

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 の開発と
視線入力インタフェースに関する研究

指導教官： 吉川 榮和 教授

氏名： 米田 賀一

提出年月日： 平成13年2月7日(水)

論文要旨

題目：Eye-Sensing HMD の開発と視線入力インタフェースに関する研究

吉川榮和研究室, 米田賀一

要旨：

今日、パソコンや携帯電話のような情報通信機器によるインターネットの利用や電子メールの交換などが盛んに行われるようになり、日本でも情報化社会が確立されつつある。このような情報通信機器を活用することによって、ライフスタイルの変貌や社会経済活動の効率化が進み、産業、物流、輸送、家庭生活等のすべての分野でエネルギー消費や環境負荷の低減が期待できる。また、コンピュータシミュレーションによって将来のエネルギーや環境の状況を予測したり、環境情報を世界に提供することができるなど、情報通信技術は環境問題に大きく寄与する可能性を秘めている。しかし、一方で世界的に高齢化が進んでいるなか、情報通信機器には高齢者・肢体不自由者への配慮がないものが多く、このままでは情報化社会の恩恵を受けられない人が増加することが予想される。

本研究では、この問題を解決するために、誰もが使いやすいユニバーサルなインタフェースの実現を目指し、特にコンピュータ操作に視線を用いるインタフェースの構築を目的とする。具体的には本研究室で開発した眼球画像撮影機能付き Head-Mounted Display (ES-HMD) を用いて、主に視線によりパソコンのポインティング操作を実現できる視線入力インタフェースシステムを開発する。

見たところのものを直接操作できる視線入力インタフェースシステムが実現できれば、高齢者、肢体不自由者だけでなく、健常者にとっても使いやすいユニバーサルなインタフェースを持つパソコンが提供でき、すべての人が情報通信技術の恩恵を享受できる豊かな社会を実現することが期待できる。

本研究では、大幅に軽量化した ES-HMD を開発し、新たに精度のよい視点位置検出方法を提案した。そして、提案手法を用いて視線によりポインティング操作が可能な視線入力インタフェースシステムを開発し、そのパフォーマンスを評価した。その結果、ポインティング対象の近傍で視点位置の検出誤差を吸収する補助機能を利用すれば、ES-HMD による視線入力は十分に実用に耐えうるインタフェース操作手段であることを確認した。さらに、立体視映像を提示できる ES-HMD の特性を利用し、ユニバーサルなインタフェースの一例として WWW ブラウザを試作した。

目次

第 1 章 序論	1
第 2 章 研究の背景と目的	3
2.1 情報化社会とインタフェースのユニバーサルデザイン	3
2.2 視点位置検出および視線入力に関する従来研究	5
2.3 研究の目的	8
第 3 章 新しいEye-Sensing HMD の開発	9
3.1 新しいEye-Sensing HMD の仕様とその改良点	9
3.1.1 ヘッドユニット	10
3.1.2 全体構成	12
3.1.3 映像表示系	14
3.1.4 眼球撮像系	15
3.1.5 撮像信号処理系	15
3.2 映像提示機能の評価実験	22
3.3 視点位置検出機能の評価実験	25
3.3.1 瞳孔中心位置検出方法	25
3.3.2 瞳孔中心の計算回数の決定	28
3.3.3 瞳孔中心位置検出の評価実験	29
3.3.4 視点位置較正方法	37
3.3.5 視点位置検出の評価実験	41
第 4 章 視点位置検出方法の改良	47
4.1 従来の視点位置検出方法の問題点	47
4.2 新しい視点位置較正方法の提案	48
4.2.1 手法の概要	48
4.2.2 提案する視点位置較正方法の詳細	51
4.3 提案した視点位置較正方法の評価実験	56

4.3.1	実験の目的	56
4.3.2	実験の方法	56
4.3.3	実験結果と考察	58
第 5 章	視線入力システムの開発	69
5.1	システム開発の着眼点	69
5.2	システム構成	70
5.3	視線入力の操作性の評価	72
5.3.1	実験の目的	72
5.3.2	実験の方法	73
5.3.3	実験の結果と考察	76
5.4	視線入力システムの WWW ブラウザへの応用	79
5.5	まとめと今後の展望	81
第 6 章	結論	83
	謝 辞	85
	参 考 文 献	86

目 次

2.1	国内の年齢層人口の推移	4
3.1	ES-HMD の外観	9
3.2	ES-HMD の外観	10
3.3	ES-HMD のヘッドユニットの構成図	11
3.4	ES-HMD のヘッドユニットの構成図	11
3.5	ES-HMD の全体構成図	12
3.6	ES-HMD の全体構成図	13
3.7	ES-HMD のヘッドユニットと制御BOXの外観	13
3.8	ES-HMD の各ブロックの入出力関係図	14
3.9	ES-HMD の赤外線LEDとCCDカメラの配置	16
3.10	ES-HMD により撮像された眼球画像の例	17
3.11	撮像信号処理系の構成	18
3.12	撮像された瞳孔二値化画像	18
3.13	瞳孔画像と対応するビデオ信号	19
3.14	PC に送られる瞳孔形状情報	20
3.15	映像提示機能の評価実験に用いた映像の例 (幅 5dot の場合)	23
3.16	ノイズが混入している瞳孔形状データ	26
3.17	瞳孔中心算出方法のステップ	27
3.18	計算回数と標準偏差 (擬似瞳孔 左眼用 CCD カメラ座標系)	30
3.19	計算回数と標準偏差 (擬似瞳孔 右眼用 CCD カメラ座標系)	30
3.20	計算回数と標準偏差 (被験者 S5 左眼用 CCD カメラ座標系)	31
3.21	計算回数と標準偏差 (被験者 S5 右眼用 CCD カメラ座標系)	31
3.22	計算回数と標準偏差 (被験者 S6 左眼用 CCD カメラ座標系)	32
3.23	計算回数と標準偏差 (被験者 S6 右眼用 CCD カメラ座標系)	32
3.24	計測された瞳孔中心位置 (擬似瞳孔、左眼側)	34
3.25	計測された瞳孔中心位置 (擬似瞳孔、右眼側)	34
3.26	計測された瞳孔中心位置 (被験者 S9、左眼側)	35

3.27	計測された瞳孔中心位置（被験者 S9、右眼側）	35
3.28	計測された瞳孔中心位置（被験者 S10、左眼側）	36
3.29	計測された瞳孔中心位置（被験者 S10、右眼側）	36
3.30	視点位置検出方法の概要	38
3.31	キャリブレーション時に表示される基準点	39
3.32	眼球回転角の計算方法	39
3.33	眼球回転角の計算方法	40
3.34	視点位置検出の評価実験で提示する参照点	42
3.35	ES-HMD によって検出された視点位置（被験者 S13：左眼）	44
3.36	ES-HMD によって検出された視点位置（被験者 S13：右眼）	44
3.37	ES-HMD の視点位置検出の評価実験で提示した参照点	45
3.38	ES-HMD によって検出された視点位置（被験者 S17：左眼）	46
3.39	ES-HMD によって検出された視点位置（被験者 S17：右眼）	46
4.1	method1 での視点位置較正方法	48
4.2	method1 で検出された視点位置	49
4.3	method1 で検出された視点位置 (CCD カメラ座標系を拡大)	50
4.4	提案する視点位置較正方法	50
4.5	提案方法による眼球回転角の計算方法	51
4.6	キャリブレーション過程で装着者に提示する基準点	52
4.7	眼球回転角の計算方法	52
4.8	眼球半径の変化	54
4.9	傾き補正の概要	55
4.10	ヘッドユニットを傾けて装着した場合のキャリブレーションで得られた 瞳孔中心位置の実測値の例	55
4.11	キャリブレーションの処理手順	56
4.12	視点位置較正の処理手順	57
4.13	提示する参照点	58
4.14	method1 によって検出された視点位置（被験者 S13：左眼）	60
4.15	method2 によって検出された視点位置（被験者 S13：左眼）	60
4.16	method1 によって検出された視点位置（被験者 S13：右眼）	61
4.17	method2 によって検出された視点位置（被験者 S13：右眼）	61
4.18	method1 によって検出された各参照点における視点位置の誤差（左眼）	62

4.19	method2 によって検出された各参照点における視点位置の誤差（左眼）	62
4.20	method1 によって検出された各参照点における視点位置の誤差（右眼）	63
4.21	method2 によって検出された各参照点における視点位置の誤差（右眼）	63
4.22	method1 によって検出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（左眼）	64
4.23	method2 によって検出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（左眼）	64
4.24	method1 によって検出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（左眼）	65
4.25	method2 によって検出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（左眼）	65
4.26	method1 によって検出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（右眼）	66
4.27	method2 によって検出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（右眼）	66
4.28	method1 によって検出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（右眼）	67
4.29	method2 によって検出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（右眼）	67
5.1	ハードウェア構成	71
5.2	システム構成図	71
5.3	タスクの概要	73
5.4	視線入力の操作性実験で提示される円の位置	74
5.5	視線入力の操作性評価実験の手順	75
5.6	補助機能 1	75
5.7	補助機能 2	75
5.8	実験 1 のタスク所要時間の結果	77
5.9	実験 1 のタスク所要時間の標準偏差	78
5.10	フットスイッチとマウスボタンのタスク所要時間の比較	79
5.11	ブラウザ画面	80

表目次

3.1	ヘッドユニットの仕様の比較	12
3.2	映像表示系の仕様の比較	14
3.3	赤外線 CCD カメラの仕様	16
3.4	白黒の帯を被験者が判別できた最小の dot 数	23
3.5	白黒の帯を被験者が判別できた最小の視野角	24
3.6	計算回数と 1 フレームあたりの処理時間 (擬似瞳孔計測時)	29
3.7	ES-HMD で計測された瞳孔中心位置の標準偏差	33
3.8	ES-HMD と ES-HMD で計測した瞳孔中心位置の標準偏差	37
3.9	検出された視点位置の誤差	43
4.1	method1、method2 の誤差の比較	59
4.2	method1、method2 の標準偏差の比較	68

第 1 章 序論

近年、コンピュータを始めとする情報通信機器の進展により、通信や情報処理の世界で飛躍的な進展が遂げられつつある。たとえば、パソコンによるインターネットの利用、あるいは携帯電話による電子メールの交換などが盛んに行われるようになってきた。ビジネスにおいてもネットワーク上での受発注システムやデータベース処理システムなどが構築されるなど、いわゆる情報化社会に向けた変革が着実に進んできている。この急速な情報化の流れは、これまでの社会の常識を打破し、我々の価値観にも大きな影響を与えている。しかし、高齢者や肢体不自由者の中にはパソコン操作においてマウスやキーボードを自由に使えない人が多く、また健常者の中でも情報通信機器の利用に抵抗感を感じるユーザがいる。このようなユーザへの対策が遅れているのが実情であり、情報化社会の恩恵を受けられないユーザも少なくない。

この問題を解決する上で、人間と機械の接点であるインタフェースの果たす役割は大きい。近年、「ユニバーサルデザイン」^[1] という新しい概念を基にインタフェースの新たな形態が研究されているが、これは障害の有無や技能の差に関わらず、より多くの人にとって使いやすいインタフェースの開発を目指すものである。そこで本研究でも高齢者や肢体不自由者を含めた全てのユーザを対象とした、ユニバーサルなインタフェースの構成のあり方を実験的に検証していくことを研究の主眼とする。

本研究では、コンピュータに関するユニバーサルデザインの1つの実現形として Eye-Sensing Head-Mounted Display(ES-HMD)^[2] 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視線入力によるユニバーサルなインタフェースを開発することを目指す。ES-HMD は、本研究室で独自に開発したデバイスであり、これ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、その画像をコンピュータで画像処理することでユーザの視点位置、瞳孔径、瞬目などの視覚系指標をリアルタイムで検出することができる。本研究室ではこれまで ES-HMD を用いて視点位置検出に関する実験研究を行ってきたが、(1) 画面周辺部で視点位置検出精度が低下する、(2) 提示画面の解像度が小さいため提示できる情報量がそれほど大きくない、(3) 重量が大きいため長時間装着するとユーザに負担がかかる、という問題点があった。

本研究では、新しく軽量化を図った ES-HMD を開発するとともに、新しい視点位

置検出手法を提案し、その計測精度を評価する（以下、本年度開発した ES-HMD を ES-HMD₂₀₂₀、昨年度まで使用していた ES-HMD を ES-HMD₂₀₁₉ と呼ぶ）。また、提案した視点位置検出手法を用いた視線入力システムを試作する。このシステムは一般的に用いられている Windows パソコンに ES-HMD₂₀₂₀ を接続するだけで視線によるポインティング操作ができるように機能を構成する。そして、このシステムを利用した視線入力の操作性を評価するための被験者実験を行う。

本論文では、まず第 2 章で研究の背景となるユニバーサルデザイン概念と、インタフェースの入力手段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検出と視線入力に関する従来研究を展望し、本研究の目的を述べる。第 3 章では、本研究でインタフェースデバイスとして使用する、本研究室で新たに開発した ES-HMD₂₀₂₀ の概要と ES-HMD₂₀₁₉ からの改良点について述べ、この ES-HMD₂₀₂₀ の基本的な機能を評価する実験の方法と、結果について述べる。第 4 章では、本研究で新たに考案した視点位置検出方法について、その検出精度を評価するために行った実験の方法とその結果について述べる。そして、第 5 章では ES-HMD₂₀₂₀ による視線入力システムの開発、それを用いた視線入力の操作性の評価、および視線入力システムの応用事例として試作した WWW ブラウザについて述べる。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

2.1 情報化社会とインタフェースのユニバーサルデザイン

現在の我々が得る情報は非常に大量である。これはパソコン、携帯電話などの情報通信機器が一般家庭のユーザ層にも普及し、情報を得る道具が多種多様になったからである。それと同時に、一般家庭でもインターネットを利用する機会が増加している。インターネットは1960年代アメリカの軍事研究に端を発し、1990年代に入ると一般にも開放され、電子商取引などにも利用されはじめ、社会的に大きなインパクトを与えた^[3]。1995年にWindows 95が発売されると同時に世界的にパソコンを利用する人が急激に増加し、それにつれてインターネットの利用者も増加してきた。また、日本では1999年に携帯電話端末でインターネットを利用できるようになり、インターネット利用者も爆発的に増加してきた。このような背景から日本でも情報化社会が確立されつつあり、郵政省のFiber To The Home構想などを追風に、情報化社会の到来は確実といえる。

インターネットを効率よく活用することによって、ライフスタイルの変貌や社会経済活動の効率化が進み、生産活動を行う場合におけるエネルギー消費や環境負荷の低減が期待される。また、環境負荷が低減されるだけでなく、コンピュータの計算によって環境の未来を予測したり、環境情報を世界に提供することができるなど、情報技術は環境問題に大きく寄与する可能性を秘めている。

一方で世界的に高齢化が問題とされている。日本国内でも高齢、少子化が進行している(図2.1)。今後、2010年には65歳以上の高齢者が全人口の21.3%、2020年には27%にも達し、4人に1人が高齢者になると予測される。そのため、今後働き盛りの若い年齢層が減少し、健全な社会システムを維持するためには高齢者にも積極的に労働に携わってもらう必要がある。しかし、高齢者の労働参画を容易にするための社会全体の高齢者対策は依然課題が多い。社会生活の面においては、駅や施設におけるエレベータの設置、リフトバスの導入、スロープの設置などの対策がなされているが、現状では決して十分なものとは言い難い。それにも増して情報通信機器やシステム分野において高齢者、障害者などへの配慮がないものが多い。例えばIBMでは文字やアイコンを拡大できる「ITry Kit」というソフトを開発しているが、これは単に視認性の向

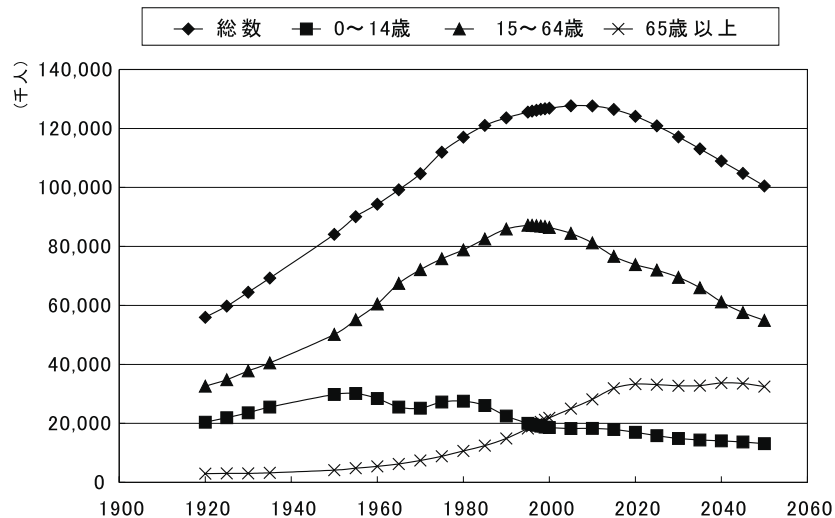


図 2.1: 国内の年齢層人口の推移

上を狙ったもので、情報の入出力全般に対してはまだ不十分である。そのため、パソコン通信やインターネットの普及率が健常者では全体の約3割に対して、障害者では約3%、高齢者では全体の約1%に留まっている^[4]。これらの要因として、次の項目が考えられる。

1. 身体機能の衰えなどのために一般的なパソコンの入出力機器の利用が困難。
2. 情報機器の扱い方が複雑なので利用したがない。

特に手や指の不自由なものにとってマウスの操作、キーボード入力、困難な作業である。この問題を解決するためには、高齢者、肢体不自由者の情報機器へのアクセシビリティを確保する必要がある。具体的にはキーボード、マウスなどの入力機器を改良すれば、機器操作の障壁を小さくし、利便性を向上させることができるが、専用の機器を使うことは健常者との区別を自覚させるという社会的差別の発生や、また同じ機能を持つ機器を障害者ごとの多様な状態にあわせて異なった製品として複数開発する必要があるなど開発コスト面の問題点も考えられる。このような問題点を解決するためには、情報機器を誰もが使いやすい、すなわちユニバーサルデザインを加味したインタフェースを開発する必要がある。ユニバーサルデザインとは、その提唱者のノースカロライナ州立大学のロン・メイスによれば、「改善または特殊化された設計を必要とせずに、最大限可能な限りすべての人々にとって利用しやすい製品と環境のデザイン」と定義している^[5]。上記の1、2の問題への情報機器のアクセシビリティ向上の観点からインタフェースに求められるのは以下の項目である。

1. 誰でも容易に利用できること
2. 使い方が簡単ですぐわかること

そこで、本研究では、誰にでも使いやすいユニバーサルなインタフェースの実現を目指し、特にコンピュータ操作に視線を用いたインタフェースの構築を行う。視線入力はユーザの見つめた対象をそのまま選ぶことができ、直感的でわかりやすく、自然な入力方法であると考えられる。本研究では情報通信機器の操作の入力方法の1つとして視線入力に着目する。具体的には本研究室で開発した眼球撮像機能付きヘッドマウントディスプレイである Eye-Sensing Head-Mounted Display (ES-HMD) を用いて、視線によりパソコン (PC) のポインティング操作を実現できる視線入力インタフェースシステムを開発する。この ES-HMD はユーザの両眼に3次元映像を提示しながら、同時に赤外線 CCD カメラで眼球を撮影しリアルタイムで画像処理することにより、瞳孔中心位置、瞬目などの視覚系指標の計測が可能な HMD である。このような ES-HMD は、視線入力インタフェース構成の観点から以下のような利点がある。

- ES-HMD が頭部に固定されているため、視覚系指標の計測が頭部運動に影響を受けない
- CCD カメラで撮像した瞳孔像の画像処理によって高精度の視点位置検出ができる
- ES-HMD はユーザの左右の眼に視差のある映像を提示できるので、3次元立体映像を提示でき、さらに立体視中の奥行き視点位置も検出できる

これらの利点を生かすことによって、使いやすいユニバーサルな視線入力インタフェースを実現することができる。

2.2 視点位置検出および視線入力に関する従来研究

視線入力インタフェースは以下の2つから構成されている。

- 視点位置検出
- 視線による操作

視点位置検出は眼球の運動を計測して、視点の位置を検出するものである。この方法には EOG や角膜反射などを用いた方法が提案されている。一方、視線による操作は

ユーザの視線や瞬目によりコンピュータを操作するものである。現在ではモニタに文字盤を映しユーザが視線で文字盤上の特定の文字を注視して文字を選択入力できる装置の研究などが行われている。本節では視線位置検出及び視線による操作に関する従来研究について展望する。

ユーザの視点位置を計測する代表的な方法として以下のものが挙げられる^{[6][7]}。

- 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し、その電位差により眼位を測定する。左右各約 40 度という広範囲の水平眼球運動を検出できるが、垂直運動の検出には、あまり有利な方法ではない。

- 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。大きな眼球運動では反射光の検出が飽和し、正確に検出できない。

- 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「アイマーク」として検出する。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が視野中の視点位置を示す「アイカメラ」として一般的に知られている。

- CCD 法

CCDカメラにより撮像された瞳孔像を画像処理することによって眼球運動を計測する。

一方、本研究室では昨年度までに以下の2つの方法が開発されている。

- ES-HMD を利用した視点位置推定^[8]

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である。上記の分類では CCD 法に属する。

- 強膜反射法による視点位置測定^[9]

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ランジスタによって受光させる方法である。強膜(白眼)に LED から赤外線を照射し、その反射光を赤外線フォトランジスタで検出する。強膜部分の

赤外線反射光量は角膜(黒目)の部分と比べて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、反射光量が少な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、詳細な視点位置検出は困難であり、中央、左右上下の5方向の検出をするのみであった。

また、視線による操作の従来研究として以下のものが挙げられる。

- 視線を用いたメニュー選択^[10]

提示画面をコマンドを記述している領域と、それを選択するための領域に分離し、選択領域に視線が位置するとコマンドが選択される。初心者でも視線によって高速にメニュー選択を行うことが可能である。

- テキストウィンドウのスクロール^[11]

この研究では視線によるテキストウィンドウの自動スクロール方式を提案している。視線を向けるという自然な動作によって、見たい、読みたいと考えるテキストを視線で画面をスクロールしながら選択する。成果として、キーボード操作によるスクロールと、同程度かそれ以上の作業効率を得られている。

- 目の動きを利用した文字入力装置^{[12][13]}

これは重度の肢体不自由者を対象に眼球運動を利用した視線入力によるコミュニケーション装置に関する研究である。CRT モニタ上に50音の文字が配列され、ユーザは視線を移動させてモニタ上のカーソルを移動させる。瞬きを意識的に行ったり注視するだけで所要の文字を選択できる。

これまでの視線入力に関する研究は、肢体障害者のための文字入力、健常者のための画面スクロールなど特定の対象に限定したものが多く、高齢者、肢体不自由者、健常者などのあらゆる対象を幅広くカバーするユニバーサルデザインの観点では研究が行われていない。また、これらの研究はマウスやキーボードに代わる入力手段として視線入力を位置づけているため、GUI上での操作を視線のみで行うことを目標としている。しかし、ユーザがGUI上にあるボタンに視線を向けている時、そのボタンを選択しようとしているのか、もしくは単に眺めているだけなのかを区別できない。視線を向けただけで操作ボタンが軒並み選択されてしまえば、ユーザにとって疲労度が増すだけでなく、使い勝手の悪いインタフェースと化してしまう。本研究では、視線入

力に関する上記のような問題点を考慮したユニバーサルなインタフェースの構築を目指す。

2.3 研究の目的

上述のように、情報技術による社会全体の豊かな発展の実現のためには、健常者だけでなく障害者、高齢者にとって、身体的障害の有無や技能の差にかかわらず、より多くの人にとって使いやすいユニバーサルなインタフェースが希求されている。そこで、本研究では、このユニバーサルなインタフェースの一つの実現形態として、ES-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、視線入力によるユニバーサルなインタフェースを実現することを目指す。

本研究室では、昨年度までに ES-HMD によりマウスのようなポインティング操作を可能とする視線入力システムを研究開発してきたが、このシステムをユニバーサルデザインの観点から考えた場合、(1) 頭部に装着するヘッドユニットが重く長時間の使用が難しい、(2) 画面周辺部で視点位置の検出精度がよくない、(3) ウィンクにより実現している指示動作が難しい、といった問題があった。本研究では、これらの問題を解決するために、大幅に軽量化を図った新しい ES-HMD を開発するとともに、高精度な視点位置検出手法を考案し、その手法による視点位置検出精度を評価する。さらに、新しく開発した ES-HMD と考案した視点位置検出手法を用いて、新たに視線入力システムを構築し、構築した視線入力システムの被験者実験によりその操作性を評価する。

すなわち、本研究では、

- 大幅に軽量化した新しい ES-HMD の開発
- 高精度な新しい視点位置検出手法の考案とその評価
- 上記の 2 つを用いた新しい視線入力システムの構築と評価

の 3 つを具体的な目的とする。

第 3 章 新しいEye-Sensing HMDの開発

本章では、まず本研究で新たに開発した ES-HMD の概要について述べる。次いで ES-HMD を用いた映像提示機能、瞳孔中心位置検出及び視点位置検出について評価実験を行い、その結果と考察について述べる。

3.1 新しいEye-Sensing HMDの仕様とその改良点

ここでは、本年度で新たに開発した ES-HMD の仕様及び改良点について述べる。ES-HMD は本研究室で独自に開発したものであり、超小型ディスプレイ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、撮像用の赤外線 CCD カメラ、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、および瞳孔位置などの計算を行う PC から構成される。

以下では、ES-HMD の改良点を、昨年度まで用いていた ES-HMD と対比させて



図 3.1: ES-HMD の外観

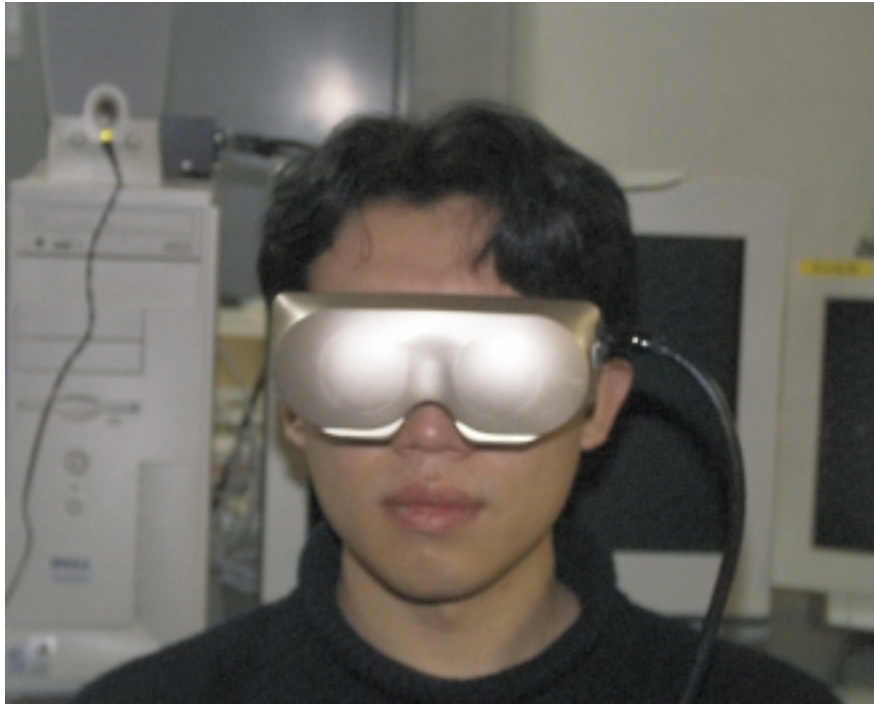


図 3.2: ES-HMD の外観

説明する。

3.1.1 ヘッドユニット

ヘッドユニットとは、ES-HMDのうち頭部に装着する部分であり、ES-HMD における大きな改良点の一つである。ES-HMD と のヘッドユニットの外観をそれぞれ図 3.1、図 3.2 に示す。また、ES-HMD 、ES-HMD のヘッドユニットの仕様の比較を表 3.1 に、ES-HMD 、 のヘッドユニットの構成図を図 3.3、図 3.4 に示す。ES-HMD のヘッドユニットの重量は 1480g もあり、長時間装着するとユーザに負担がかかるという問題があったが、ES-HMD では 230g と非常に軽く、さらに、装着しやすい眼鏡型に改良している。また、ES-HMD にはヘッドユニットを装着した状態で前面のシールド板を上げれば提示された映像と外界の両方を同時に見るシースルー機能があるが、ES-HMD ではヘッドユニットの軽量化のためシースルー機能は実装せず映像のみを提示することとした。

