間、CCDカメラによる撮像に瞳孔画像が写らなくなる。このことを利用して、CCDカメラからの眼球映像から撮像画像処理系で処理されPCに入力される瞳孔形状データに瞳孔が含まれていない（データが含まれていない）ときを眼瞼が閉じている、すなわち瞬目が発生していると考ええる。

具体的には、3.3.1で述べた瞳孔中心位置計算の際に、1画面分の水平走査が終了した時点で画面内に瞳孔形状データが含まれていないとき、すなわち1度も瞳孔開始点が含まれていない場合に、瞬目が発生したとして瞬目の検出を行う。一般的に、人間の不随意性瞬目（無意識な瞬目）の持続時間（瞬目を行っている時間）は約200 msecといわれている<sup>[14]</sup>。しかし、ES-HMDで瞬目として検出できるのは眼瞼が下がり始めてから開眼の位置に戻るまでであるから、瞳孔部分が眼瞼によって完全に隠れている時間はさらに短い時間であると考えられる。ES-HMDのCCDカメラはその仕様より画面の走査周波数が59.94 Hzであり、1画面の走査時間は約16.7 msecであるので、十分に瞬目の発生を検知することが可能である。また、ES-HMDの撮像信号処理系から入力される瞳孔形状データが、ボードの処理エラーによって瞬目が生じていないにもかかわらず、入力されずに瞬目として検出されてしまうことがある。そのような検出エラーを防ぐために、3フレーム連続で瞳孔形状データが入力されなかった場合に不随意性瞬目が発生していると検出する。こうすることによって、拡張ボードのエラーによる瞬目の誤認識を抑えることができると思う。

また、不随意性瞬目と意識的な閉眼を区別するために、ある一定時間閉眼状態（撮像された画像に瞳孔が写っていない状態）が続いた場合、意識的な閉眼として検出する。先に述べたように不随意性瞬目の持続時間は約200 msecであるから、意識的な閉眼は200msecよりも長い時間閉眼状態が続いた場合を検出する必要がある。そこで、15フレーム連続で撮像された眼球画像に瞳孔形状データが検出されなかった場合、意識的な閉眼として検出する。15フレームの撮像に要する時間は、CCDカメラの走査周波数

より

$$15 \text{ [frame]} \times 16.7 \text{ [msec/frame]} = 250.5 \text{ [msec]} \quad (3.16)$$

であり、200 msec 以上であるため、不随意性瞬目と区別することが可能である。さらに、閉眼を用いたインタフェースへの入力動作などに利用することを鑑みて、片眼のみの意識的な閉眼を検出するために、閉眼の検出は左右それぞれ独立に行う。



## 第 4 章 視点位置推定の評価実験

本章では、第3章で提案した新しい瞳孔中心位置の測定方法、視点位置の推定方法および瞬目検出方法を実現するシステムを構築し、各方法の測定精度を評価、検討した結果を述べる。

### 4.1 瞳孔中心位置測定精度の評価実験

#### 4.1.1 実験の目的

3.3.1に述べた瞳孔中心位置の測定方法は、ES-HMDで撮像された瞳孔像に混入する照明用の赤外線LEDの輝点や眼瞼の影のため撮像されない瞳孔部分などのノイズ成分の影響を低減することを目的として考案したものである。この方法のノイズ成分に対するロバスト性を実験的に確認するため、昨年度までに本研究室で行っていた福島による視点位置の推定方法の瞳孔中心位置の測定方法<sup>[4][11]</sup>と比較して、本研究で考案した測定方法の測定精度の評価を行った。具体的には、新たに3.3.1で提案した撮像された瞳孔の輪郭線から3点を抽出し、その3点から求められる円の中心によって瞳孔中心位置を求める方法（method 1）と3.3.1で説明した瞳孔径を与える水平走査線の瞳孔検知開始位置と終了位置の中点を瞳孔中心座標とする方法（method 2）の測定精度の比較を行い、新たに考案したmethod1のノイズ成分に対するロバスト性、および測定精度の評価を行う。

本実験では瞳孔中心位置の測定対象として、以下の2種類を用いた。

（測定対象1） 測定対象が完全に静止し、ノイズのない擬似瞳孔（五円硬貨）

（測定対象2） 実際の人間の瞳孔

#### 4.1.2 実験の方法

本実験では、瞳孔中心位置の測定の際にみられる CCD 座標系における瞳孔中心座標の誤差範囲を評価することを目的としているが、実際の人間の眼球は静止することではなく、常に微動している（固視微動）<sup>[6]</sup>。したがって、まず、この固視微動による瞳孔

測定への影響を取り除くため、「測定対象1」として擬似瞳孔を用い、測定対象が完全に静止した条件下での測定精度を評価する。また、擬似瞳孔は照明用の赤外線LEDの輝点や眼瞼の影などのノイズ成分が混入することのない条件下で評価することができるため、擬似瞳孔の輪郭線とその輪郭線から計算された瞳孔中心座標の比較を行い実際に瞳孔の中心部分が測定されていることの評価も行う。次いで、被験者実験によりノイズ成分が混入し、きれいな円形の瞳孔形状が入力されない場合の瞳孔中心の測定精度の評価を行う。

method1、method2のそれぞれの方法で同一の瞳孔像から瞳孔中心位置を計算するために、PC上に両方法を用いて実時間で計算するプログラムを作成し、そのプログラムを用いてCCDで撮像された画像200フレーム分、すなわち200回のCCD座標系における中心座標を測定した。

## 実験手順

測定対象1の擬似瞳孔を測定の際には五円硬貨を穴を開けた厚紙に貼り、その五円硬貨の穴を用いた。五円硬貨の穴は直径が5mmの均一な円であり、この穴をそれぞれの方法で測定した。測定対象となる五円硬貨は、ES-HMDを装着した際に眼球が配置される位置に固定する。このとき五円硬貨の穴以外の部分では赤外線が反射しているため、測定中に五円硬貨の穴の部分にノイズ成分は混入せず、きれいな円形になっていることをモニタで目視して確認した。method1、method2とも瞳孔位置の移動はなかった。

被験者を用いた測定では、被験者に着座姿勢でディスプレイ全体が視野に入るようにES-HMDを装着してもらい、瞳孔形状がなるべく良好に撮像できるように瞳孔画像の二値化時の閾値を調節する。ES-HMDのディスプレイ中央に十字カーソルを提示し、測定中はこの十字カーソルを注視し、瞬目を行わないように指示した上で200回の瞳孔中心位置の測定を行った。

## 被験者

被験者は男子大学院生2名（被験者TO、DK）、学部4年生1名（被験者KS）とし、全員、視機能に異常はない。ただし、被験者DKはコンタクトレンズを装着した状態で、被験者KSは通常眼鏡を使用しているが、実験中はこれを用いずに測定を行った。

表 4.1: 計算された中心位置の標準偏差

| 被験者  |    | method1   |           | method2   |           |
|------|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      |    | 水平方向 (mm) | 垂直方向 (mm) | 水平方向 (mm) | 垂直方向 (mm) |
| 擬似瞳孔 | 左眼 | 0.020     | 0.096     | 0.064     | 0.623     |
|      | 右眼 | 0.012     | 0.032     | 0.514     | 0.359     |
| TO   | 左眼 | 0.053     | 0.145     | 1.072     | 1.704     |
|      | 右眼 | 0.065     | 0.132     | 0.651     | 0.789     |
| DK   | 左眼 | 0.847     | 0.212     | 0.792     | 0.853     |
|      | 右眼 | 0.954     | 0.466     | 1.319     | 0.949     |
| KS   | 左眼 | 0.041     | 0.220     | 2.638     | 4.351     |
|      | 右眼 | 0.497     | 0.824     | 0.952     | 2.078     |

### 4.1.3 実験結果と考察

#### 実験結果

method1、method2それぞれについて、同じ条件下で測定した擬似瞳孔の中心座標を式 (3.5)、式 (3.6) から求めた計数単位により、実際の瞳孔のサイズに変換してプロットした結果を、図 4.1、4.2に示す。また、ES-HMD から PC に入力された瞳孔形状とその瞳孔形状から計算された中心位置の例を図 4.3および図 4.4に示す。

#### 考察

以上の結果より、method1、method2の瞳孔中心位置測定方法の比較検討を行う。図 4.1、4.2からわかるように、両方法とも測定対象を擬似瞳孔として完全に静止させた条件において測定を行っても、計算される瞳孔中心位置は1点に留まることなくある程度の範囲内にゆらぎを持って分布している。そこで、計算した200個の瞳孔中心位置分布の、水平方向、垂直方向それぞれの標準偏差を求めた結果を表 4.1に示す。得られた標準偏差は求めた瞳孔中心位置のゆらぎの大きさを示す指標となる。

表 4.1において、method1の方が右眼、左眼共に水平、垂直方向のいずれについても標準偏差が1mm以下であり、method2と比較しても明らかに小さい値を示している。このことは、図 4.1、図 4.2からも明らかにmethod1の方がmethod2より狭い範囲に測定された瞳孔中心位置がまとまって分布していることが確認できる。

また、実際に、1画面中に測定対象の瞳孔中心がCCD座標系上でどのように決定さ

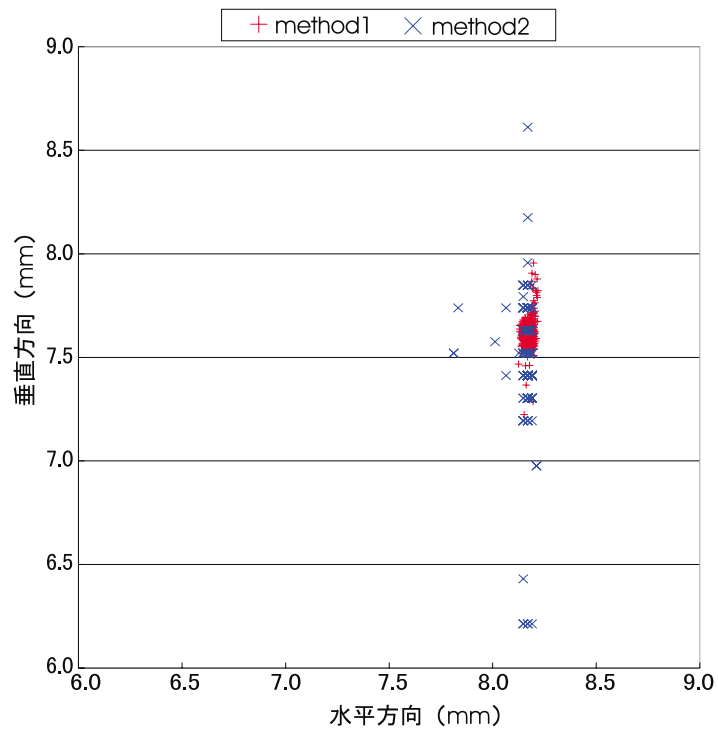


図 4.1: 計算された中心位置 (左眼側)

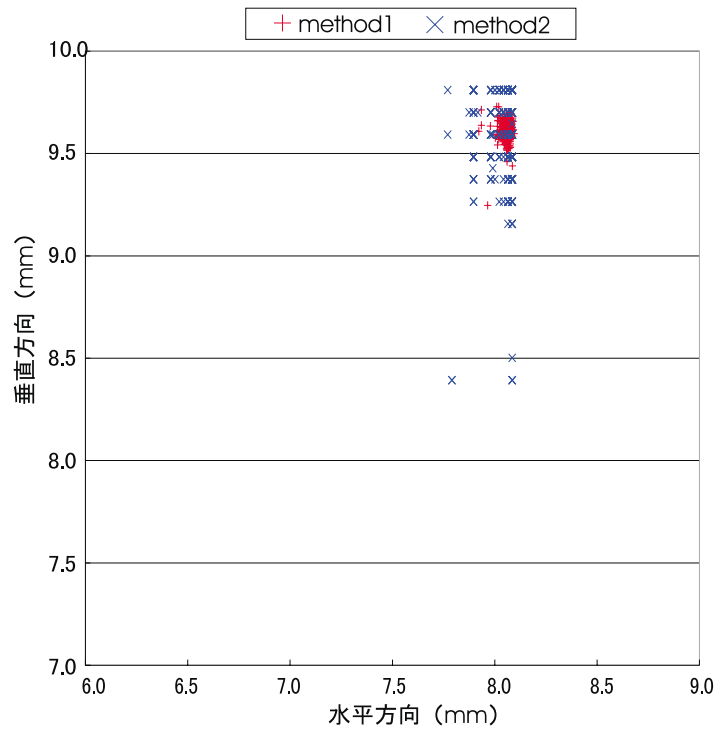


図 4.2: 計算された中心位置 (右眼側)

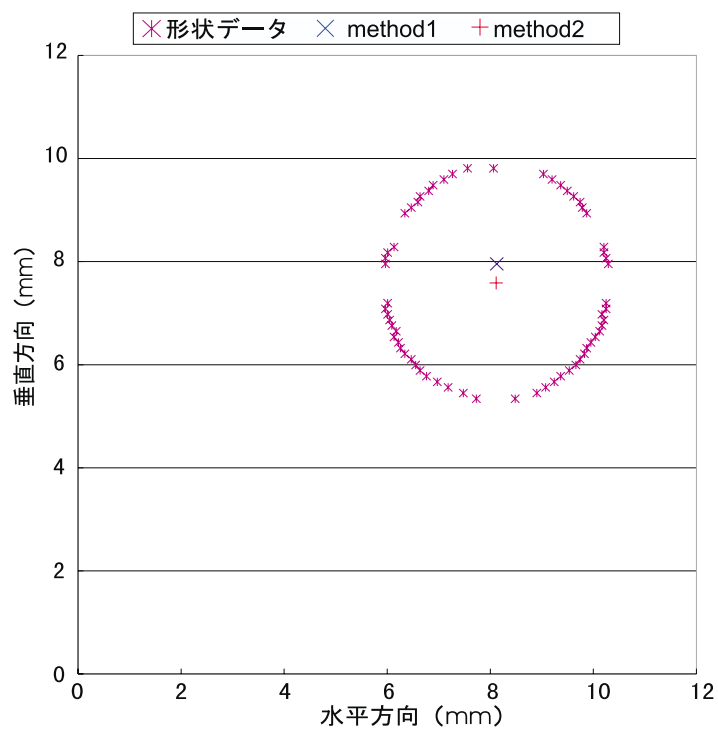


図 4.3: 五円硬貨の穴の形状データと計算された中心位置 (1)

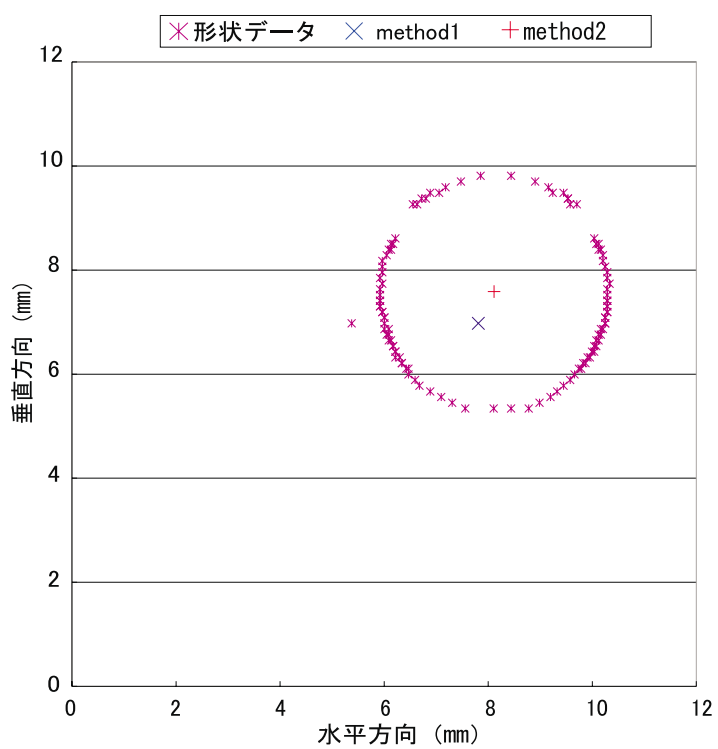


図 4.4: 五円硬貨の穴の形状データと計算された中心位置 (2)

れていたかに注目し、図 4.3、図 4.4 に、瞳孔の輪郭形状と計算された中心の位置関係について method1 と method2 で大きな差異がみられる典型例を示す。この図から両方法を比較すると、method1 で計算された瞳孔中心位置が実際に測定対象の輪郭を円形とみなした場合の中心付近に位置していることが確認できる。

この測定精度の差異の原因を考察する。瞳孔の輪郭のエッジ部分は ES-HMD の撮像画像処理系によって完全に正確な輪郭形状が抽出されるとは限らず、モニタ画面での目視によってノイズ成分が確認されない場合でも、瞳孔の輪郭部分にいくつか明らかに不自然な点が含まれてしまうことがある。そのため、method2 ではその部分が瞳孔の最大径をとる部分として認識されたときに大きな誤差を持った計算結果が得られ、明らかに正確な瞳孔の中心位置を計算できていないものが含まれる原因となっていると考えられる。また、method2 ではその計算方法から計算結果の最小変化量が水平方向で  $1/2\text{dot}$ （計数単位による変換後の値で  $1/2[\text{dot}] \times 0.042[\text{mm}/\text{dots}] = 0.021[\text{mm}]$ ）、垂直方向で  $1\text{dot}$ （計数単位による変換後の値で  $1[\text{dot}] \times 0.109[\text{mm}/\text{dot}] = 0.109[\text{mm}]$ ）であるため、離散的な値が得られている。

method1 では、輪郭形状に対する上で述べたような画像処理過程におけるノイズ成分の影響を削減することを考慮しているため、擬似瞳孔を測定した場合、撮像された瞳孔像には明らかなノイズ成分がないため、ほとんどゆらぎのない計算結果を得ることができている。また、実際の被験者の瞳孔中心位置の測定を行った場合にも、図 4.5 のように、照明用赤外線 LED の輝点や眼瞼の影などのノイズの影響により、瞳孔形状がきれいに抽出できていない場合にも、ノイズの影響をあまり受けずに比較的安定した計算結果となっている。

以上の結果より、本研究で新たに考案した瞳孔中心位置の測定方法は以前使用していた方法と比較して、ノイズ成分に対するロバスト性に優れ、また、撮像された瞳孔像の中心位置を安定に測定できることが確認された。

## 4.2 視点位置推定精度の評価実験

### 4.2.1 実験の目的

4.1 では CCD カメラで撮像された瞳孔像から CCD カメラ座標系での瞳孔中心位置算出精度の評価実験を行った。本節では、4.1 で述べた方法により算出した CCD カメラ座標系での瞳孔中心位置からディスプレイ座標系での視点位置の推定を行う視点位置推定精度の評価を行う。

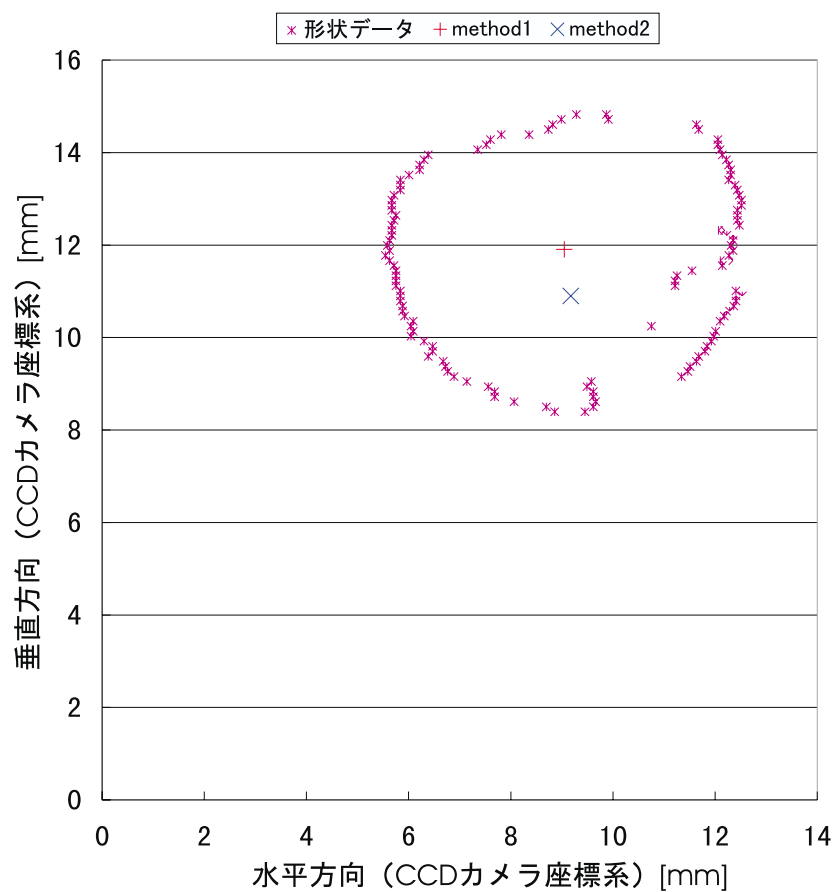


図 4.5: ノイズを含んだ瞳孔形状データ

## 4.2.2 実験の方法

本研究で新たに考案した瞳孔中心位置測定方法で計算された瞳孔中心位置を、本研究で考案した座標変換方法を用いてディスプレイ座標系での視点位置に変換する方法と、瞳孔中心測定方法と座標変換方法と method2 を利用したものを比較評価する。

比較実験を行うため、比較対象となるデータを同一にすることに注意し、計算機上に同一の瞳孔形状データから両方法を同時に独立して用いて座標変換を行うシステムを作成し、同一のデータから視点位置推定を行う。

具体的には、被験者がディスプレイ上で注視する点として図 4.6 に示す 35 点のうち 1 点ずつ順に ES-HMD のディスプレイ上に表示させ、その点を注視しているときの CCD カメラ座標系における瞳孔中心位置の算出を行い、その瞳孔中心位置からディスプレイ上の視点位置の推定を行った。図 4.6 の参照点は Graphic WS で作成し、ES-HMD に提示した。図 4.6 の原点は左上にあり、画面のサイズは水平方向 640dots、垂直方向 434dots である。ディスプレイ上に合計 35 個の参照点を水平方向が 100～540dots の範囲に 7 点、垂直方向が 100～334dots の範囲に 5 点配置した。点 17 が画面中央位置に相当する。また、参照点の最右端と最左端の水平視野角は約 34.0deg に相当し、各参照点間の水平視野角は約 4.5～6.4deg となる。一方最上端と最下端の垂直視野角は約 19.9deg に相当し、各参照点間の垂直視野角は約 5.0～4.9deg となる。

ここで、

- |          |                                  |
|----------|----------------------------------|
| method 1 | 瞳孔中心位置計算方法、視点位置較正方法共に新しい方法       |
| method 2 | 瞳孔中心位置計算方法、視点位置較正方法共に福島による方法とする。 |

### 実験手順

まず被験者に ES-HMD を装着してもらい、次いで画面に基準点を点 17、14、20、3、31、1、28、34、6 順に提示し視点位置較正を行う。座標変換のための基準点はそれぞれの方法で異なっているため、図 4.6 の各点の中から以下の点を利用した。

- |          |                       |
|----------|-----------------------|
| method 1 | 点 3、14、17、20、31 の 5 点 |
| method 2 | 点 1、5、17、29、33 の 5 点  |



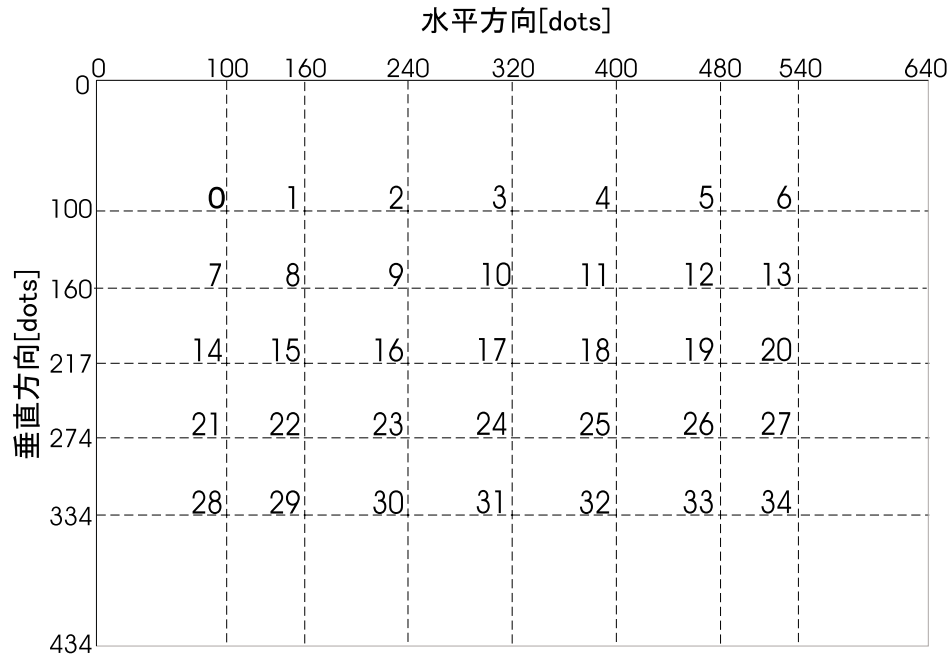


図 4.6: 提示した参照点

以上の準備の後、図4.6に示す35点の参照点を1点ずつ順にそれぞれES-HMDのディスプレイに表示させ、その点を注視しているときの瞳孔中心位置を算出し、ディスプレイ上の視点位置の推定を行った。推定する視点位置は参照点1つあたり40回である（約33msec/回）。また、被験者には参照点注視中は瞬目をしないように指示した。