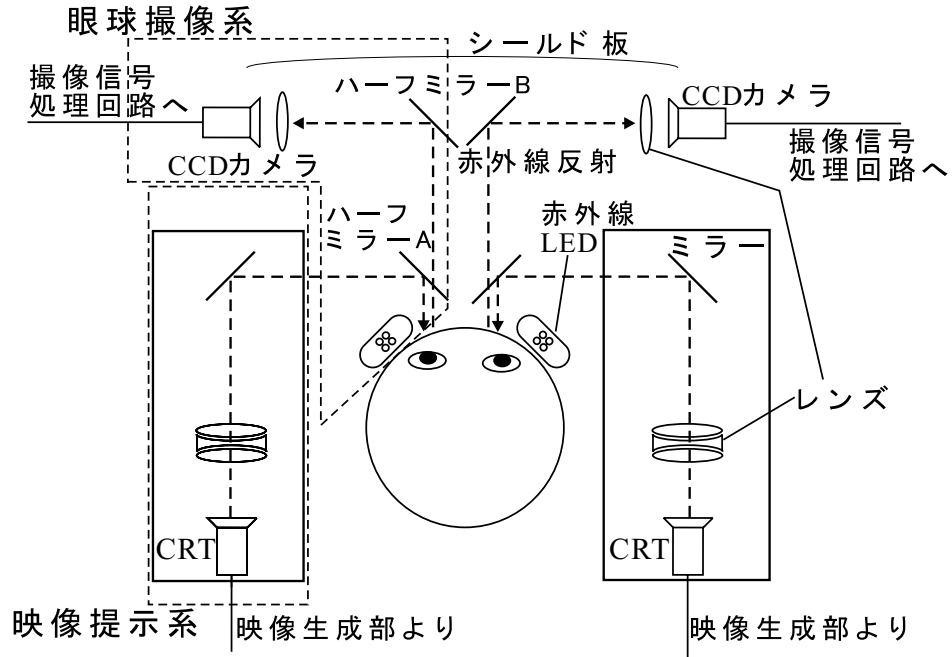


図 3.3: ES-HMD のヘッドユニットの構成図

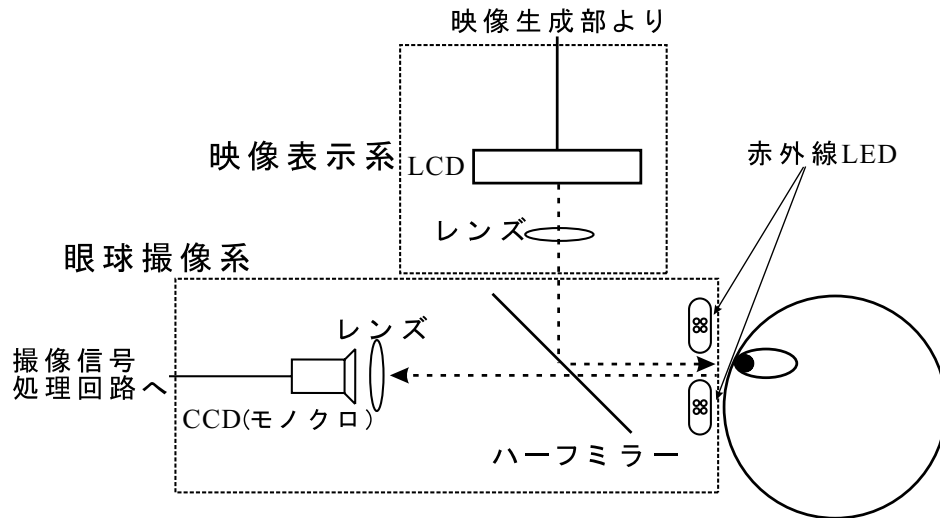


図 3.4: ES-HMD のヘッドユニットの構成図

表 3.1: ヘッドユニットの仕様の比較

	ES-HMD	ES-HMD
重量	1480g	230g
シースルー機能	あり	なし
頭部への装着方法	ヘルメット型	眼鏡型

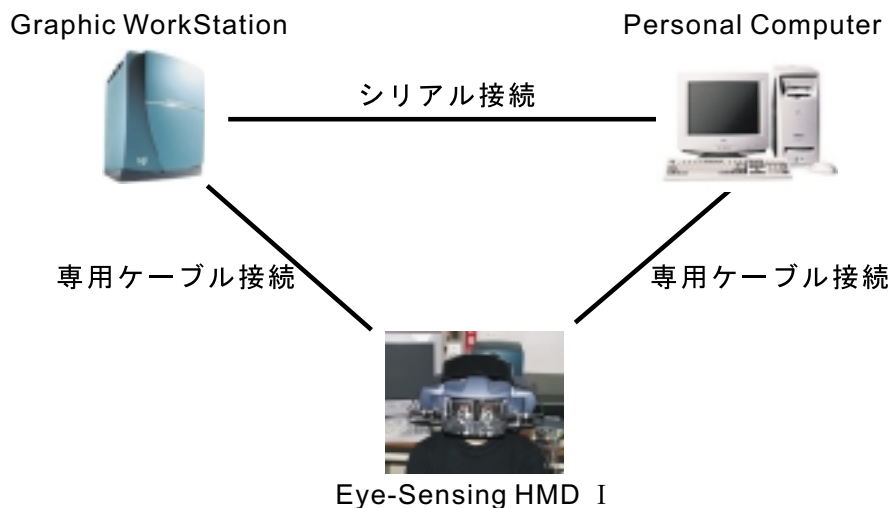


図 3.5: ES-HMD の全体構成図

3.1.2 全体構成

ES-HMD は、頭部に装着するヘッドユニットとその制御BOXから構成される。図3.5に示すようにES-HMDを動作させるための環境構成は、ES-HMDに加えて、提示する画面の作成およびユーザの視点位置を推定するGraphic Workstation、視点位置を検出するPCをネットワーク接続した大がかりなシステムであった。本研究では、ES-HMDを動作させる環境構成として、ES-HMDと1台のWindows PCを接続するだけで動作するように設計した。そのため、ES-HMDでは、ES-HMDをコントロールするソフトウェアがあれば他に特別なハードウェアを必要とせず、汎用のWindows PCに汎用のビデオケーブルとパラレルケーブルで接続するだけで動作させることができる。ES-HMDのヘッドユニットと制御BOXの外観を図3.7に、また、ES-HMDの各ブロックの入出力関係を図3.8に示す。次項から各処理系の機能を説明する。

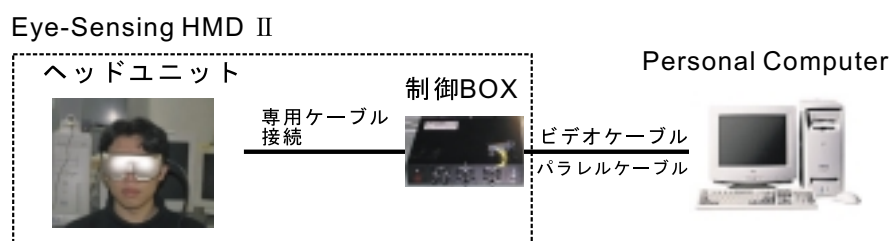


図 3.6: ES-HMD の全体構成図



図 3.7: ES-HMD のヘッドユニットと制御BOXの外観

Eye-Sensing HMD II

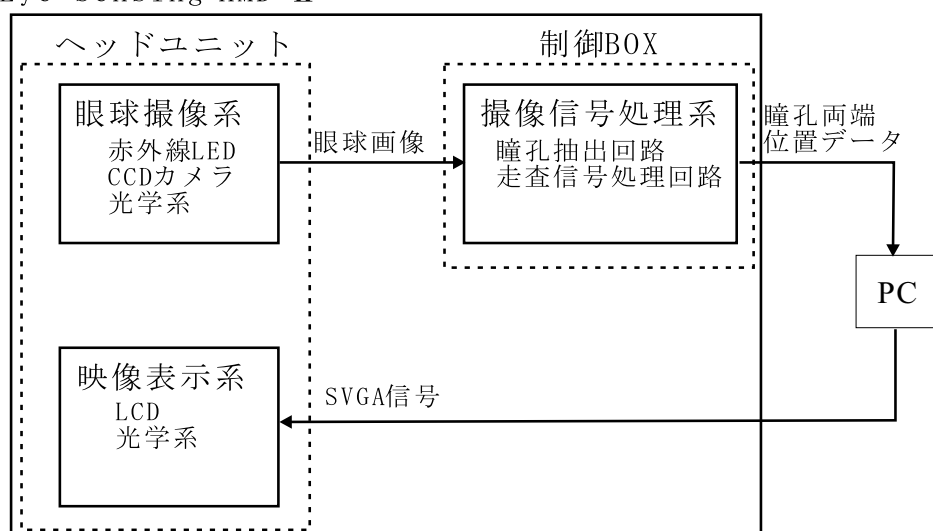


図 3.8: ES-HMD の各ブロックの入出力関係図

表 3.2: 映像表示系の仕様の比較

	ES-HMD	ES-HMD
表示装置	超小型カラー CRT	超小型カラー LCD
視野角	水平 48 deg × 垂直 36 deg	水平 30 deg × 垂直 20 deg
虚像位置	1 m	1 m
表示画面の解像度	水平 640dots × 垂直 434dots	水平 800dots × 垂直 600dots
映像信号	NTSC	SVGA

3.1.3 映像表示系

映像表示系は、装着者の両眼へ映像を提示することである。ES-HMD、及びES-HMDの映像表示系の仕様の比較を表3.2に示す。ES-HMD、ともに表示装置は左右両眼用に各1つずつ配置され、瞳孔間距離に対応した視差を持つ映像を両眼に提示し立体映像を提示することが可能である。ES-HMDでは表示装置として超小型CRTを用いていたが、これを超小型LCDに変更して軽量化と高解像度化を実現している。

ES-HMDでは、ES-HMDと同様に、レンズおよびハーフミラーからなる光学系によってLCDに表示された映像の虚像位置が装着者の1m先に来るように設計されている。ES-HMDのヘッドユニットで提示される映像の画角は水平方向が30deg、垂

直方向が 20 deg であり、これは眼前 1m の位置にある約 26 inch の TV 画面を見るのと同等の視野である。映像提示系への入力信号については、ES-HMD では NTSC 信号であったものが ES-HMD では SVGA 信号に変更している。これにより、PC から出力される高解像度の映像を直接入力することができ、ユーザにきめ細かで鮮明な映像を提示することができる。

3.1.4 眼球撮像系

眼球撮像系は、ヘッドユニットの接眼部分の上下に取り付けられている赤外線 LED により眼球を照明し、眼球の映像を赤外線 CCD カメラで撮像するものである。人間の網膜は赤外光に対して感受性がないことから、LCD から提示される映像に影響を与えず眼球像を撮像することができる。ES-HMD 、及び ES-HMD の CCD カメラの仕様の比較を表 3.3 に、赤外線 LED の配置及び CCD カメラの配置を図 3.9 に、撮像された眼球画像例を図 3.10 にそれぞれ示す。赤外線 LED は両眼直前の位置に上下各 2 個ずつ配置し、眼瞼による影の影響が極力小さくなるようにした。使用した CCD カメラは左目側は日立電子製 BE-211A、右目側は同 BE-212A である。ただし、これらのカメラは左右同一のカメラである。昨年度まで使用していた ES-HMD では、提示映像と CCD カメラの光学中心が違うためにユーザごとに CCD カメラの位置を微調整する必要があった。しかし、ES-HMD では、提示映像と CCD カメラの光学中心を一致させて固定しているので、ユーザが提示映像全体を見えるようにヘッドユニットを装着すれば、CCD カメラで適切に眼球を撮像することができる。また、これに伴い、ES-HMD では ES-HMD に比べて眼球を拡大して撮像することができ、特に垂直方向の解像度が向上している。

表 3.3 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、ES-HMD で計測できる視覚系指標の時間分解能や空間分解能が決定される。

3.1.5 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、その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眼球映像の NTSC ビデオフォーマット信号をハードウェア処理することにより、ソフトウェア処理に比べて高速化と計算負荷の軽減を実現している。撮像信号処理系の構成は、基本的に ES-HMD

表 3.3: 赤外線 CCD カメラの仕様

	ES-HMD	ES-HMD
CCDの有効画素	水平 768 × 垂直 494	水平 510 × 垂直 492
CCDの解像度(水平)	570 TV 本	380 TV 本
CCDの解像度(垂直)	350 TV 本	262.5 TV 本
映像出力信号フォーマット	NTSC	NTSC
走査周波数(水平)	15.734 kHz	15.734 kHz
走査周波数(垂直)	59.94 Hz	59.94 Hz
レンズ焦点距離	24.0 mm	6.6 mm
レンズ・眼球間距離	145 mm	22 mm
撮像範囲(水平)	35.5mm	24.8mm
撮像範囲(垂直)	26.5mm	18.4mm
位置分解能(水平)	0.0467 mm	0.0489 mm
位置分解能(垂直)	0.109 mm	0.0775 mm

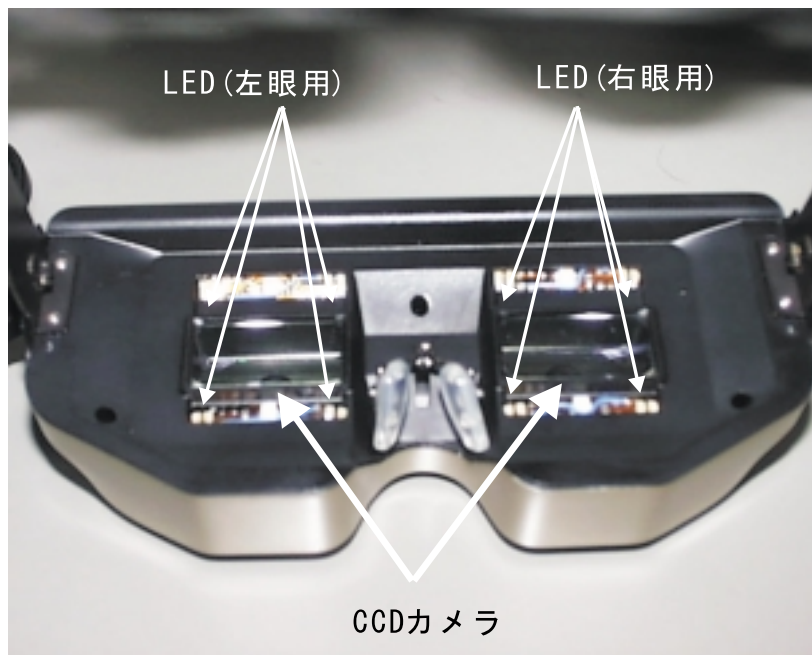


図 3.9: ES-HMD の赤外線 LED と CCD カメラの配置

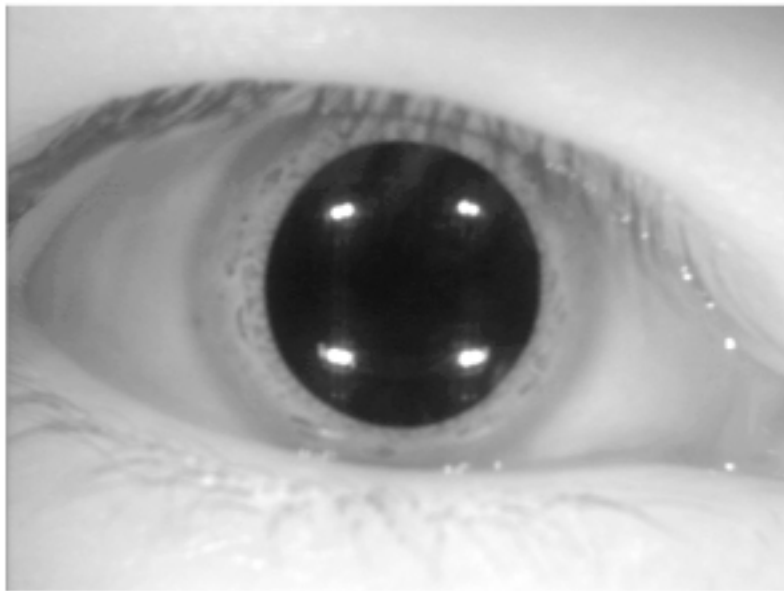


図 3.10: ES-HMD により撮像された眼球画像の例

、ES-HMD とも同じである。

撮像信号処理系の構成を図 3.11 に示す。赤外線 CCD カメラで撮影された眼球画像 (図 3.10) では、瞳孔部分の赤外線反射率が低く、その他の光彩、強膜 (白目部分)、眼瞼、皮膚表面の部分の赤外線反射率が高いために、瞳孔部分のみが暗く撮影されている。そこで、瞳孔抽出ブロックでは、眼球撮像系で撮影された眼球画像を適当な閾値で二値化することにより瞳孔部分のみが黒くなった二値化画像が得られる。この閾値は制御 BOX にあるつまみにより調整することができる。

次に瞳孔部分のみが黒く描画された映像のうち図 3.12 に示すように検出有効範囲のみを白黒反転した後、コンパレータブロックで各水平走査線上における瞳孔部分の輪郭 (瞳孔端点) を検出する。検出された瞳孔端点は、ドットクロックとカウンタブロックによりその水平位置が求められる (図 3.13)。瞳孔端点の垂直位置は映像の水平・垂直同期信号により別途求める。なお、有効領域設定ブロックでは、映像中に写り込む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設定する。

ES-HMD では、得られた瞳孔画像における各水平走査線ごとの瞳孔端点位置からなる 1 画面分の瞳孔形状情報 (図 3.14) はパラレルケーブルで PC に送信される。

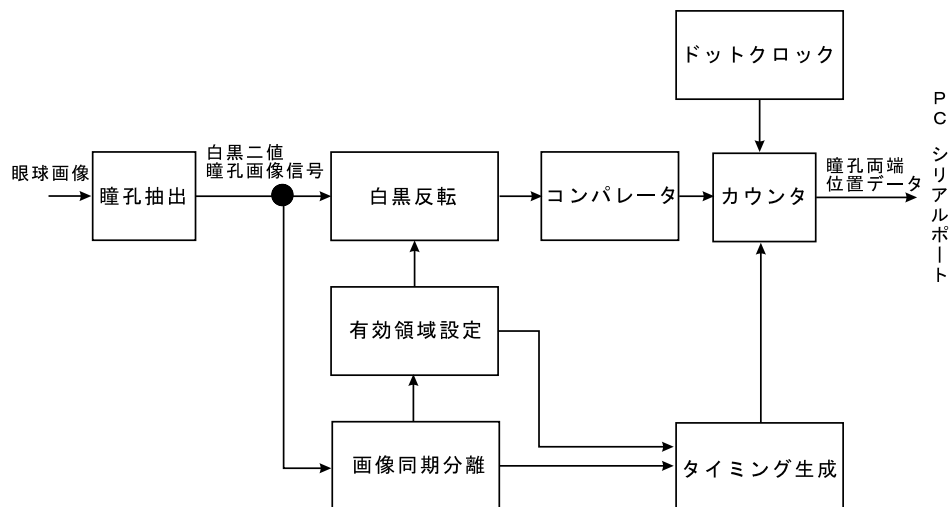


図 3.11: 撮像信号処理系の構成

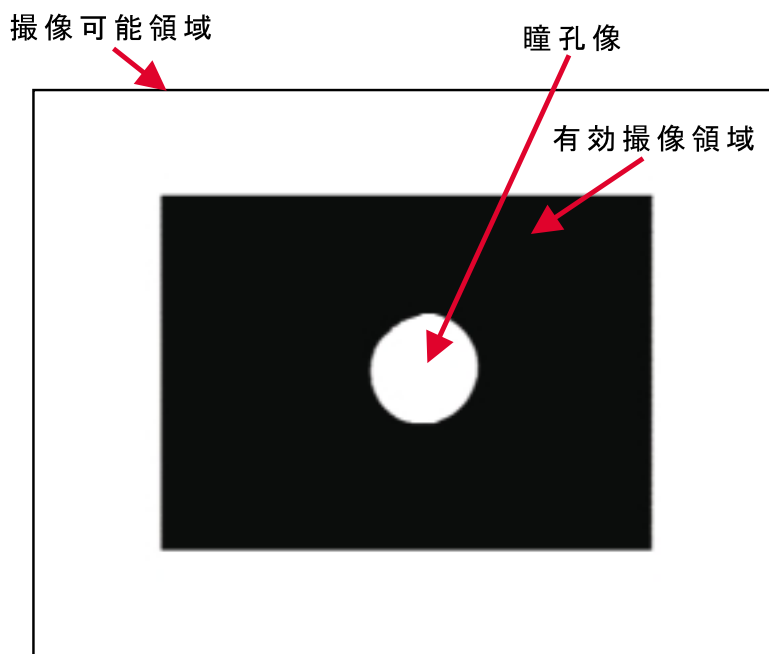


図 3.12: 撮像された瞳孔二値化画像

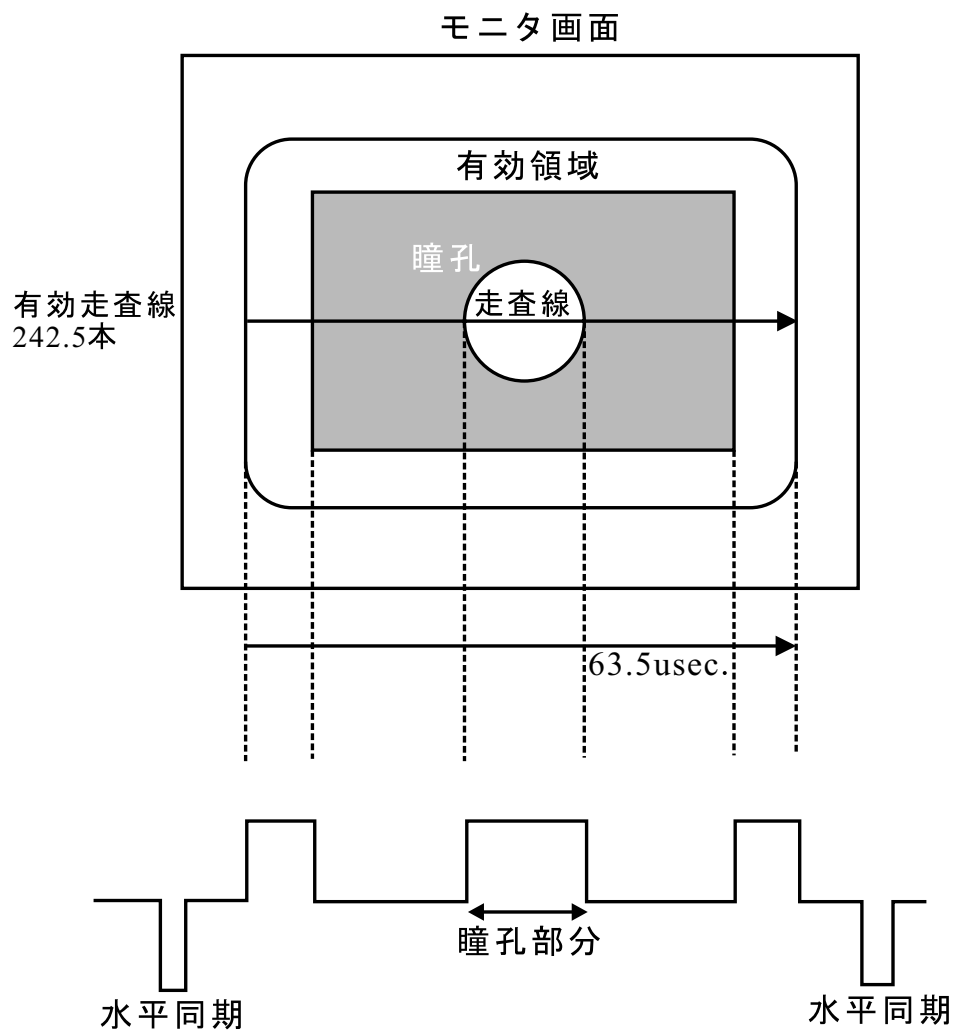


図 3.13: 瞳孔画像と対応するビデオ信号



図 3.14: PC に送られる瞳孔形状情報

時間分解能

上記の画像処理は、垂直走査ごとに行われる。すなわち、表 3.3 より垂直走査周波数が 59.94 Hz であることから、瞳孔の輪郭抽出の時間分解能は約 16.68 msec である。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 と非常に短い間に視野の一端から他端まで移動できるため、ES-HMD ではサッケード中の眼球状態を解析するのは困難であるが、注視点位置、比較的移動速度が遅い追従運動、瞳孔の収縮・散大等は、十分に計測することができる。

空間分解能

ES-HMD の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 3.3 より、CCD カメラの水平解像度が 380TV 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、

$$380 \times \frac{4}{3} = 506.66 \quad [\text{本}] \quad (3.1)$$

が水平解像度となる。CCD カメラの水平撮像領域は 24.8 mm である。よって、

$$H_{res} = \frac{24.8[\text{mm}]}{506.66} = 0.0489 \quad [\text{mm}] \quad (3.2)$$

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262.5本であるが、垂直同期信号など無効なものが20本あるので、有効垂直走査線数は

$$262.5 - 20 = 242.5 \quad [\text{本}] \quad (3.3)$$

となる。よって垂直位置分解能 V_{res} は、

$$V_{res} = \frac{18.8[\text{mm}]}{242.5} = 0.0775 \quad [\text{mm}] \quad (3.4)$$

となる。

計数単位

図3.11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。クロック周波数が小さすぎると式(3.2)で示されるCCDカメラの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 $63.5 \mu\text{sec}$ およびNTSC信号の水平有効映像範囲83%を用いて次式(3.5)を満たせばCCDカメラの解像度を十分に活用することができる。

$$f \geq \frac{24.8[\text{mm}]}{63.5[\mu\text{sec}]} \times 0.83 \times 0.0489[\text{mm}] = 9.6 \quad [\text{MHz}] \quad (3.5)$$

本研究ではCCDカメラのサブピクセル情報も利用することを考え、ドットクロックを上記の式の約2倍の20.0 MHzとした。一方、水平走査周期が $63.5 \mu\text{sec}$ であることから水平サンプリング回数 H_{time} は、次の式(3.6)で与えられる。

$$H_{time} = 63.5[\mu\text{sec}] \times 20[\text{MHz}] = 1270 \quad [\text{回}] \quad (3.6)$$

このうち、有効範囲が83%であることから水平有効サンプリング回数 H_{at} は、

$$H_{at} = 1270 \times 0.83 = 1054 \quad [\text{回}] \quad (3.7)$$

となる。CCDカメラの水平撮像領域は24.8 mmであることから、水平方向の計数単位 T_h は、次のようになる。

$$T_h = \frac{24.8}{1054} = 0.0235 \quad [\text{mm/dot}] \quad (3.8)$$

ここで、計数単位とは、計測される瞳孔端点位置の1ドットあたりの実際の撮像対象の大きさ (mm) である。

一方、垂直方向の計数単位 T_v は、眼球撮像系の垂直分解能 V_{res} に相当し、

$$T_v = V_{res} = 0.0775 \quad [\text{mm/dot}] \quad (3.9)$$

となる。本研究では、映像信号処理系から出力される瞳孔輪郭情報 (dot) から実際の瞳孔の大きさ (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。

次節からは、ES-HMD の映像提示機能と視点位置検出機能を評価するために行った実験について述べる。

3.2 映像提示機能の評価実験

ここでは、ES-HMD の映像提示について、ES-HMD と対比させてその機能を評価する。具体的には、被験者に ES-HMD と をそれぞれ装着してもらい、縞模様の映像を提示する。そして、提示する縞の幅を変えることにより提示映像の実質的な解像度を評価する。以下、本実験の目的、方法、結果について述べる。