## 被験者

被験者は、視機能に異常のない男子大学院生3名（被験者TO、YA、DK）である。

### 4.2.3 実験結果と考察

#### 実験結果

ここでは、被験者DKについて視点位置推定結果を図4.7、4.8、4.9、4.10に示す。他の被験者については付録A、付録Bにゆずる。図4.6で破線の交差している位置がディスプレイ上に提示した参照点位置である。各参照点ごとに注視している参照点と推定された視点位置との距離（誤差）を求めた結果を図4.11～図4.14に示す。また、各参照点を注視している際に推定された40点の視点位置のばらつきの度合いを表す指標として、各参照点ごとに標準偏差を求めた結果を図4.15～図4.22に示す。

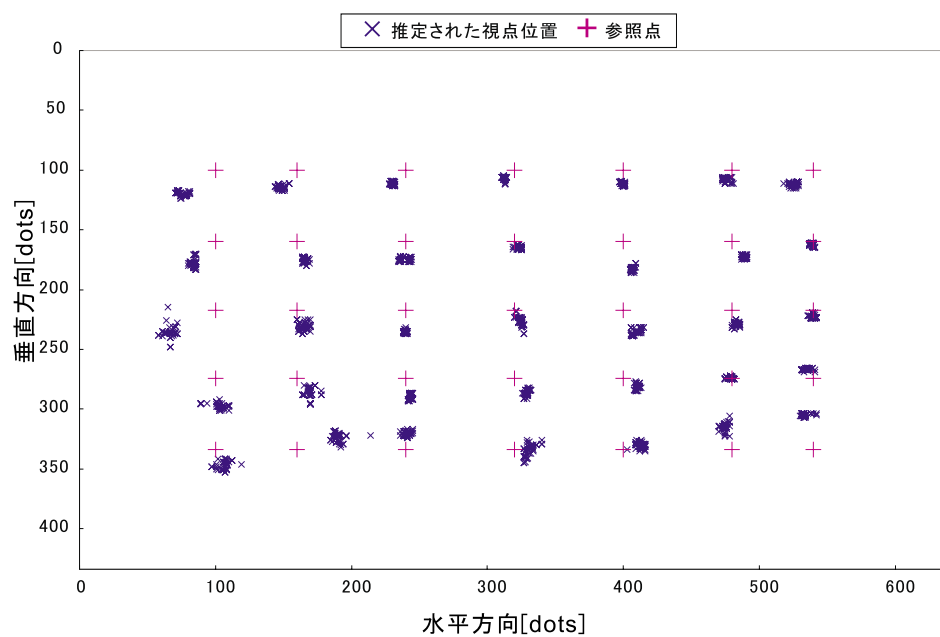


図 4.7: method1によって推定された視点位置（被験者 DK：左眼）

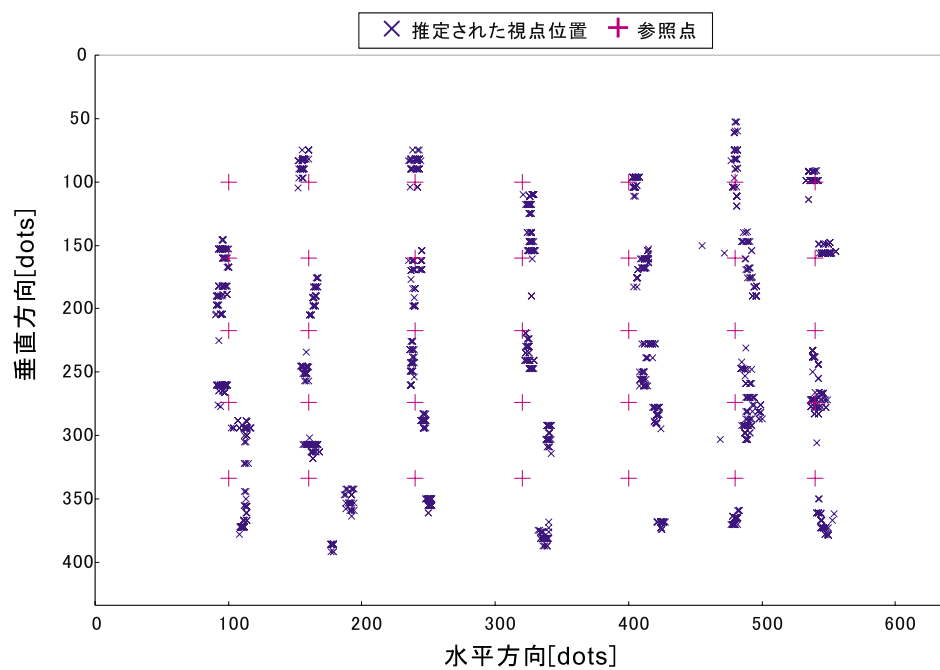


図 4.8: method2によって推定された視点位置（被験者 DK：左眼）

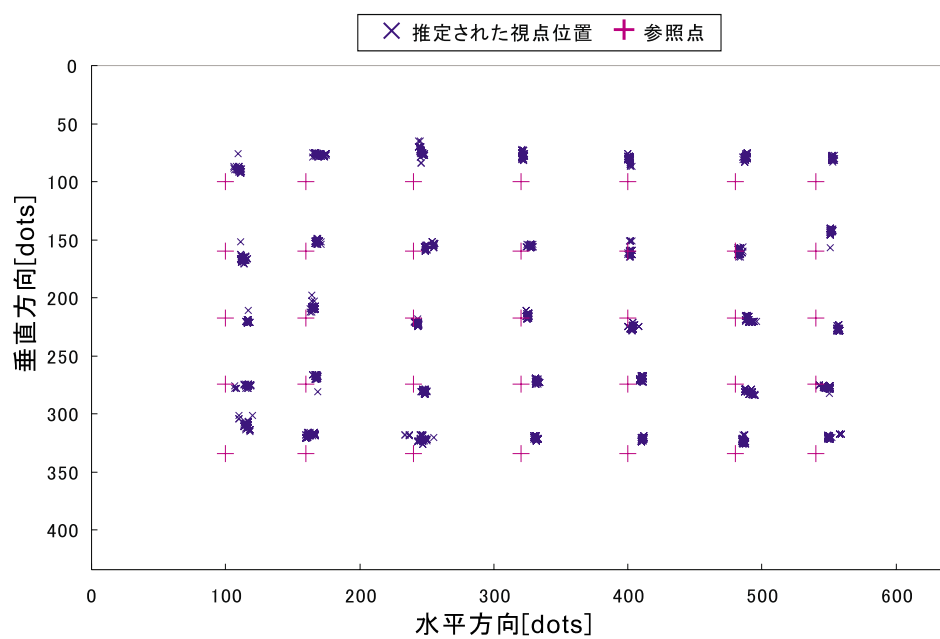


図 4.9: method1によって推定された視点位置（被験者 DK：右眼）

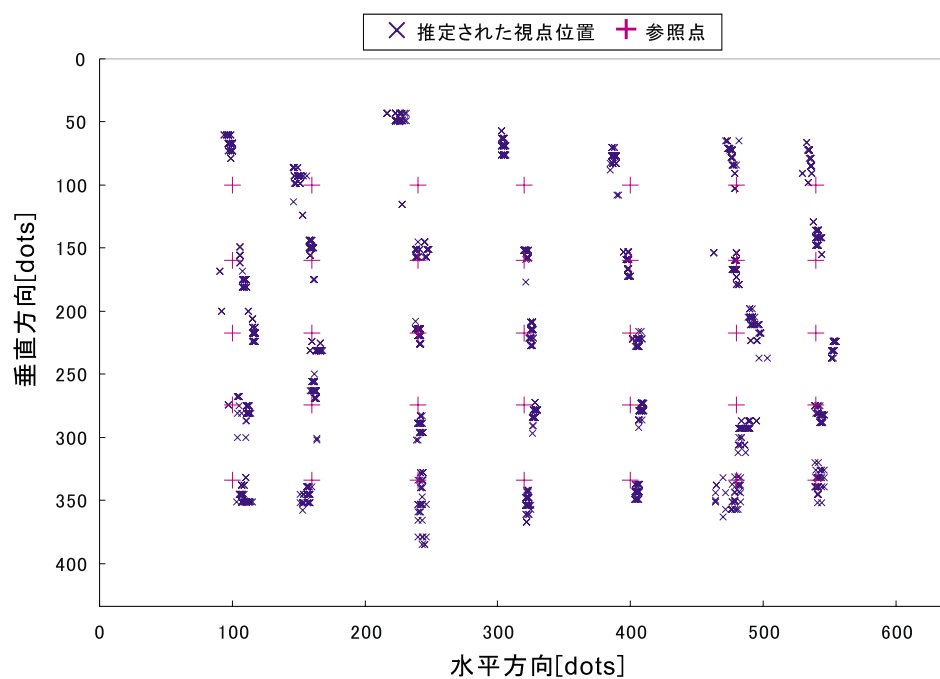


図 4.10: method2によって推定された視点位置（被験者 DK：右眼）

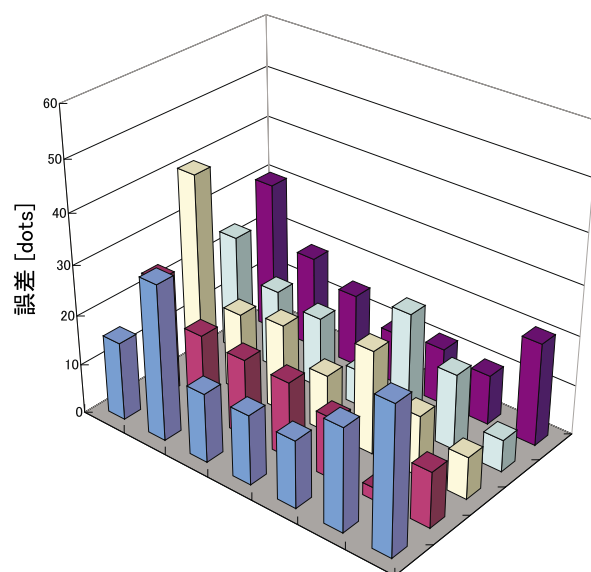


図 4.11: method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者DK：左眼）

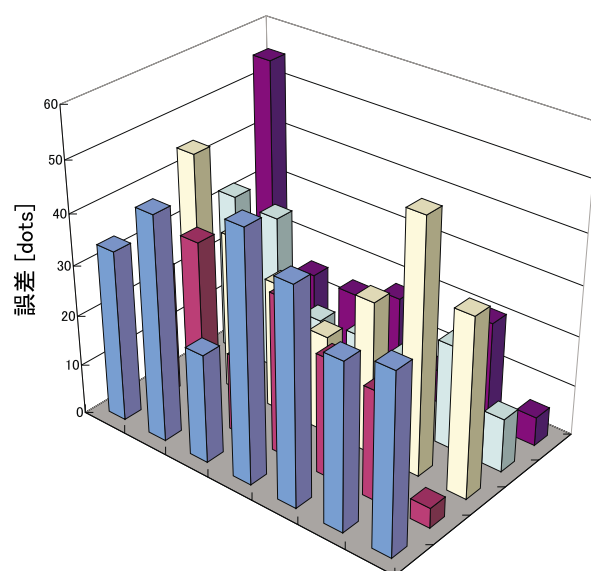


図 4.12: method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者DK：左眼）

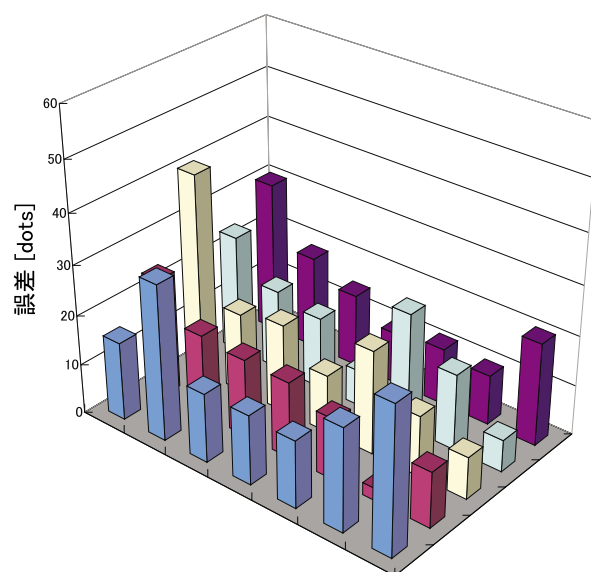


図 4.13: method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者DK：左眼）

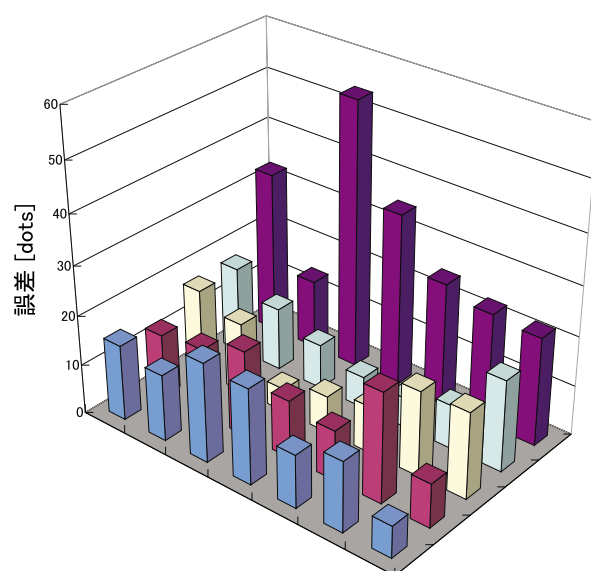


図 4.14: method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者DK：左眼）

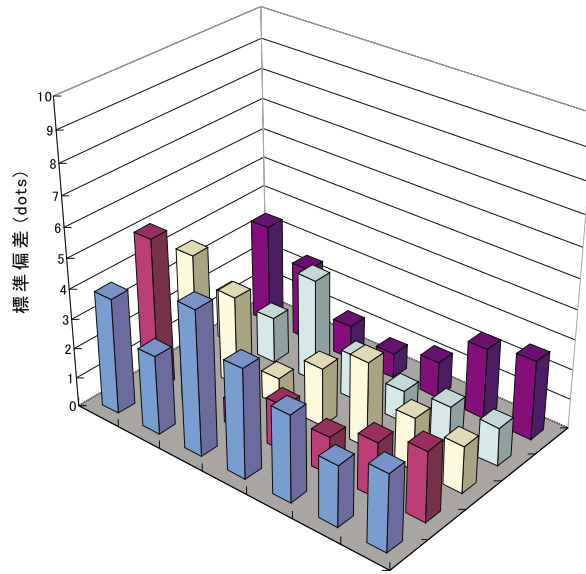


図 4.15: method1によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者DK：左眼）

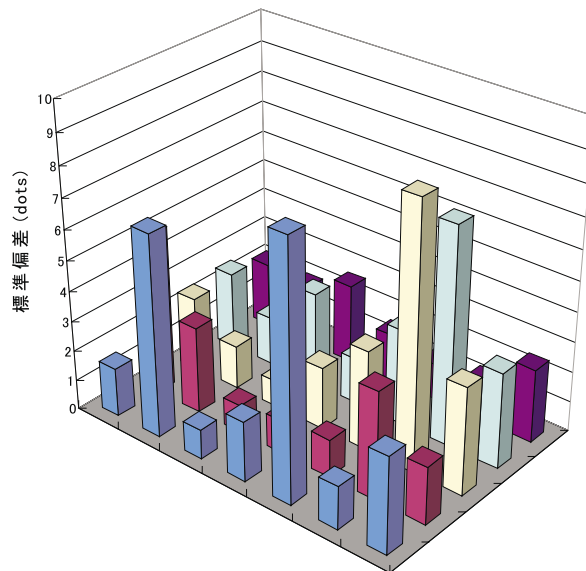


図 4.16: method2によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者DK：左眼）

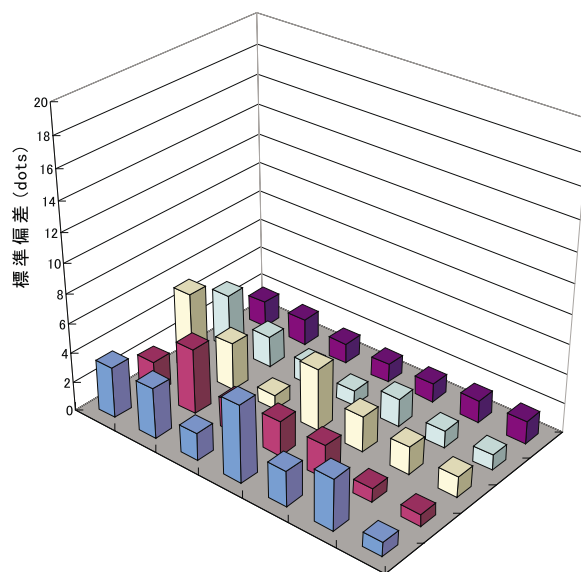


図 4.17: method1によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者DK：左眼）

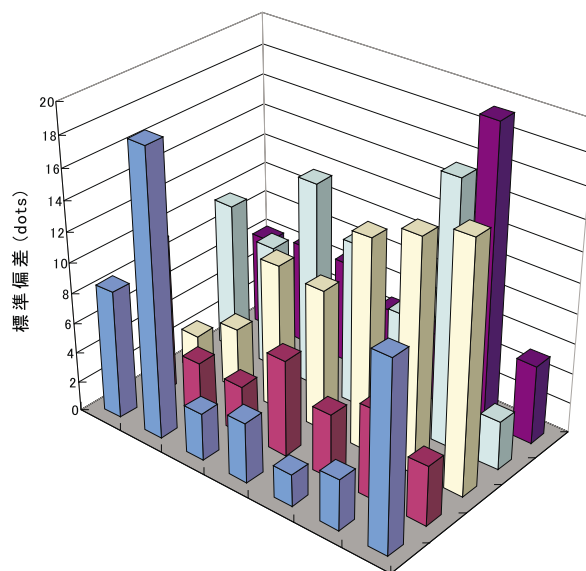


図 4.18: method2によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者DK：左眼）

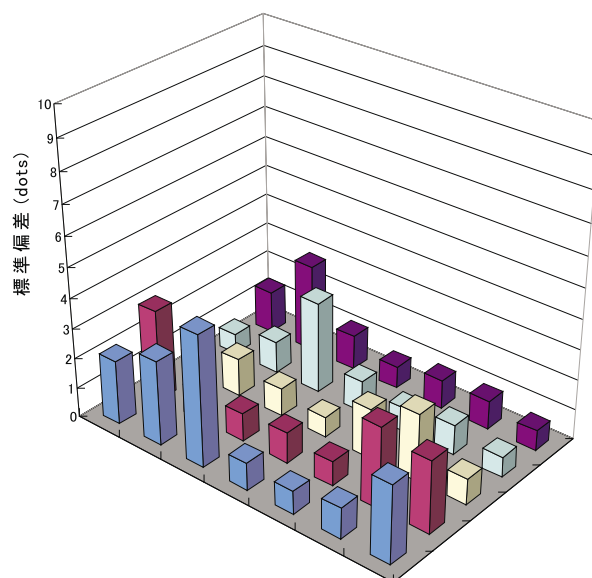


図 4.19: method1 によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者DK：右眼）

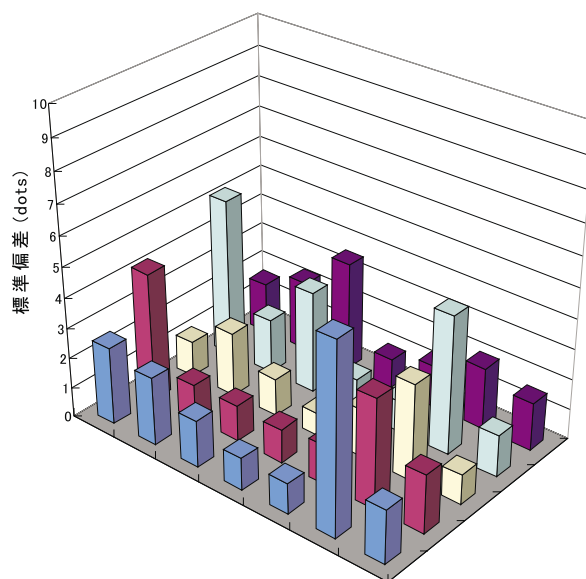


図 4.20: method2 によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者DK：右眼）



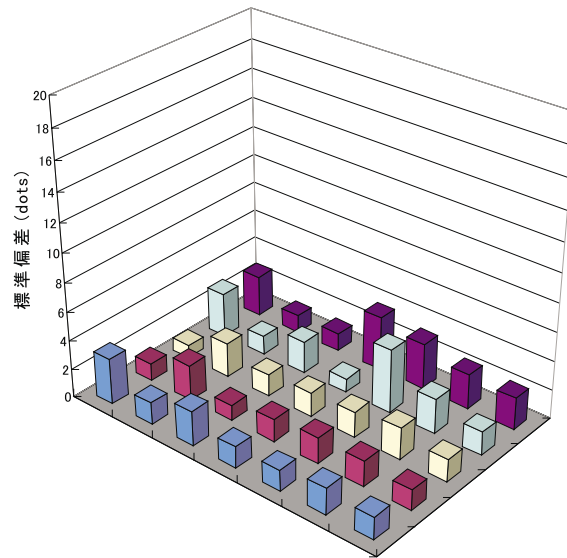


図 4.21: method1 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 DK : 右眼）

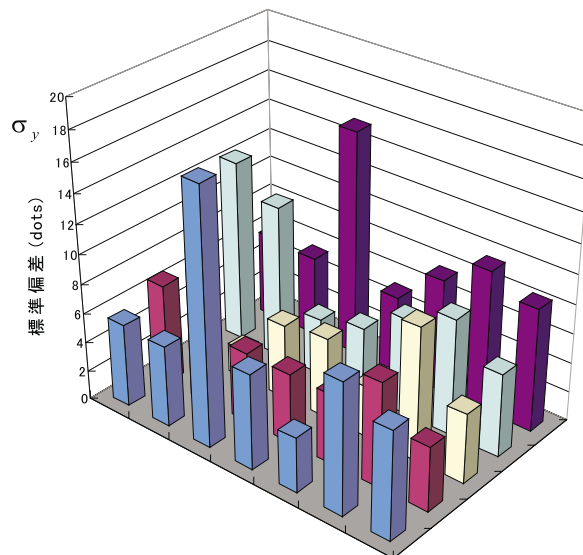


図 4.22: method2 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 DK : 右眼）

## 考察

図4.7～図4.10において、本研究で新たに考案した方法（method1）で視点位置の推定を行ったものでは、推定された視点位置が注視している参照点付近にばらつきなく推定されており、参照点との誤差も比較的小さなものとなっている。一方、福島による方法（method2）では、各参照点を注視しているときの推定結果は、図4.10のように水平方向の視点位置推定はある程度誤差の小さい結果となっているが、垂直方向では大きなばらつきがみられ誤差も大きな値となっている。特に図4.8、図4.10では、上下に隣り合う参照点を注視しているときの視点位置推定の結果が一部重複し、区別がつかない部分がみられる。さらに推定された視点位置が離散的な値を示している。