実験の目的

ES-HMD および ES-HMD の提示映像の実質的な解像度を評価する。

実験の方法

実験の手順を以下に示す。

1. 図 3.15 に示すような、白と黒の帯を縦方向、および横方向に交互に配列した、縦縞および横縞の映像を用いる。ES-HMD 、ES-HMD とともに、白黒の帯の幅を 1dot から 10dot まで 1dot ずつ変化させたものを用意する。
2. 被験者に ES-HMD を装着してもらい、1 で用意した映像を縦・横の縞模様の幅が 10dot のものから 1dot のものへと順次提示する。その際、被験者には、それぞれの縞の幅で、縞模様が判別できるかどうかを判断してもらう。

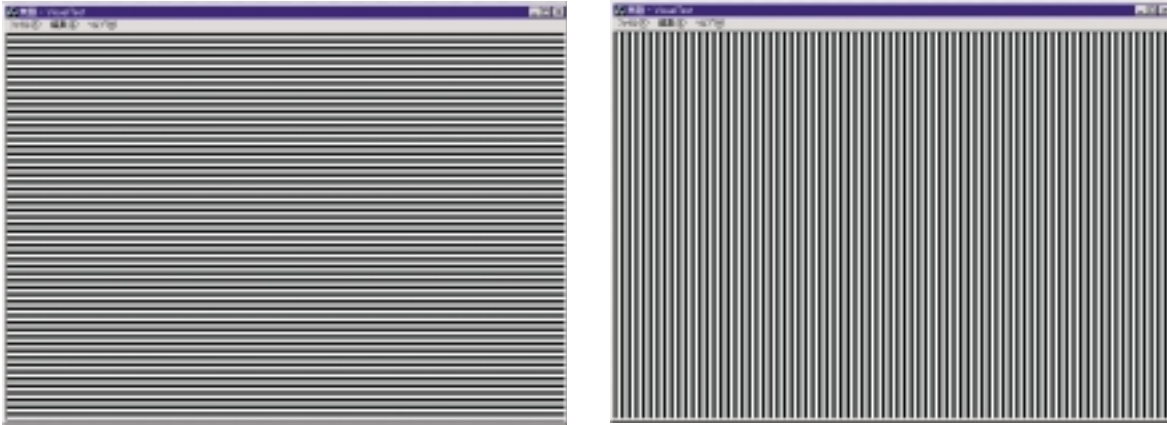


図 3.15: 映像提示機能の評価実験に用いた映像の例 (幅 5dot の場合)

表 3.4: 白黒の帯を被験者が判別できた最小の dot 数

被験者	ES-HMD		ES-HMD	
	縦縞 [dot]	横縞 [dot]	縦縞 [dot]	横縞 [dot]
S1	2	2	3	2
S2	3	2	3	2
S3	2	2	3	3
S4	3	2	2	2

3. 次に、被験者に ES-HMD を装着してもらい、1 で用意した映像を縦・横の縞模様の幅が 10dot のものから 1dot のものへと順次提示する。その際、被験者には、それぞれの縞の幅で、縞模様が判別できるかどうかを判断してもらう。

被験者は、視機能に異常のない大学院生 4 名 (被験者 S1、S2、S3、S4) である。

実験の結果

各被験者が白黒の帯を判別できた最小の幅 (dot 数) を、縦縞と横縞について表 3.4 に示す。

結果の考察

表 3.4 から判別できた dot 数は ES-HMD と ES-HMD でほとんど同じであった。しかし、ES-HMD と ES-HMD では、提示映像の視野角や表示分解能に差があるた

表 3.5: 白黒の帯を被験者が判別できた最小の視野角

被験者	ES-HMD		ES-HMD	
	縦縞 [deg]	横縞 [deg]	縦縞 [deg]	横縞 [deg]
S1	0.15	0.14	0.11	0.07
S2	0.22	0.14	0.11	0.07
S3	0.15	0.14	0.11	0.10
S4	0.22	0.14	0.08	0.07

め、判別できた最小の dot 数だけでは実質的な解像度を判断できない。そこで、表 3.4 の結果を視野角に置き換えて考察する。表 3.4 の結果を視野角に換算した結果を表 3.5 に示す。なお、提示映像の 1dot は視野角に変換すると以下ようになる。

ES-HMD では、

$$\text{水平方向の提示映像 1dot の視野角} = \frac{\text{水平視野角}}{\text{水平解像度}} = \frac{48[\text{deg}]}{640[\text{dot}]} = 0.075[\text{deg/dot}](3.10)$$

$$\text{垂直方向の提示映像 1dot の視野角} = \frac{\text{垂直視野角}}{\text{垂直解像度}} = \frac{36[\text{deg}]}{434[\text{dot}]} = 0.083[\text{deg/dot}](3.11)$$

ES-HMD では、

$$\text{水平方向の提示映像 1dot の視野角} = \frac{\text{水平視野角}}{\text{水平解像度}} = \frac{30[\text{deg}]}{800[\text{dot}]} = 0.038[\text{deg/dot}](3.12)$$

$$\text{垂直方向の提示映像 1dot の視野角} = \frac{\text{垂直視野角}}{\text{垂直解像度}} = \frac{20[\text{deg}]}{600[\text{dot}]} = 0.033[\text{deg/dot}](3.13)$$

4 人の被験者の平均は、ES-HMD で縦縞 0.19 deg、横縞 0.14 deg であったのに対して、ES-HMD では縦縞 0.10 deg、横縞 0.08 deg であり、約 2 倍程度解像度が向上している。ES-HMD が ES-HMD に比較して表示映像の実質的な解像度が向上した理由として、以下の点が考えられる。

- 提示映像の解像度を SVGA(800 × 600) に変更したことにより表示画面自体の解像度が向上した。
- 表示装置の CRT から LCD への変更で実質的に細かい画像まで鮮明に表示できるようになった。
- ES-HMD では 2 枚のミラーを通して映像を提示していたが、ES-HMD では 1 枚のミラーを通すだけで映像を提示することができる。そのため、ミラーの曇りや歪みによる画像の劣化が少なくなった。

なお、被験者からは、ES-HMD に提示された映像はES-HMD に比べて鮮明に見ることができたという事後報告が得られている。一方、ES-HMD ではES-HMD に比べて視野角が広いため、ES-HMD に提示された映像の方が見やすかったという報告も得られた。

3.3 視点位置検出機能の評価実験

ES-HMD のリアルタイム視点位置検出機能は、以下の2つの処理から構成される^[14]。

1. 瞳孔中心位置検出
2. 視点位置較正

ここでは、ES-HMD およびES-HMD を用いてこの2つの処理を行い、その精度を評価することにより視点位置検出機能の評価を行う。

以下では、

1. 瞳孔中心位置検出方法
2. 瞳孔中心位置検出の評価実験
3. 視点位置較正方法
4. 視点位置検出の評価実験

の順に述べる。

3.3.1 瞳孔中心位置検出方法

図 3.14 に示したように、ES-HMD の赤外線 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。しかし、実際には赤外線 LED の反射像や睫毛等の影響により、撮像される瞳孔像にノイズが混入している場合がある。また、撮像信号処理系から PC に入力される瞳孔形状情報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。そのため、撮像された瞳孔像にノイズが混入している場合には、図 3.16 のような座標データが収集されることになる。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。

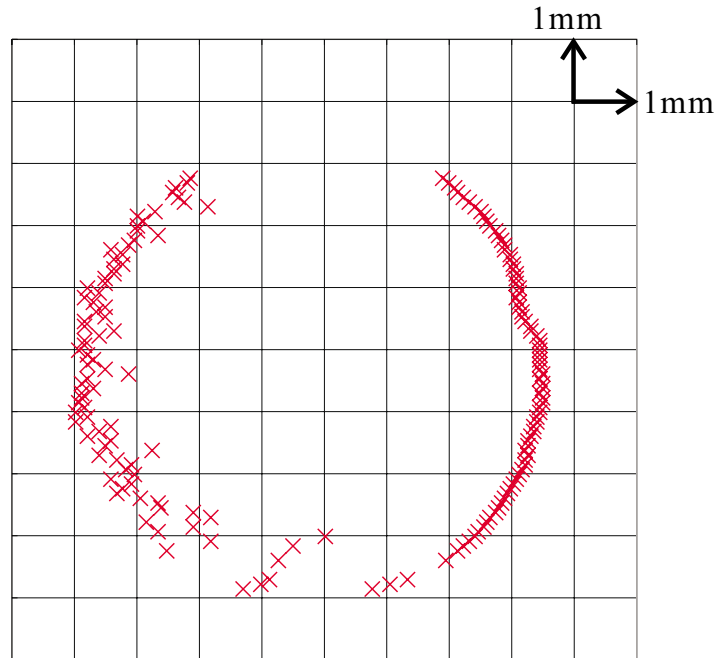


図 3.16: ノイズが混入している瞳孔形状データ

そこで、CCD カメラによって撮像された瞳孔像にノイズが混入している可能性を考慮し、以下のような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 回繰り返して、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のうち、水平方向の両端から $n/5$ 個ずつ削除する。
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 $n/5$ ずつ削除する。
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 (3.8)、式 (3.9) より、CCD カメラの位置分解能の計数単位は水平分解能が 0.0235 mm/dot 、垂直分解能が 0.0775 mm/dot 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。

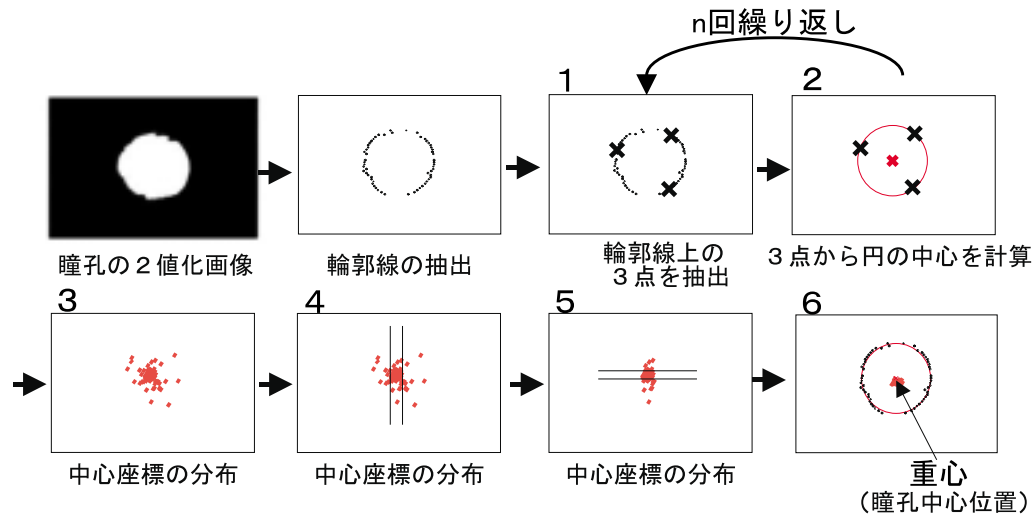


図 3.17: 瞳孔中心算出方法のステップ

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 (3.14)、式 (3.15) より求める。

$$X = \frac{(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)(y_2 - y_3) + (y_2^2 - y_3^2 + x_3^2 - x_2^2)(y_1 - y_2)}{2\{(x_2 - x_1)(y_2 - y_3) - (x_3 - x_2)(y_1 - y_2)\}} \quad (3.14)$$

$$Y = \frac{(x_2^2 - x_1^2 + y_2^2 - y_1^2)(x_2 - x_3) + (y_2^2 - y_3^2 + x_3^2 - x_2^2)(x_1 - x_2)}{2\{(x_3 - x_2)(y_1 - y_2) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3)\}} \quad (3.15)$$

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、ノイズの影響を受けることなく、ロバストに瞳孔中心位置を検出できる。

以上の各ステップの計算手順の実行例を図 3.17 に示す。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る。

3.3.2 瞳孔中心の計算回数の決定

3.3.1 項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。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。ES-HMD では昨年度の評価実験の結果、 $n = 50$ が処理時間と検出精度の点で最適であった^[8]。しかし、ES-HMD では CCD カメラの解像度が向上し、さらに撮像される瞳孔像の大きさが異なるため、新たに評価実験を行い n を決定する必要がある。そこで、ES-HMD の瞳孔中心位置検出の評価を行う前に、3.3.1 項で述べた方法により瞳孔中心位置を検出する際の最適な 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、150 回の計 6 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 4 名（被験者 S5、S6、S7、S8）を被験者とした。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する。
- B では被験者の瞳孔中心位置の測定の際に、ES-HMD の LCD 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する。被験者には測定中に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する。

実験結果と考察

測定された 200 フレーム分の瞳孔中心座標の 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、標準偏差は中心位置測定のばらつきを表す指標となる。A、B それぞれの場合の瞳孔中心位置の標準偏差 σ_x 、 σ_y を求めた結果を、図 3.18（A：擬似瞳孔、左眼）図 3.19（A：擬似瞳孔、右眼）図 3.20（B：被験者 S5、左眼）図 3.21（B：被験者 S5、右眼）図 3.22（B：被験者 S6、左眼）図 3.23（B：被験者 S6、右眼）に示す。他の被験者の結果については付録 A に譲る。また、各計算回数での 1 フレームあたりの処理時間を表 3.6 に示す。

表 3.6: 計算回数と1フレームあたりの処理時間（擬似瞳孔計測時）

計算回数 [回]	処理時間 [msec]
10	4.75
30	5.21
50	5.64
70	6.47
100	6.95
150	7.57

算出された瞳孔中心位置の標準偏差 σ_x 、 σ_y の計算回数に対する依存性では、計算回数が100回以下では σ_x 、 σ_y が大きいですが、それよりも計算回数が増えてもあまり変化がなかった。また、表 3.6 から、1フレームあたりの処理時間は計算回数が150回でも7.57 msec であり、眼球画像の撮像レートである16.68 msec に比べて小さく、リアルタイムで十分計測することができる。

以上より、ES-HMD では計算回数 n を100とする。

3.3.3 瞳孔中心位置検出の評価実験

3.3.2項の実験結果から、ES-HMD では、1フレームあたりの瞳孔中心位置の計算回数を100回に決定した。これを用いて、ES-HMD の瞳孔中心位置検出の検出精度を評価する。具体的には、3.3.2項の実験と同様に、擬似瞳孔と被験者によりES-HMD で瞳孔中心位置を検出し、そのばらつきを調べる。以下では、実験の目的、方法、結果、および考察について述べる。

実験目的

ES-HMD の瞳孔中心位置検出の精度を評価する。

実験方法

瞳孔中心の計測対象は、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4名（被験者S9、S10、S11、S12）である。実験の手順は3.3.2項で述べた実験の手順と同じである。

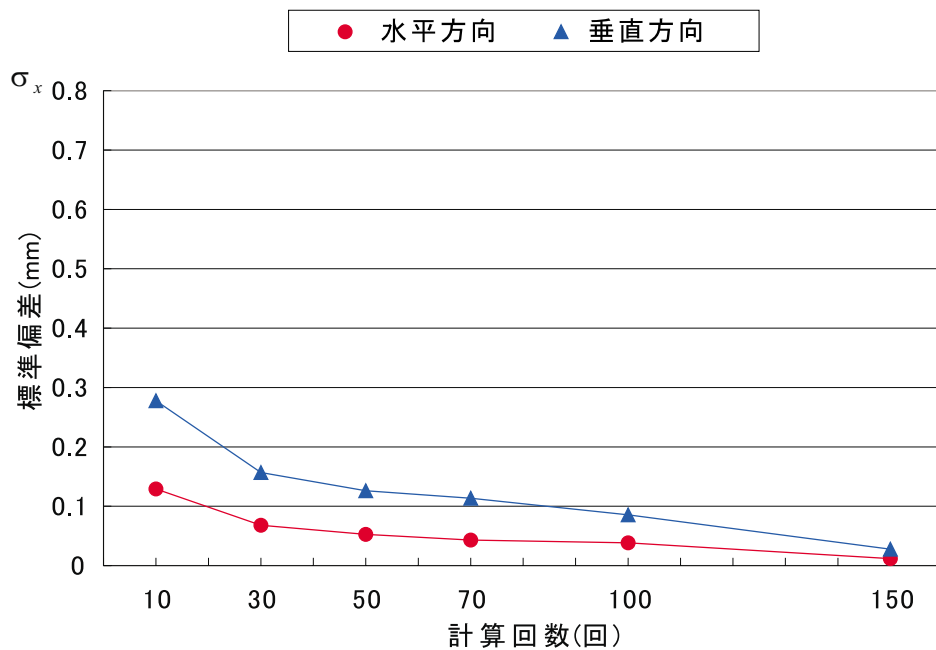


図 3.18: 計算回数と標準偏差 (擬似瞳孔 左眼用 CCD カメラ座標系)

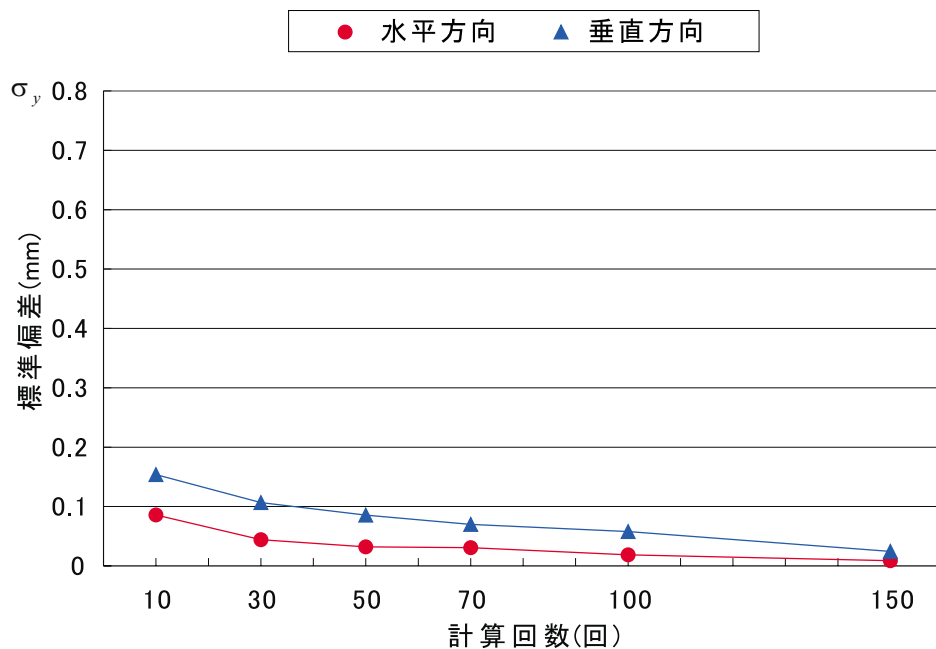


図 3.19: 計算回数と標準偏差 (擬似瞳孔 右眼用 CCD カメラ座標系)

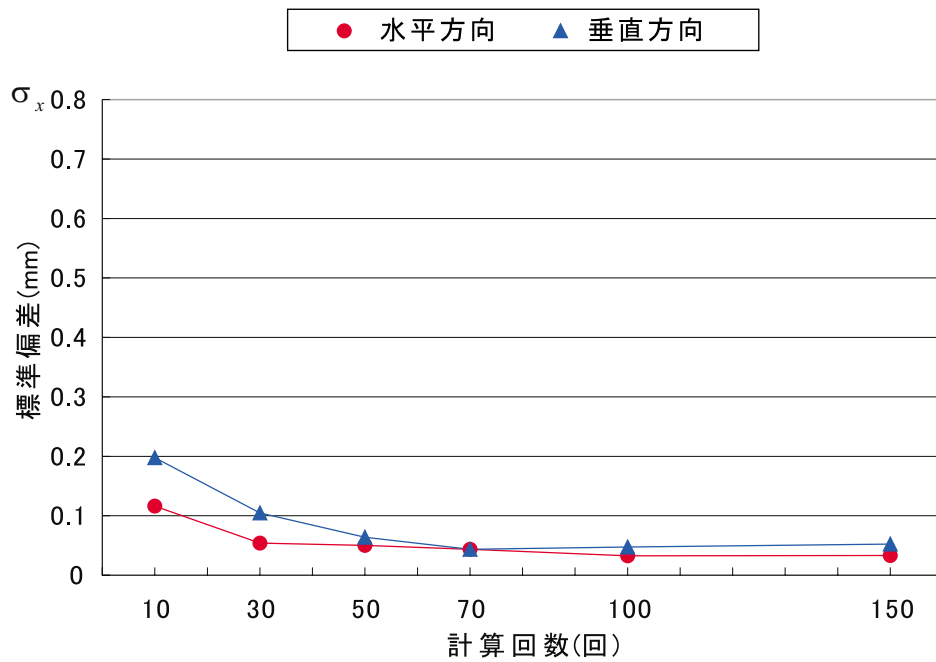


図 3.20: 計算回数と標準偏差 (被験者 S5 左眼用 CCD カメラ座標系)

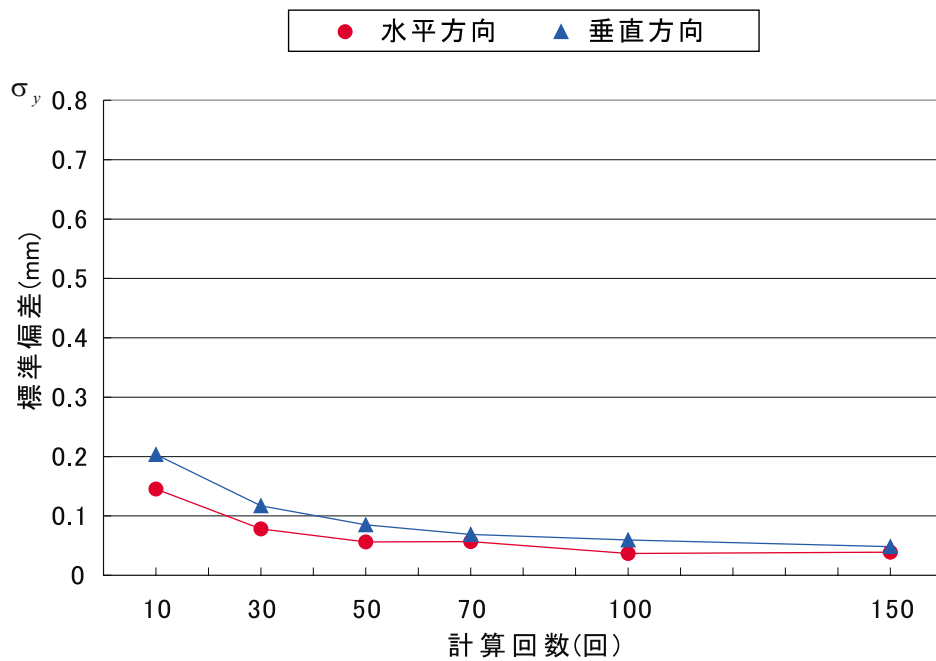


図 3.21: 計算回数と標準偏差 (被験者 S5 右眼用 CCD カメラ座標系)

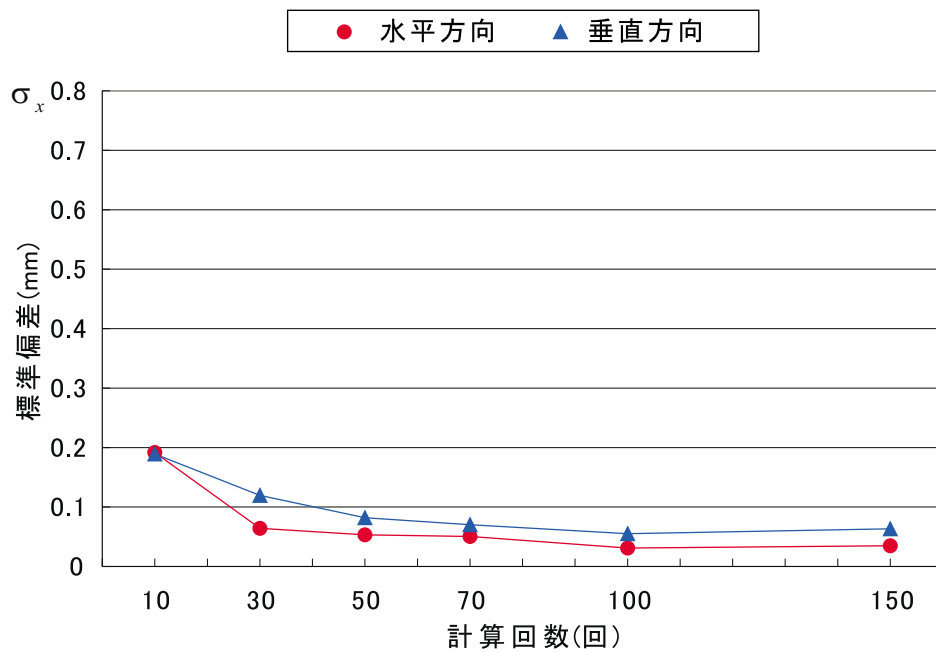


図 3.22: 計算回数と標準偏差 (被験者 S6 左眼用 CCD カメラ座標系)

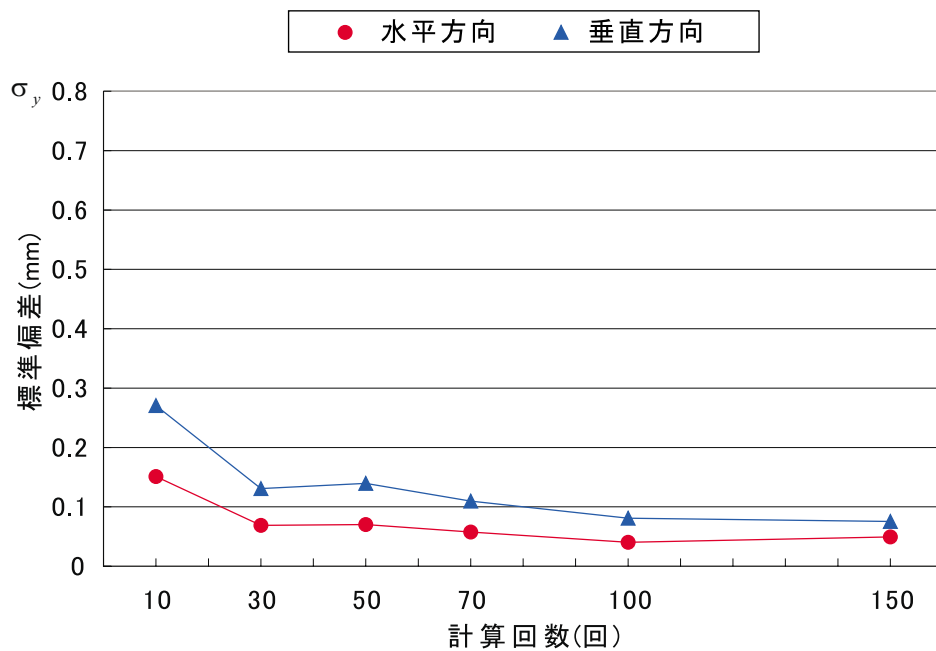


図 3.23: 計算回数と標準偏差 (被験者 S6 右眼用 CCD カメラ座標系)

表 3.7: ES-HMD で計測された瞳孔中心位置の標準偏差

測定対象	左眼		右眼	
	水平方向 [mm]	垂直方向 [mm]	水平方向 [mm]	垂直方向 [mm]
擬似瞳孔	0.016	0.037	0.006	0.019
S9	0.078	0.064	0.047	0.058
S10	0.026	0.048	0.047	0.046
S11	0.031	0.055	0.040	0.080
S12	0.102	0.058	0.103	0.071

実験結果と考察

計測された瞳孔中心の 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 3.24 ~ 図 3.29 に示す。ただし、B については S9、S10 についてのみ示している。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施している。これは、瞬目や睫毛等により 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。

図 3.24 ~ 図 3.29 より、計測された瞳孔中心座標に、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。この原因として、制御 BOX 内から発生するノイズの影響が考えられる。本来ならば、閾値さえ調節すれば得られた二値化画像はきれいな円形で取得される。しかし、制御 BOX から発生するノイズの影響で二値化画像の白黒の境界部分にノイズが生じ、正確に円形を取得できていない可能性がある。そのため、瞳孔中心位置にばらつきが生じるものと考えられる。

A、B それぞれのばらつきの指標となる標準偏差を水平方向、垂直方向にそれぞれ求めた結果を表 3.7 に示す。また、ES-HMD と ES-HMD の瞳孔中心位置検出を比較するために、A、B それぞれの場合における瞳孔中心位置の標準偏差を求めた結果を表 3.8 に示す。表中で ES-HMD の結果は昨年度に行った実験の結果^[8]である。また、人間の瞳孔については全被験者の平均値である。

表 3.7 に示すように、擬似瞳孔、被験者とも計測された瞳孔中心位置の標準偏差は 0.1 mm 以内であり、ノイズなどの影響による瞳孔中心位置のばらつきはほぼ抑制され

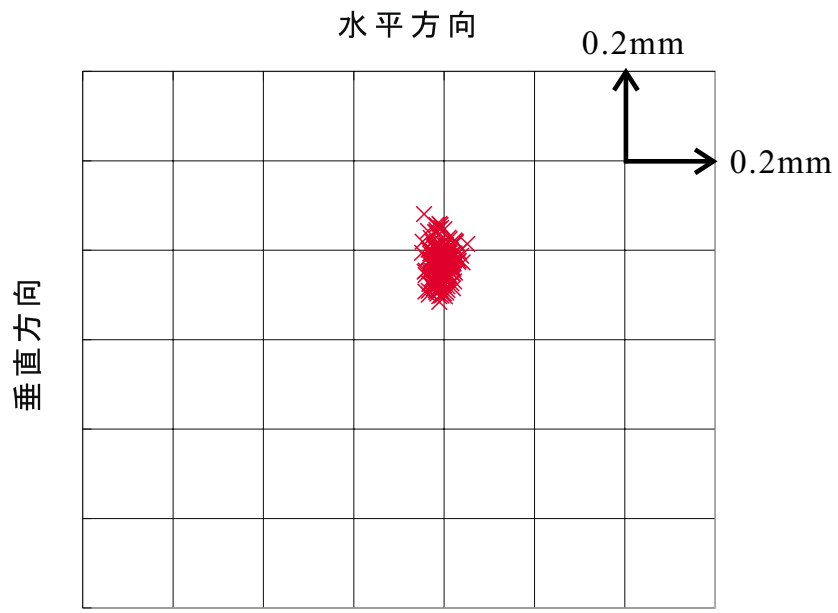


図 3.24: 計測された瞳孔中心位置 (擬似瞳孔、左眼側)

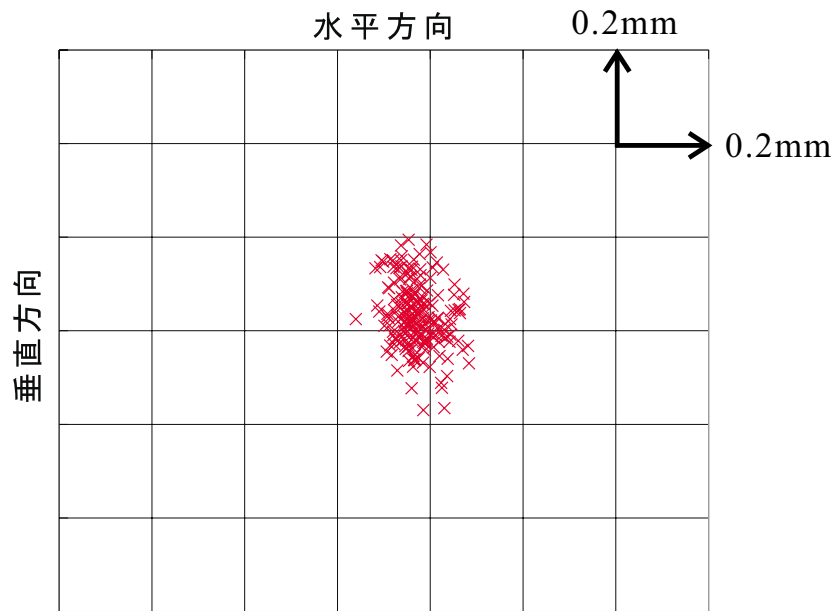


図 3.25: 計測された瞳孔中心位置 (擬似瞳孔、右眼側)

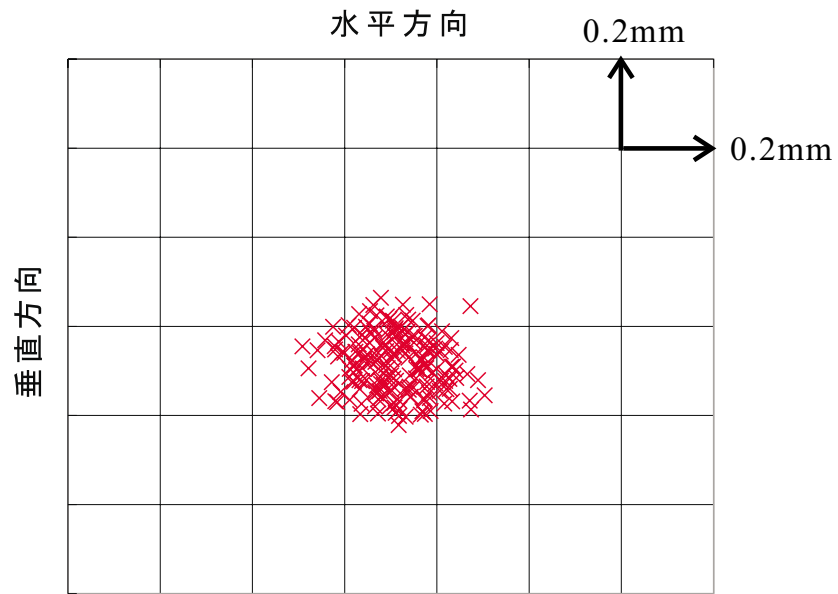


図 3.26: 計測された瞳孔中心位置 (被験者 S9、左眼側)

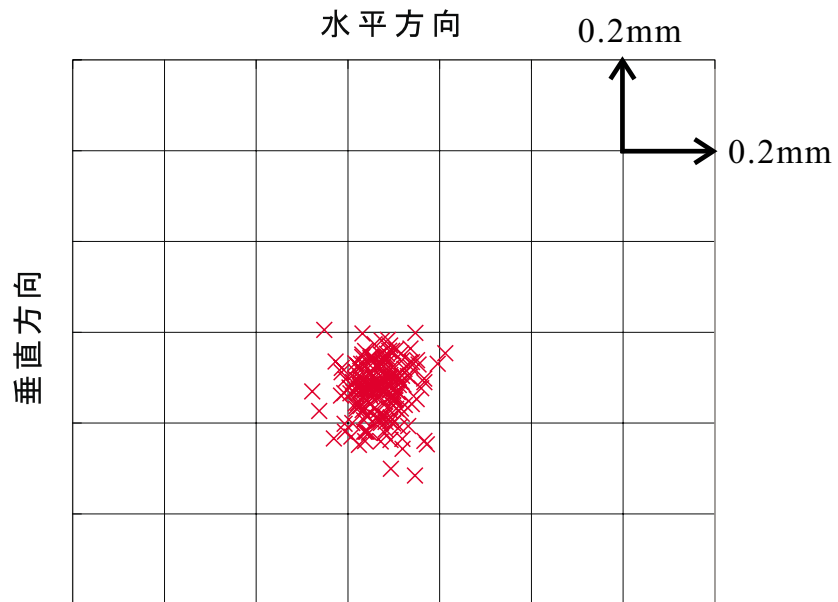


図 3.27: 計測された瞳孔中心位置 (被験者 S9、右眼側)

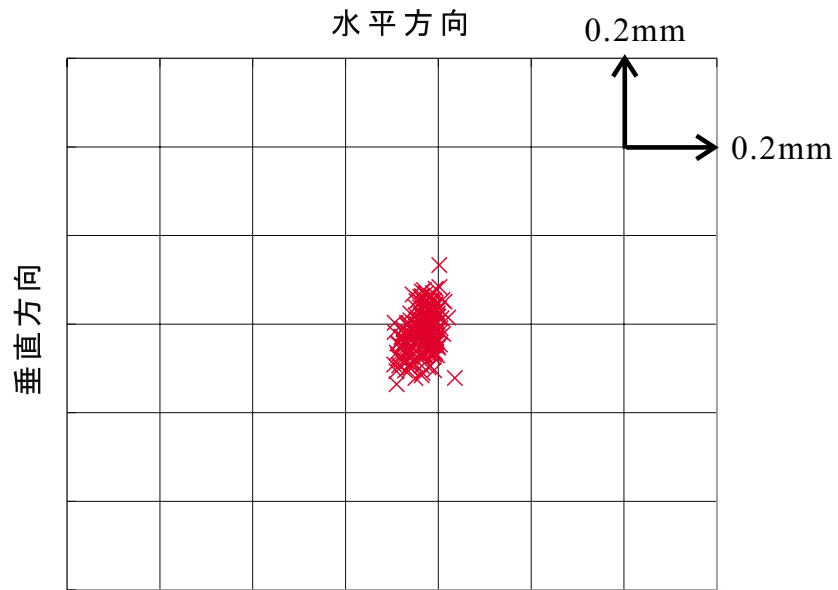


図 3.28: 計測された瞳孔中心位置 (被験者 S10、左眼側)

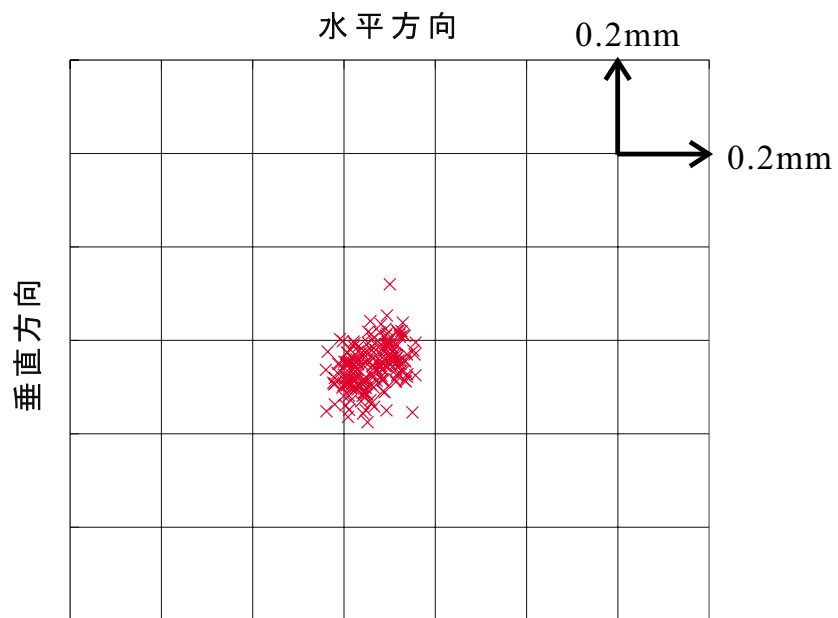


図 3.29: 計測された瞳孔中心位置 (被験者 S10、右眼側)

表 3.8: ES-HMD と ES-HMD で計測した瞳孔中心位置の標準偏差

		ES-HMD [mm]		ES-HMD [mm]	
		水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向
擬似瞳孔	左眼	0.020	0.096	0.016	0.037
	右眼	0.012	0.032	0.006	0.019
人間の瞳孔	左眼	0.314	0.192	0.059	0.056
	右眼	0.505	0.474	0.059	0.064

ている。また、表 3.8 で ES-HMD と ES-HMD を比較すると、擬似瞳孔、人間の瞳孔ともに、ES-HMD による計測の方が ES-HMD によるものよりも標準偏差が明らかに小さい。すなわち、ES-HMD では ES-HMD に比べて瞳孔中心位置検出の精度が向上したと考えられる。この理由には、

- CCD カメラで撮像される眼球画像の解像度が向上したこと
- CCD カメラと LCD の光学中心が一致しているので、装着するユーザーごとに CCD カメラの位置を微調整する必要がなくなったこと

があげられる。

3.3.4 視点位置較正方法

視点位置較正を評価する前に、まず、ここでは、瞳孔中心位置検出で計測された瞳孔中心位置から視点位置を推定する視点位置較正について、その方法を説明する。視点位置較正方法の概要を図 3.30 を示し、以下で説明する。

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ー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。

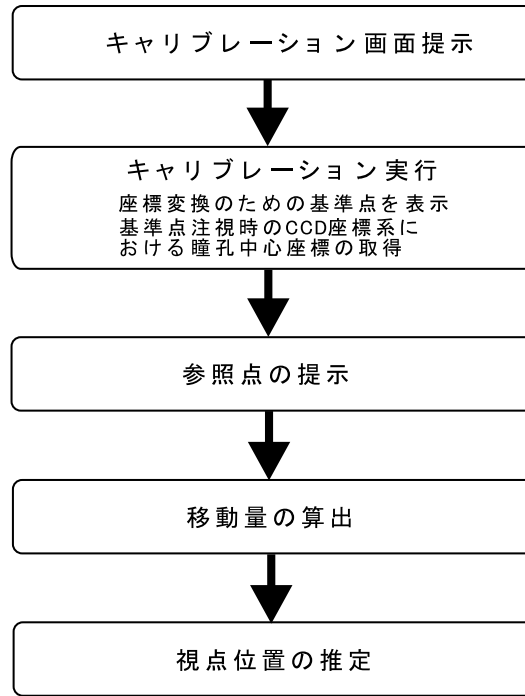


図 3.30: 視点位置検出方法の概要

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、ユーザー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、眼前1m先に提示される虚像の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。ユーザー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。

座標変換方法

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点を用いる。ここで ES-HMD の映像表示系は1m先に26 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を表す変数を θ_h 、 θ_v とすると式 (3.16) より計算できる。

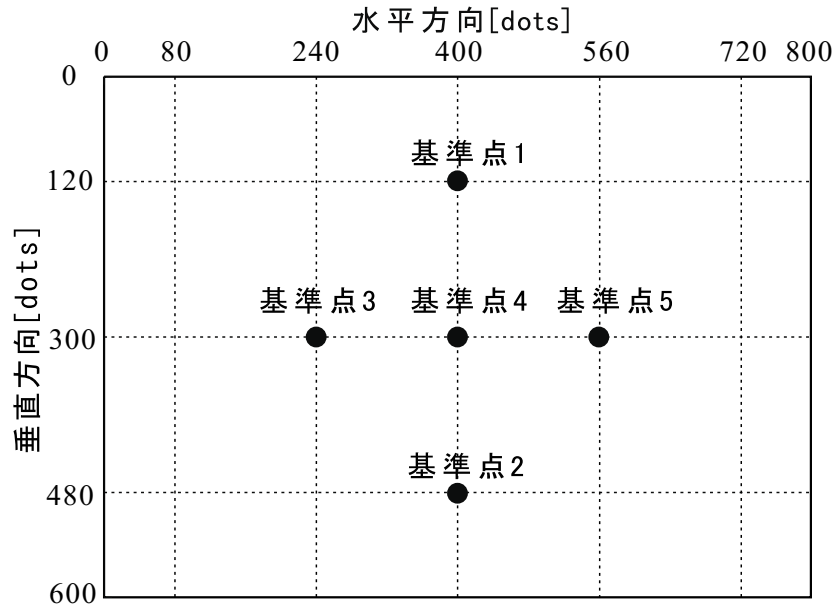


図 3.31: キャリブレーション時に表示される基準点

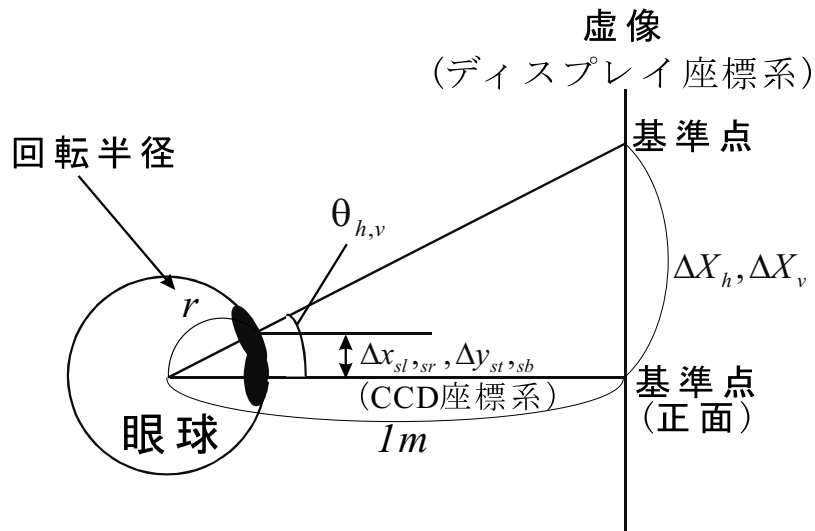


図 3.32: 眼球回転角の計算方法

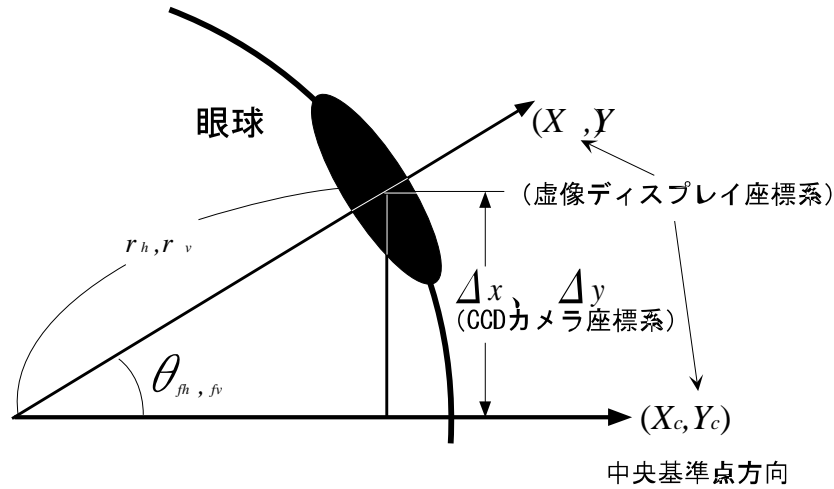


図 3.33: 眼球回転角の計算方法

$$\theta_h = \tan^{-1} \frac{\Delta X_h}{1000} \quad [\text{deg}], \quad \theta_v = \tan^{-1} \frac{\Delta X_v}{1000} \quad [\text{deg}] \quad (3.16)$$

ただし、図 3.31、図 3.32 より、 $\Delta X_h=106.2\text{mm}$ 、 $\Delta X_v=118.8\text{mm}$ である。眼球の水平方向の回転半径を示す変数を r_h 、 r_v とすると、式 (3.17)、式 (3.18) で与えられる。

$$r_h = \frac{\Delta x_{sl} + \Delta x_{sr}}{2 \cdot \sin \theta_h} \quad [\text{mm}] \quad (3.17)$$

$$r_v = \frac{\Delta y_{st} + \Delta y_{sb}}{2 \cdot \sin \theta_v} \quad [\text{mm}] \quad (3.18)$$

ただし、 Δx_{sl} 、 Δx_{sr} 、 Δx_{st} 、 Δx_{sb} は基準点 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である。図 3.33 に示すようにある点 (X, Y) を見ているときの眼球の縦、横方向それぞれの回転角を表す変数を θ_{fh} 、 θ_{fv} とすると、次式 (3.19) により求められる。

$$\theta_{fh} = \sin^{-1} \frac{\Delta x}{r_h} \quad [\text{deg}], \quad \theta_{fv} = \sin^{-1} \frac{\Delta y}{r_v} \quad [\text{deg}] \quad (3.19)$$

ただし、 Δx 、 Δy はある点 (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である。

虚像のディスプレイ座標系での中央の基準点からの移動距離を表す変数を ΔX 、 ΔY とすると次式 (3.20) で求められる。

$$\Delta X = 1000 \cdot \tan \theta_{fh} \quad [\text{mm}], \quad \Delta Y = 1000 \cdot \tan \theta_{fv} \quad [\text{mm}] \quad (3.20)$$

虚像ディスプレイ座標を LCD の座標を変換するための定数を H_{dot} 、 V_{dot} とすると、次の式 (3.21)、式 (3.22) で与えられる。

$$H_{dot} = \frac{160}{\Delta X_h} \quad [\text{dot/mm}] \quad (3.21)$$

$$V_{dot} = \frac{180}{\Delta X_v} \quad [\text{dot/mm}] \quad (3.22)$$

ただし、 ΔX_h 、 ΔX_v は虚像ディスプレイ上での中央の基準点から左右、上下の基準点までの距離である。

以上より、LCD 上の座標系におけるユーザが注視している点を表す変数を X_{LCD} 、 Y_{LCD} とすると次式 (3.23) で求めることができる。

$$X_{LCD} = H_{dot} \cdot \Delta X + X_{LCD_c} \quad [\text{dots}], \quad Y_{LCD} = V_{dot} \cdot \Delta Y + Y_{LCD_c} \quad [\text{dots}] \quad (3.23)$$

ただし、 (X_{LCD_c}, Y_{LCD_c}) は LCD の中心座標である。

3.3.5 視点位置検出の評価実験

本項では 3.3.1 項および 3.3.4 項で述べた方法により、ES-HMD を用いて視点位置の検出精度を評価するための実験について述べる。具体的には、ディスプレイ上に配した 15 点を被験者が注視したときの視点位置を検出し、その誤差とばらつきを計測する。以下、実験の目的、方法、結果および考察について述べる。

実験目的

ES-HMD の視点位置検出の精度を評価する。

実験方法

ES-HMD のディスプレイ上に順次表示される 15 個の参照点を被験者に注視してもらい、3.3.4 項で述べた方法によりそのときの被験者の視点位置を検出する。被験者がディスプレイ上で注視する点を図 3.34 に示す。この 15 の参照点のうち図中の番号順

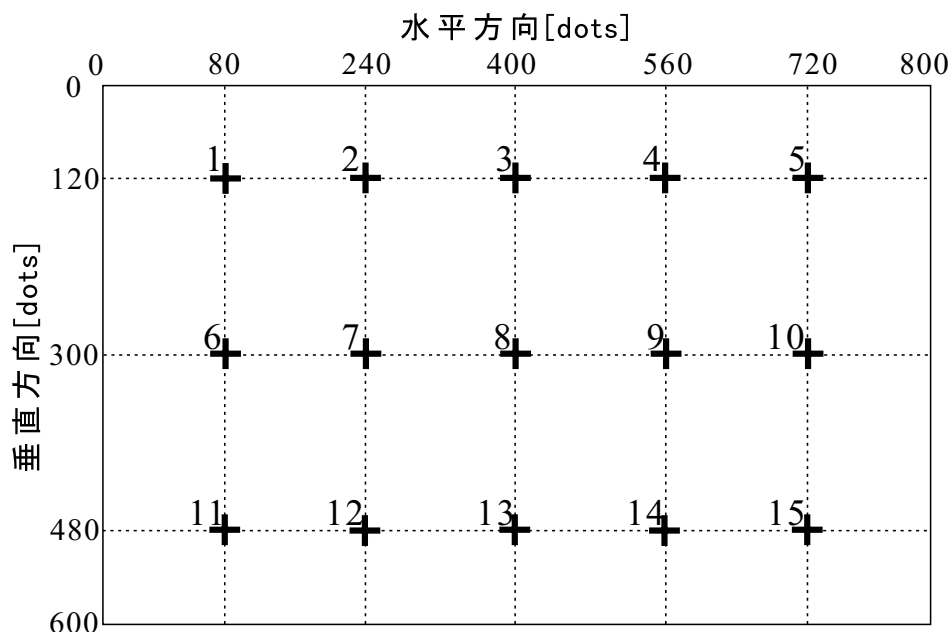


図 3.34: 視点位置検出の評価実験で提示する参照点

に1点ずつ ES-HMD のディスプレイ上に表示させる。参照点は十字の形をしたターゲットであり、水平方向が 80 ~ 720dots の範囲に 5 点、垂直方向が 120 ~ 480dots の範囲に 3 点配置した（参照点 8 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 24.0deg に相当し、各参照点間の水平視野角は約 6.0deg となる。一方、最上端と最下端の垂直視野角は約 12.0deg に相当し、各参照点間の垂直視野角は約 6.0deg となる。

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 3、13、7、8、9 の順に提示し視点位置較正のためのキャリブレーションを行う。その後、図 3.34 に示す 15 点の参照点を 1 から 1 点ずつ順に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を検出する。検出する視点位置は参照点 1 つあたり 100 フレームである。また、被験者には参照点注視中に瞬目をしないように指示した。被験者は、視機能に異常のない男子大学院生 4 名（被験者 S13、S14、S15、S16）である。

表 3.9: 検出された視点位置の誤差

被験者	ES-HMD		ES-HMD	
	水平方向 [deg]	垂直方向 [deg]	水平方向 [deg]	垂直方向 [deg]
左眼	1.056	1.194	0.565	1.053
右眼	1.790	4.459	0.716	0.782

実験結果と考察

ここでは、被験者 S13 の視点位置検出結果を図 3.35、図 3.36 に示す。他の被験者については付録 B に譲る。ここで、ES-HMD の視点位置検出精度を評価するために、昨年度行った ES-HMD の視点位置検出実験の結果^[8]と比較する。ES-HMD と ES-HMD では実験条件が若干異なるため、以下に昨年度 ES-HMD で行った実験の条件を示す。

- 被験者がディスプレイ上で注視する点を図 3.37 に示す。この 35 個の参照点のうち図中の番号順に 1 点ずつ ES-HMD のディスプレイ上に表示させる。参照点は十字の形をしたターゲットであり、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（参照点 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。
- 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 の順に提示し視点位置較正のためのキャリブレーションを行った。その後、図 3.37 に示す 35 点の参照点を 0 から 1 点ずつ順に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を検出した。検出した視点位置は参照点 1 つあたり 40 フレームであった。被験者は視機能に異常のない男子大学院生 3 名（被験者 S17、S18、S19）である。

昨年度に行った ES-HMD の視点位置検出精度の評価実験において、被験者 S17 の結果を図 3.38、図 3.39 に示す。

ES-HMD では、視野角の違いや提示した参照点の位置などの実験条件が異なるため、ES-HMD とは単純に比較できないが、ここでは検出された視点位置の誤差を視野

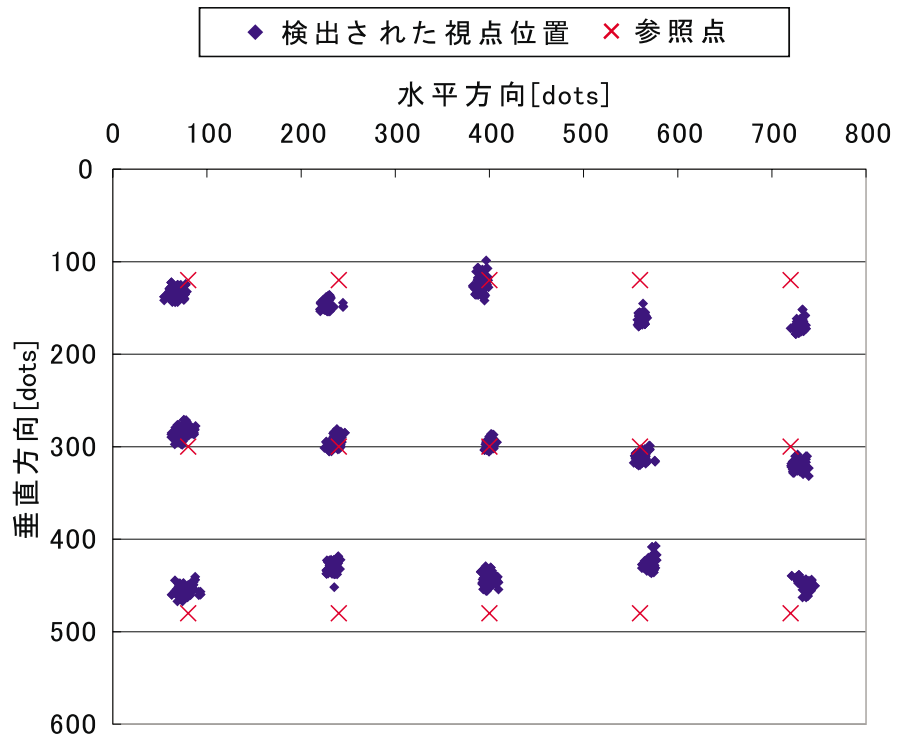


図 3.35: ES-HMD によって検出された視点位置 (被験者 S13 : 左眼)