各参照点と推定された視点位置との誤差を表す図4.11～図4.14から、method1については左眼と右眼で誤差の大きさに差はみられなかった。また、画面の周辺部分の参照点における誤差は画面中央付近の参照点における誤差よりも大きく、画面の周辺部分では視点位置の推定精度が低下する傾向がみられる。一方、method2では、全体的に誤差が大きいことがわかる。また、画面の周辺部分で視点位置の推定精度が低下する傾向がmethod1よりも顕著にみられる。

次に、各参照点ごとの標準偏差を示す図4.15～4.22からも、method2では、水平方向については比較的小さな値が得られており、特に大きなばらつきはみられない。しかし、垂直方向については標準偏差が大きな値となっており、非常にばらつきが大きいと言える。一方、method1では周辺部分の参照点を注視しているときの標準偏差が中央付近の参照点を注視しているときと比較して大きな値を示す傾向がみられるが、水平方向と垂直方向では大きな差はみられない。このmethod2における垂直方向のばらつきの原因としては、4.1でも述べたように、計算方法の特徴から、CCDカメラ座標系における瞳孔中心座標が離散的な値となり、さらにCCDカメラの垂直方向の位置分解能が低いため、撮像された瞳孔画像の中央付近にわずかなノイズ成分が混入した場合にでも、算出される瞳孔中心位置は本来の位置と比較して、垂直方向に大きな誤差が含まれてしまう可能性が高い。したがって、この瞳孔中心位置の算出結果を用いてCCD座標系の瞳孔中心位置からディスプレイ座標系での視点位置に変換した場合、瞳孔中心位置のばらつきが座標変換により推定されたディスプレイ座標系での視点位置に大きく影響し、瞳孔中心座標の計算結果による推定精度の悪化を引き起こすと考えられる。

そこで次に、以上の考察を検証することを目的に瞳孔中心位置の誤差が、ディスプレイ座標系における視点位置にどの程度影響をおよぼすものを調べる。図4.23に実験で取得した被験者DKの計算の基準となるCCDカメラ座標系におけるキャリブレーション

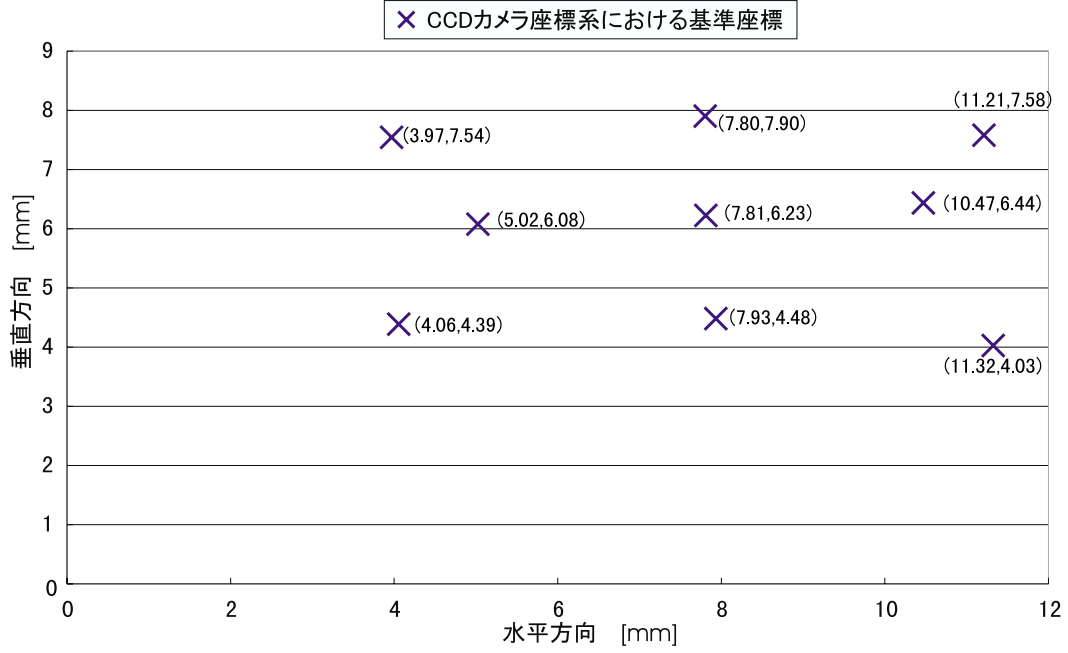


図 4.23: キャリブレーションで取得した CCD カメラ座標における基準座標（被験者 DK 左眼）

ション基準座標を示す。このキャリブレーション基準点を元に、2つの方法それぞれについて瞳孔中心位置が0.1 mm ずれた場合に推定されるディスプレイ座標系での視点位置に与える影響を試算する。

method1 では、基準座標から、眼球の回転半径を水平・垂直方向それぞれについて求め、その回転半径を元に視線方向を推定する方法を用いる。よって、図 4.23 の基準点から求められる眼球の回転半径は、中央の基準点位置から左右・上下の基準点を見ているときの回転角度が、

$$\text{左右方向 } \theta_{sh} = 12.54[\text{deg}] \quad (4.1)$$

$$\text{上下方向 } \theta_{sv} = 9.94[\text{deg}] \quad (4.2)$$

であることから（図 3.31 より）、式（3.12）、（3.13）を用いて、左右および上下の眼球の回転半径をそれぞれ求めると、

$$r_h = \frac{7.81 - 5.02}{\sin 12.54} \simeq 12.85 [\text{mm}] \quad (4.3)$$

$$r_v = \frac{6.23 - 4.48}{\sin 9.94} \simeq 10.14 [\text{mm}] \quad (4.4)$$

である。したがって、CCD カメラ座標系における瞳孔中心座標が中央の基準点位置か

ら左右および上下方向に0.1 mm 変位した場合、式 (3.14) よりそれぞれの方向における眼球の回転角度は以下ようになる

$$\theta_h = \sin^{-1} \frac{0.1}{12.85} \simeq 0.446 [deg] \quad (4.5)$$

$$\theta_v = \sin^{-1} \frac{0.1}{10.14} \simeq 0.565 [deg] \quad (4.6)$$

以上の結果から式 (3.15) より、推定される視点位置の変位は、

$$\Delta X = \frac{\tan 0.446}{\tan 12.54} \cdot 160 \simeq 5.46 [dots] \quad (4.7)$$

$$\Delta Y = \frac{\tan 0.565}{\tan 9.94} \cdot 117 \simeq 6.58 [dots] \quad (4.8)$$

となる。また、同様の試算を図4.23において左上の基準点（座標(3.97, 7.54)）の位置において左右上下にで0.1 mm ずれた場合について行った結果、水平方向で6.47 dots、垂直方向で6.77 dots のずれとなった。

一方、method2では、CCD座標系をキャリブレーション基準点を用いて4つの三角形領域に分割して、領域内の瞳孔中心座標をその領域を構成する基本ベクトルに分解し、成分比に応じた比例配分によりディスプレイ座標系での視点位置を推定する方法を用いている。そこで、図4.10において、比較的垂直方向のぼらつきが小さい下部の三角形領域に対して、method1と同様の試算を行う。

下部領域を構成する基本ベクトルは図4.23より、

$$\begin{pmatrix} x_{RT} \\ y_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.51 \\ -2.20 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{TL} \\ y_{TL} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3.78 \\ -1.84 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

となる。したがって、この基本ベクトルより、この領域内でCCD座標系における瞳孔中心位置座標が、水平方向に0.1 mm ずれた場合は、ディスプレイ座標系での視点位置は水平方向に約7.19 [dots]、垂直方向に約0.34 [dots] のずれとして現れ、垂直方向に0.1 mm ずれた場合、ディスプレイ座標系での視点位置は水平方向に約0.48 [dots]、垂直方向に約6.90 [dots] のずれとして現れることになる。method2では、線形の比例配分による座標変換をしているため、同じ領域内であれば視点位置のずれに差はない。以上の計算結果より、method1とmethod2と比較して視点位置推定精度に大きな差はみられなかった。

よって、瞳孔中心位置計測手法とあわせて使用した場合、method2では、瞳孔中心位置がその計算方法から、最小分解能が水平方向で0.021mm (CCDカメラの1/2画素分)、垂直方向が0.109 mm (CCDカメラの1画素分) であることが求められ、その影響

から図4.8、図4.10のようにディスプレイ座標系での視点位置が離散値となってしまふ。この瞳孔中心位置計算の性能限界が最大の要因となり、視点位置の推定精度が低くなっていると考えられる。一方、method1では、瞳孔中心位置計算の結果が離散値になることはなく、その結果、視点位置の推定結果のばらつきも少なく、参照点からの誤差も小さくなっており、このmethod1を利用することで全体的な視点位置の推定精度は向上しているといえる。

## 4.3 瞬目検出機能の評価実験

### 4.3.1 実験の目的

視覚系指標の測定として視点位置以外に3.3.3で述べた瞬目測定の検出精度の評価実験を行う。ここでは、人間の意志と無関係に生じる瞬目である不随意性瞬目の検出とユーザの意志を反映した瞬目である随意性瞬目の検出を行う方法の評価をすることを目的とする。3.3.3で述べた方法は、通常の不随意性瞬目以外に随意性瞬目として片眼のみ閉眼をした場合にも検出可能な機能を持っているため、以下の4種類の瞬目（閉眼状態）を確実に区別して検出できるかどうかを評価する。

- 意識的に行う1秒間程度の両眼閉眼
- 意識的に行う1秒間程度の左眼閉眼
- 意識的に行う1秒間程度の右眼閉眼
- 無意識な両眼による瞬目（不随意性瞬目）

### 4.3.2 実験の方法

被験者実験により評価を行う。被験者には実験中、自由に瞬目を行ってもらい、ある決まったタイミングで意識的に比較的長い時間（約1sec以上）閉眼してもらい、不随意性瞬目と随意性瞬目を測定する。予め決めてあるタイミングでビーブ音を鳴らし、被験者にビーブ音にあわせて閉眼してもらう。同様の実験を3回行いそれぞれについて、意識的に閉眼する眼は両眼、左眼のみ、右眼のみの3種類とした。評価方法は、実験中に被験者の両眼のビデオ映像を記録しておき、そのビデオ記録を再生して実験中のどの時刻で被験者が瞬目を行ったかを調べ、ES-HMDによる検出結果と比較する。

## 実験手順

まず被験者に着座姿勢でES-HMDを装着してもらい、測定時間は3分間であり、その間、被験者にはES-HMDの画面中央に提示した十字カーソルを注視してもらい、自由に瞬目を行ってよいとした。閉眼の合図として測定中に最低5秒以上の間隔を置いて、合計12回のビープ音を鳴らす。被験者にはビープ音が聞こえたらすぐに約1秒程度、指定された眼を閉じてもらうように指示した。

## 被験者

被験者は、男子大学院生TO1名とした。

### 4.3.3 実験結果と考察

#### 実験結果

実験の結果をまとめたものを、図4.24、4.25、4.26に示す。図中、青色の縦線で示した時刻に意識的な閉眼を行うビープ音のタイミングを示す。また、ビデオ記録により確認された自発的な両眼瞬目について、瞬目しているにもかかわらず検出されていないものを「検出失敗」、瞬目していないにもかかわらず瞬目の発生として検出されているものを「誤検出」と定義し、3回の実験をまとめた結果、および意識的な閉眼に関しても検出された結果を表4.2に示す。ビデオ記録でビープ音の合図によって意識的に閉眼を行っているとき以外に片眼のみを閉じていることはなかった。

表4.2より、両眼、左眼のみ、右眼のみの3種類すべてで、閉眼の合図のビープ音直後の比較的長い閉眼は、誤りなく検出されている。一方、通常の生理行動である意識していない不随意性瞬目の検出は、3回の実験を通じて、93.1%（ビデオ記録による不随意性瞬目発生72回中、67回検出成功）であり、ビデオ記録から瞬目が発生しているにもかかわらず、検出に失敗しているものが5回ある。また、実際には両眼の瞬目が生じていないにもかかわらず、瞬目が発生していると誤って検出しているケースも3回みられた。

#### 考察

この瞬目検出方法では、ES-HMDにより撮像された瞳孔像がCCDカメラの撮像フレーム数にして15フレーム（視点位置推定システムの測定周波数はおよそ50 Hzであるから時間にして約0.3 sec）以上、瞳孔が撮像されない場合に被験者の意識的な閉眼

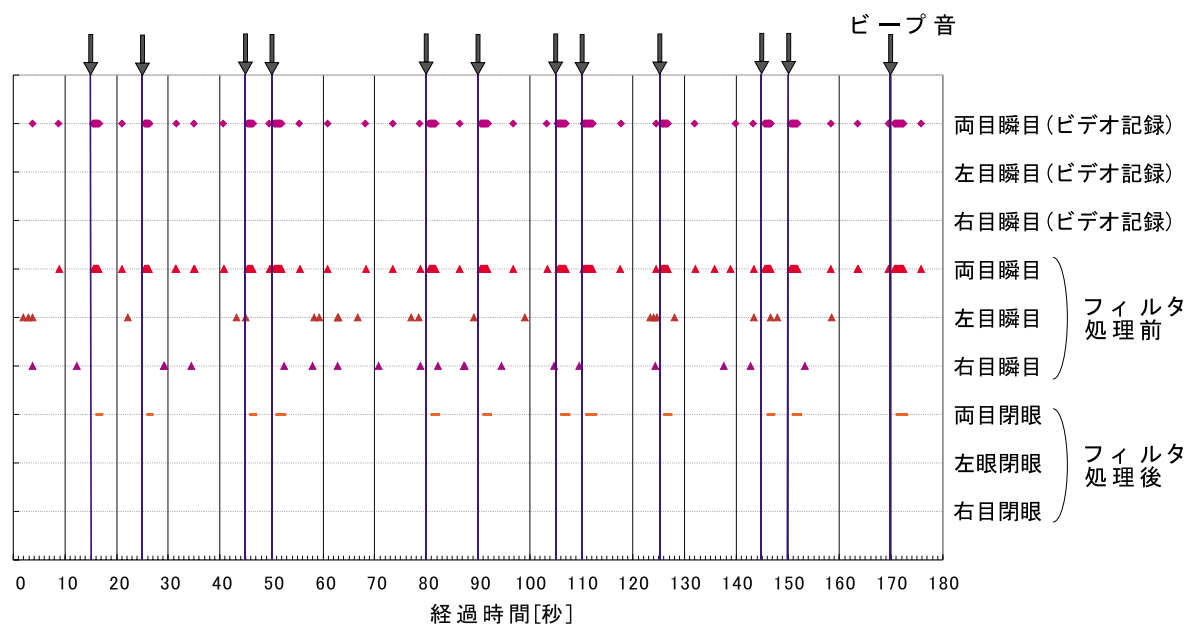


図 4.24: 閉眼検出結果 (両眼)

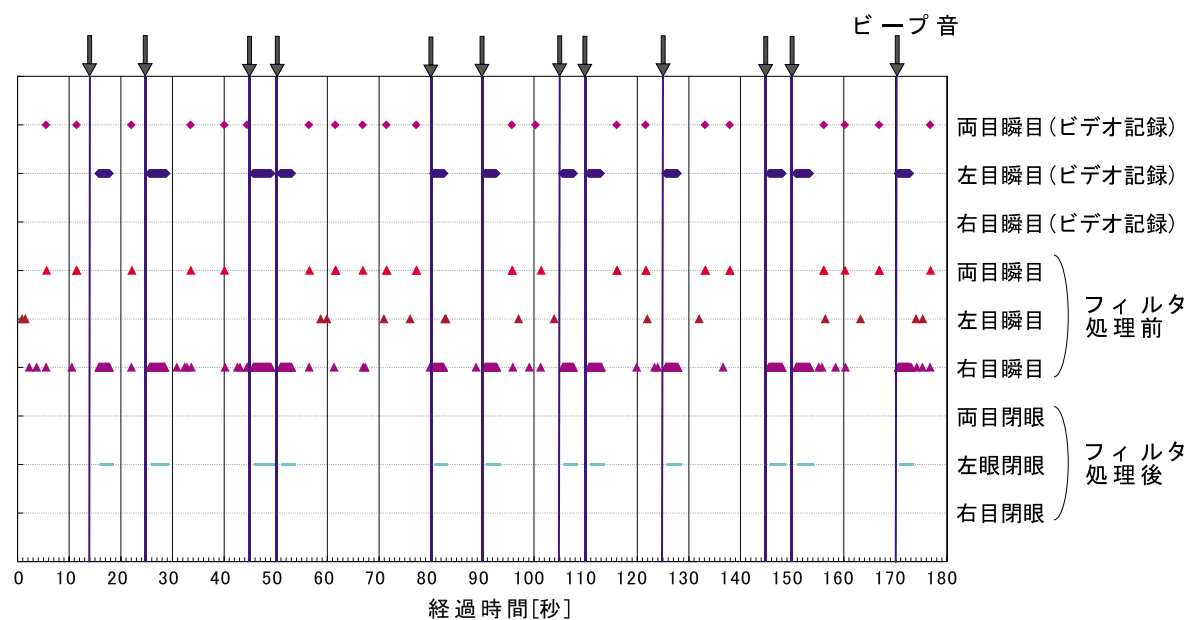


図 4.25: 閉眼検出結果 (左眼)

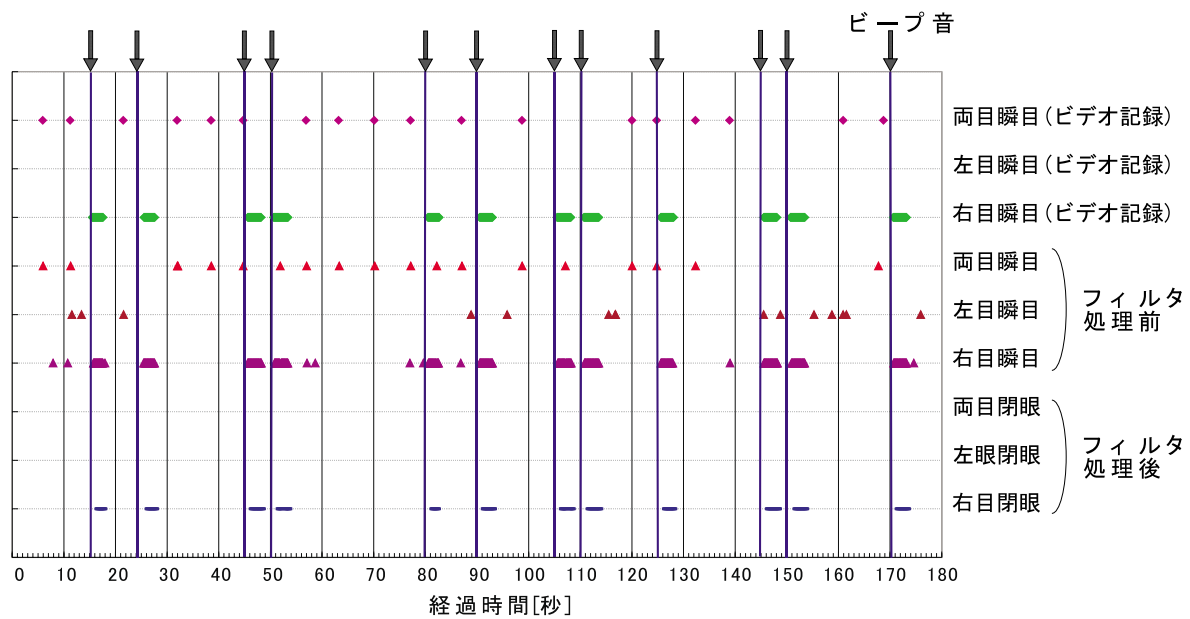


図 4.26: 閉眼検出結果 (右眼)

表 4.2: 瞬目検出結果

|             |    | ビデオ記録 (回) | 検出成功 (回) | 検出失敗 (回) | 誤検出 (回) |
|-------------|----|-----------|----------|----------|---------|
| 不随意性瞬目 (両眼) |    | 72        | 67       | 5        | 3       |
| 意識的な閉眼      | 両眼 | 12        | 12       | 0        | 0       |
|             | 左眼 | 12        | 12       | 0        | 0       |
|             | 右眼 | 12        | 12       | 0        | 0       |



であると検出している。図4.24、4.25、4.26より意図的な閉眼の検出率は100%であり、被験者の自発的な不随意性瞬目を意識的な閉眼として検出することはなく、正確に区別できていることがわかる。

通常、不随意性瞬目は両眼同時に閉眼状態になるが、閉眼状態でも睫毛の影響などでノイズが混入してしまい両眼瞬目の検出ができない場合があり、実際に図4.24、図4.25、図4.26より、ビデオ記録では両眼による不随意性瞬目を確認されているが、検出結果は片眼のみの瞬目となっているものがみられる。また、両眼瞬目の前後に片眼のみの瞬目として検出されているものもあり、これはノイズの影響以外にも左右の眼瞼がわずかな時間差を持って開閉していることも原因として考えられる。以上より、不随意性瞬目の検出ミスが生じた原因としては、次の3つが考えられる。

- ・瞬目持続時間

3.3.3で述べたように、一般に不随意性瞬目の持続時間は約200 msecと言われているが、ここでの瞬目持続時間は眼瞼が閉じ始めてから完全に開き終わるまでの時間である。しかし、ES-HMDによる瞬目の検出は眼瞼の動きによって検出するものではなく、眼瞼によって瞳孔が完全に隠れた瞬間から眼瞼が開き瞳孔が見え始める瞬間までを瞬目している時間として検出している。したがって、図4.27に示すように、ES-HMDによって検出可能な瞬目は一般に言われている瞬目持続時間(200 msec)よりも短い時間となる。よって、本方法では不随意性瞬目をES-HMDで撮像される瞳孔像がCCDカメラの撮像フレーム数で3フレーム(時間にして約60 msec)以上撮像されなかった場合に瞬目していると判断しており、瞳孔が眼瞼に隠されている時間が60msec以下の場合には瞬目として検出されないために、検出ミスが生じたと考えられる。瞬目持続時間による検出ミスの改善には、不随意性瞬目として検出するための、瞳孔の写っていないCCDカメラの撮像フレーム数を少なくして、より短い時間の瞬目にも対応できるようにすることが考えられる。しかし、CCDカメラに瞳孔像が写っているにもかかわらず、ハードウェア上の原因により、ES-HMDの撮像信号処理系からPCに形状データが入力されないことが稀に生じることがわかっており、3フレームよりも少なくしてしまうと瞬目と誤って検出される回数が増えてしまうため、試行錯誤的に3フレームと決定した。

- ・瞬目タイミング

瞬目によって瞳孔が完全に同時に隠れるわけではなく、左眼もしくは右眼がわずかに遅れることがある。このためCCDカメラの撮像タイミングによって片眼のみ

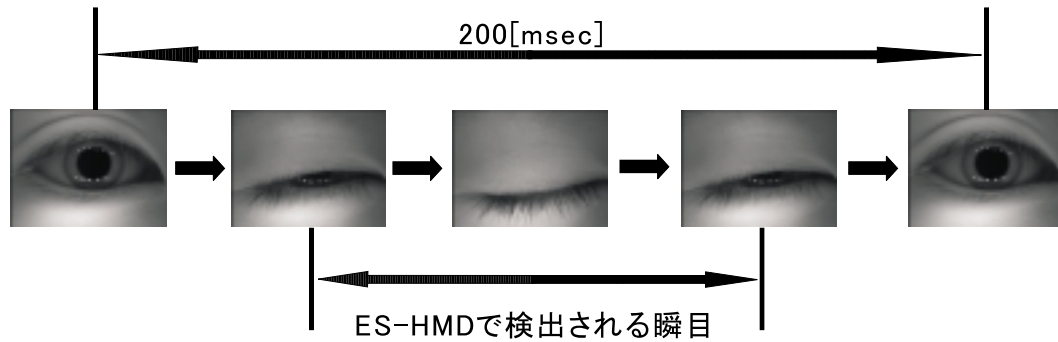


図 4.27: ES-HMD で検出可能な瞬目と一般的な瞬目

の閉眼として検出されている可能性も考えられる。

- ・ノイズの影響

眼瞼の赤外線反射率は瞳孔のそれと比較して高く、このことを利用して瞬目検出を行っているが、眼瞼が閉じているときに上眼瞼と下眼瞼の境目もしくは睫毛の部分が影になってしまい、画像を二値化すると瞳孔として検出されてしまい、目を閉じているにもかかわらず瞬目として検出されない可能性がある。

以上の結果より、不随意性瞬目の検出には多少の検出ミスが生じており、生理指標として瞬目を利用するためには検出方法の改善が必要であるが、意識的に0.5sec以上閉眼したものは3種類の実験において合計36回のビープ音のタイミングで100%検出可能であり、この機能を視線入力インタフェースに応用してマウスのクリックのように入力手段として利用することは可能である。