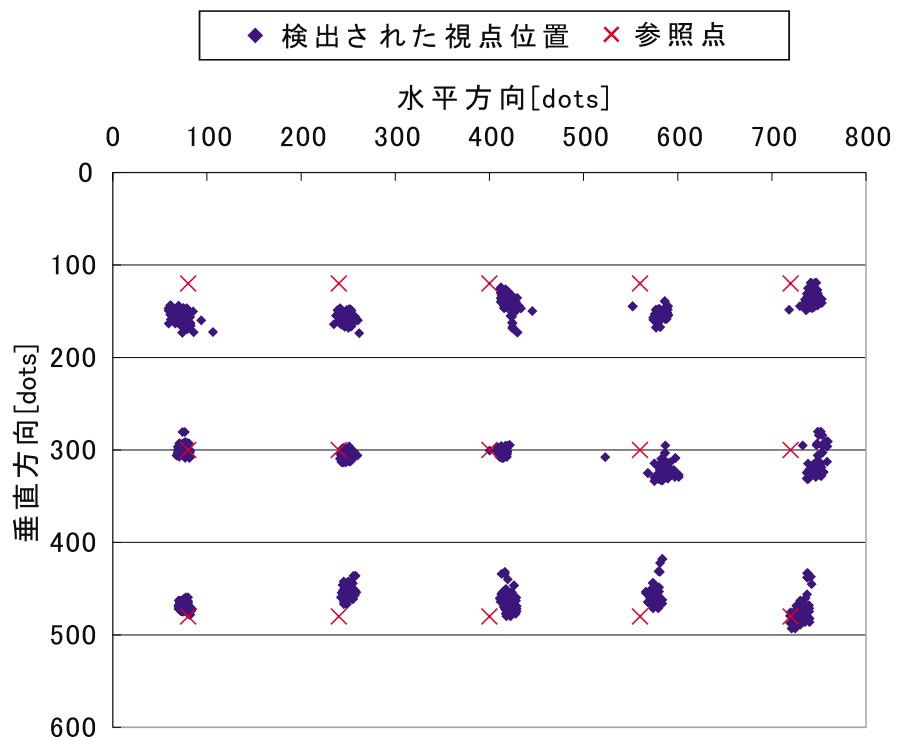


図 3.36: ES-HMD によって検出された視点位置 (被験者 S13 : 右眼)

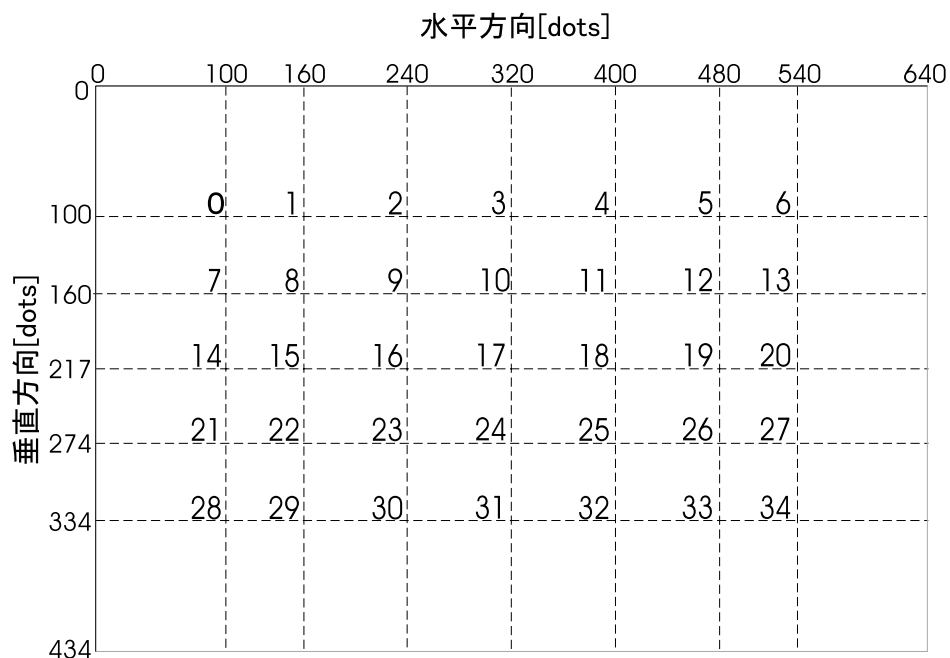


図 3.37: ES-HMD の視点位置検出の評価実験で提示した参照点

角に換算して考察する。表 3.9 に、ES-HMD と ES-HMD での視点位置検出誤差を視野角で比較したものを示す。表中の誤差は、ES-HMD では 3 名の被験者、ES-HMD では 4 名の被験者の平均である。

この結果から ES-HMD では、水平方向、垂直方向ともに誤差が小さくなっているのがわかる。視点位置較正方法は ES-HMD と ES-HMD の場合で同じであるので、誤差が小さくなった理由は、瞳孔中心位置の計測精度が向上したことが考えられる。視点位置を検出するためには、参照点を注視したときの瞳孔中心位置を精度よく計測することだけでなく、キャリブレーションのための基準点を注視したときの瞳孔中心位置も精度よく計測する必要がある。さらに、キャリブレーション時と参照点注視時において、頭部運動等によるヘッドユニットのずれがないことが必要である。これより、ES-HMD で視点位置検出精度が向上した理由は、

- 瞳孔中心位置の計測精度が向上していること
- ヘッドユニットの軽量化により、ずれが少なくなっていること

と考えられる。

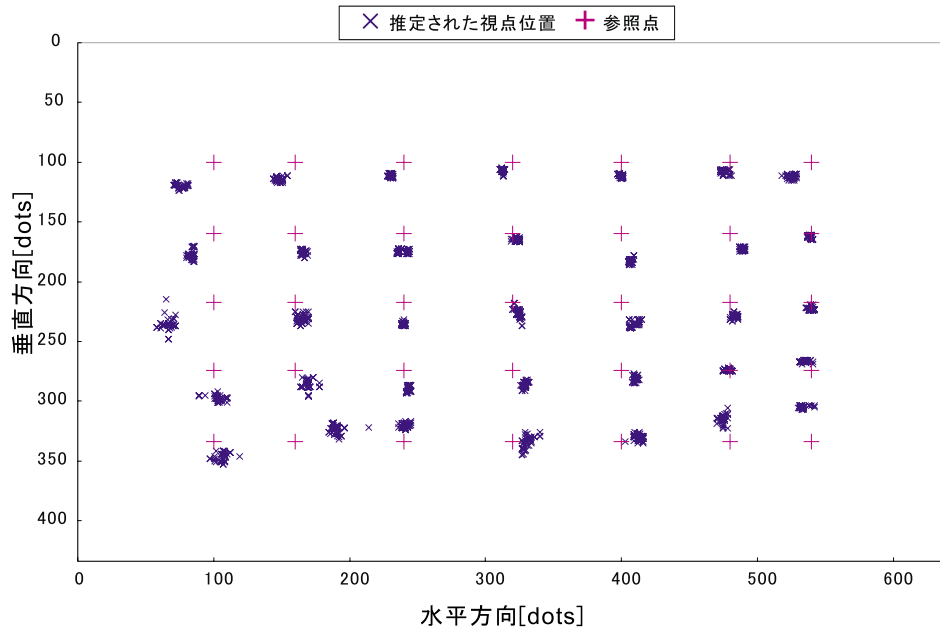


図 3.38: ES-HMD によって検出された視点位置 (被験者 S17 : 左眼)

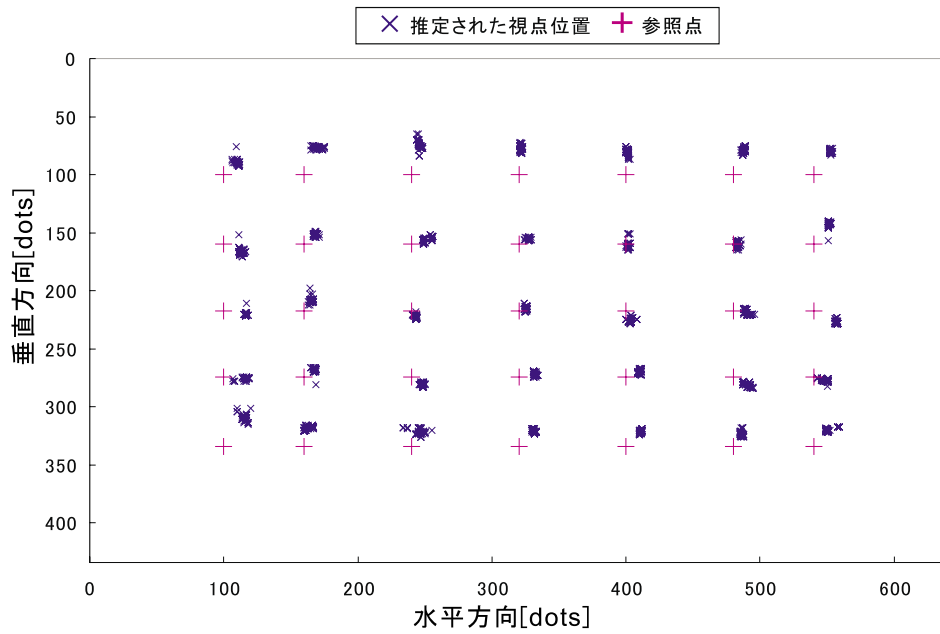


図 3.39: ES-HMD によって検出された視点位置 (被験者 S17 : 右眼)

第 4 章 視点位置検出方法の改良

本章では、3章で述べた視点位置検出方法を改良し、新たな方法を提案する。本章ではまず、昨年度の手法の問題点を指摘し、新たに提案する視点位置検出方法の詳細について説明する。そして、ES-HMD を用いて、提案方法による視点位置検出の精度を評価した結果を述べる。

4.1 従来の視点位置検出方法の問題点

視点位置検出方法は 3.3 節で述べたように、(1) 瞳孔中心位置検出と (2) 視点位置較正の 2 つの処理からなっている。提案する視点位置検出方法は、(2) 視点位置較正方法を改良し、視点位置の検出精度の向上を図るものである。まず、3.3.4 項で述べた視点位置較正方法を振り返り、その方法の問題点を指摘する。なお、以下では 3.3.4 項で述べた視点位置較正方法を method1 と呼ぶ。

method1 では、まずキャリブレーション時の瞳孔中心位置から眼球の回転半径を水平方向、垂直方向それぞれ別々に求める。次に、図 4.1 のように、ある点を見ている際の CCD カメラ座標系での眼球の移動量の水平成分、垂直成分 Δx 、 Δy を求め、それぞれをディスプレイ座標系での移動量 ΔX 、 ΔY に変換して視点位置を検出する。図 4.2 に、実際に装着者が見ている視点位置と method1 で検出された視点位置を示す。図中の O は眼球中心、A は method1 によって検出された視点位置、B はに装着者が見ている視点位置である。method1 では、眼球半径を式 (3.17) および式 (3.18) で求めているが、これらはそれぞれ線分 OQ、OP に相当する。視点位置較正を行う際には、CCD カメラ座標系での瞳孔中心の移動量 Δx 、 Δy を用いて、ディスプレイ座標系での移動量 ΔX 、 ΔY を個別に求めるが、この方法では、図 4.2 に示すように実際に見ている点と若干の誤差が生じる。これは、装着者の瞳孔中心位置 R は視点の移動に伴い、眼球中心 O を中心とした球上を移動するのに対し、この方法では、瞳孔中心位置 R が平面上を移動すると仮定しているためである。視点が正面方向からあまり移動していない場合には、この際の誤差は少ないが、視点が正面から大きく移動したときには、この誤差は大きくなる。

また、図 3.35、図 3.36 に示した視点位置検出結果からもわかるように、視点位置の

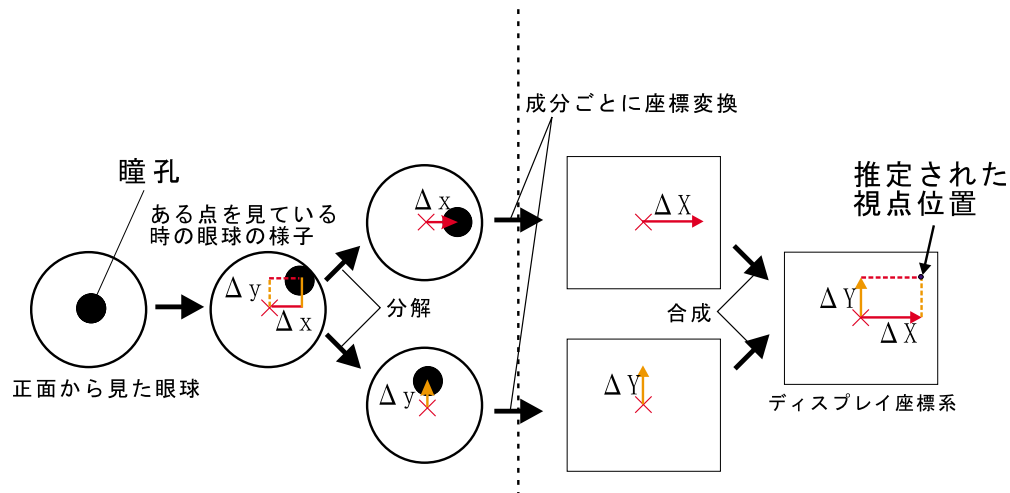


図 4.1: method1 での視点位置較正方法

検出結果が参照点に対して若干傾いていることがある。この原因は、ヘッドユニットを装着する際に若干傾いたまま装着しているためである。

そこで、本研究では、上記の誤差と装着時の傾きの問題を解決することによって視点位置検出精度を向上させるために、新しい視点位置較正方法を提案する。

4.2 新しい視点位置較正方法の提案

4.2.1 手法の概要

本研究で提案する視点位置較正方法の特徴は以下の2点である。

1. 眼球回転角の計算方法を変更することで、method1における視点位置較正誤差をなくす
2. ヘッドユニットを装着する際の傾きから生じるずれを補正する

1. の概要を図 4.4、図 4.5 に示す。キャリブレーションの方法は従来の視点位置較正方法と同じである。提案手法では、図 4.4 に示すように、まず、ある点を見ているときの瞳孔中心の CCD カメラ座標系における移動量から、瞳孔がどの方向に回転したのかを示す方位角を求める (図 4.4 の θ_p)。次に、図 4.5 に示すように CCD カメラ座標系による瞳孔中心の移動量 $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$ から眼球の仰角 θ_r を求める。そして、求められた θ_p 、 θ_r 及びキャリブレーションで得られた眼球の回転半径を用いて LCD 座標系上の視点位置を検出する。

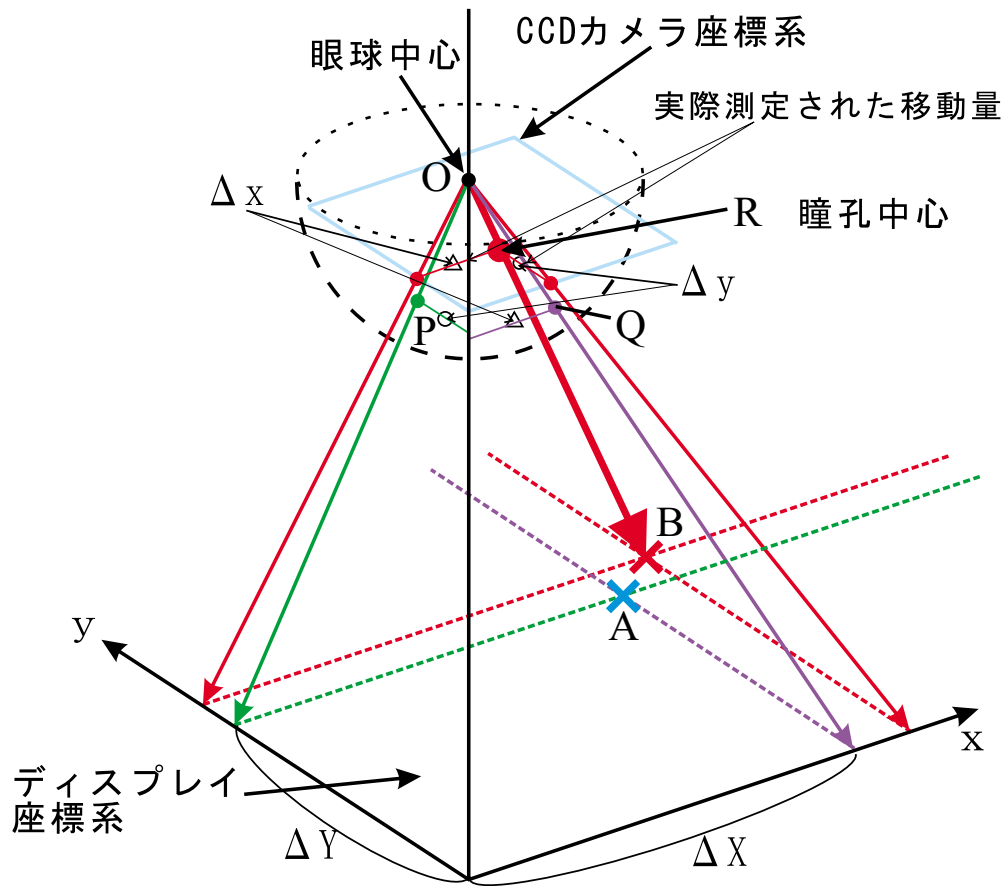


図 4.2: method1 で検出された視点位置

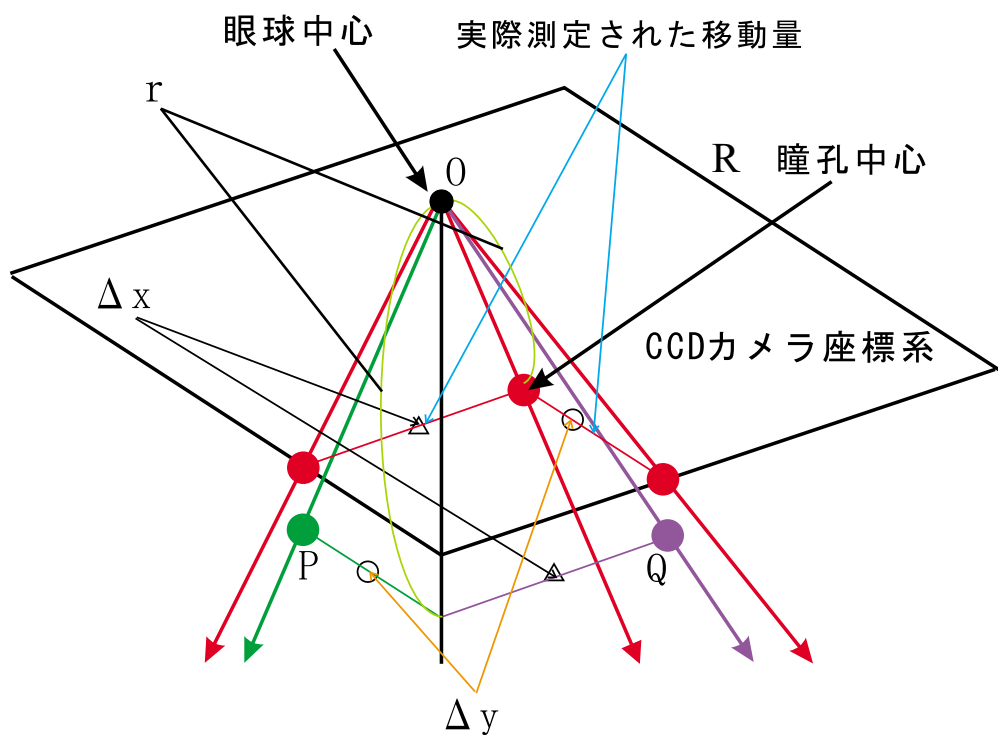


図 4.3: method1 で検出された視点位置 (CCD カメラ座標系を拡大)

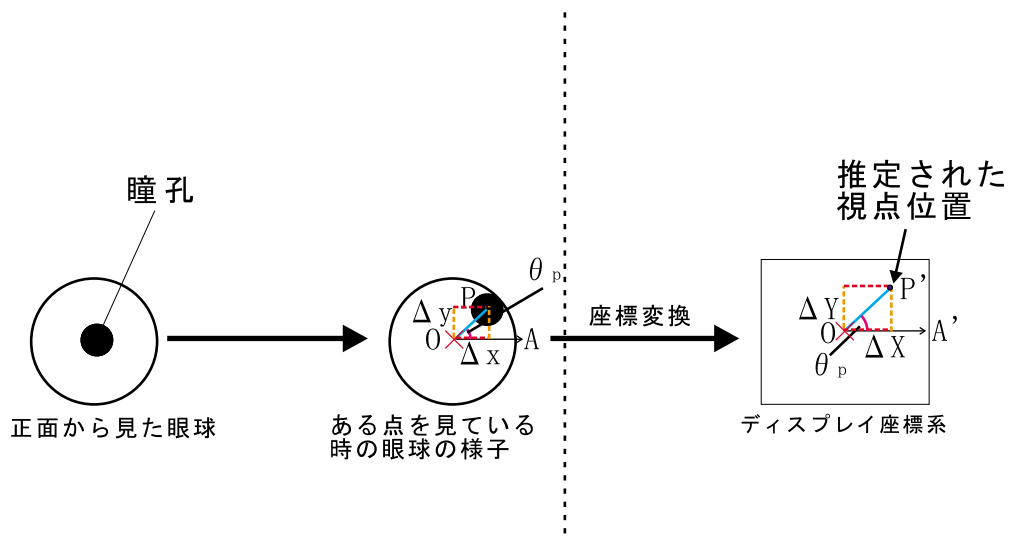


図 4.4: 提案する視点位置較正方法

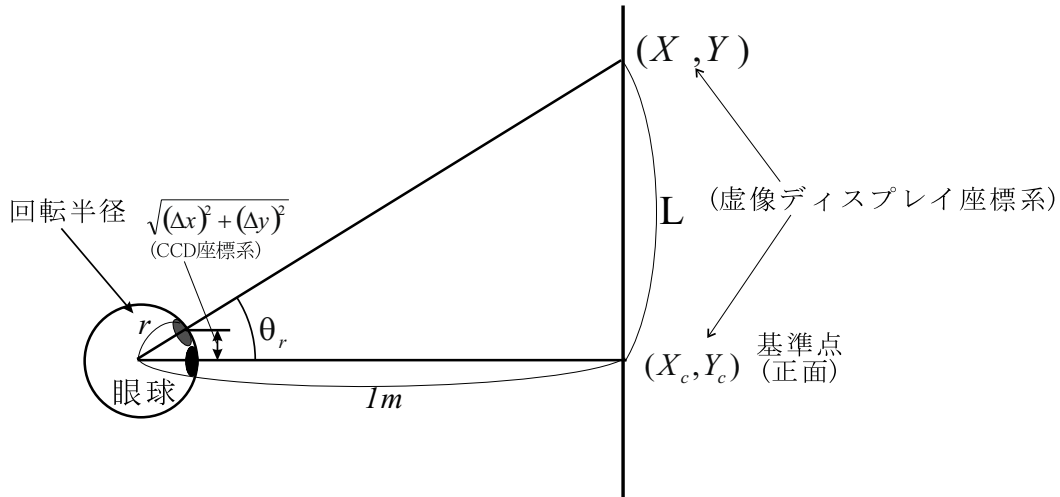


図 4.5: 提案方法による眼球回転角の計算方法

2. では、キャリブレーション時に計測される瞳孔中心位置から装着時のヘッドユニットの傾きを検出し、その傾きから検出された視点位置を逆に回転させて補正する。

4.2.2 提案する視点位置較正方法の詳細

まず、眼球の水平方向、垂直方向の回転半径 r_h 、 r_v を求めるためキャリブレーションを行う。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 4.6 に示すような中央および左右上下の計 5 点を用いる。そして、3.3.4 項で述べた方法と同様に、式 (3.17)、式 (3.18) により r_h 、 r_v を求める。

図 4.7 のように見ている点の水平方向からの角度を表す変数を θ_p とすると次式 (4.1) で求められる。

$$\theta_p = \tan^{-1} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad [\text{deg}] \quad (4.1)$$

ただし、 Δx 、 Δy は虚像ディスプレイ上のある点 (X, Y) を見ているときの瞳孔中心位置の移動量である。点 (X, Y) を見ているときの眼球の回転角を表す変数を θ_r とすると次式 (4.2) で与えられる。

$$\theta_r = \sin^{-1} \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{r} \quad [\text{deg}] \quad (4.2)$$

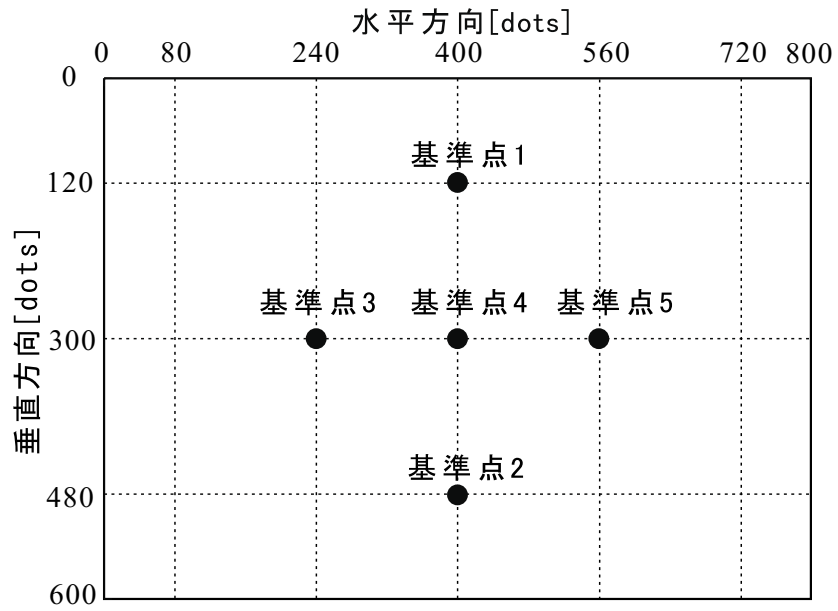


図 4.6: キャリブレーション過程で装着者に提示する基準点

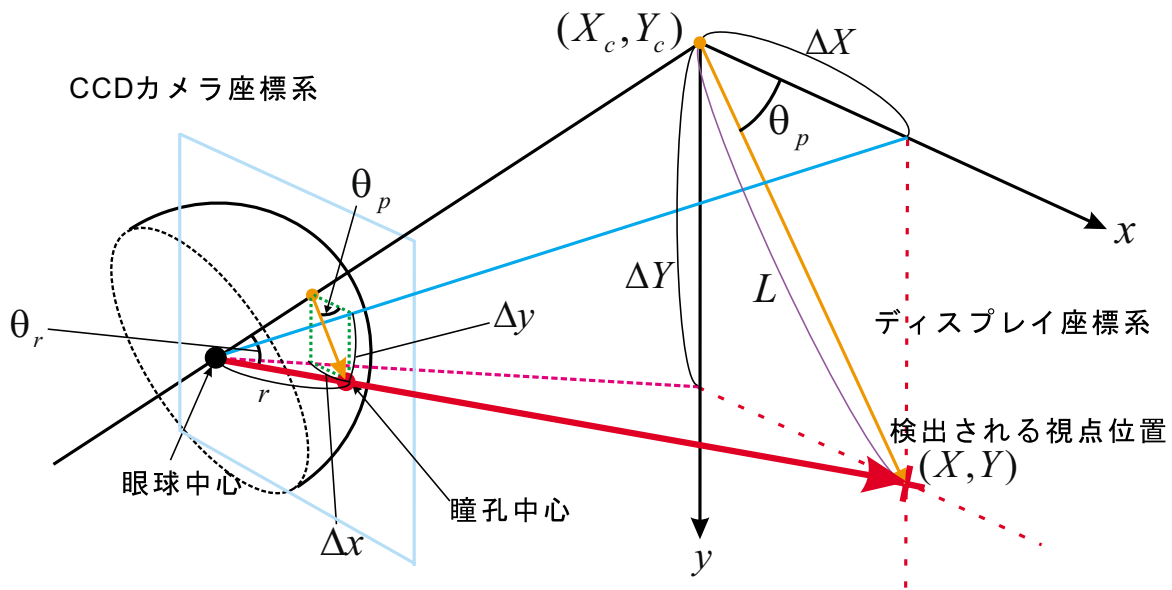


図 4.7: 眼球回転角の計算方法

ただし、 r は眼球の回転半径である。虚像ディスプレイ上の視点 (X, Y) と虚像ディスプレイ中心 (X_c, Y_c) との距離を表す変数 L は次式 (4.3) で与えられる。

$$L = 1000 \cdot \tan \theta_r \quad [\text{mm}] \quad (4.3)$$

虚像ディスプレイ上での中心からの視点の移動量を表す変数 ΔX 、 ΔY はそれぞれ次の式 (4.4)、式 (4.5) で与えられる。

$$\Delta X = L \cdot \cos \theta_p \quad [\text{mm}] \quad (4.4)$$

$$\Delta Y = L \cdot \sin \theta_p \quad [\text{mm}] \quad (4.5)$$

LCD 上での視点位置を表す変数 X_{LCD}, Y_{LCD} はそれぞれ次の式 (4.6)、式 (4.7) で与えられる。

$$X_{LCD} = H_{dot} \cdot \Delta X + X_{LCD_c} \quad [\text{dot}] \quad (4.6)$$

$$Y_{LCD} = V_{dot} \cdot \Delta Y + Y_{LCD_c} \quad [\text{dot}] \quad (4.7)$$

ただし、 H_{dot} 、 V_{dot} は前述の式 (3.21)、式 (3.22) で与えられている。また、 (X_{LCD_c}, Y_{LCD_c}) は、LCD の中心座標である。