## 第 5 章 視点位置推定を利用した応用研究

本章では、まず本研究で開発した視点位置推定・瞬目検出技術の応用事例として、第2章で概略を述べた適応型CAIシステムへの応用可能性を考察し、適応型CAIシステムを実現するために必要となる視線入力インタフェースへの応用方法について説明する。次に、実際に視点位置推定と瞬目検出を応用した視線入力インタフェースを応用したシステムを構築し、その動作確認を行った結果を述べる。

### 5.1 視点位置推定方法の応用研究への展開

#### 5.1.1 適応型CAIシステムへの応用の可能性

本研究室では、昨年度まで適応型CAIシステムとして、原子力プラントの異常事象診断の専門知識教育のためのCAIシステムに関して基礎研究を行ってきた。適応型CAIシステムとは、第2章でも述べたように、機械システムのレベルに人間があわせるだけでなく、人間の状態（例えば疲労度、覚醒度、ストレスレベル、作業負荷、知識レベル等）を機械システムが的確に認識・判断を行い、それに応じた最適な教示を与えることで効果的な訓練環境を提供することを目的としている。このような機能を実現するためには、システムが人間の生体情報を計測し、現在のユーザの様々な状態を的確に推定することが必要となる。すなわち、機械システムが人間を認識する能力を持たなければならない。

そこで、本研究室では適応型CAIシステム実現の要素研究として、システムが推定すべき人間の内面状態として「思考過程」を取り上げ、音声認識による思考過程推定システムに関する研究を行ってきた<sup>[1][5]</sup>。このシステムでは、ユーザは図5.1に示すような、CRTモニタ上に提示されるインタフェースウィンドウに表示される原子力プラントシミュレータからの計装パラメータ値を監視し、シミュレータ上に発生する異常事象の根本原因の特定作業を行う。このシステムではシステムが人間の思考過程を推定する手がかりとして、以下のような工夫をしている。

- パラメータの表示される枠内にマウスカーソルが入らなければパラメータ値が確認できない機能を持たせ（図5.2）、そのマウスの操作履歴から「どのパラメータ

を参照しているか？」という情報を得る。

- その参照したパラメータについて「どのような判断をしたのか？」という思考発言をユーザに求め、それを音声認識することで情報を得る。

以上のユーザからの2つの情報を分析してシステムはユーザの思考過程をリアルタイムで推定するというものである。しかし、このシステムではユーザがどのパラメータを見ているのかという情報をマウス操作の履歴によって得ているため、被験者にとってはマウスカーソルをあわせなければパラメータが確認できないことになり、非常に不自然な訓練環境となってしまう。そこで、本研究で考案したES-HMDを用いた視点位置推定システムをこのマウス操作履歴の代わりに利用することによって、ユーザが実際に見ている場所をシステムが自動的に認識することができるようになるため、自然な訓練環境を提供することが可能になる。またES-HMDを利用することで、3次元仮想現実感技術の利用も可能となり3次元立体視映像による仮想制御室などをユーザに提示することで臨場感・没入感の高い訓練環境を提供することも可能となり、高い教育効果を得られると考えられる。

このように無理なく自然な状態で視点位置情報を記録し、利用することが可能になるため、視点位置を人間の生体情報として用いる適応型CAIシステムへ応用することでユーザの思考過程をシステムが判断することが容易になる。その他に、瞬目検出機能の利用によって、瞬目率等のデータから認知負荷、疲労度などを推定することも可能になり<sup>[16]</sup>、より人間に適応できるCAIシステムの実現が期待できる。

### 5.1.2 視線入力インタフェースへの応用

前項では、本研究で開発した視点位置推定技術の適応型CAIシステムへの応用可能性を考察した。これに加えて、視点位置推定システムでは、第4章の結果より視点位置推定と同時に意識的な閉眼状態の検出も可能なので、この機能を応用して視線入力インタフェースとしての応用も可能となる。視点位置推定により画面上の目的の位置に視線をあわすことにより、マウスのポインティング動作と同じ機能を実現することが可能であり、さらに左右眼のそれぞれの閉眼検出機能を応用し、インタフェースへの入力信号に替えることによって、マウスのクリック動作と同じ機能を実現することが可能となる。このような視線入力機能の利用によって、インタフェース上のどこを見たかという情報を推定すると同時に、ユーザが眼だけを用いてインタフェース操作を行えるような機能を持つシステムを計算機上に容易に構築することが可能になる。

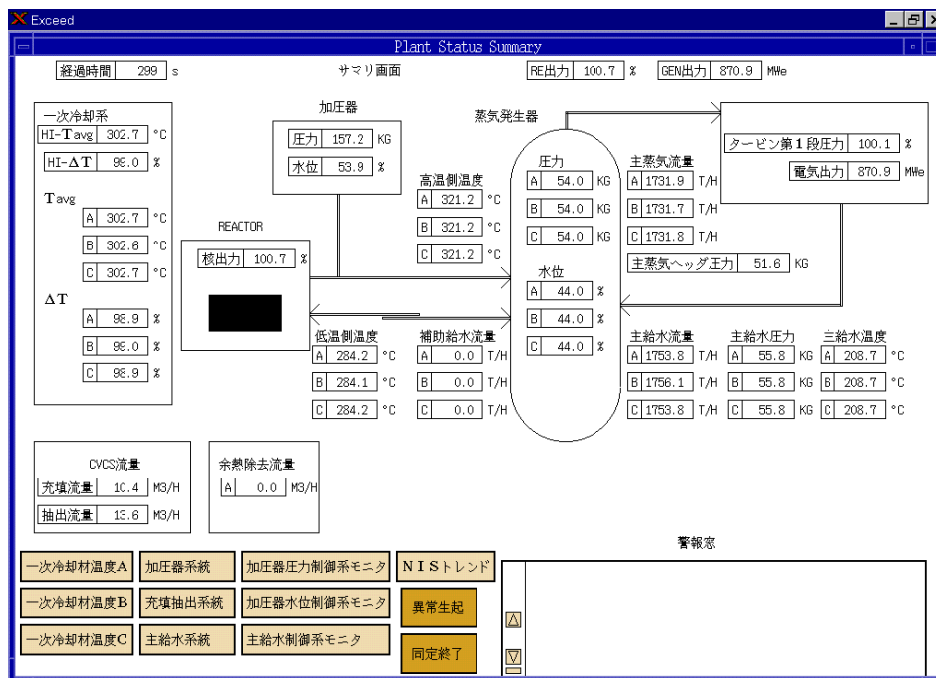


図 5.1: 思考過程推定システムのインタフェースウィンドウ例（サマリ画面）

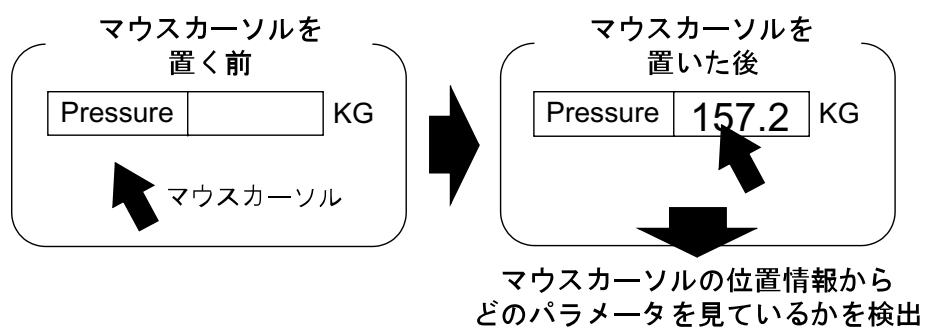


図 5.2: 思考過程推定システムの監視パラメータ情報取得方法

これら機能をもつシステムを構築すれば、本研究で目指している適応型CAIシステムを実現する上で要求される要素技術を満たすことになる（図2.3参照）。そこで本研究では、第4章で構築した視点位置推定・瞬目検出システムの応用事例として、以上の機能を実現する視線入力インタフェースシステムの構築を行うこととし、以下にそのシステムに求められる機能をまとめる。

1. ES-HMDに提示されたインタフェース画面上の情報を見ながら、ユーザは異常診断を行うことができる。
2. ユーザは自分の眼を用いてES-HMDに提示されたインタフェースの画面操作が行える。
3. ユーザがインタフェース画面上のどこを見ているかをリアルタイムで推定できる。

さらにここで、視線入力インタフェースシステムを構築する上で注意すべき点について述べる。第4章の評価実験の結果から、推定された視点位置と実際にユーザが注視している点との誤差が約20dots（ES-HMDの提示画面の横幅の約5%）であることが得られている。つまりこの結果から、実際に視線入力インタフェースの画面を設計する際には、ボタンなどの画面上のポインティング対象オブジェクト、および視点位置を推定するための対象領域の大きさを20dots以上に設定する必要がある。次節では、以上の点を踏まえて開発した視線入力インタフェースシステムについて述べる。

## 5.2 視線入力インタフェースシステム(EGOS)の開発

本節では、第4章で構築した視点位置推定・瞬目検出システムの応用例として、適応型CAIシステムの構成要素となる視線入力インタフェースシステムとして、Eye Gaze Operation System（EGOS）と呼ぶシステムの開発について述べる。

### 5.2.1 EGOSのシステム構成

本節では、視点位置推定と瞬目検出を利用して開発したEGOSのシステム構成について説明する。EGOSの特徴をまとめると以下のようなになる。

1. ユーザの視点位置を推定し、その結果をマウスカーソルのポインティング情報として利用する。

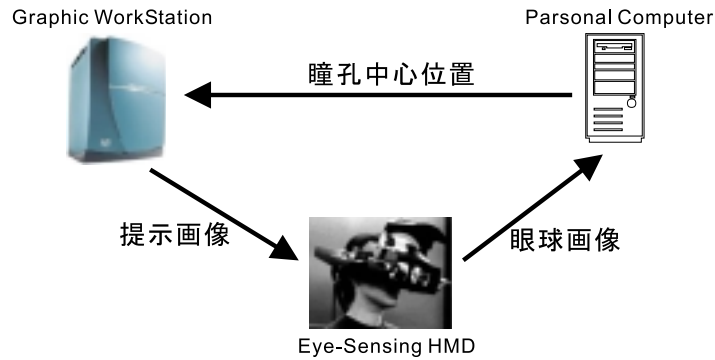


図 5.3: EGOS のハードウェア構成

2. ユーザの右眼のみの意識的な閉眼を検出し、マウスのクリック動作として使用する。

以上のような、機能を有することで、視線入力機能を実現する。

## ハードウェア構成

開発した EGOS のハードウェア構成を図 5.3 に示す。本システムは、(1) ユーザに画像の提示を行い、またユーザの眼球画像を撮像して画像処理により瞳孔形状データを抽出する ES-HMD、(2) 入力された瞳孔形状データを処理し CCD カメラ座標系での瞳孔中心位置の算出および瞬目の検出を行う PC (NEC 製:PC-9821 Xv20)、(3) 算出された瞳孔中心位置と瞬目データから視点位置の推定および意識的な閉眼の検出を行い、ES-HMD に提示する映像を生成する Graphic WS (SGI 社製:Octane MXE R10000 250 MHz) から構成される。

その他、PC で計算された CCD 座標系における瞳孔中心座標は、データを確実にかつ高速で伝送するために RS-232C によるシリアル通信で Graphic WS に送られる。

## ソフトウェア構成

本システムのソフトウェア構成について図 5.4 に示す各処理ブロック別に箇条書きで説明する。

- ES-HMD の映像提示部、眼球撮像部、撮像信号処理部の機能は 3.1 で述べたとおりである。
- PC 上の瞳孔中心算出部では、3.3.1 で述べたように本研究で考案した新しい方法を用いて ES-HMD から入力された瞳孔形状データから CCD 座標系での瞳孔中心

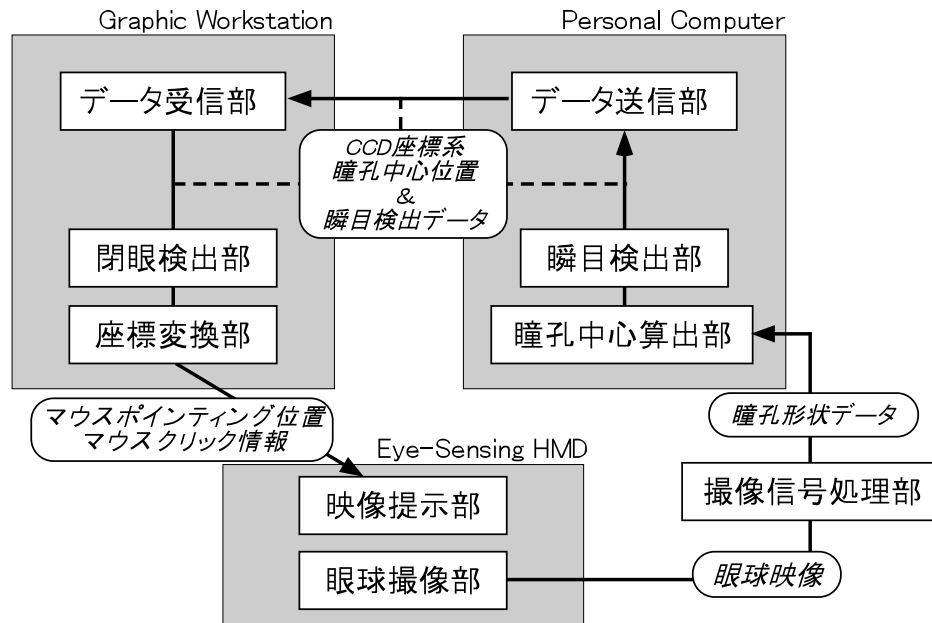


図 5.4: EGOS のシステム構成図

位置を算出する。また、瞬目検出部ではES-HMDからの瞳孔形状データが全くない画像があった場合、瞬目が発生したとして検出する。

- PCのデータ送信部はGraphic WSへCCD座標系での瞳孔中心位置データと瞬目検出信号を送る。
- 座標変換部では、データ受信部で受け取ったCCD座標系における瞳孔中心位置データから、3.3.2で述べたように本研究で考案した新しい方法を用いて提示している画面上の視点位置を推定する。そして、その位置にマウスカーソルを移動させる。
- 閉眼検出部ではPCからの瞬目検出信号をモニタし、連続した瞬目から意識的な閉眼を検出し、マウスクリック情報として利用する。

以上が、EGOSを構成する各ブロックの機能である。

## 5.2.2 EGOSの原子カプラント異常診断体験インタフェースシステムへの応用

本項では、5.2.1で述べたEGOSを原子力プラントの異常診断が体験できるインタフェースに応用したシステムを開発した。このシステムの構成図を図5.5に示す。以下



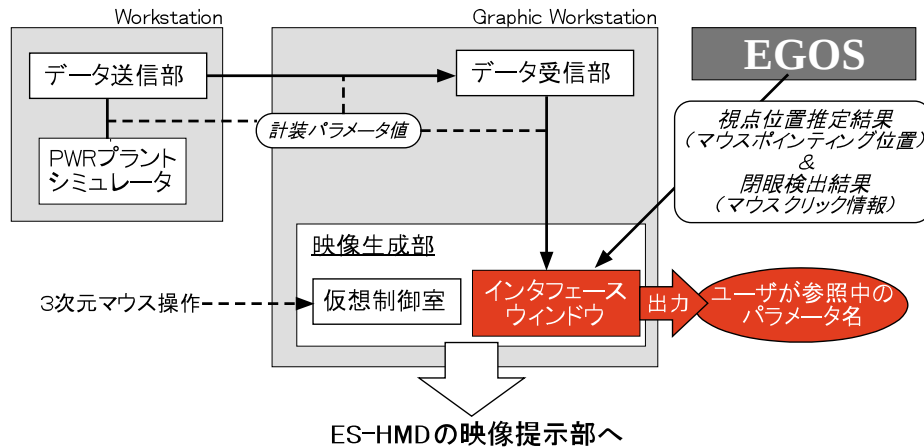


図 5.5: 構築したインタフェースシステムのシステム構成図

にその特徴を箇条書きで述べる。

1. リアルタイムで原子力プラントシミュレータを用いて原子力プラントの異常事象を模擬できる。
2. プラントシミュレータで計算された各計装パラメータ値を ES-HMD の画面のインタフェース画面上にリアルタイムで提示できる。
3. EGOS の視点位置推定結果から、ユーザーがインタフェース画面上のどのパラメータを見ているかをリアルタイムで推定し、その結果を出力できる。
4. インタフェース画面上の画面切り替えボタンの上で右眼のみの閉眼を行うことで、視線入力のみで画面の切り替えを行うことができる。

以上の機能を有することで、原子力プラントの異常診断が体験でき、さらに、ユーザーの注目しているパラメータが出力されることで、その結果を利用した異常診断中のユーザーの思考過程推定へ応用することも可能になる。

## ハードウェア構成

図 5.6 に示すように、EGOS の動作しているハードウェア構成と原子力プラントシミュレータが動作する WS（日本ヒューレットパッカー社製：HP/9000 シリーズ モデル C200）からなる。また、原子力プラントシミュレータを実装している WS からのプラント計装パラメータはソケット通信により提示画面を生成している Graphic WS に送られる。

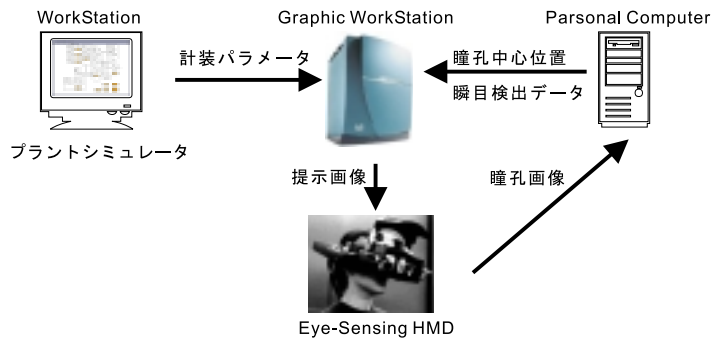


図 5.6: 構築したインタフェースシステムのハードウェア構成

## ソフトウェア構成

- PWR プラントシミュレータではリアルタイムで原子力プラントの異常事象を模擬し、計算されたプラント計装パラメータ値は Graphic WS 上で動作するインタフェースウィンドウに送られる。
- 映像生成部では、プラントシミュレータから送られてきた計装パラメータを用いて、異常事象診断用の 2 次元インタフェースウィンドウを生成し、ES-HMD に提示する。また、訓練環境として、3 次元仮想空間内に仮想制御室を構築し ES-HMD に提示する。
- 異常診断用インタフェース画面は全部で 16 画面あり、図 5.7 のように階層的な画面構成となっている。

また、第 4 章で述べた視点位置推定精度の評価実験の結果から、画面の周辺部分の視点位置推定精度が画面中央付近と比較して低く、また、視点位置の推定には、画面全体の平均で約 15 dots の誤差が生じることも考慮し、誤認識を防ぐために、なるべく画面周辺部分に注視対象となるパラメータが配置されず、各パラメータが近づきすぎないように注意して ES-HMD に提示するインタフェース画面のデザインを再構成した。画面例として、図 5.8 にサマリ画面を、図 5.9 に加圧器制御系のトレンドグラフを示す。残りのインタフェースウィンドウは付録 C に掲載する。

このインタフェースウィンドウ上で訓練者は提示されるプラント計装パラメータを監視しながら異常事象診断を行う。診断中の訓練者の注視点を本研究で考案した EGOS 利用して追跡し、視点位置推定の結果から訓練者が注視しているパラメータをリアルタイムで推定し、その結果の出力を行う。

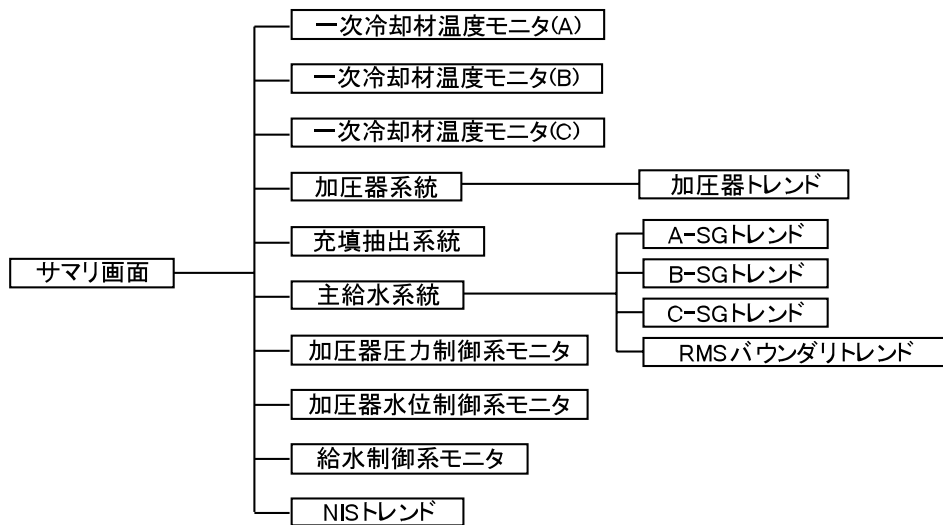


図 5.7: 思考過程推定システムのインタフェースウィンドウの階層構造

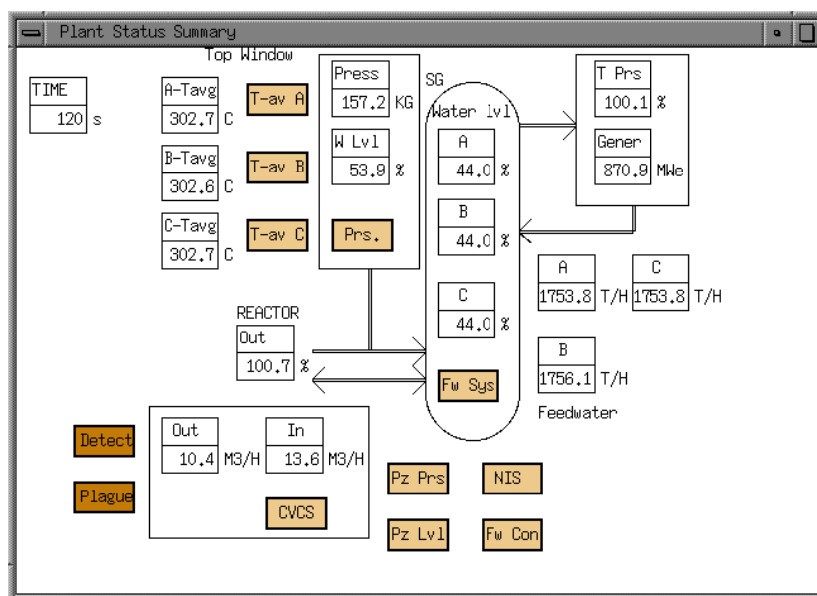


図 5.8: 異常診断用のインタフェースウィンドウ例（サマリ画面）

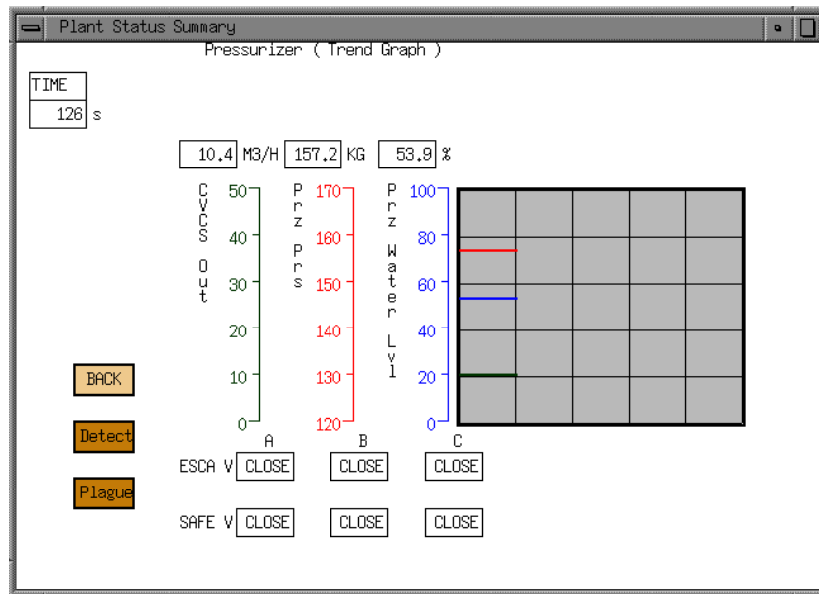


図 5.9: 異常診断用インタフェースウィンドウ例（加圧器トレンドグラフ）

以上が、EGOSを用いて開発した原子力プラント異常診断体験インタフェースの各ブロックの機能である。

## ユーザのシステム利用手順

試作したEGOSを利用した異常診断体験インタフェース環境の基本動作について述べる。図5.10に試作したシステムをユーザが利用する際の手順を示す。

1. ユーザの視点位置推定の基準点の取得を行う。
2. キャリブレーション終了と同時に図5.11に示す仮想空間内に構築した仮想制御室に入る。ここでは、3次元マウスを利用して、制御室内を自由に移動することが可能になっており、訓練者は制御盤の前まで移動する。この制御室内ではEGOSの機能は使用しない。
3. 制御盤前に移動すると異常診断用のインタフェースウィンドウが提示される。
4. インタフェースウィンドウ上でユーザが異常診断を行っている間、視点位置の推定を行い、注目しているパラメータ名を出力する。
5. 異常診断中にインタフェース画面の切り替えを、画面上の画面切り替えボタン上にマウスカーソルを移動させ、右眼を意識的に閉眼することで行う。