このようにして、LCD 上の視点位置 (X_{LCD}, Y_{LCD}) を求めることができるが、この方法では、式 (4.2) で眼球を真球と仮定しその回転半径 r をキャリブレーションから求めて用いるものとしている。しかし、実際には眼球の水平方向と垂直方向の回転半径 r_h 、 r_v は異なっている（詳細は付録 C 参照）。そこで、本研究では、キャリブレーションで求めた r_h と r_v を用いて、式 (4.2) で用いる眼球の回転半径 r を以下の式で求めることとする。

$$r = r_h + (r_v - r_h) \cdot \frac{\theta_p}{90} \quad [\text{mm}] \quad (4.8)$$

これは、視点の水平方向からの角度 θ_p により、図 4.8 に示すように半径 r が r_h と r_v の間を線形的に変化するものとしている。

しかし、図 4.9 に示すように ES-HMD のヘッドユニットを傾けて装着した場合、キャリブレーションを行うと図 4.10 のような瞳孔中心位置が得られる。そのためこの

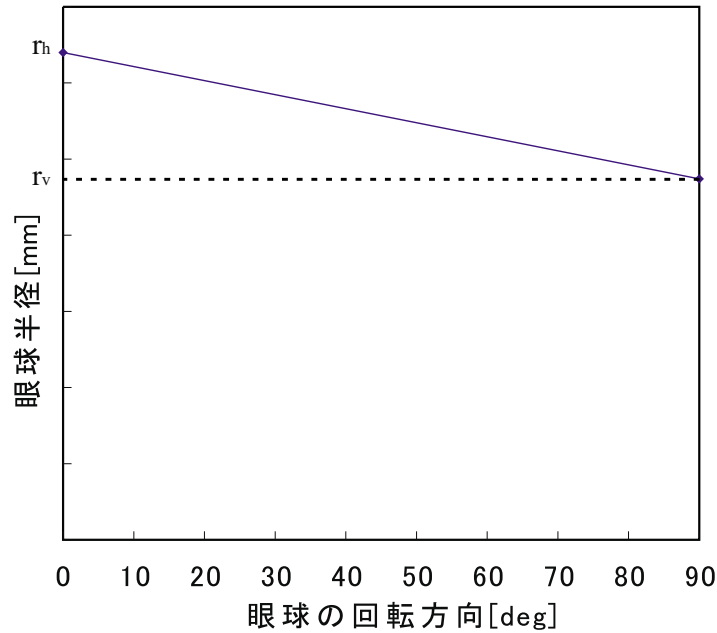


図 4.8: 眼球半径の変化

まま上記の視点位置較正を行うと実際にユーザが見ている位置とは異なった視点位置を検出してしまう。そこで、キャリブレーションで得られた瞳孔中心位置から、各基準点の傾き (図 4.10 中の $\theta_a \sim \theta_d$) を計算し、これらの値を平均してヘッドユニットの傾き θ_g を次の式 (4.9) によって検出する。

$$\theta_g = \frac{1}{4} \cdot (\theta_a + \theta_b + \theta_c + \theta_d) \quad [\text{deg}] \quad (4.9)$$

そして、式 (4.6)、式 (4.7) で求めた視点の LCD 上での中心からの移動量 (ΔX_{LCD} , ΔY_{LCD}) = ($H_{dot} \cdot \Delta X$, $V_{dot} \cdot \Delta Y$) を図 4.9 により θ_g だけ回転させることで傾きを補正し、最後に LCD 中心座標 (X_{LCD_c} , Y_{LCD_c}) を加えることで、次式 (4.10) により LCD 上の視点位置 ($X_{LCD_{corr}}$, $Y_{LCD_{corr}}$) を次の (4.10) によって求める。

$$\begin{pmatrix} X_{LCD_{corr}} \\ Y_{LCD_{corr}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_g & \sin \theta_g \\ -\sin \theta_g & \cos \theta_g \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta X_{LCD} \\ \Delta Y_{LCD} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{LCD_c} \\ Y_{LCD_c} \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

なお、キャリブレーションにおける処理手順をまとめたものを図 4.11 に、視点位置検出における処理手順をまとめたものを図 4.12 に示す。

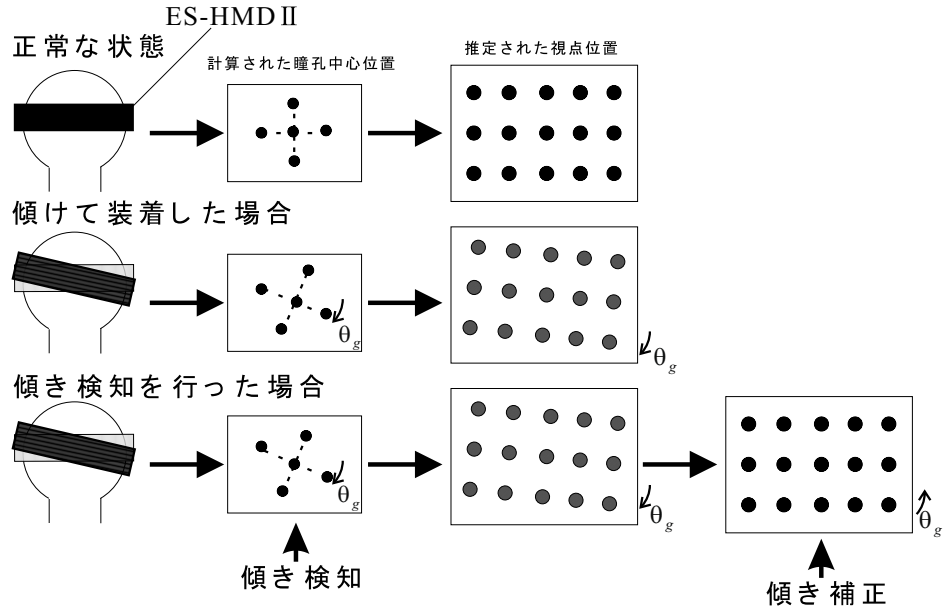


図 4.9: 傾き補正の概要

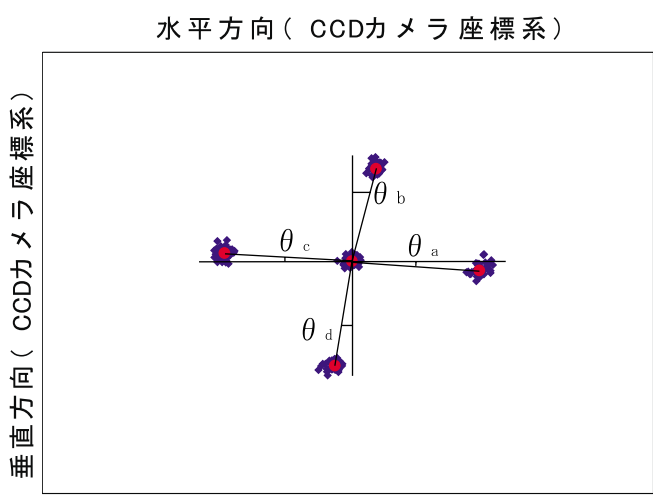


図 4.10: ヘッドユニットを傾けて装着した場合のキャリブレーションで得られた瞳孔中心位置の実測値の例

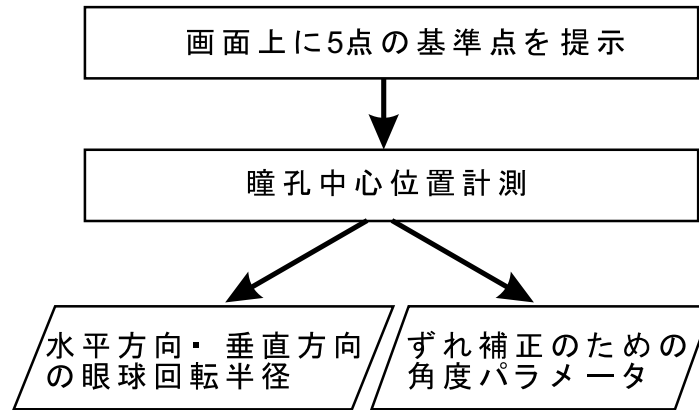


図 4.11: キャリブレーションの処理手順

4.3 提案した視点位置較正方法の評価実験

本節では、4.2.2 項で提案した視点位置較正方法の測定精度を評価するために行った実験について述べる。実験では、昨年度の視点位置較正方法と本研究で提案した視点位置較正方法により検出した視点位置の誤差を比較した。

4.3.1 実験の目的

本研究で提案した視点位置較正方法による視点位置検出精度を評価する。具体的には、被験者実験により、3.3.4 項で述べた昨年度の方法による視点位置検出精度と、提案した方法による精度とを比較する。なお、以下では、昨年度の視点位置較正方法を method1、本研究で提案した方法を method2 と呼ぶ。

4.3.2 実験の方法

瞳孔中心位置測定方法で計算された瞳孔中心位置を、4.2.2 項で method2 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について評価する。

実験では、ES-HMD のヘッドユニットを装着した被験者に図 4.13 に示した 15 点を 1 点ずつ順に見てもらい、その際の瞳孔中心位置を検出する。そして、検出した瞳孔中心位置から、method1、method2 により視点位置を検出する。

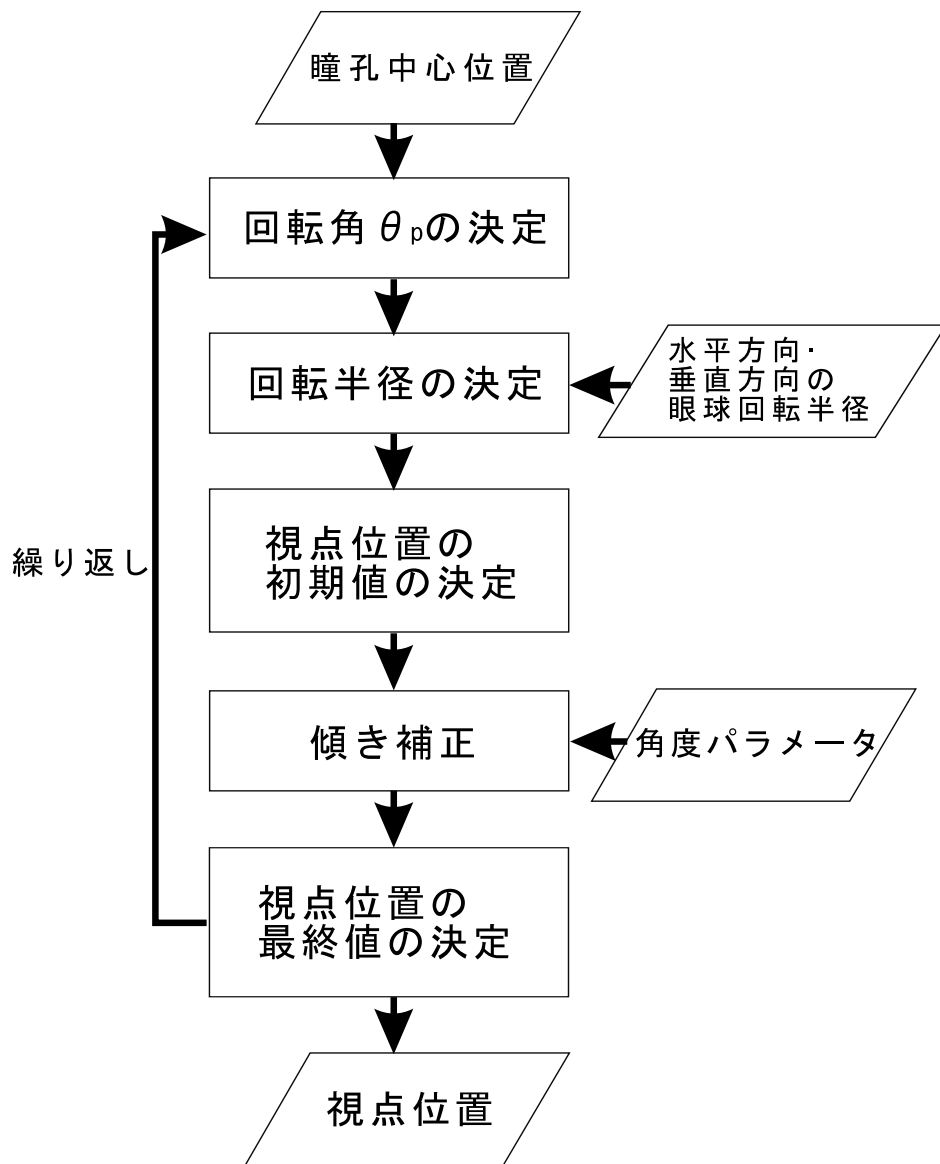


図 4.12: 視点位置較正の処理手順

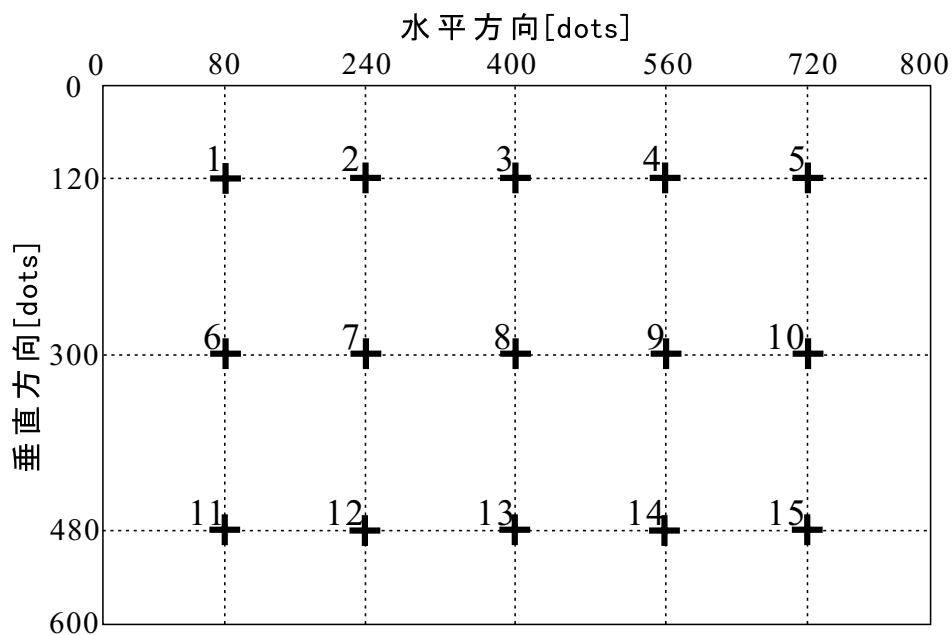


図 4.13: 提示する参照点

実験手順

まず、被験者に ES-HMD のヘッドユニットを装着してもらい、次いで画面に基準点を点 3、13、7、8、9 の順に提示し、各基準点を注視している時の瞳孔中心位置を検出する。ここで得られた瞳孔中心位置は method1、method2 でのキャリブレーションに用いる。この準備の後、図 4.13 に示す 15 点の参照点を 1 から 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、method1 および method2 により LCD 上の視点位置をそれぞれ検出する。参照点を注視している際に求める視点位置は参照点 1 つあたり 100 フレームである。また、被験者には参照点注視中に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 4 名（被験者 S13、S14、S15、S16）である。ただし、これら 4 名は 3.3.4 項で述べた実験の被験者と同じである。

4.3.3 実験結果と考察

被験者 S13 の method1、method2 による視点位置検出結果を図 4.14 ~ 図 4.17 に示す。他の被験者については付録 B に譲る。また、method1 と method2 について、各参照点

表 4.1: method1、method2 の誤差の比較

被験者		method1[dots]	method2[dots]
S13	左眼	28.66	20.91
	右眼	27.04	21.68
S14	左眼	39.61	30.22
	右眼	30.45	24.82
S15	左眼	28.33	22.03
	右眼	22.61	21.88
S16	左眼	24.64	22.54
	右眼	39.01	38.81

毎に参照点と検出された視点位置との距離（誤差）を求め、被験者全員の平均を求めた結果を図 4.18 ~ 図 4.21 に、各参照点を注視している際のばらつきを示す指標として各参照点における各フレーム毎の誤差の標準偏差を求め、被験者全員の平均を求めた結果を図 4.22 ~ 図 4.29 に示す。さらに、method1、method2 について、参照点からの誤差を各被験者ごとにまとめた結果を表 4.1 に、また水平方向、垂直方向それぞれの誤差の標準偏差を各被験者ごとにまとめた結果を表 4.2 に示す。

図 4.14 ~ 図 4.17 から、method2 では method1 に比べて画面周辺部において視点位置検出精度が向上していることがわかる。これは、被験者 S13 の結果であるが、全被験者における参照点と視点位置との誤差を示す図 4.18 ~ 図 4.21 から、method2 は method1 に比べて、特に画面周辺部において誤差が小さくなっていることが確認できる。被験者ごとの誤差をまとめた表 4.1 でも、method2 が method1 に比べて誤差が小さくなっていることを示している。

また、図 4.22 ~ 図 4.29 より、method2 の各参照点における視点位置のばらつきは method1 と比較して、水平方向ではばらつきが若干小さいのに対し、垂直方向では少しではあるが大きくなっている。ただし、視点位置のばらつきそのものは、瞳孔中心位置検出時のばらつきが原因であり、視点位置較正方法の違いによるものではない。

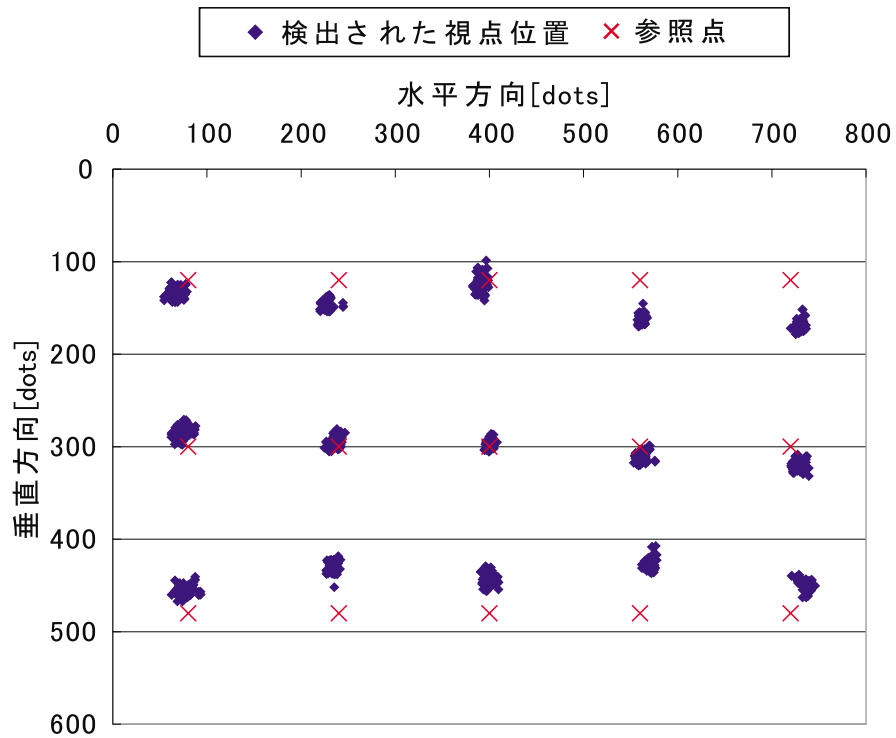


図 4.14: method1 によって検出された視点位置 (被験者 S13 : 左眼)

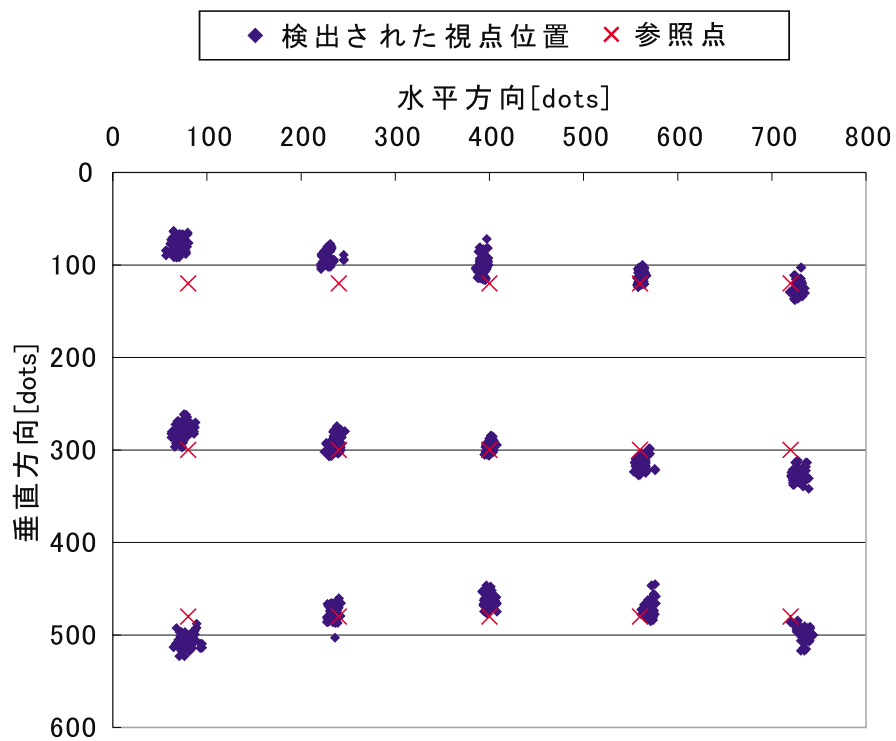


図 4.15: method2 によって検出された視点位置 (被験者 S13 : 左眼)

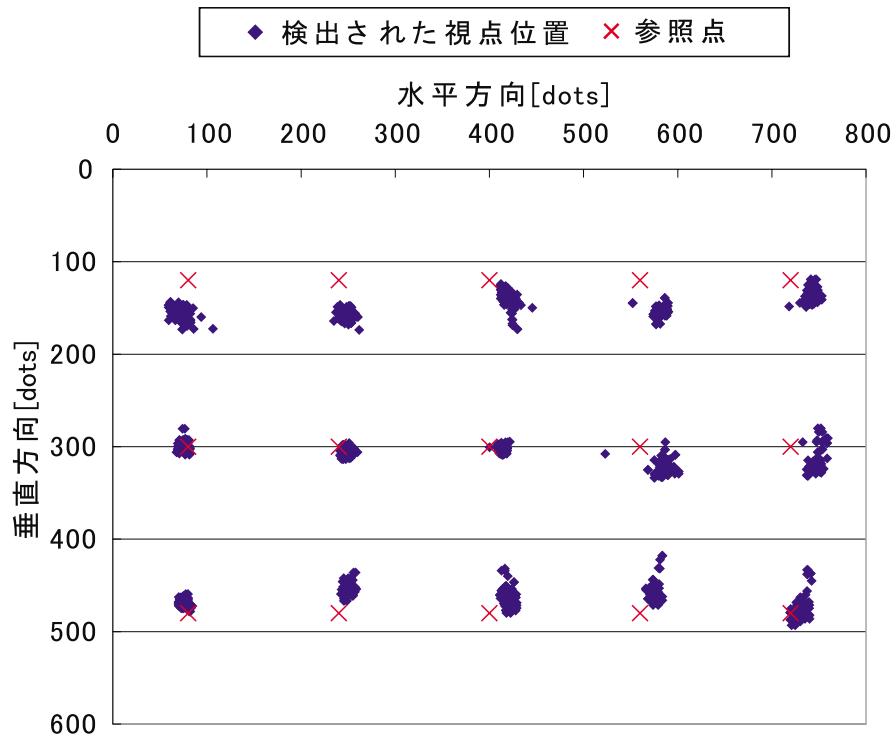


図 4.16: method1 によって検出された視点位置 (被験者 S13 : 右眼)

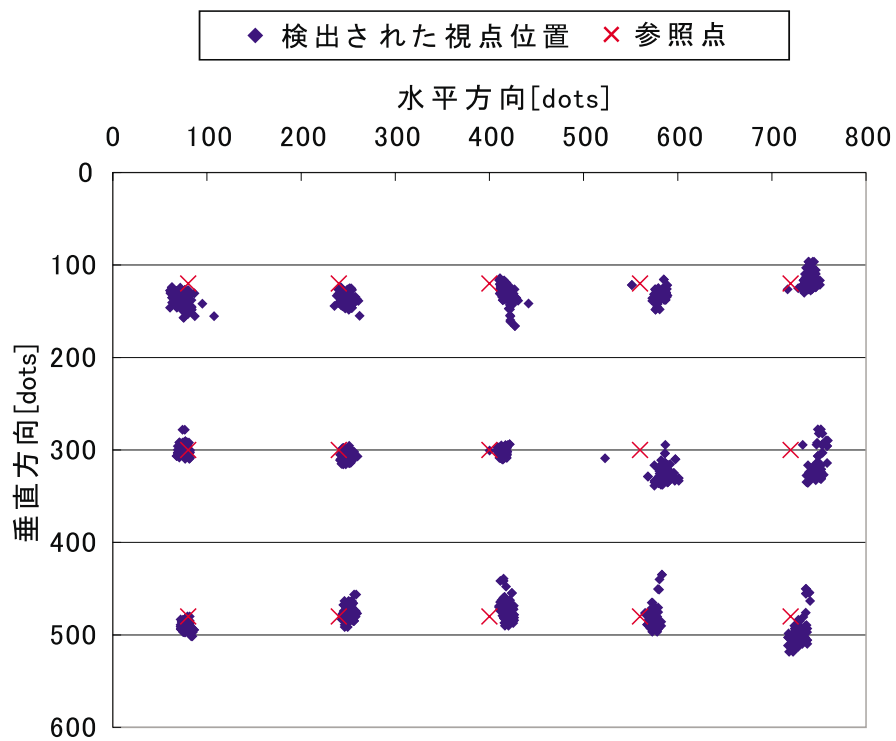


図 4.17: method2 によって検出された視点位置 (被験者 S13 : 右眼)

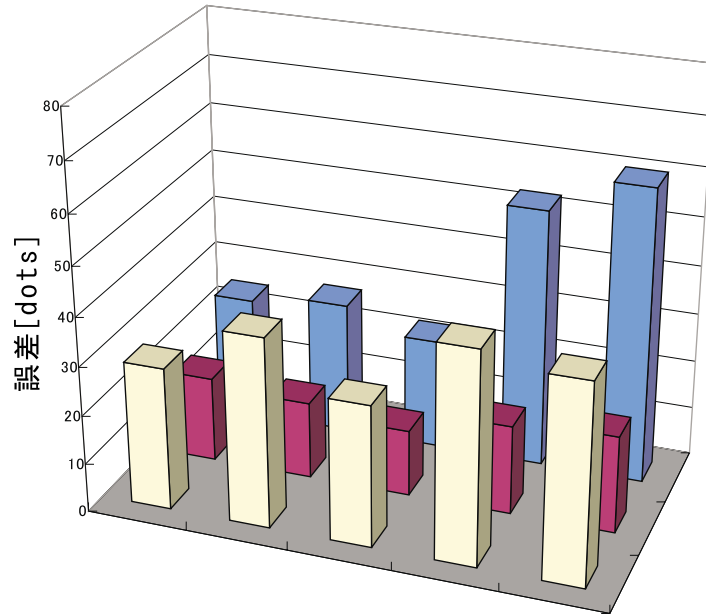


図 4.18: method1 によって検出された各参照点における視点位置の誤差 (左眼)