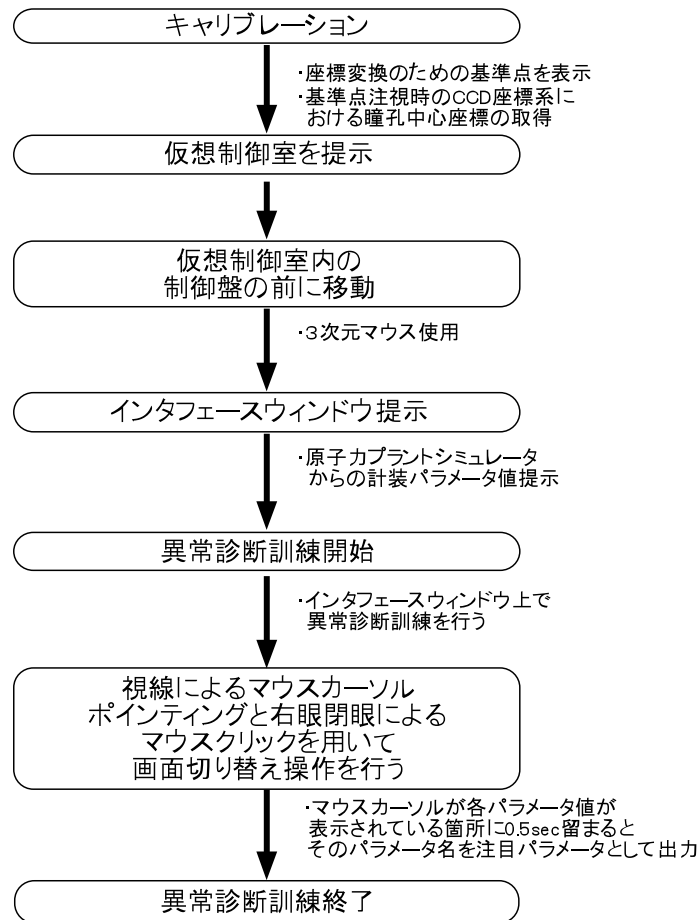


図 5.10: システムの利用手順

6. 訓練者が異常診断を終了するとシステム終了。

## 5.3 動作確認実験

本節では、開発したEGOSを利用したインタフェースシステムの動作確認実験を行った結果について述べる。

### 5.3.1 実験の目的

本実験の目的は、視点位置推定システムの応用事例として試作したEGOSを利用したインタフェースシステムの動作確認を行うことである。本研究の目的が適応型CAIシステム構成のための要素技術として、リアルタイムで視点位置推定、瞬目検出する手法の開発であることを鑑みて、本実験では、実際に視点位置推定によって訓練者が

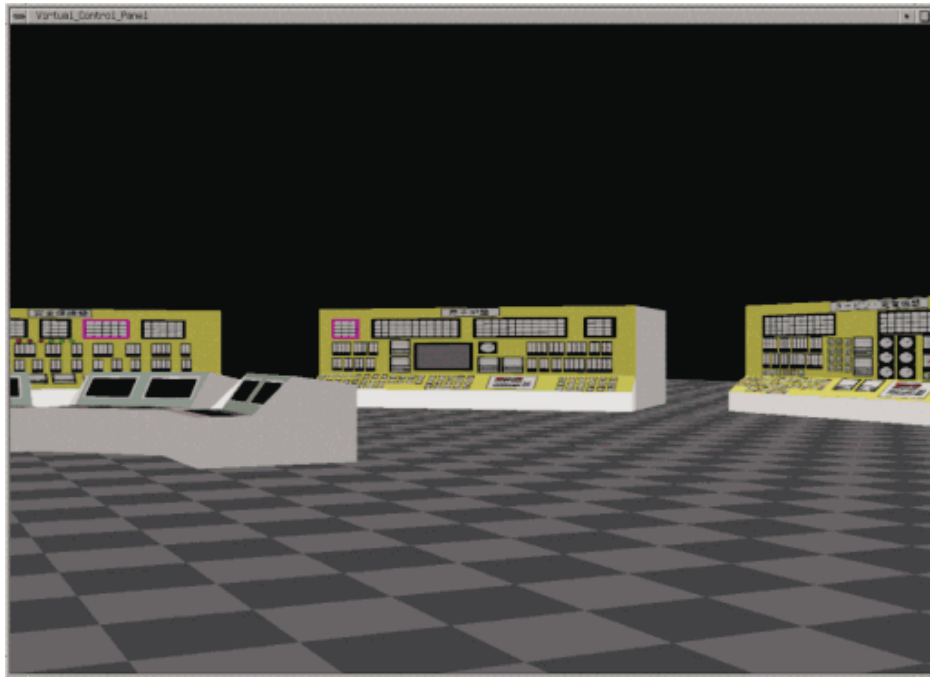


図 5.11: 仮想空間内に構築した仮想制御室

注目しているパラメータを誤りなく検出できるかどうかの確認、および視線入力機能を利用したマウスポインティングとクリック動作による画面切り替え機能の動作確認を行う。

### 5.3.2 実験方法

実験ではまず、以前に本研究室で行った異常診断の被験者実験で得られたインタフェース画面の操作記録を元に、シナリオを1種類作成した。そして実験では、被験者にそのシナリオ通りの行動をしてもらう。被験者はES-HMDを装着しており実験中に次の行動を確認できないため、実験者が隣りで次に行う行動を発声で指示し、その指示に従って行動してもらう。また、ES-HMDに提示する2次元インタフェース画面および実験者からの音声指示を同時にビデオに記録し、実験後に実験者の指示終了から画面切り替えタスク終了までの所要時間を計測した。使用したシナリオは付録Dに掲載する。なお、被験者は男子大学院生1名（被験者TO）とした。

### 5.3.3 実験結果と考察

実験後に被験者が注視したとして認識されたパラメータの出力結果を分析したところ、注視するように指示されたパラメータ以外のパラメータを注視したとシステムが誤認識したものは一つもなく、また指示された画面切り替え操作タスクを遂行できなかったケースはみられなかった。すなわち、実験者の指示通りにシナリオに沿ってパラメータの注視と画面の切り替え操作を行っていたことが確認できた。

しかし一方で、被験者の事後報告によると、画面中央付近ではマウスカーソルが視点位置におおむね追従していたが、画面の周辺部分では、被験者の視点位置とマウスカーソルの位置にずれが生じたため、被験者が故意にマウスカーソルを移動させ、システムが注視しているパラメータを検出できるように調節したという報告が得られた。このことから、本システムの注視点検出機能は画面中央付近では検出精度が高いが、画面周辺部分では推定された視点位置と実際の視点位置との間に誤差が生じてしまい、注視点検出精度が低いことが示される。この結果は、4.2の視点位置測定精度の評価実験において、中央付近の測定精度は比較的に高かったが画面の周辺部分に行くほど測定精度が低くなるという結果と一致する。

次に、実験者の指示終了から被験者が実際に画面切り替え操作タスクを終了するまでの所要時間を表5.1に示す。

表中、タスクの所要時間は0.96 secから9.90 secまで大きな幅がある。これは、上で述べたように画面の周辺部分は視点位置測定精度が低いため、インタフェースウィンドウの各画面切り替えボタンの位置によって、視線入力によりボタンをクリックするタスクに難易度の差が生じていたためと考えられる。そこで、タスクに使用したクリックボタンのインタフェースウィンドウ上での位置を調べ、画面内のボタンの位置と、タスクにかかる所要時間の関係を図5.12に示す。これは、インタフェースウィンドウ全16画面におけるボタンの位置を調べ、複数の画面で全く同じ位置にあるボタンについては、その所要時間の平均を示している。

図5.12より、画面中央付近に配置されているボタンをクリックするタスクにかかる所要時間は画面周辺部分に配置されているボタンをクリックするタスクと比べて比較的短時間でタスクを完了していることがわかる。

以上の結果より、本システムを実際に適応型CAIシステムに応用する場合、視点位置の測定精度が画面周辺部分では低下してしまうため、注視対象および視線入力対象となるオブジェクトを画面の中央付近に配置する必要があることがわかる。

表 5.1: 画面切り替えタスク終了までの所要時間

| クリックするボタン名 | ボタンが位置する画面名    | 所要時間<br>[10msec] |
|------------|----------------|------------------|
| Prs.       | サマリ画面          | 293              |
| Trend      | 加圧器系統          | 411              |
| BACK       | 加圧器トレンド        | 206              |
| BACK       | 加圧器系統          | 608              |
| Pz Prs     | サマリ画面          | 198              |
| Plague     | 加圧器圧力制御系モニタ    | 990              |
| BACK       | 加圧器圧力制御系モニタ    | 206              |
| Fw Sys     | サマリ画面          | 213              |
| A-SG       | 主給水系統          | 280              |
| BACK       | A-SGトレンド       | 219              |
| RMS        | 主給水系統          | 504              |
| BACK       | RMSトレンド        | 187              |
| C-SG       | 主給水系統          | 96               |
| BACK       | C-SGトレンド       | 288              |
| B-SG       | 主給水系統          | 110              |
| BACK       | B-SGトレンド       | 497              |
| A-SG       | 主給水系統          | 192              |
| BACK       | A-SGトレンド       | 189              |
| A-SG       | 主給水系統          | 215              |
| BACK       | A-SGトレンド       | 192              |
| BACK       | 主給水系統          | 189              |
| T-av A     | サマリ画面          | 400              |
| BACK       | 一次冷却材平均温度モニタ A | 190              |
| T-av B     | サマリ画面          | 189              |
| BACK       | 一次冷却材平均温度モニタ B | 291              |
| T-av C     | サマリ画面          | 201              |
| BACK       | 一次冷却材平均温度モニタ C | 190              |
| Pz Prs     | サマリ画面          | 109              |
| BACK       | 加圧器圧力制御系モニタ    | 901              |
| Fw Con     | サマリ画面          | 585              |
| BACK       | 給水制御系モニタ       | 716              |
| Fw Sys     | サマリ画面          | 192              |
| A-SG       | 主給水系統          | 394              |
| Detect     | A-SGトレンド       | 403              |



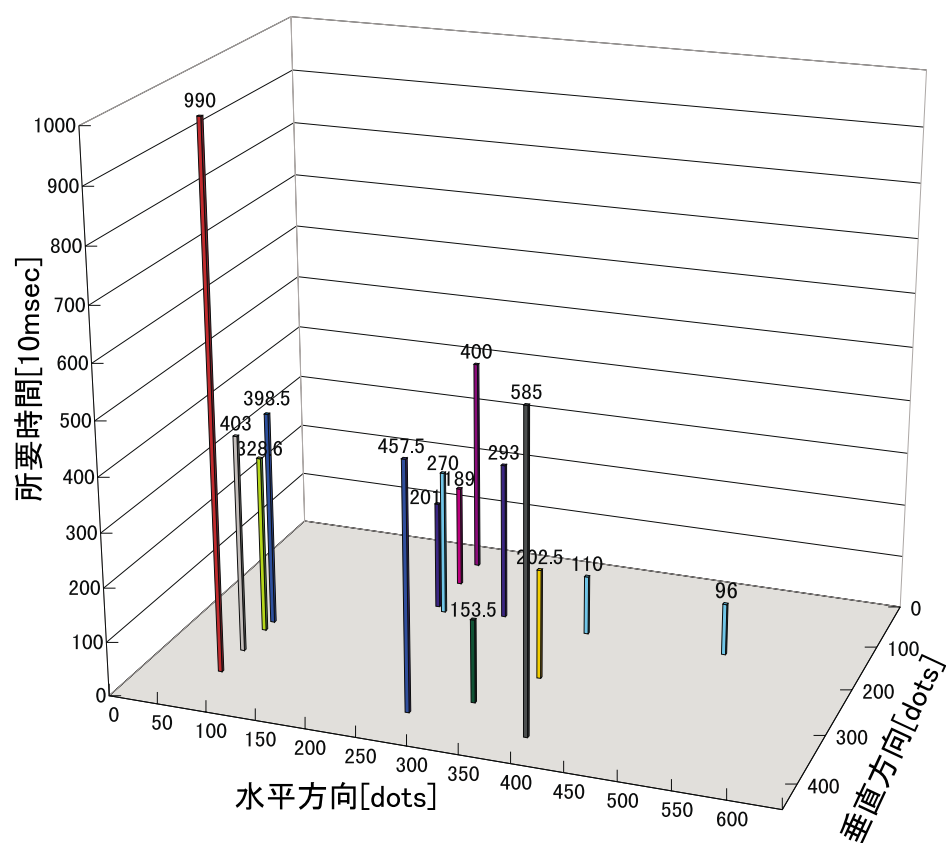


図 5.12: 各ボタン位置におけるタスク終了までの所要時間

## 5.4 EGOSの総合的考察

本研究で開発したEGOSを用いることで、ユーザの視点位置を推定しマウスカーソルを視点位置に追従させ、閉眼によりクリック動作を入力させる基本機能の動作が確認された。しかし、画面周辺部分での視点位置推定精度が低下するため、画面全体を使用した視線入力を無理なく行うことは困難であることもわかった。このことから、今後、視点位置推定精度のさらなる向上を目指すことも必要であるが、一方で、インタフェースウィンドウ上の操作対象オブジェクトを画面中央付近に集める、または、オブジェクトの大きさを周辺部分では大きくする等の工夫をすれば、実際に利用可能なシステムであると考えられる。よって、EGOSを利用することで、原子力プラントの異常診断を行っているユーザの注目している情報を自動的に認識することが可能となり、これを適応型CAIシステムにおける思考過程推定技術に応用することは容易である。

また、適応型CAIシステムへの応用だけでなく、一般的な応用も期待できる。例えば、パソコンにおけるマウス等の既存の入力デバイスは、高齢者や障害者には操作が困難なケースがある。そこで本研究で開発したEGOSを利用すれば、目標を見ること自体がポインティング作業となり、片目による閉眼でクリック動作を行うこともできるため、比較的容易に自然な動作の中で既存のマウスと同じ作業が可能となる。高齢者や障害者のような「情報貧民」にとっても便利なデバイスへの発展が期待できる。

## 第 6 章 結論

本研究では、適応型CAIシステム実現のための要素技術として、リアルタイムで視点位置の推定、瞬目の検出を行う新たな方法を考案し、その方法を実現する視覚系指標分析システムを計算機上に構築し、その測定精度を評価実験により検証することを目的とした。また、開発した視点位置推定・瞬目検出技術の応用事例として、視線によるマウスポインティングと瞬目によるマウスクリックが可能な視線入力インタフェースシステム（EGOS）を開発し、それを用いた原子力プラントの異常診断体験インタフェースを作成、その動作確認実験を行った。

第2章では、研究の背景として、本研究室で研究を進めている適応型インタフェースの一つの形態である「適応型CAIシステム」の概要について述べ、その適応型CAIで利用する人間の生体情報として視点位置、瞬目などの視覚系指標に着目した理由について述べた。また、視覚系指標を用いた従来研究について、視点位置計測の代表的な方法を紹介し、その問題点について述べた後、視点位置計測を利用した従来研究を紹介した。

第3章では、本研究でインタフェースデバイスとして使用する、Eye-Sensing HMDの概要について述べ、次いで、昨年度まで用いていた視点位置計測方法の問題点として、撮像された瞳孔像にノイズ成分が混入した場合に正しく計測されないこと、また、視点位置計測の基準点から離れた場合に測定誤差が大きくなるという問題点を指摘した。そして、それらの問題を解決するために、ノイズに対するロバスト性を高め、視点位置の推定精度をより高めるため、リアルタイム計測が可能な新しい瞳孔中心計算方法と視点位置推定方法を考案し、それについて詳細に説明した。さらに、この視点位置推定方法を応用し、瞬目のリアルタイム検出方法について説明した。

第4章では、第3章で考案した瞳孔中心位置計算方法と、視点位置推定方法について昨年度まで用いていた方法と比較し、その測定精度の評価実験を行い、その結果、昨年度の方法に比べ、ノイズに対するロバスト性に優れ、視点位置の測定精度も大幅に向上していることが確認された。また、瞬目検出に関しても、わずかながら検出エラーが見られたが、意識的な1秒程度の閉眼については100%検出可能であることが確認された。

第5章では、視点位置推定の応用事例として、原子力プラントの異常事象診断訓練

を対象とした適応型CAIシステムへの応用、および視線入力インタフェースとしての応用の可能性について検討した。そして、実際に視線入力インタフェースとしてEYE Gaze Operation System (EGOS)を開発し、さらに原子力プラントの異常診断を体験できるインタフェースシステムへと応用した。そして、実験により実際にユーザの注視している位置の推定が可能であり、視線入力デバイスとして正常に動作することを確認した。しかし、視点位置の推定精度が画面の周辺部分では低下してしまうことも判明し、画面の周辺部分のインタフェースデザインにはオブジェクトの大きさ等の注意が必要であることがわかった。

本研究で得られた成果をまとめると以下のようなになる。

- 視点位置推定は昨年度まで採用していた方法と比較して推定精度が向上した。
- 視点位置推定と瞬目検出を応用したEGOSの試作を行い、視線入力デバイスとして応用できることも確認された。
- ユーザが何を見ているかを表す注視点位置を推定することが可能であることが示された。

本研究で得られた以上の結果より、人間の生体情報の一つである視点位置および、瞬目のリアルタイム検出が可能になった。それによって、それらの生体情報を利用することによって人間の思考過程や疲労度などの内面状態の推定を行うことで、機械が人間の内面状態を推定して適切な対応を行う「適応型インタフェース」への応用の可能性を示した。また、視点位置推定システムの応用事例として開発したEGOSは、それをPCなどの入力に利用することで高齢者や障害者などにとって便利なデバイスへの発展が期待できる。

今後の課題としては、以下のことが考えられる。

- EGOSを使用する場合に最適な画面デザインの検討
- 視点位置推定精度の更なる向上
- リアルタイム視点位置推定技術の適応型CAIシステムへの応用

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、研究の方針、論文の構成について、適切かつ厳しいご指導をいただきました吉川榮和教授に深く感謝いたします。

また本研究を直接ご指導いただき、数々の適切な助言、さらに困ったときには親身になって相談に乗っていただき、最後まで暖かく導いてくださいました下田宏助教授に深く感謝いたします。

本研究を共同で行い、研究グループのリーダーとして、至らないところの多い後輩を引っ張っていつていただきました、大学院博士課程の小澤尚久氏に深く感謝いたします。

本研究を進めるにあたり、様々な面で助けていただいた、大学院修士課程1回生の米田賀一君に深く感謝いたします。

また本研究を進めるにあたり、数々の適切な助言をいただきました松下電工株式会社、福島省吾氏に深く感謝いたします。

最後に、研究を進める上で何かとお世話頂いた谷友美秘書、藤岡美紀秘書および、被験者として協力していただいた吉川研究室の学生の皆様にも心から感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] 小澤 尚久：「異常診断知識教育用 CAI におけるエラー指摘機能の検討」, 第 38 回計測自動制御学会学術講演会予稿集, 304 D-5, pp607-608 (1999).
- [2] M.Takahashi：「Mutural Adaptive Interface: Basic Concept」, Proc. of 2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication; RO-MAN'93, pp.454-459 (1993)
- [3] M.Takahashi：「Experimental Study toward Mutural Adaptive Interface」, Proc. of 3rd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication; RO-MAN'94, pp.271-276 (1994)
- [4] 青竹 雄介：「視点位置と発話のリアルタイム分析による思考過程推定システムの試作」, 計測自動制御学会システム情報部門シンポジウム'99 講演論文集, pp329-334 (1999).
- [5] 小澤 尚久：「音声認識を用いた動的認知過程推定手法の基礎研究」, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.1, No.1, pp19-28, (1999).
- [6] 宮田 洋他：「新 生理心理学 1」, 北大路書房, pp256-261, pp266-279, (1998).
- [7] J.L.Andreassi：「心理生理学」, ナカニシヤ出版 (1985)
- [8] 江崎 郁子他：「相互適応インタフェースシステムのためのオンラインヒューマンエラー分析」, 第 11 回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論文集, pp.817-823, (1995).
- [9] 「原子力 eye」, Vol.45, No.3, 日刊工業出版プロダクション, pp25, (1999)
- [10] 新井 豪：「Eye-Sensing HMD の試作とその評価実験」, 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文, (1997).
- [11] 藤山 宏昭：「Eye-Sensing HMD を用いた視点位置の計測と視覚特性実験に関する研究」, 京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー社会・環境科学専攻修士論文, (1998).

- [12] 二階堂 義明：「頭部装着型インタフェースデバイス (HIDE) の製作と応用に関する研究」, 京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー社会・環境科学専攻修士論文,(1999).
- [13] 福島 省吾：「眼球画像撮像機能付きヘッドマウントディスプレイの開発」, 第39回ヒューマン・インタフェース研究会資料, Vol.11, pp197-202,(1997).
- [14] 田多 英興 他：瞬きの心理学, 北大路書房 (1991)
- [15] Aotake, Y.:「A New Adaptive CAI System Based on Bio-Informatic Sensing : Study on Real-time Method of Analyzing Ocular Information by Using Eye-Sensing HMD and Method of Adaptive CAI System Configuration」, Proceedings of IEEE-SMC'99, Tokyo, Japan, October 12-15, Vol.3, pp733-738 (1999).
- [16] 梅田 直樹：「頭部装着型インタフェースデバイス (HIDE) のカーナビゲーションシステムへの応用」, 京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー社会・環境科学専攻修士論文,(1999).