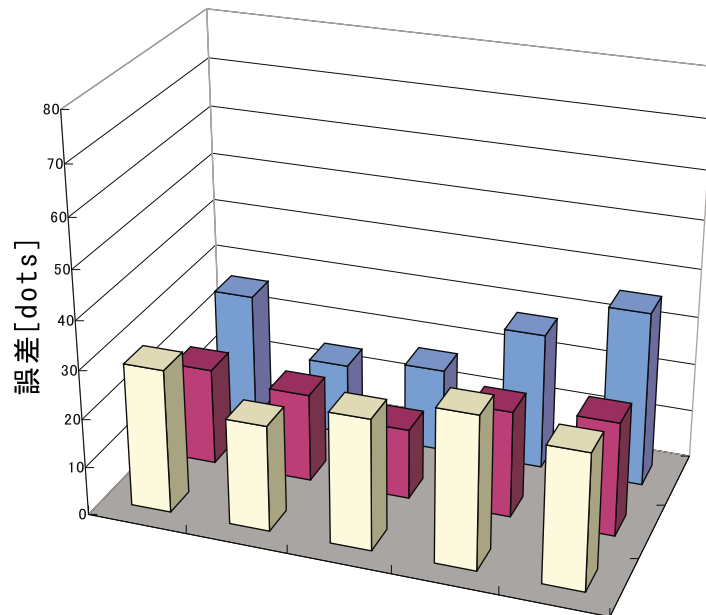


図 4.19: method2 によって検出された各参照点における視点位置の誤差 (左眼)

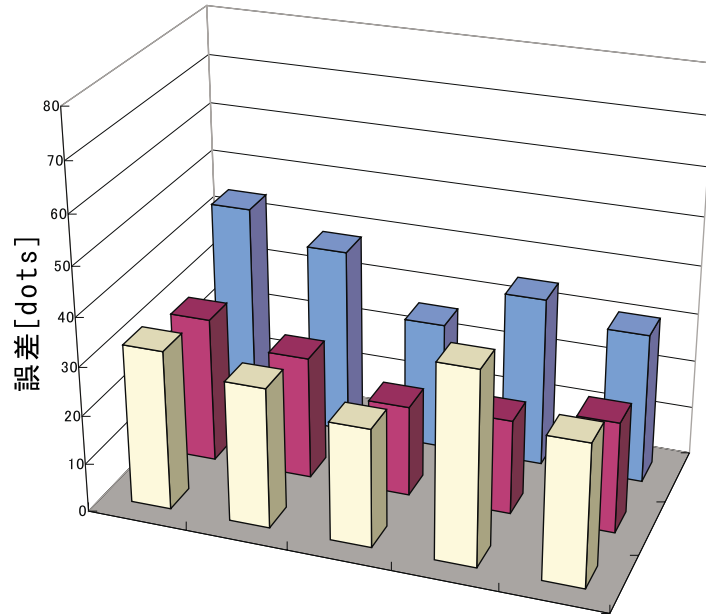


図 4.20: method1 によって検出された各参照点における視点位置の誤差 (右眼)

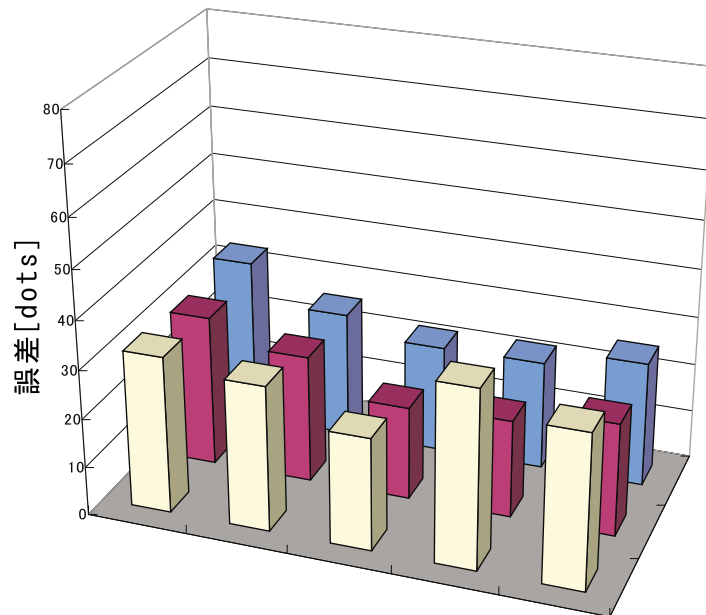


図 4.21: method2 によって検出された各参照点における視点位置の誤差 (右眼)

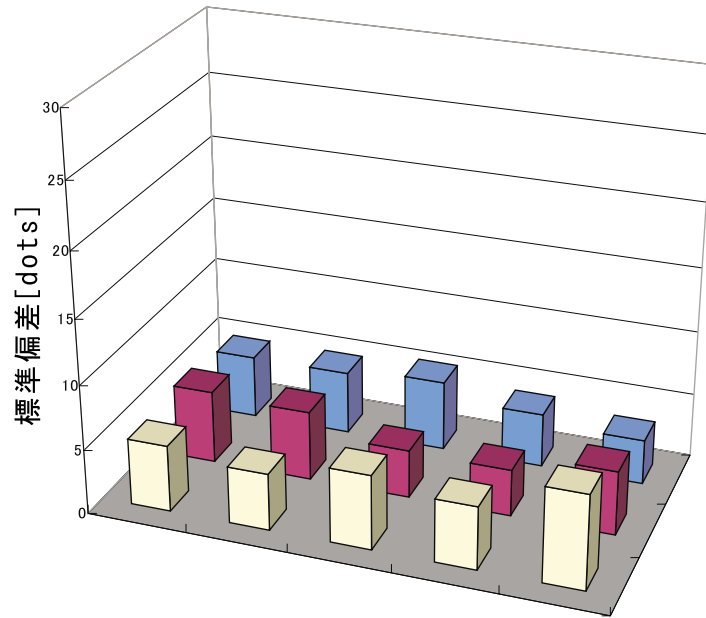


図 4.22: method1 によって検出された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差 (左眼)

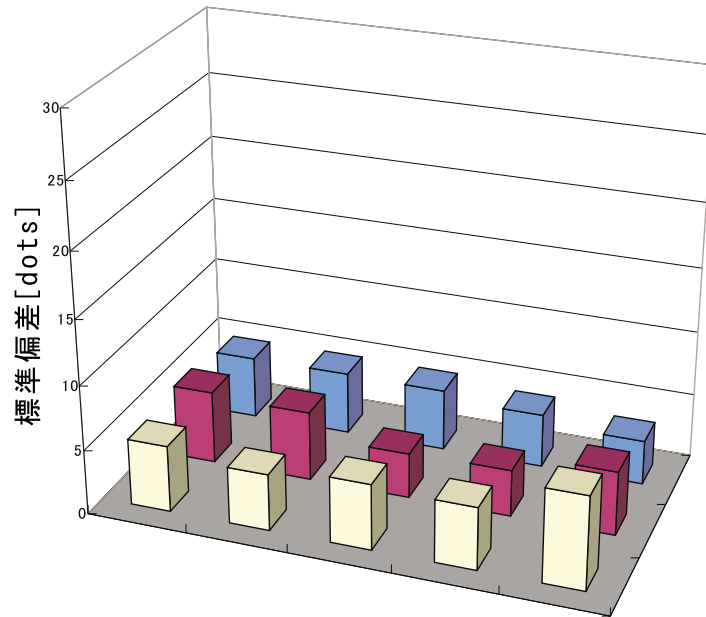


図 4.23: method2 によって検出された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差 (左眼)

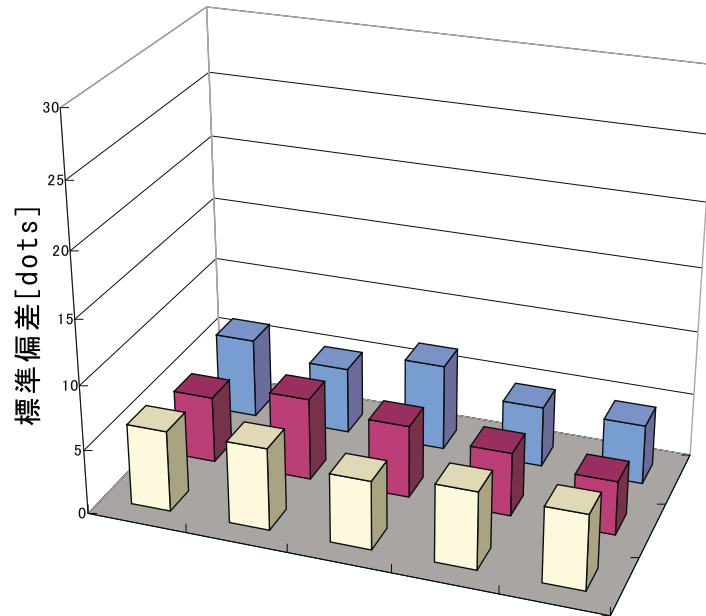


図 4.24: method1 によって検出された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差 (左眼)

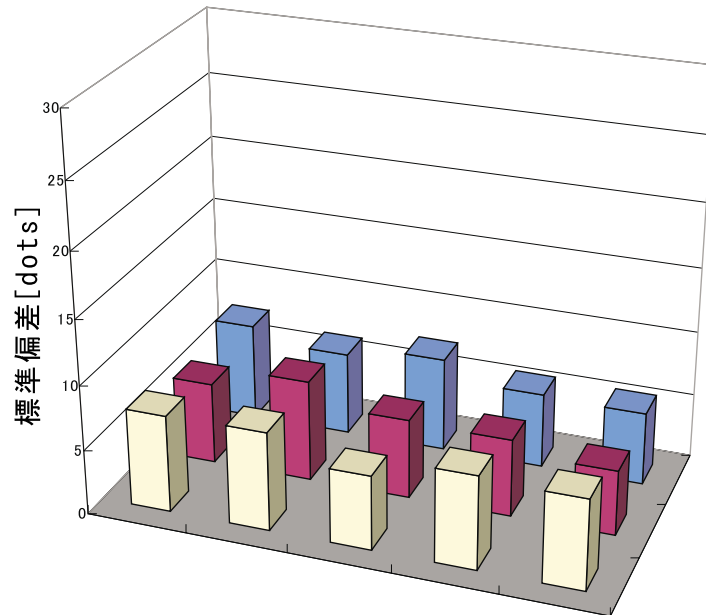


図 4.25: method2 によって検出された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差 (左眼)

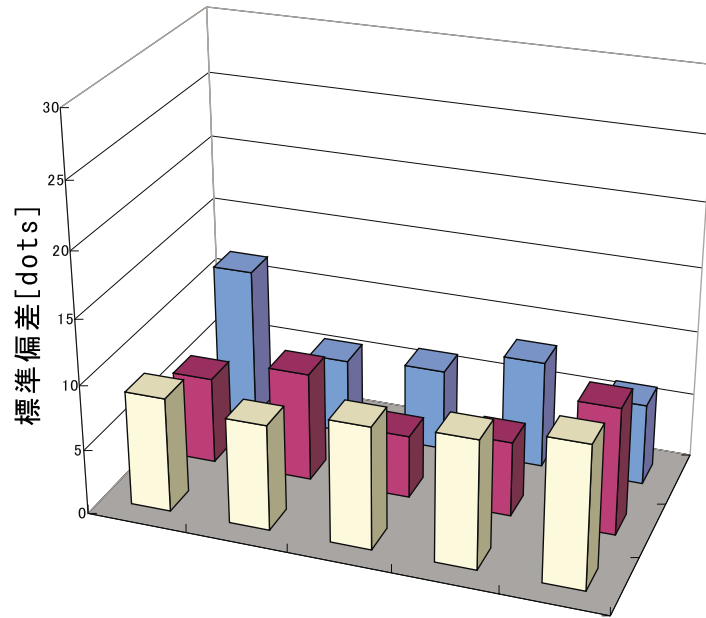


図 4.26: method1 によって検出された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差 (右眼)

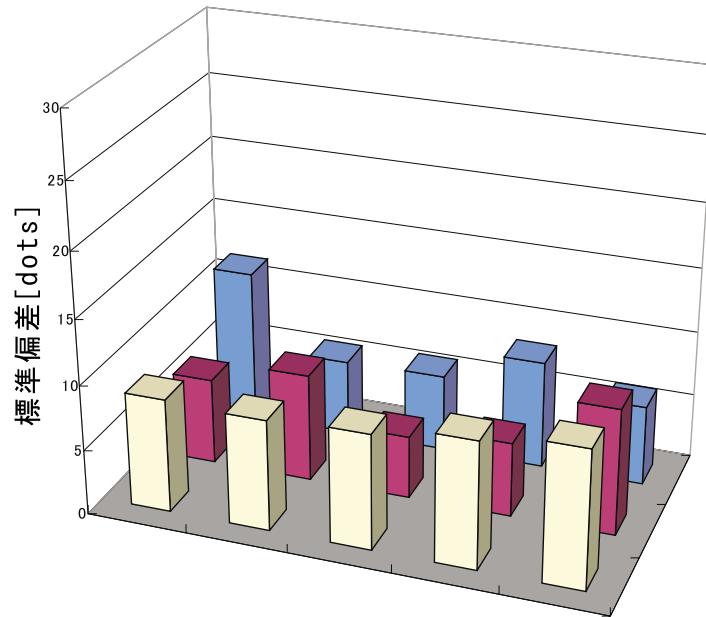


図 4.27: method2 によって検出された各参照点における視点位置の水平方向の標準偏差 (右眼)

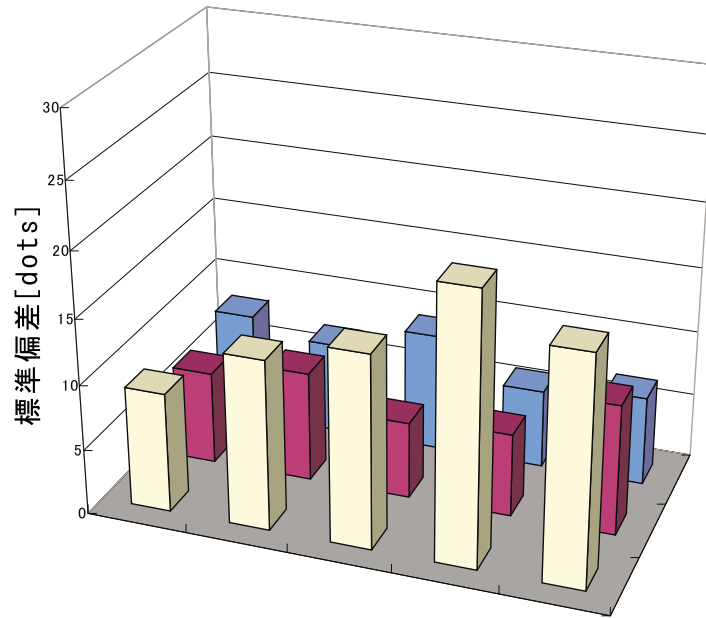


図 4.28: method1 によって検出された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差 (右眼)

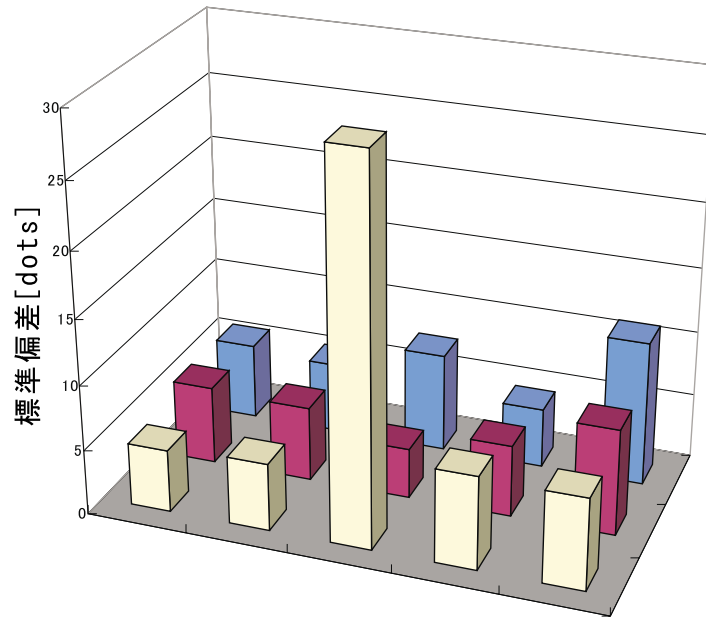


図 4.29: method2 によって検出された各参照点における視点位置の垂直方向の標準偏差 (右眼)

表 4.2: method1、method2 の標準偏差の比較

被験者		method1[dots]		method2[dots]	
		水平	垂直	水平	垂直
S13	左眼	4.32	5.31	4.19	6.86
	右眼	5.69	6.24	5.63	8.14
S14	左眼	4.91	4.85	4.81	6.00
	右眼	5.63	6.24	5.66	6.60
S15	左眼	4.22	4.91	4.07	6.06
	右眼	9.77	9.33	9.71	10.01
S16	左眼	6.17	7.30	6.07	7.88
	右眼	11.27	17.22	10.95	17.47

第 5 章 視線入力システムの開発

本研究は、第 2 章で述べたように、ユニバーサルな視線入力インタフェースを実現することを目指している。本研究ではその実現へ向けた第一歩として、前章で提案した視点位置検出手法を用いて、一般のパソコンをマウスで操作するのと同様に、ES-HMD を装着したユーザが提示画面上のインタフェースを視線でポインティング操作できる視線入力システムを試作した。

以下、本章では、まず視線入力システムを開発する上でのシステム構成の着眼点を説明し、続いてこの視線入力システムの特徴と、システムのハードウェア構成とソフトウェア構成、システムの機能を述べる。そして、このシステムを利用して、視線入力の操作性を評価するために行った被験者実験について述べる。さらに、視線入力システムの応用事例として、3次元立体視映像を提示できる ES-HMD の特性を利用し、ユニバーサルなインタフェースの一例として試作した World Wide Web のホームページブラウザについて述べ、最後に視線入力システムのまとめと今後の展望について述べる。

5.1 システム開発の着眼点

本研究では、前章で述べた視点位置検出手法を用いて、ES-HMD を装着したユーザの提示画面上の視点位置をリアルタイムで検出し、その位置にマウスのポインタを移動させ、ユーザが視線でポインティング操作を行うことができるシステムを試作した。

視線入力の従来研究では、画面のスクロールや文字入力など特定のインタフェース機能を対象としたシステムを開発したものが多く、しかし、高齢者や肢体不自由者だけでなく健常者にとっても使いやすい汎用的なインタフェースの開発に主眼を置き、本研究では、アイコンやボタン等をクリックしてコマンド入力を行う GUI で多用される、基本的なポインティング操作を対象とした。一方、昨年度試作した視線入力システムでは、左眼の視線によるポインティング操作と右眼の閉眼によるクリック入力操作を採用したが、閉眼を随意に行いにくいユーザがいたこと、また右眼の閉眼時に左眼の視点位置がずれるユーザがいたなどの問題点があった。そのため本研究では、左眼の視点位置をポインティング操作に利用し、クリック入力操作は外部の機械的な入力装

置を用いることにした。

また、クリック入力操作を機械的な入力装置で行う構成にすることは、ユーザの不自由な身体部位に対応する入力装置を別個に用意すれば、不自由な身体箇所にかかわらず本システムを利用できる利点が考えられる。そのため、ハンドスイッチ・フットスイッチ等の様々なタイプの入力装置を簡単に接続でき、またその取り替えも容易にできるように、システムの構成を行った。

さらに、ES-HMD は、パラレルポートを備えたあらゆる DOS/V パソコンに接続できる特徴がある。この点に着目し、ES-HMD を接続したパソコンに、視線によるポインティング操作を行う機能を持つソフトウェアを導入するだけで、簡単に視線入力が行えるシステム構成を目指す。

以上の着眼点に基づいて開発した視線入力システムのシステム構成について次節で述べる。

5.2 システム構成

ハードウェア構成

視線入力システムのハードウェア構成を図 5.1 に示す。本システムは以下の機器から構成される。

1. ユーザに画像の提示を行い、またユーザの眼球を撮像して画像処理により瞳孔の輪郭形状データを抽出する ES-HMD
2. 入力された瞳孔の輪郭形状データを処理し、CCD カメラ座標系での瞳孔中心位置を算出し、それをユーザに提示した画面上の視点位置に変換を行う PC(DELL 製:Dimension XPS B733r)
3. メス型ミニジャックを取り付けたマウス
4. ハンドスイッチ・フットスイッチ等の入力装置

上記 3 は市販のマウスを改造し、内部の左ボタン用の ON/OFF 端子にメス型ミニジャック (2 極 $\phi 5$) を接続してある。このジャックにオス型ミニジャックを出力端にもつ市販のスイッチを接続すれば、スイッチの ON/OFF 操作がマウスのクリック信号に置き換わる仕組みになっている。また、本研究では上記 4 の入力装置として、手の不自由

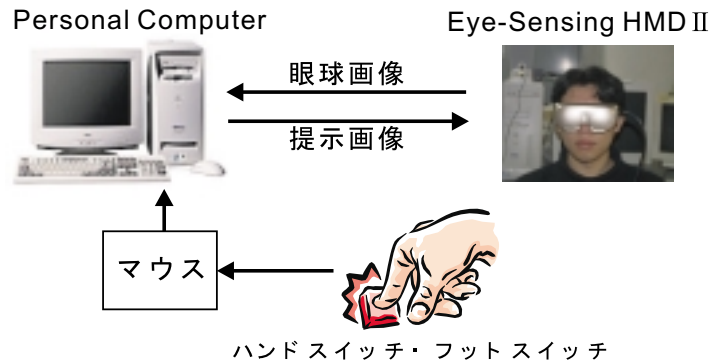


図 5.1: ハードウェア構成

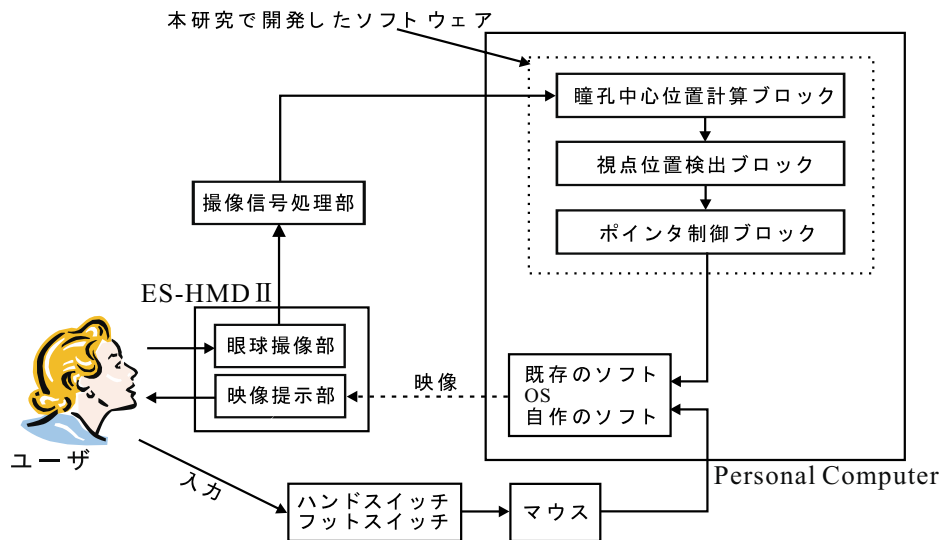


図 5.2: システム構成図

な人でも視線入力操作ができるようにフットスイッチ (The Boss Pedal Zone 製 FS-5U) を用意した。

ソフトウェア構成

本システムのソフトウェア構成を図 5.2 に示す。以下、図中の各処理ブロック別に説明する。

1. 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 節で述べたとおりである。撮像信号処理部で抽出された瞳孔の輪郭形状データは、次の瞳孔中心位置計算ブロックに送られる。

2. PC上の瞳孔中心位置計算ブロックでは、3.3.1項で述べた方法を用いて入力された瞳孔形状データから CCD 座標系での瞳孔中心位置を算出する。
3. 視点位置検出ブロックでは、瞳孔中心位置のデータを、本研究で新たに提案した方法を用いて提示している画面上の視点位置に変換する。
4. ポインタ制御ブロックでは、2で検出された視点位置にポインタを移動させる。
5. 3で制御されるポインタ位置とフットスイッチ等の入力装置によるクリック信号により、PCのWindows OSやGUIで構成された既存のソフトウェアや自作のソフトウェア等に対してユーザがコマンドを入力する。

また本研究では、上記2~4の3つのブロックをまとめて1つのソフトウェアとして構成し、これをEGOS(Eye Gaze Operation System)と名付けた。EGOSは、一般のWindowsパソコンに導入が可能であり、そのためES-HMDを接続したパソコンにEGOSを導入するだけで簡単に視線入力ができる構成が実現できる。

次節では、この視線入力システムを用いて視線入力の操作性を評価した被験者実験について述べる。

5.3 視線入力の操作性の評価

本節では、本研究で開発した視線入力システムを利用して、通常の手を用いたマウスによるポインティング操作と比較し、視線入力の操作性を評価するために行った被験者実験について述べる。また、実験では視線入力のクリック入力操作に用いるフットスイッチの操作性も評価した。以下、実験の目的、方法、実験の結果と考察について述べる。

5.3.1 実験の目的

本実験の目的は、本研究で開発した視線入力システムを利用した視線入力法の操作性を評価することである。その評価は、通常の手を用いたマウスによるポインティングとクリック入力操作（以下、マウス操作と呼ぶ）と視線入力とを用いて被験者に共通のタスクを行わせ、そのパフォーマンスを比較して行う。その際、視線入力については、ポインティング操作に対する2種類の補助機能を用意し、その効果も検証する。

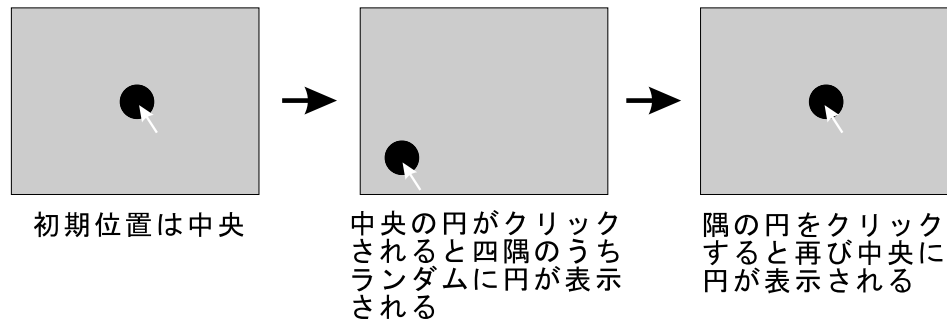


図 5.3: タスクの概要

また、視線入力におけるクリック入力操作について、フットスイッチの操作性を通常のマウスボタンの操作と比較して評価する。

5.3.2 実験の方法

タスクの内容

タスクの概要を図 5.3 に示し、タスクの内容を以下で順に説明する。

1. 被験者は画面中央（図 5.4 の中央）に表示される円内にポインタを移動させ、クリック入力を行う。
2. ポインタが画面中央の円内にある状態でクリック入力があれば、中央の円は消去され、画面の四隅（図 5.4 の四隅の点）のうちいずれかの場所にランダムに円が表示される。
3. 被験者は新たに表示された円にポインタを移動させクリック入力を行う。
4. 円内でクリック入力があれば、その円は消去され、画面中央に再び円が表示される。
5. 以下、1～4 の操作を 20 回繰り返す。

実験ではこのタスクを円の大きさを変化させて繰り返す。円の大きさは直径が 30dots、45dots、60dots、90dots、120dots の 5 段階に設定した。これらはそれぞれ画面垂直方向の長さの 2/40、3/40、4/40、6/40、8/40 に相当する。