# 付 録 目 次

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| 付録 A 視点位置推定精度の評価実験結果（被験者 YA） | 付録 A-1 |
| 付録 B 視点位置推定精度の評価実験結果（被験者 TO） | 付録 B-1 |
| 付録 C インタフェース画面               | 付録 C-1 |
| 付録 D 動作確認実験で使用了シナリオ          | 付録 D-1 |



# 付 録 図 目 次

|                                                       |        |
|-------------------------------------------------------|--------|
| A.1 method1によって推定された視点位置（被験者YA：左眼）                    | 付録 A-1 |
| A.2 method2によって推定された視点位置（被験者YA：左眼）                    | 付録 A-1 |
| A.3 method1によって推定された視点位置（被験者YA：右眼）                    | 付録 A-2 |
| A.4 method2によって推定された視点位置（被験者YA：右眼）                    | 付録 A-2 |
| A.5 method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者YA：左眼）         | 付録 A-3 |
| A.6 method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者YA：左眼）         | 付録 A-3 |
| A.7 method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者YA：左眼）         | 付録 A-4 |
| A.8 method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者YA：左眼）         | 付録 A-4 |
| A.9 method1によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者YA：左眼）  | 付録 A-5 |
| A.10 method2によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者YA：左眼） | 付録 A-5 |
| A.11 method1によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者YA：左眼） | 付録 A-6 |
| A.12 method2によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者YA：左眼） | 付録 A-6 |
| A.13 method1によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者YA：右眼） | 付録 A-7 |
| A.14 method2によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者YA：右眼） | 付録 A-7 |
| A.15 method1によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者YA：右眼） | 付録 A-8 |

|                                                       |       |
|-------------------------------------------------------|-------|
| A.16 method2によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者YA：右眼） | 付録A-8 |
| B.1 method1によって推定された視点位置（被験者TO：左眼）                    | 付録B-1 |
| B.2 method2によって推定された視点位置（被験者TO：左眼）                    | 付録B-1 |
| B.3 method1によって推定された視点位置（被験者TO：右眼）                    | 付録B-2 |
| B.4 method2によって推定された視点位置（被験者TO：右眼）                    | 付録B-2 |
| B.5 method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者TO：左眼）         | 付録B-3 |
| B.6 method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者TO：左眼）         | 付録B-3 |
| B.7 method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者TO：左眼）         | 付録B-4 |
| B.8 method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者TO：左眼）         | 付録B-4 |
| B.9 method1によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者TO：左眼）  | 付録B-5 |
| B.10 method2によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者TO：左眼） | 付録B-5 |
| B.11 method1によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者TO：左眼） | 付録B-6 |
| B.12 method2によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者TO：左眼） | 付録B-6 |
| B.13 method1によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者TO：右眼） | 付録B-7 |
| B.14 method2によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者TO：右眼） | 付録B-7 |
| B.15 method1によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者TO：右眼） | 付録B-8 |
| B.16 method2によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者TO：右眼） | 付録B-8 |
| C.1 サマリ画面                                             | 付録C-1 |

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| C.2 加圧器系統 . . . . .           | 付録 C-1 |
| C.3 加圧器トレンドグラフ . . . . .      | 付録 C-2 |
| C.4 CVCS 系統 . . . . .         | 付録 C-2 |
| C.5 主給水系統 . . . . .           | 付録 C-3 |
| C.6 A-SG トレンドグラフ . . . . .    | 付録 C-3 |
| C.7 B-SG トレンドグラフ . . . . .    | 付録 C-4 |
| C.8 C-SG トレンドグラフ . . . . .    | 付録 C-4 |
| C.9 一次冷却材平均温度モニタ A . . . . .  | 付録 C-5 |
| C.10 一次冷却材平均温度モニタ B . . . . . | 付録 C-5 |
| C.11 一次冷却材平均温度モニタ C . . . . . | 付録 C-6 |
| C.12 RMS トレンドグラフ . . . . .    | 付録 C-6 |
| C.13 加圧器圧力制御系モニタ . . . . .    | 付録 C-7 |
| C.14 加圧器水位制御系モニタ . . . . .    | 付録 C-7 |
| C.15 給水制御系モニタ . . . . .       | 付録 C-8 |
| C.16 NIS トレンドグラフ . . . . .    | 付録 C-8 |

## 付 録 表 目 次

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| D.1 CAIシステムの動作確認実験に用いたシナリオ前半 . . . . . | 付録D-1 |
| D.2 CAIシステムの動作確認実験に用いたシナリオ後半 . . . . . | 付録D-2 |

## 付録 A 視点位置推定精度の評価実験結果（被験者YA）

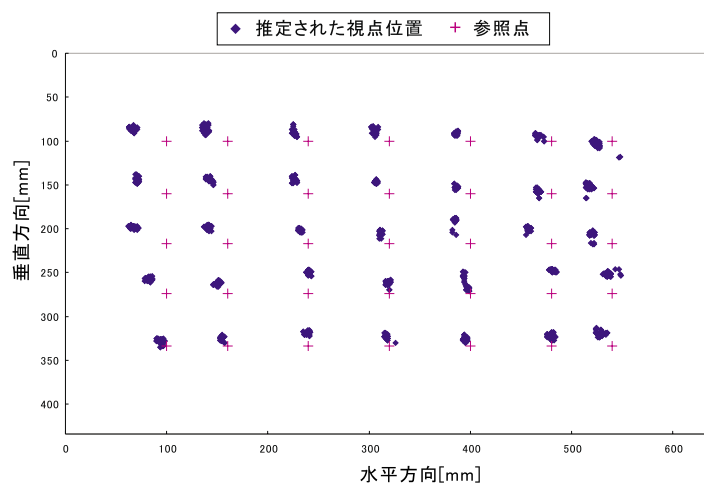


図 A.1: method1 によって推定された視点位置（被験者YA：左眼）

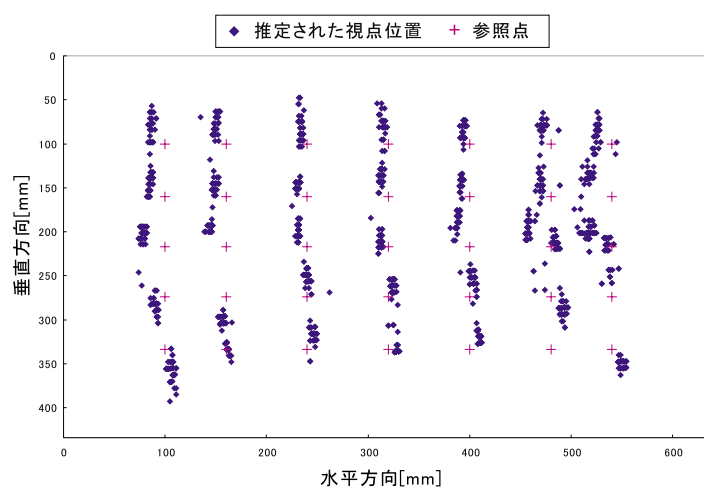


図 A.2: method2 によって推定された視点位置（被験者YA：左眼）

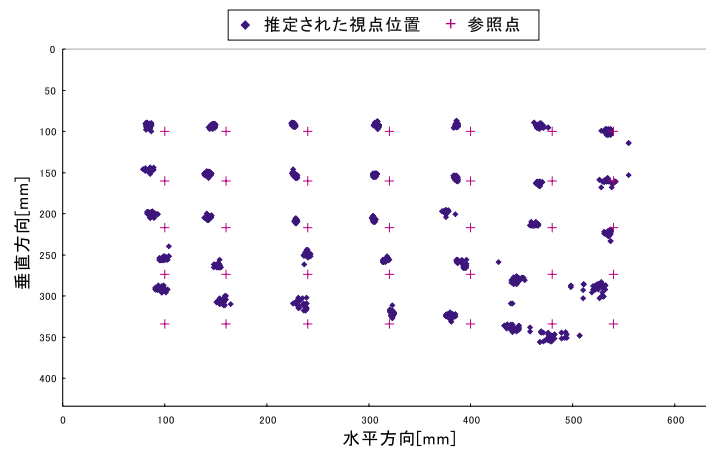


図 A.3: method1 によって推定された視点位置（被験者YA：右眼）

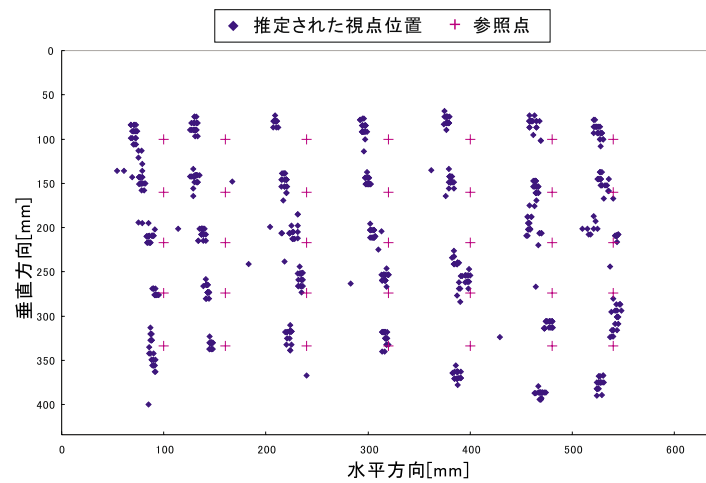


図 A.4: method2 によって推定された視点位置（被験者YA：右眼）

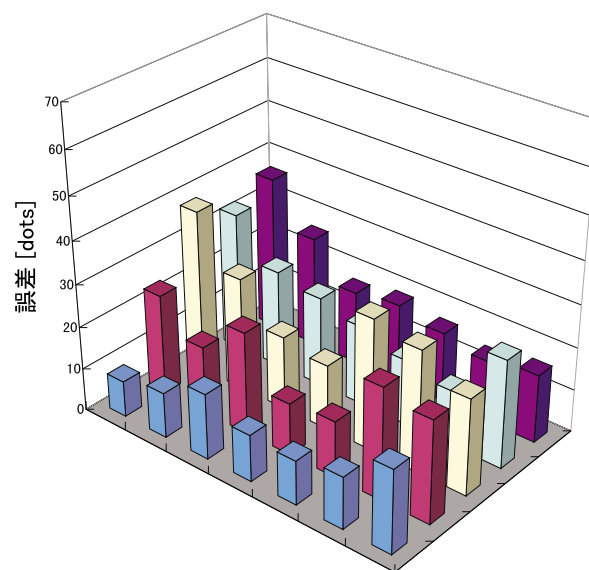


図 A.5: method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者YA：左眼）

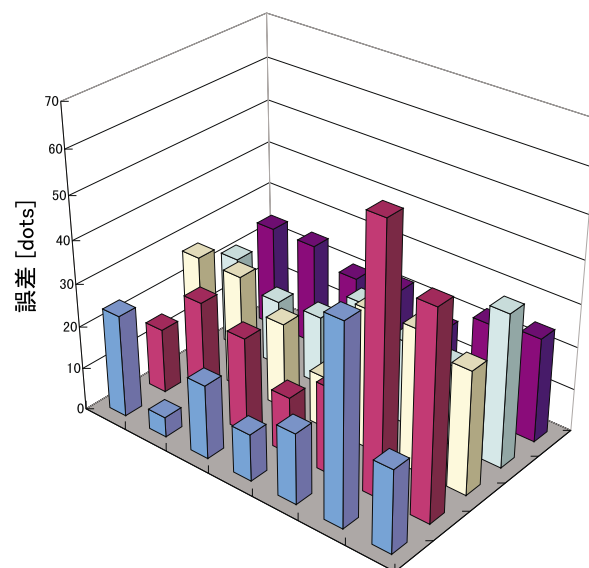


図 A.6: method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者YA：左眼）

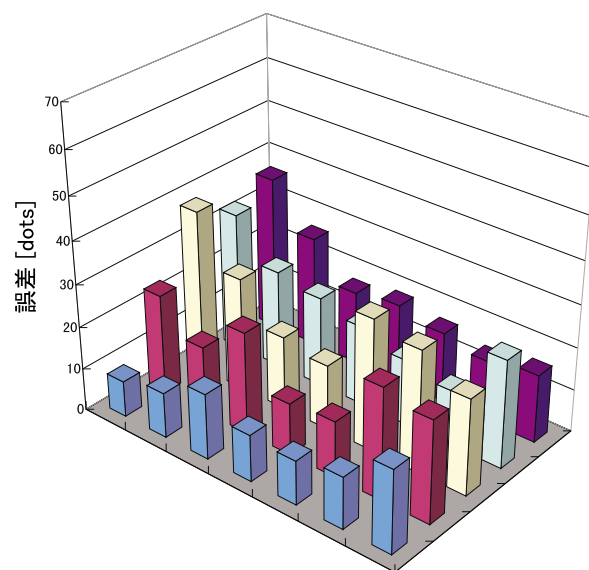


図 A.7: method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者 YA : 左眼）

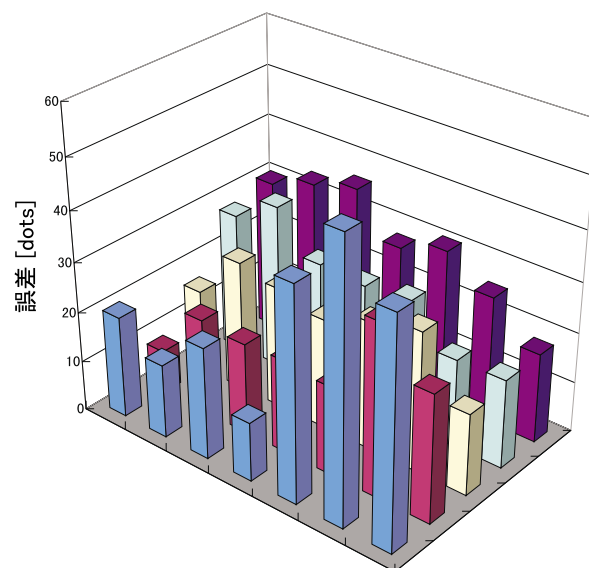


図 A.8: method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者 YA : 左眼）



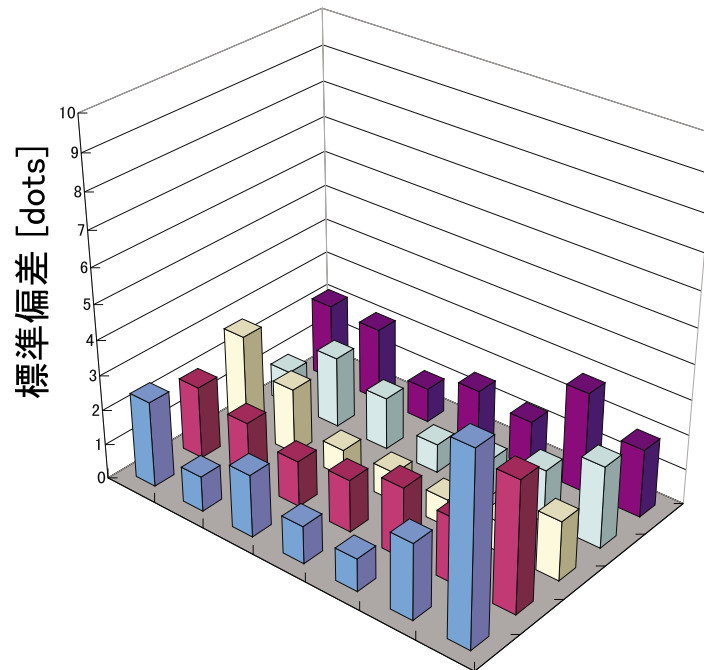


図 A.9: method1 によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差  
(被験者 YA : 左眼)

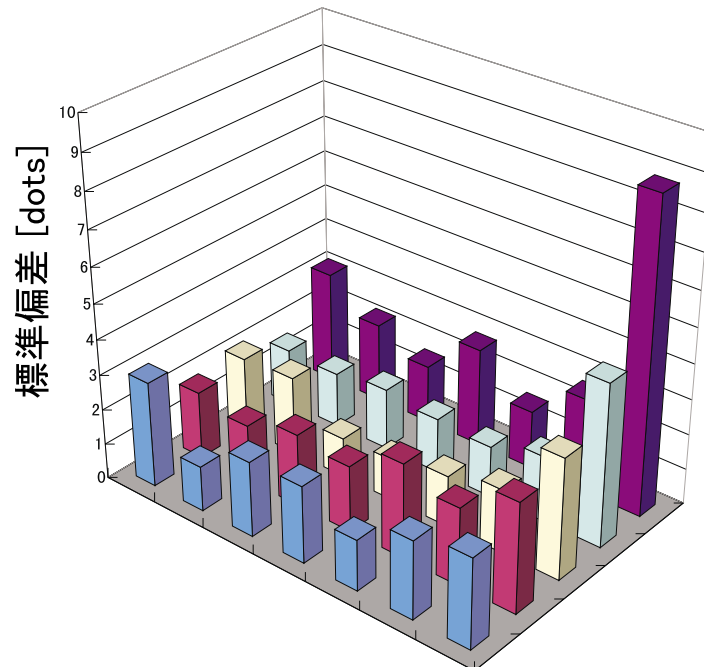


図 A.10: method2 によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差  
(被験者 YA : 左眼)

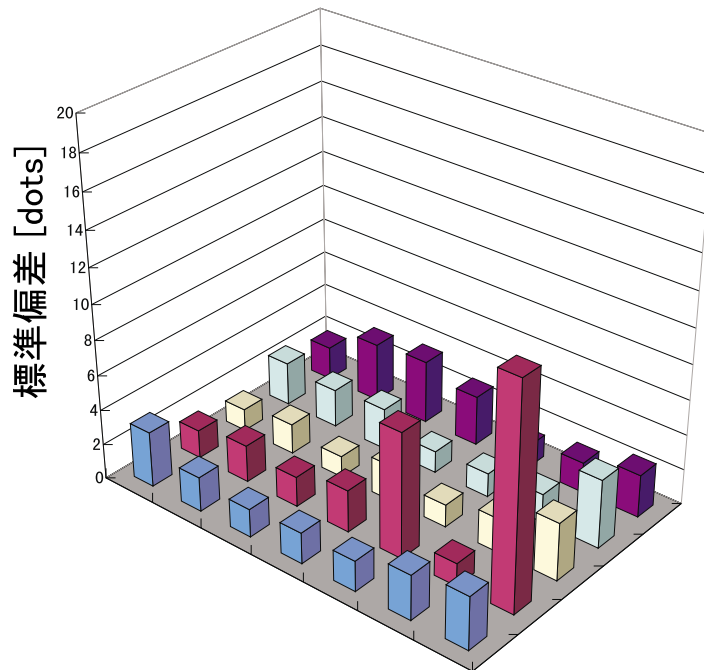


図 A.11: method1 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 YA : 左眼）

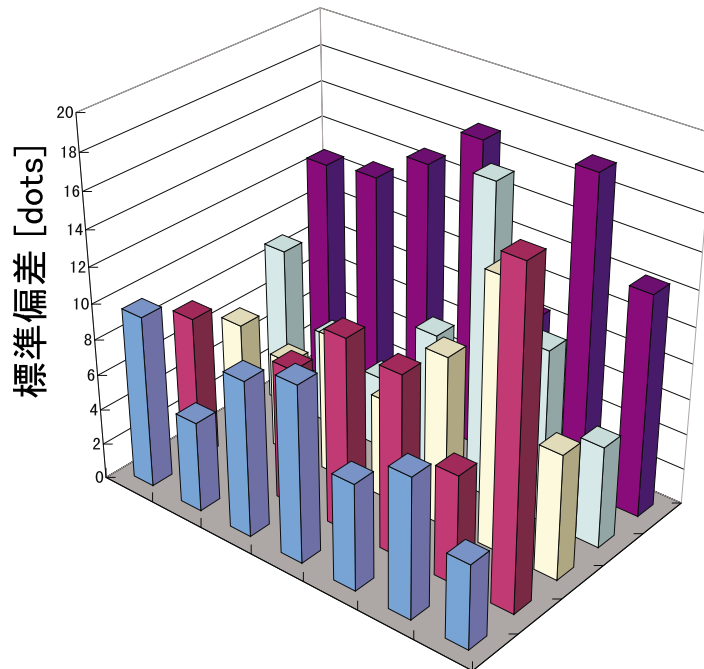


図 A.12: method2 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 YA : 左眼）

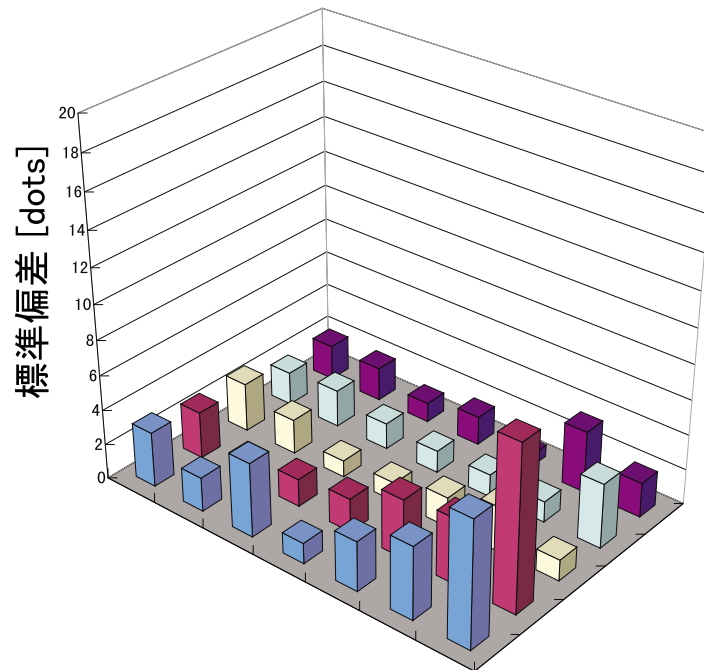


図 A.13: method1 によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者 YA : 右眼）

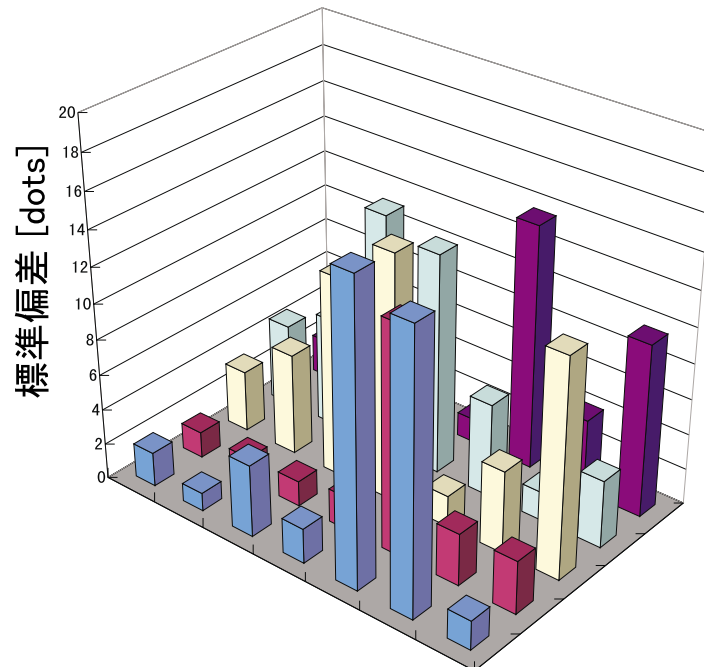


図 A.14: method2 によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者 YA : 右眼）

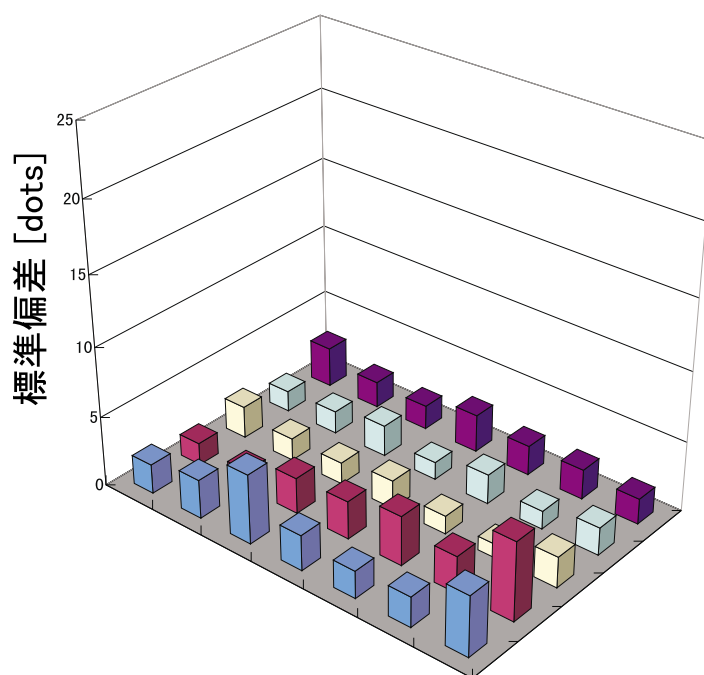


図 A.15: method1 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 YA : 右眼）

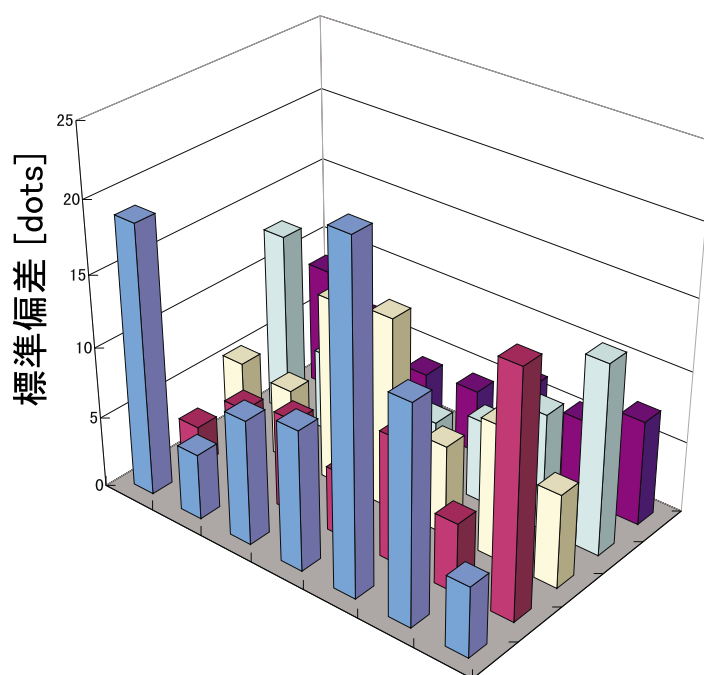


図 A.16: method2 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 YA : 右眼）

## 付録 B 視点位置推定精度の評価実験結果（被験者 TO）

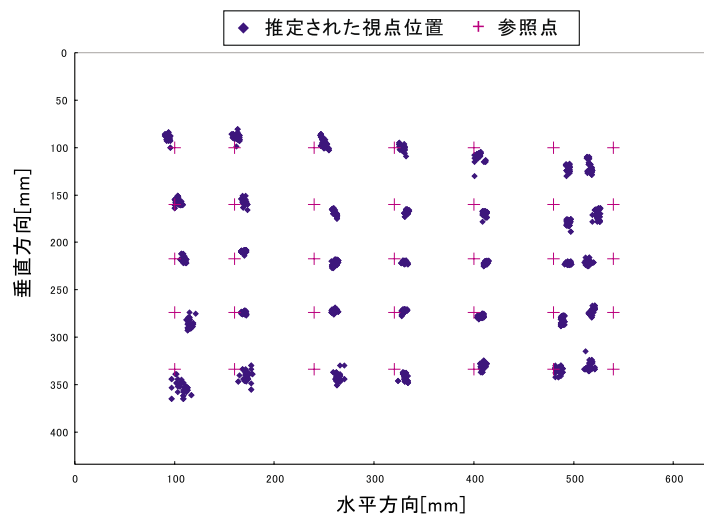


図 B.1: method1 によって推定された視点位置（被験者 TO : 左眼）

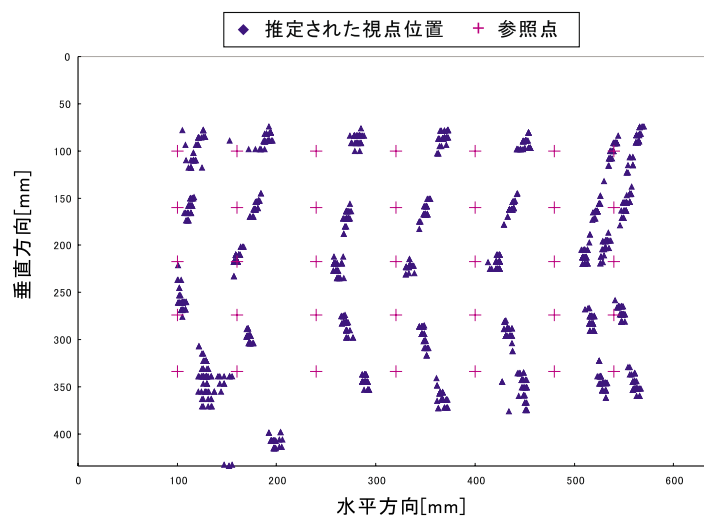


図 B.2: method2 によって推定された視点位置（被験者 TO : 左眼）

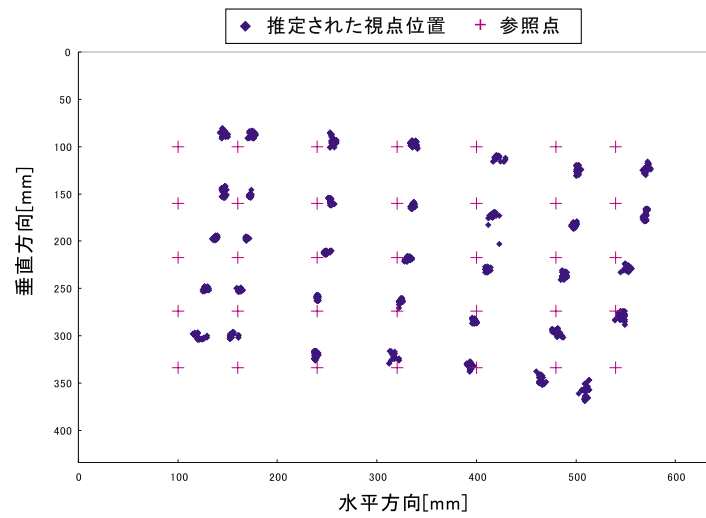


図 B.3: method1 によって推定された視点位置（被験者 TO : 右眼）

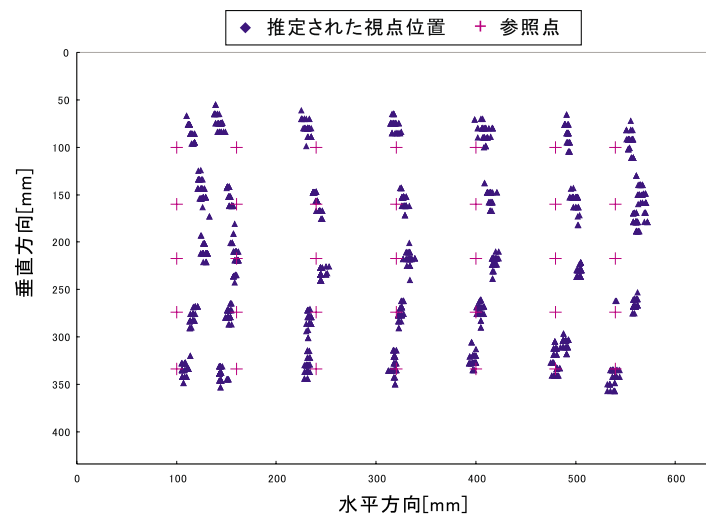


図 B.4: method2 によって推定された視点位置（被験者 TO : 右眼）

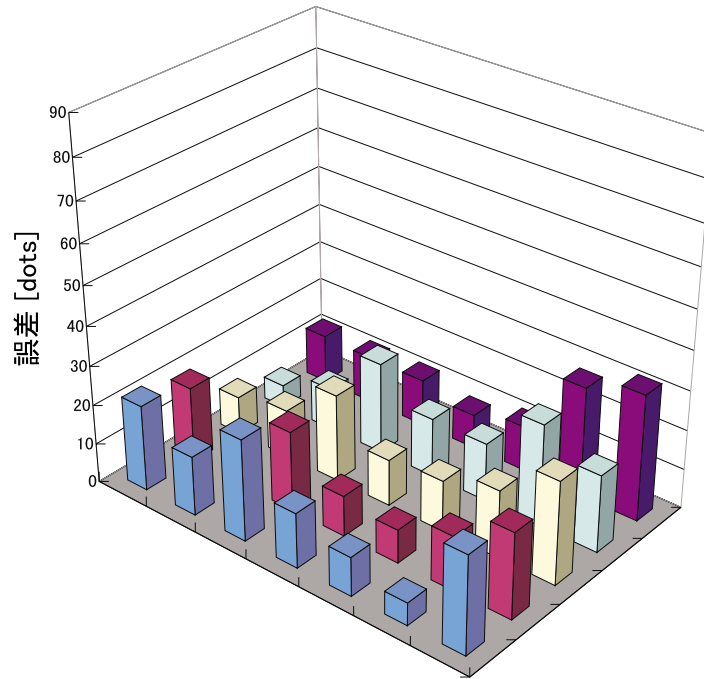


図 B.5: method1 によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者 TO : 左眼）

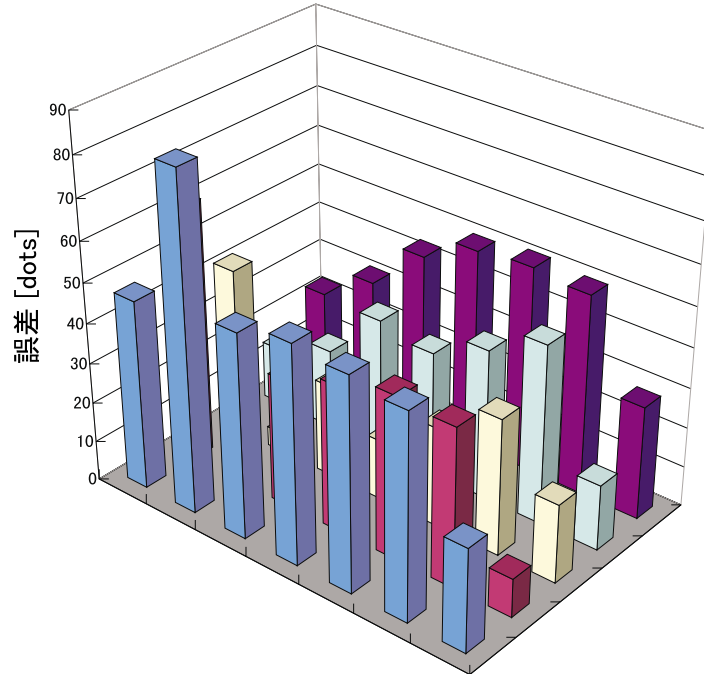


図 B.6: method2 によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者 TO : 左眼）

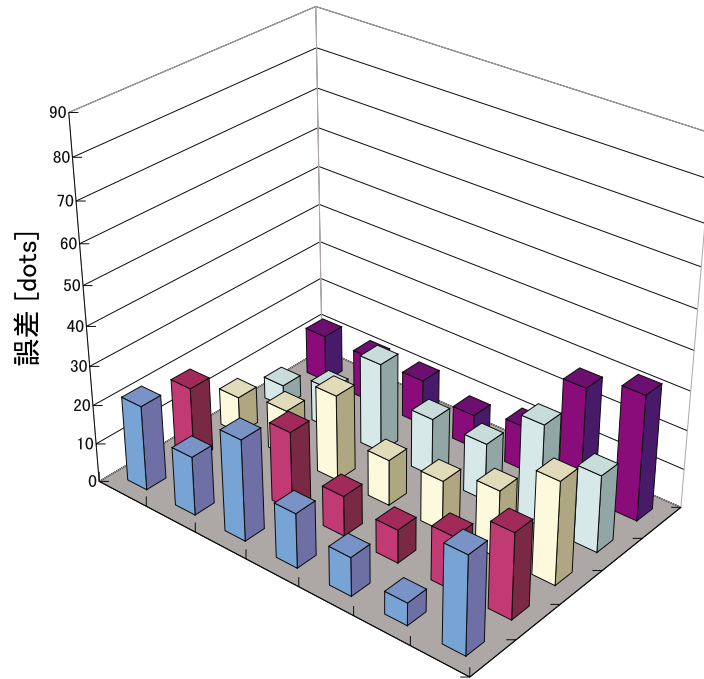


図 B.7: method1によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者TO：左眼）

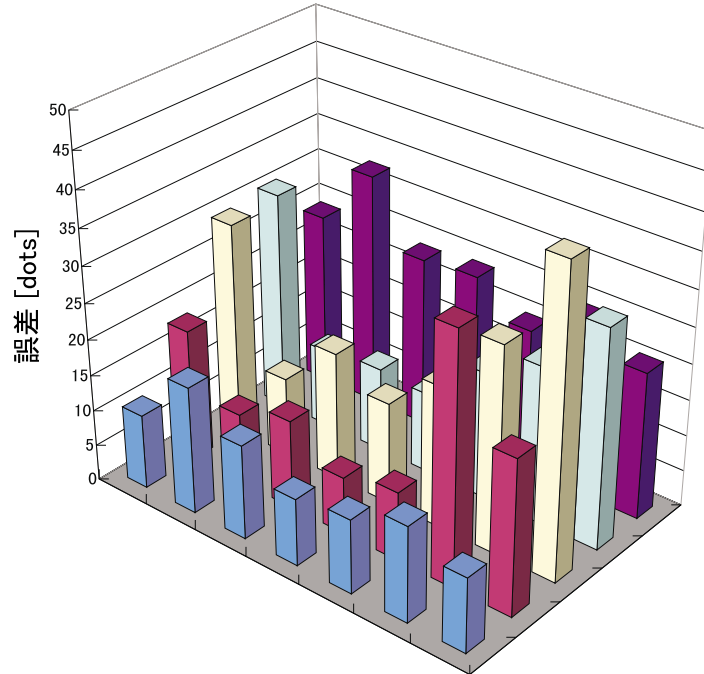


図 B.8: method2によって推定された各参照点における視点位置の誤差（被験者TO：左眼）



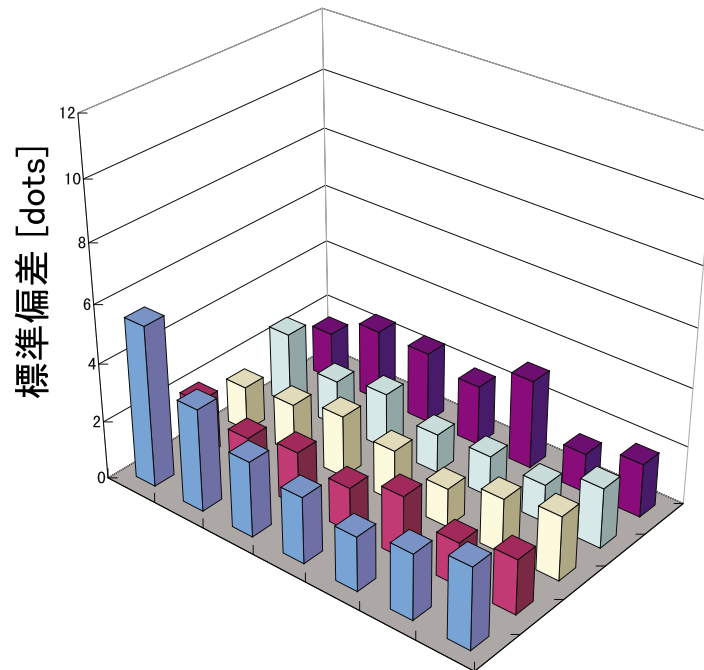


図 B.9: method1によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者 TO : 左眼）

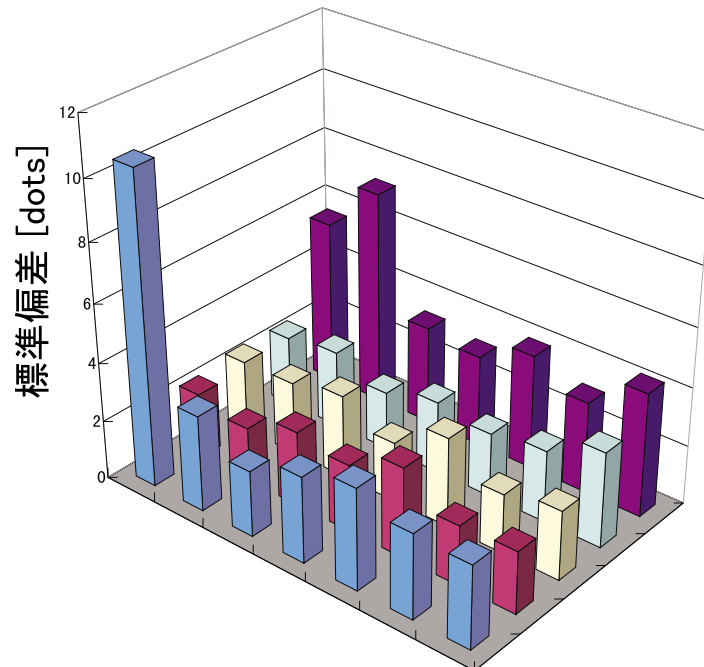


図 B.10: method2によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者 TO : 左眼）

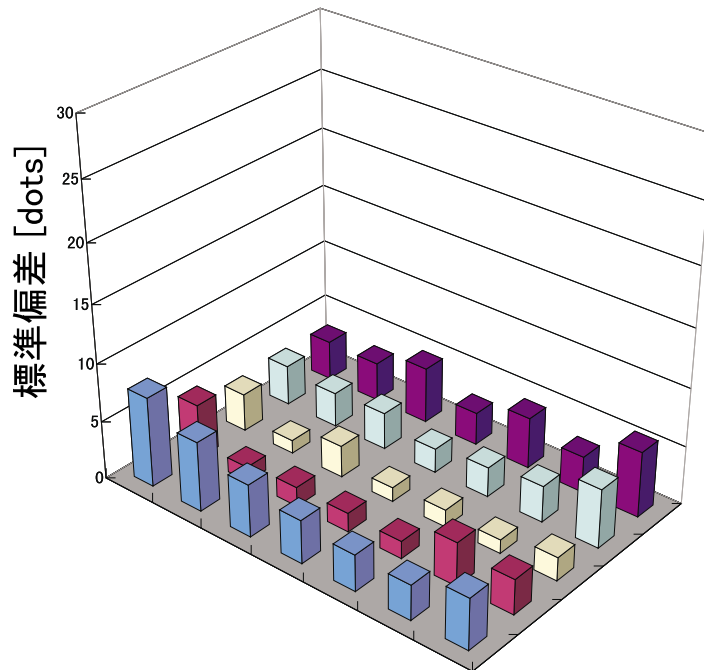


図 B.11: method1 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 TO : 左眼）

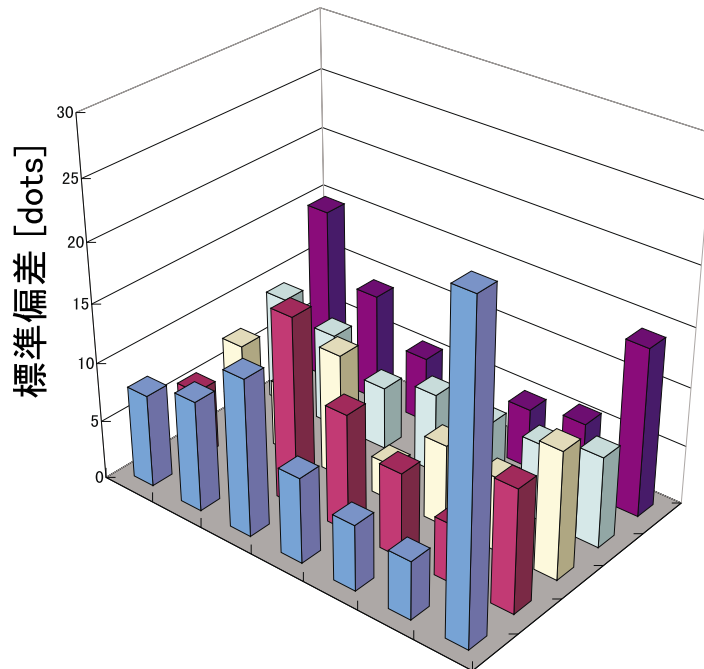


図 B.12: method2 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 TO : 左眼）

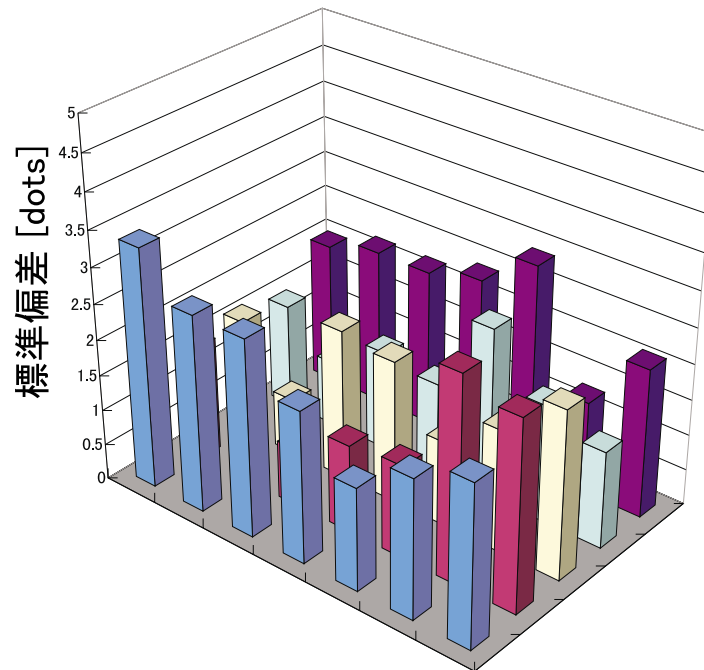


図 B.13: method1 によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者 TO : 右眼）

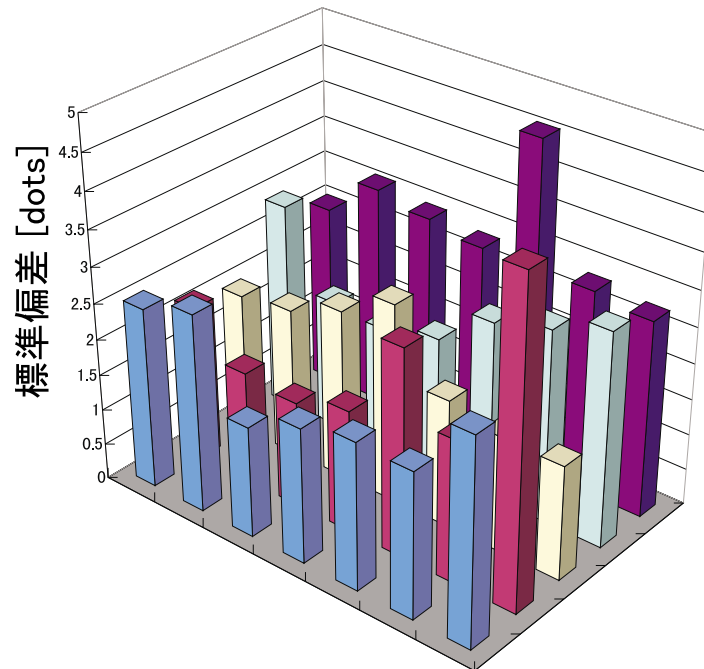


図 B.14: method2 によって推定された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差（被験者 TO : 右眼）

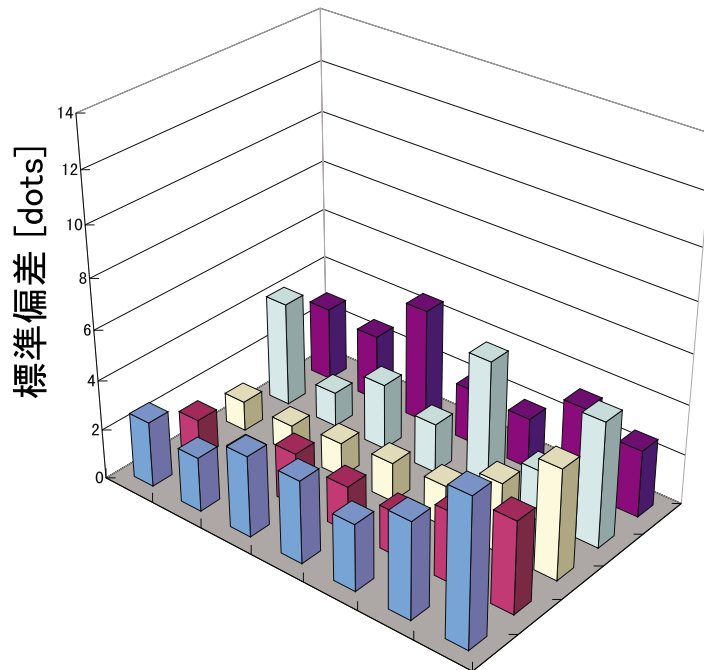


図 B.15: method1 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 TO : 右眼）

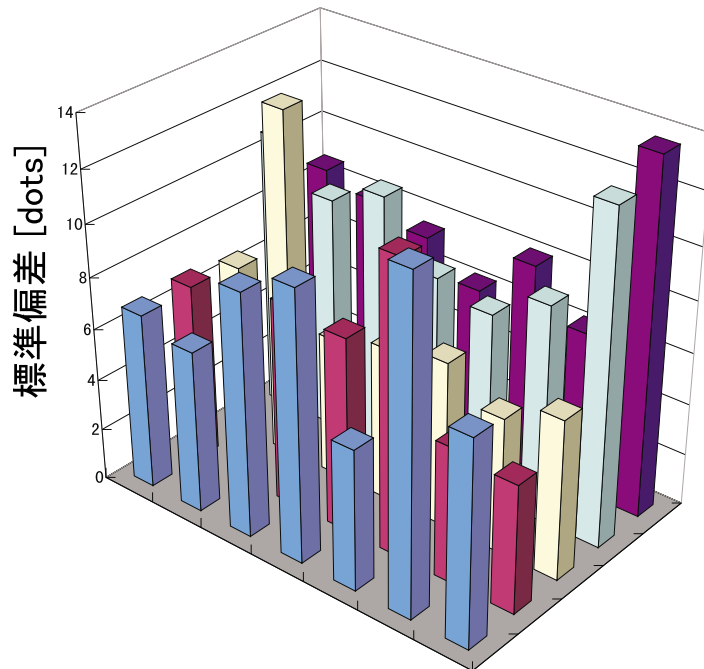


図 B.16: method2 によって推定された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差（被験者 TO : 右眼）