本実験ではポインタの移動の方法及び円の大きさ以外に、結果に影響を与えるパラメータを極力排除するために画面中央に表示される円の中心から画面の四隅に表示さ

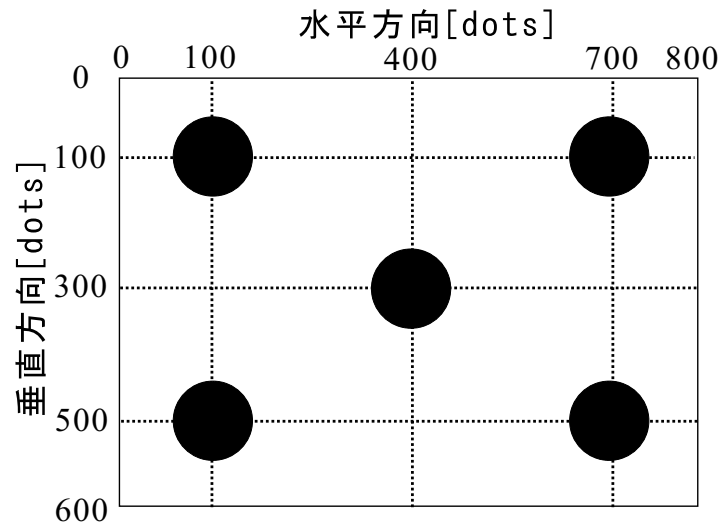


図 5.4: 視線入力の実験で提示される円の位置

せる円の中心までの距離は固定し、中心位置は画面の四隅から 100dots、すなわち画面垂直方向の長さの $1/6$ 、画面水平部分の長さの $1/8$ の位置とする。

データ収集は画面隅の円が表示されてから画面隅の円内でのボタン入力までの時間を測定することによって行う。

実験 1：視線入力とマウス操作の比較

実験の手順を図 5.5 に示す。まず、被験者は実験前にタスク十分な練習を行い、習熟効果が現れないよう配慮する。そして実験では、視線入力とマウス操作との比較を行うため、上記のタスクを以下の 5 つの場合についてそれぞれ順に被験者に行わせ、そのタスクの遂行時間を測定する。

1. 視線入力のみ
2. 視線入力・補助機能 1
3. 視線入力・補助機能 2
4. マウス操作・ES-HMD 装着
5. マウス操作・CRT モニタ

上記 2 の補助機能 1 は、図 5.6 に示すように、上記タスクでポインティングのターゲットとなる円内にポインタが進入すると、円の中心にポインタが自動的に瞬時に吸

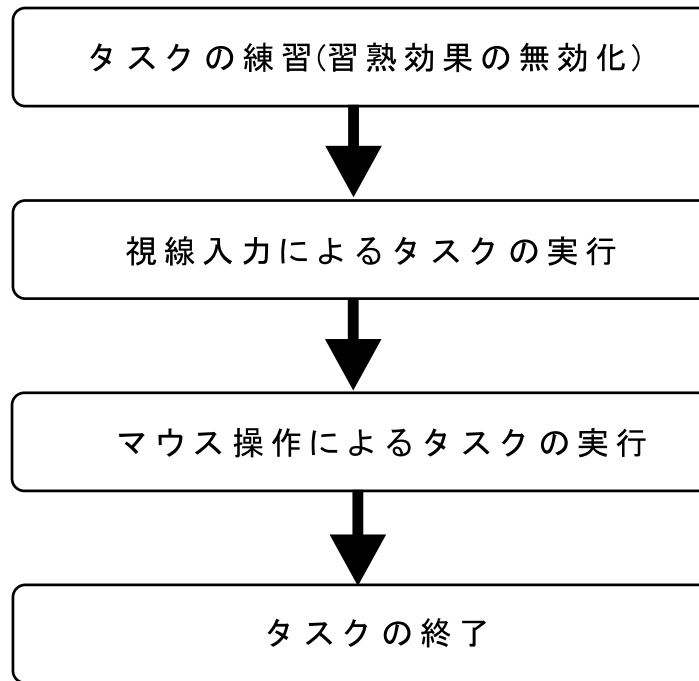


図 5.5: 視線入力の操作性評価実験の手順

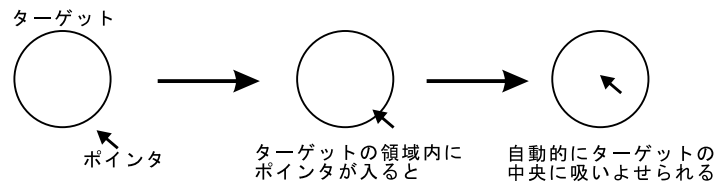


図 5.6: 補助機能 1

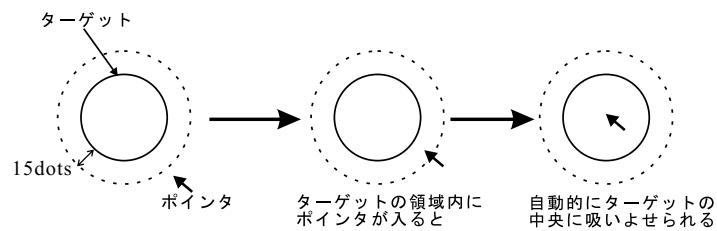


図 5.7: 補助機能 2

い寄せられる機能である。また、上記3の補助機能2は、図5.7に示すように、補助機能1に比べてポインタが吸い寄せられる領域をより大きく確保し、円の外周からさらに15dots以内にポインタが進入すると円の中心にポインタが自動的に瞬時に吸い寄せられる機能である。これら2つの補助機能はともに、視点位置検出の誤差がポインティング操作に与える影響を低減させることを目的に導入した機能で、本実験ではこれらの補助機能の効果も評価の対象とする。

上記4では、被験者はES-HMD に提示される映像を見ながらマウス操作を行う。また上記5では提示画面として15インチのCRTモニタを用いる。このとき、モニタから約60センチ離れた位置に着座してもらう。また、上記1~3では、クリック入力装置としてマウスの左ボタンを利用する。

なお、上記1~3では、ターゲットの円の大きさを変更するごとに、タスク実行直前にキャリブレーションを行う。

また、被験者は視機能に異常のない男子大学院生3名(被験者S20、S21、S22)である。

実験2：フットスイッチの評価実験

本実験では、視線入力におけるクリック入力手段として、フットスイッチの操作性を評価する。なお、ここでは実験1の実験条件のうち3の補助機能2を用いる場合のみを行い、フットスイッチを用いた場合のタスク遂行時間を測定する。被験者は実験1と同じである。

5.3.3 実験の結果と考察

実験1：視線入力とマウス操作の比較

5つの実験条件について、1回あたりのタスク所要時間を被験者全員にわたって平均した結果を図5.8に、その標準偏差を図5.9に示す。図の上の軸は1m先の円の大きさをmmで示したものである。この2つの図より以下の点が特徴として挙げられる。

- 視線入力では、ターゲットの円の大きさが大きくなるにつれて1タスクあたりの所要時間は短くなる傾向が強いが、マウス操作では、円の大きさが直径60dots以上では所要時間にほとんど変化がみられなかった。
- 通常の視線入力と補助機能1を導入した視線入力では、ターゲットの円が大きくなると、タスク所要時間が急激に減少し、マウス操作との差が少なくなった。

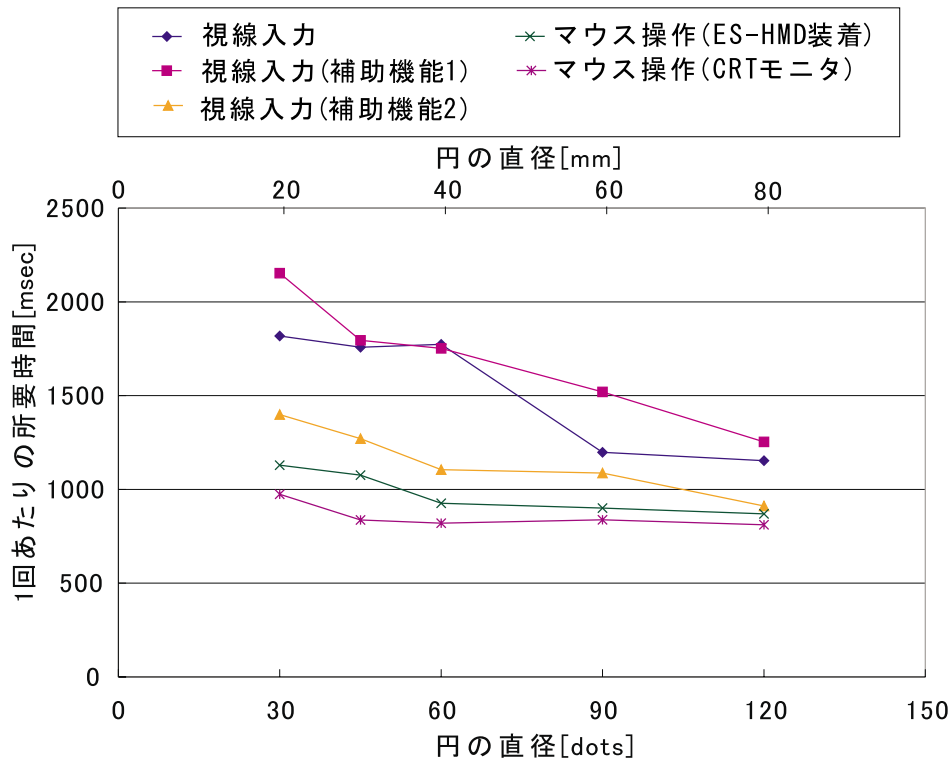


図 5.8: 実験 1 のタスク所要時間の結果

- 補助機能 2 を導入した視線入力は、視線入力のなかで最もパフォーマンスがよかった。
- 補助機能 2 を導入した視線入力は、マウス操作とほぼ同様の傾向がみられ、また円の直径が 60dots 以上ではほぼ同等のパフォーマンスが得られた。
- 標準偏差に着目すると、マウス操作では所要時間にばらつきはあまり見られなかったが、視線入力マウスでは所要時間に大きなばらつきがあった。

また主観報告によると、円の大きさが 60dots 以上では視線入力でも無理なくタスクが遂行できたという被験者がいた。一方、45dots 以下では円が小さいため、補助機能のない視線入力ではターゲットにポインタを移動させることに困難を感じたが、補助機能があれば大幅に改善するという報告が多かった。これらの主観報告は、上記の特徴とよく一致している。

以上の結果から、ポインティング操作のターゲットが大きい場合には、視線入力でもマウス操作と同等のパフォーマンスを示すことが確認できた。一方、ターゲットが小さい場合には、視線入力はマウス操作に比べてタスクの遂行に時間がかかり、また

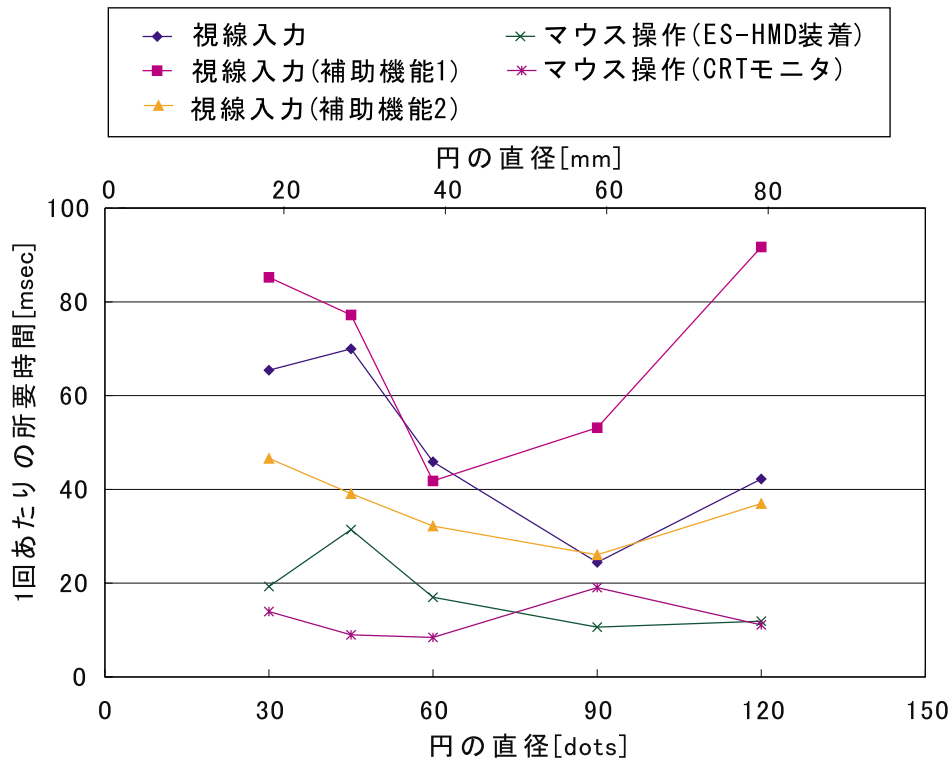


図 5.9: 実験 1 のタスク所要時間の標準偏差

所要時間のばらつきも大きい。しかし、本実験で採用した補助機能を併用すればターゲットが小さくてもマウス操作とほぼ同等のパフォーマンスが得られることもわかり、利用者が視線入力に習熟すれば、ES-HMD による視線入力は十分に実用になるインタフェース操作手段であると考えられる。

実験 2：フットスイッチの評価実験

視線入力におけるクリック入力装置としてフットスイッチとマウスボタンを利用した場合のタスク所要時間の比較を図 5.10 に示す。なお図中のマウスボタンのデータは、図 5.8 と同じである。

図 5.10 から、フットスイッチの方が全ての大きさのターゲットでタスク所要時間が長いことがわかるが、その差は最大でも 0.5sec 程度である。被験者の主観報告では、フットスイッチではボタンを押す（踏む）動作により体全体が動いてしまい、その振動で視線によるポインティング位置がずれてしまうケースが一部あったとの報告が得られている。これが、フットスイッチのタスク所要時間が長くなった原因の 1 つと考えられる。これは、実験前のタスク練習が不十分であったため、フットスイッチの操作を

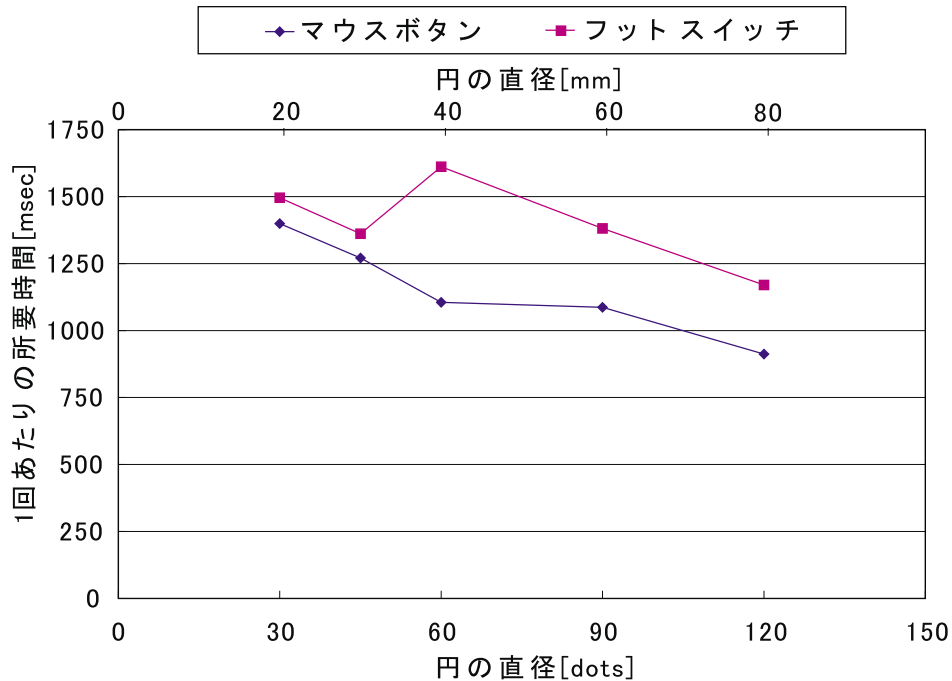


図 5.10: フットスイッチとマウスボタンのタスク所要時間の比較

完全に習熟できなかったことに原因があると思われるが、他方、フットスイッチの操作に習熟すれば更なるパフォーマンスの向上が期待でき、十分に実用的な入力手段であると考えられる。

5.4 視線入力システムの WWW ブラウザへの応用

本節では、前述の視線入力システムの応用事例として開発した WWW ブラウザについて述べる。WWW ブラウザは、インターネットに接続された PC を用いてホームページを閲覧するためのソフトウェアであり、これを視線で操作することができれば、障害者や高齢者が無数にある Web サイトの情報を自由に閲覧することが可能となる。また、前節の結果より、視線入力は操作対象がある程度大きければマウスと同等のパフォーマンスを得ることができ、さらに見たところを直接操作できるインタフェースとして、健常者にも使いやすい環境を提供できるものと考えられる。

ES-HMD による視線入力を用いた WWW ブラウザを開発するにあたり、以下の点を考慮した。

- 5.3 節および 4.3 節の結果を考慮して操作対象の大きさや操作方法を決定する



左眼用の提示画面



右眼用の提示画面

図 5.11: ブラウザ画面

- ES-HMD が持つ立体像を提示できる特徴を生かす

この2点を考慮して作成したWWWブラウザの画面例を図5.11に示す。図の左側のウィンドウは左眼に提示される画像であり、右側のウィンドウは右眼に提示される画像である。このWWWブラウザでは、ウィンドウの背景に左右の画面で同じ模様を配しており、さらに、画面上部に表示される操作ボタンに左右で視差を与えている。これにより、左右の眼をウィンドウ背景に融像させることで操作ボタンが浮き上がって見えるように工夫されている。また、操作ボタンの大きさも視線入力の変差やパフォーマンスを考慮して80dots × 60dotsにして、さらに誤操作を避けるために各操作ボタンは30dotsの間隔をおいて配置している。

WWWブラウザに表示されるホームページには、関連する別のページに移動するためのハイパーリンクが配置されている。開発したWWWブラウザは、操作ボタンを浮き上がらせて表示しているが、このハイパーリンクを示す部分も浮き上がらせて表示し、さらに視線がハイパーリンクに近づくとカーソルがハイパーリンク部分に移動するようにすれば、別のページにリンクしている部分が一目瞭然でわかり、マウスが使えない人が視線により操作できるだけでなく、WWWブラウザを使い慣れた人にとっても使いやすいユニバーサルなインタフェースを提供することができる。この方法はWWWブラウザだけでなく、他のアプリケーションソフトウェアへの応用も可能である。

5.5 まとめと今後の展望

本研究では、新たに提案した視点位置検出手法を用いて、ES-HMD を装着したユーザの提示画面上の視点位置をリアルタイムで検出し、その位置にマウスのポインタを移動させ、ユーザが視線でポインティング操作を行うことができるシステムを開発した。またその際、視線によりポインティング操作を行う機能を持つソフトウェア EGOS を他の計算機にも移植できるように独立させた構成で開発したことによって、ES-HMD を接続したパソコンに EGOS を導入するだけで簡単に視線入力が行えるシステム構成を実現した。さらに、視線入力のクリック入力操作には外部の機械的な入力装置を用いることにし、様々な身体の不自由箇所に対応できるように、ハンドスイッチ・フットスイッチ等の様々なタイプの入力装置を簡単に接続でき、またその取り替えも容易にできるようなシステムの構成を実現した。

また、この視線入力システムを用いた視線入力の操作性を評価する被験者実験を行い、ポインティング対象の近傍で視点位置の検出誤差を吸収する補助機能を利用すれば、ES-HMD による視線入力は十分に実用に耐えうるインタフェース操作手段であることを確認した。

さらに、本研究では視線入力システムの応用事例として、3次元立体視映像を提示できる ES-HMD の特性を利用し、ユニバーサルなインタフェースの一例として WWW ブラウザを試作した。

本研究の今後の課題について考察すると、今回、視線入力のクリック入力操作を機械的な入力装置に限定したが、筋委縮性側索硬化症 (ALS) 患者などの重度の肢体不自由者を想定した場合、瞬目や閉眼をクリック入力に置き換えることも必要である。これに対しては、本研究で対象としなかったものの、ES-HMD でも瞬目・閉眼の検出はソフトウェアを改良すれば容易に可能である。また、クリック入力手段は呼気流など身体のあらゆる動作可能部位を利用した方法が想定でき、入力手段をユーザが自由に切り替えることが可能な、より柔軟な仕組みを開発する必要もあるだろう。

一方、ES-HMD は視線入力可能なインタフェースデバイスという特徴だけでなく、3次元立体視映像を提示できるなど、まだ未活用の特性がある。人工現実感技術などを利用してインタフェースをデザインすれば、健常者でも高齢者でも、直感的で使いやすいユニバーサルなインタフェースの実現が期待できる。

本研究で開発した視線入力システムを利用すれば、眼を動かすこと自体がポインティング作業となり、また簡単な入力装置を利用することでクリック入力操作を行うこと

もでき、直感的で理解しやすいインタフェースを構成できる。このような視線入力、今後マウス操作やキーボード入力にかわる汎用的な入力手段となることが期待できる。

第 6 章 結論

本研究では、ユニバーサルな視線入力インタフェース実現のための要素技術として、昨年度の ES-HMD に比べて大幅に軽量化した Eye-Sensing HMD (ES-HMD) を開発し、リアルタイム視点位置検出の新たな方法を考案した。そして、考案した方法の検出精度を評価するための被験者実験を行った。また、考案した視点位置検出方法を用いて、視線によるカーソルポインティングと機械的な入力装置により PC のマウスカーソル操作が可能な視線入力インタフェースシステムを開発し、それを用いた評価実験を行った。さらに、この視線入力インタフェースシステムの応用として、WWW ブラウザを開発した。

第 2 章では、研究の背景として、情報化社会と高齢化社会に関する問題点を指摘し、本研究の着眼点であるユニバーサルなインタフェースのあり方について述べた。次いで、本研究に関連する視点位置計測、および視線による操作に関する従来研究を展望した。そして、これらを背景として、本研究の目的が、視線入力を用いたユニバーサルなインタフェースの実現のための要素技術の開発であることを述べた。

第 3 章では、本研究で新たに開発した ES-HMD の仕様について述べ、次いで ES-HMD の映像提示機能と視点位置検出機能を評価した。映像提示機能の評価では、昨年度まで用いていた ES-HMD と比較し、提示される映像の解像度が向上していることがわかった。また、視点位置検出機能では、CCD カメラの解像度の向上や CCD カメラとディスプレイの光学中心が一致していることから、ES-HMD に比べ瞳孔中心位置計算機能、視点位置検出機能において精度が向上していることを確認した。

第 4 章では、昨年度まで用いていた視点位置検出方法の問題点を指摘し、この問題を解決するために、新たな視点位置検出手法を提案した。昨年度の視点位置検出方法は、瞳孔中心の移動量からその眼球の水平方向と垂直方向の回転角を独立に計算し視点位置を検出するので、検出する視点位置に誤差が生じていた。また、ユーザがヘッドユニットを傾けて装着した時のずれを考慮していなかった。本研究では、瞳孔中心の移動量から直接眼球の回転角を求め視点位置を検出し、さらに装着時のヘッドユニットの傾きを推定してずれを補正する手法を提案した。昨年度の方法と本研究で提案した方法を被験者実験により評価し、提案した方法の視点位置検出精度が向上していることを確認した。

第5章では、提案した視点位置検出方法の応用事例として、視点を計算機への入力手段として応用することを試み、視線入力システムの開発を行いマウス入力と比較する評価実験を行った。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。また、評価結果より条件によっては視線入力によるボタン入力はマウス入力と同等のパフォーマンスを示すことがわかった。一方視線入力を行いやすいインタフェースデザインを行うにはGUI上にあるボタンなどのオブジェクトの大きさにも注意が必要であることが判明した。以上の数々の実験を通して本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- 新たに ES-HMD を開発し、その機能評価を行った結果、表示画面の解像度が向上したとともに高精度の視点位置検出が行えることを確認した。
- 考案した視点位置検出方法は昨年度まで採用していた方法と比較して測定精度が向上した。
- 開発した視線入力システムにおいて視点位置検出を利用したカーソル操作は、操作対象がある程度大きく、補助機能を併用すればマウスと同等のパフォーマンスを得ることができる。

以上の結果より、ES-HMD と視線入力ソフトウェアがあれば、PC に接続させるだけで視線を利用した PC の操作が可能である。これにより、情報通信機器の利用に抵抗感を感じるユーザや、マウスやキーボードが自由に使えない肢体不自由者や高齢者でも気軽に PC を操作できるユニバーサルなインタフェースが実現でき、情報化社会の恩恵を受けられることが期待できる。

今後の課題としては、以下のことが考えられる。

- 視線による文字入力方法の検討
- 視線による操作が容易なインタフェースデザインの検討
- 高齢者、肢体不自由者を対象とした選択入力手段の検討
- 閉眼や瞬目を利用した選択入力方法の検討

謝 辞

本研究を進めるにあたり、研究の方針、論文の構成等において、適切かつ厳しい御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。

また研究全般にわたって直接御指導いただき、数々の適切な助言を頂くなど、論文執筆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。

本研究を進めるに当たってプログラミングなど様々な面でお世話になった石井裕剛助手に深く感謝します。

本研究を行うに当たって、至らないところの多い後輩に研究を進めるに当たって数々の助言や御指導を頂き、細部までお世話になった大学院博士課程の小澤尚久氏に深く感謝いたします。

また本研究を進めるにあたり、助言を多々いただきました松下電工株式会社、福島省吾氏、鈴木健之氏、村上宗司氏に深く感謝いたします。

更には忙しい中、本研究の評価実験に協力して頂いた、吉川研究室、宮沢研究室の学生の皆様に心から感謝します。

最後に、研究を進める上で日頃何かとお世話頂いた谷友美秘書、藤岡美紀秘書、吉川万里子秘書にも心から感謝いたします。

参考文献

- [1] 関根 千佳：「情報のユニバーサルデザイン」, ヒューマンインタフェースシンポジウム 1999 講演会資料集, pp.95-103 (1999).
- [2] 福島 省吾：「Eye-Sensing Head Mounted Display の開発」, 計測自動制御学会論文集, vol.35 , No.6, pp.699-707 (1999).
- [3] 辻井 重男：「暗号と情報社会」, 文藝春秋 (1999).
- [4] 郵政省：「情報通信の利用支援技術の普及推進とインターネットのアクセシビリティ確保」 (1999).
- [5] 古瀬 敏：「ユニバーサルデザインとはなにか」, 都市文化社 (1998).
- [6] J.L.Andreassi：「心理生理学」, ナカニシヤ出版 (1985).
- [7] 山田 光穂：「最近の眼球運動の研究動向」, 電子情報通信学会技術報告, vol.95, No.404, pp.145-152 (1995).
- [8] 青竹 雄介：「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」, 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 (2000).
- [9] 下田 宏他：「頭部装着型インタフェースデバイス (HIDE) の製作と機能評価」, 計測自動制御学会論文集, vol.36 , No.11, pp.972-979 (2000).
- [10] 大野 健彦：「視線を用いた高速メニュー選択」, 情報処理学会論文誌, vol.40 , No.2, pp.602-612 (1999).
- [11] 大和 正武他：「視線によるテキストウィンドウの自動スクロール」, 情報処理学会論文誌, vol.40 , No.2, pp.613-622 (1999).
- [12] 落合 積他：「目の動きを利用した身障者用文字入力装置の試作」, 日本機会学会論文集 (C 編), vol.63 , No.5, pp.140-144 (1997).

- [13] 伊藤 和幸他：「重度肢体不自由者向けの視線入力式コミュニケーション装置」，電子情報通信学会論文集 (D 編), vol.J83D- , No.5, pp.495-503 (2000).
- [14] 米田 賀一：「Eye-Sensing HMD による視線入力インタフェースの構成法の検討」，ヒューマンインタフェースシンポジウム 2000 論文集, pp.239-242 (2000).
- [15] 苧阪 良二他 (編)：「眼球運動の実験心理学」，名古屋大学出版社 (1993).