## 付録 C インタフェース画面

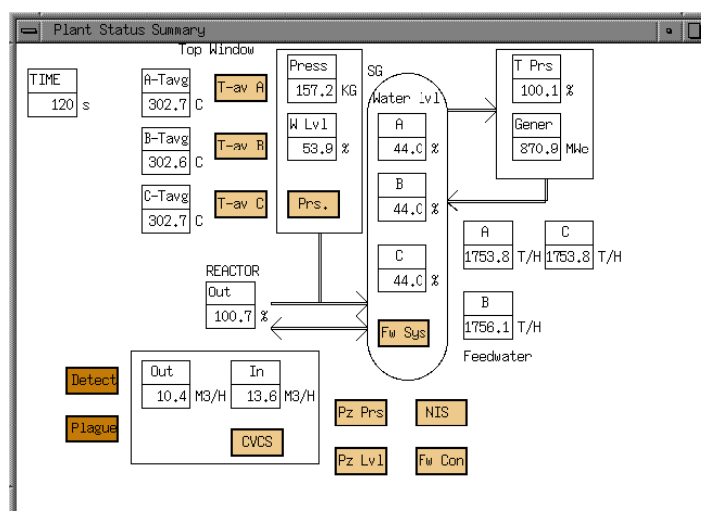


図 C.1: サマリ画面

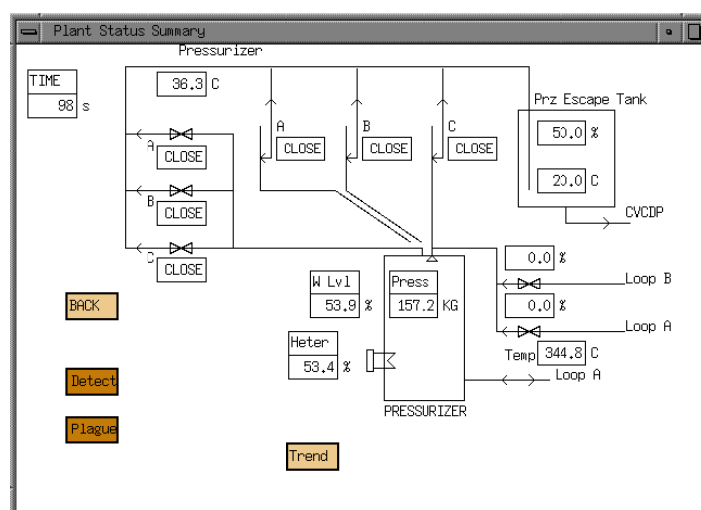


図 C.2: 加圧器系統

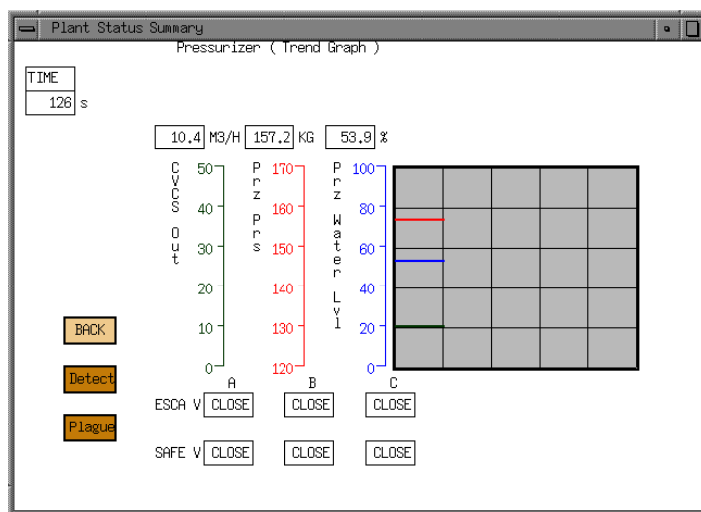


図 C.3: 加圧器トレンドグラフ

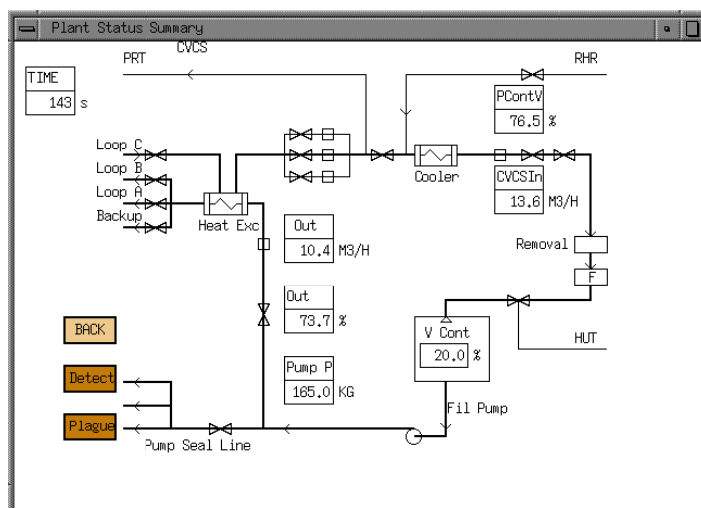


図 C.4: CVCS 系統

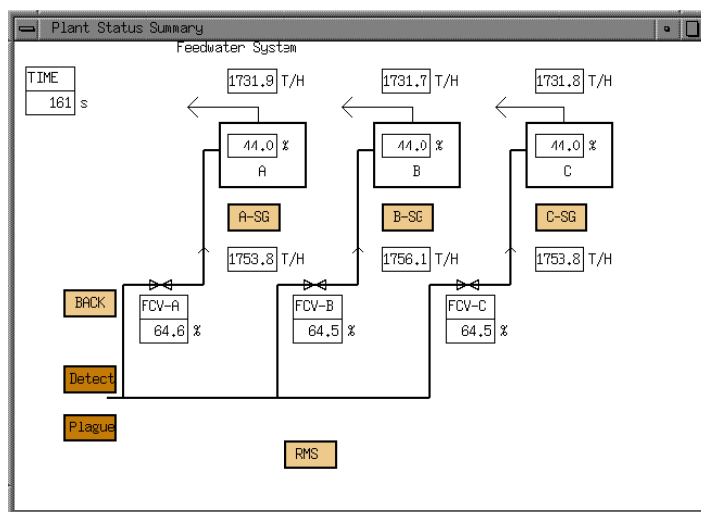


図 C.5: 主給水系統

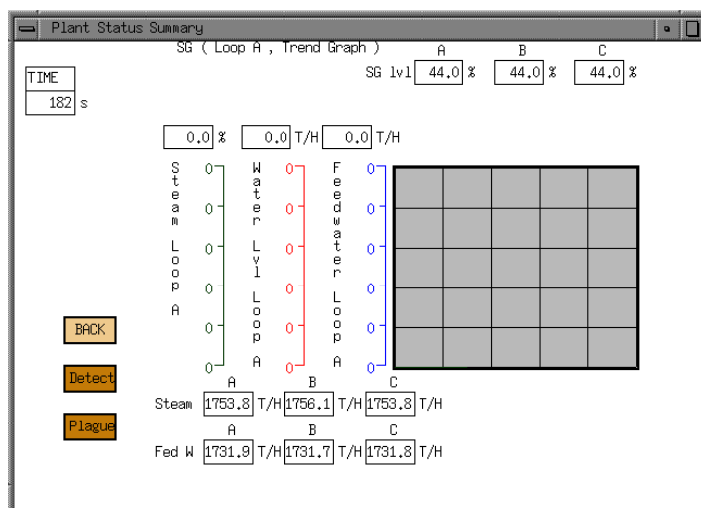


図 C.6: A-SGトレンドグラフ

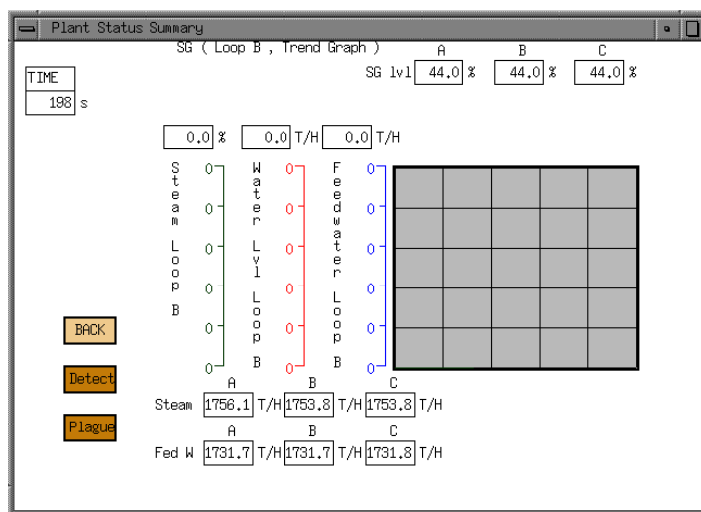


図 C.7: B-SGトレンドグラフ

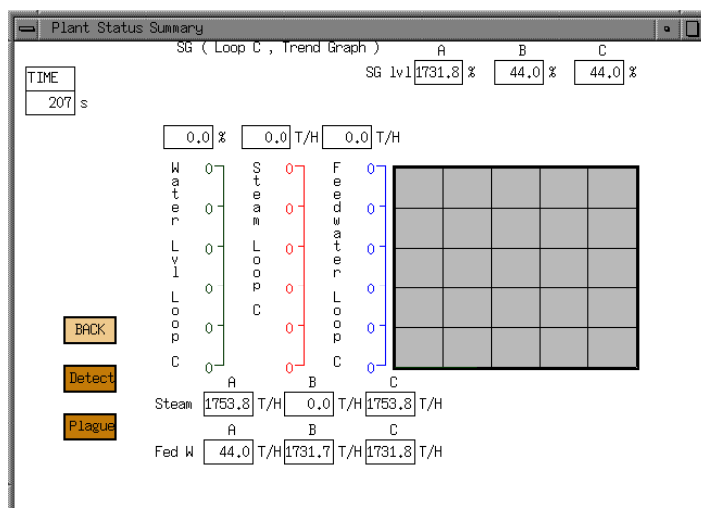


図 C.8: C-SGトレンドグラフ



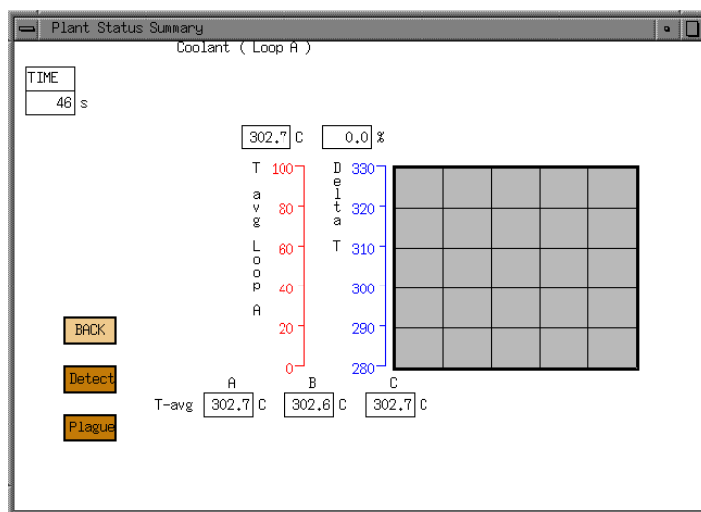


図 C.9: 一次冷却材平均温度モニタ A

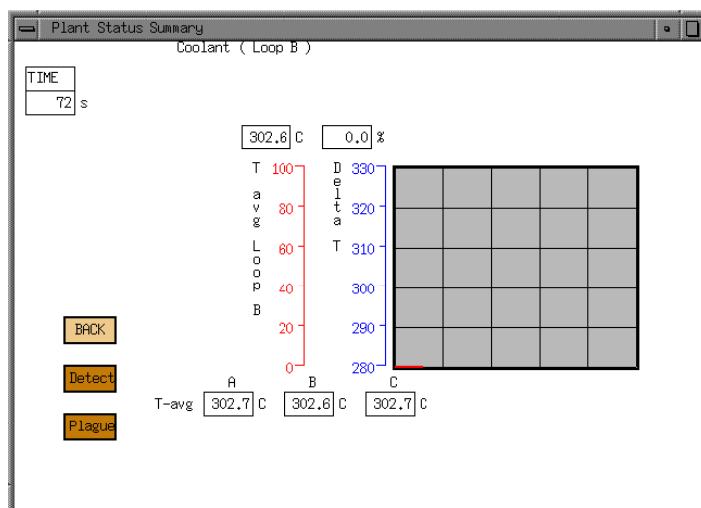


図 C.10: 一次冷却材平均温度モニタ B

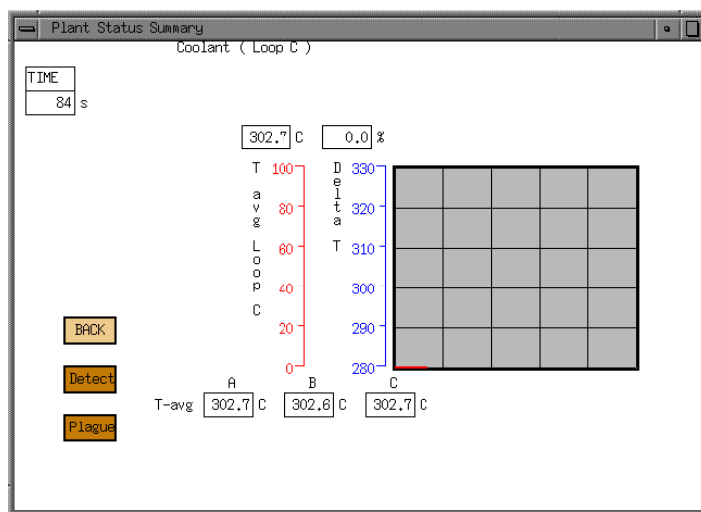


図 C.11: 一次冷却材平均温度モニタ C

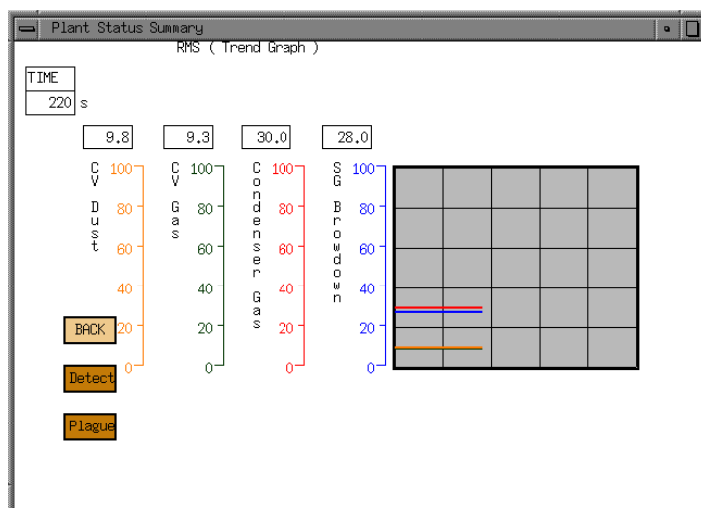


図 C.12: RMSトレンドグラフ

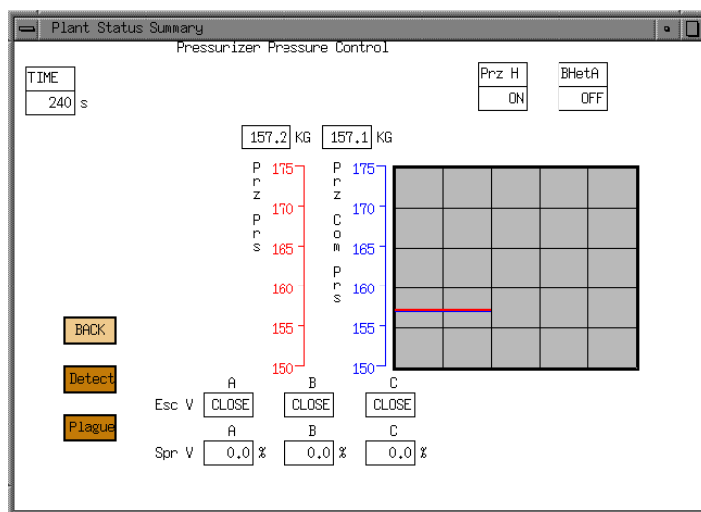


図 C.13: 加圧器圧力制御系モニタ

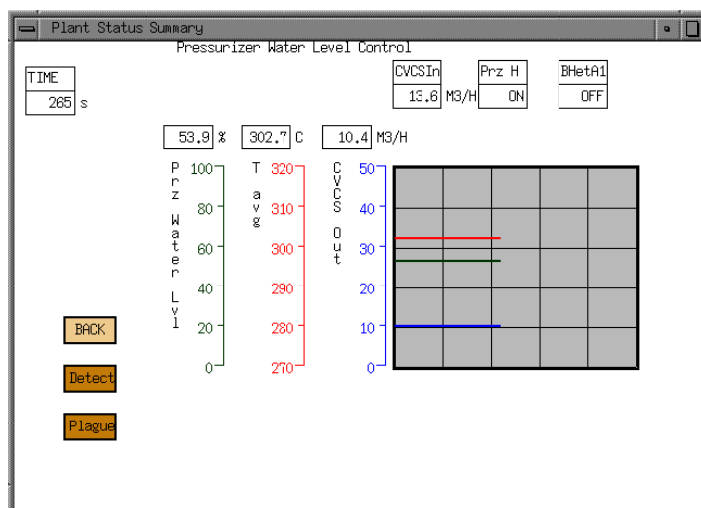


図 C.14: 加圧器水位制御系モニタ

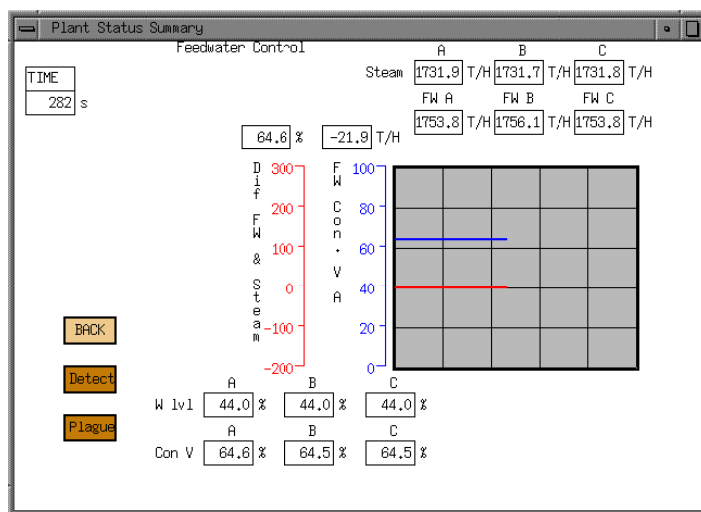


図 C.15: 給水制御系モニタ

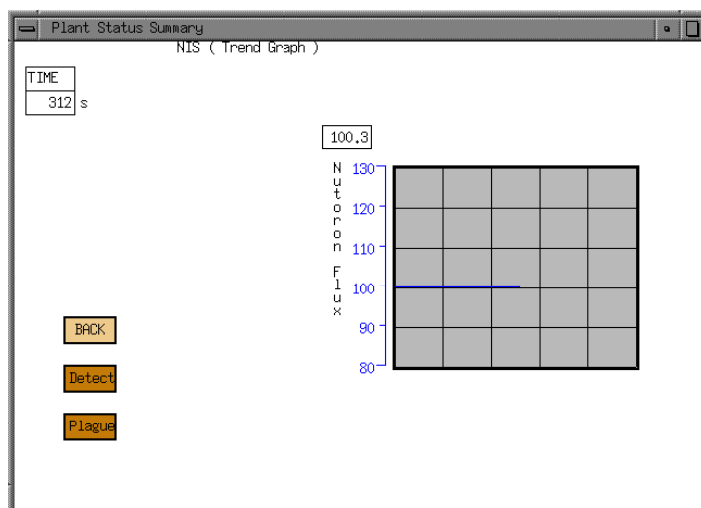


図 C.16: NISトレンドグラフ

## 付録 D 動作確認実験で使したシナリオ

黄色 … モニタ画面名、青色 … トレンドグラフ、  
赤色 … 異常生起、同定終了ボタン、白色 … パラメータ名、

表 D.1: CAIシステムの動作確認実験に用いたシナリオ前半

| 参照するモニタ or トレンド<br>or パラメータ | 被験者の発話プロトコル記録            |
|-----------------------------|--------------------------|
| 加圧器系統                       |                          |
| 加圧器トレンド                     |                          |
| トレンド                        |                          |
| 加圧器系統                       |                          |
| 比例ヒータ                       |                          |
| スプレイ弁A                      |                          |
| スプレイ弁B                      |                          |
|                             | (異常事象挿入)                 |
| サマリ画面                       |                          |
| 加圧器圧力制御系モニタ                 |                          |
| トレンド                        |                          |
|                             | (給水蒸気不一致警報)              |
| 異常生起                        | (異常生起ボタンクリック)            |
|                             | 2次系に問題が起きたようだ。           |
| サマリ画面                       |                          |
| A-主給水流量                     |                          |
| B-主給水流量                     |                          |
| C-主給水流量                     |                          |
| 主給水系統                       |                          |
| A-SGTトレンド                   |                          |
| トレンド                        |                          |
| 主給水系統                       |                          |
| RMSバウンダリトレンド                |                          |
| トレンド                        |                          |
| 主給水系統                       |                          |
| C-SGTトレンド                   |                          |
| トレンド                        |                          |
| 主給水系統                       |                          |
| B-SGTトレンド                   |                          |
| トレンド                        |                          |
| 主給水系統                       |                          |
| A-SGTトレンド                   |                          |
| トレンド                        | Aだけ異常な変わり方。              |
| 主給水系統                       |                          |
| 給水流量制御弁A                    | 74.0、73.9、73.7、<br>動いている |
| 給水流量制御弁B                    |                          |
| 給水流量制御弁C                    |                          |
| 給水流量制御弁A                    | 弁の固着かと思ったけどちがう。          |
|                             |                          |
|                             | 誤開して元に戻したんか？             |
| A-SGTトレンド                   |                          |
| トレンド                        |                          |
| A-SG水位                      | 下がって、元に戻ってきてる。           |

表 D.2: CAIシステムの動作確認実験に用いたシナリオ後半

| 参照するモニタ or トレンド<br>or パラメータ | 被験者の発話プロトコル記録                        |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| 主給水系統                       |                                      |
| 給水流量制御弁A                    | 定常に戻った。                              |
| サマリ画面                       |                                      |
| 一次冷却材温度モニタ(A)               |                                      |
| トレンド                        |                                      |
| サマリ画面                       |                                      |
| 一次冷却材温度モニタ(B)               |                                      |
| トレンド                        |                                      |
| サマリ画面                       |                                      |
| 一次冷却材温度モニタ(C)               |                                      |
| トレンド                        |                                      |
| サマリ画面                       |                                      |
| A-SG水位                      | Aだけ異常に低い。                            |
| B-SG水位                      |                                      |
| C-SG水位                      |                                      |
| A-主給水流量                     | Aだけ異常に高い。                            |
| B-主給水流量                     |                                      |
| C-主給水流量                     |                                      |
|                             | 給水ポンプがおかしいのか、センサがおかしいのか、水が漏れてるのか？    |
| 加圧器圧力制御系モニタ                 |                                      |
| トレンド                        | SG水位Aが減ったから、温度が上がった。                 |
|                             | やはり給水関係がおかしい。                        |
| サマリ画面                       |                                      |
| 給水制御系モニタ                    |                                      |
| トレンド                        | 弁を閉じろと言って、また増やしてる。                   |
|                             | 今、定常値になった。                           |
| サマリ画面                       |                                      |
| A-主給水流量                     | センサがおかしい。                            |
| B-主給水流量                     |                                      |
| C-主給水流量                     |                                      |
| A-SG水位                      |                                      |
| B-SG水位                      |                                      |
| C-SG水位                      |                                      |
| 主給水系統                       |                                      |
| 給水流量制御弁A                    | 元に戻ってる。                              |
| 給水流量制御弁B                    |                                      |
| 給水流量制御弁C                    |                                      |
| A-SGトレンド                    |                                      |
| トレンド                        | 水位下がって、また戻ってるなあ。                     |
|                             | 流量計異常でしょね、おそらく。                      |
|                             | 水位が戻るということは、壊れた、穴が開いたやつが元に戻るはずはないから。 |
| 同定終了                        |                                      |