

平成17年度 修士論文

# 多点眼電位に基づく 眼球位置計測システム

電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報ネットワーク学専攻

ヒューマンインターフェース学講座

0451031 溝尾元洋

指導教員

阪口 豊

出澤 正徳

井上 誠喜

平成18年3月10日提出

## 修士論文の和文要旨

大学院	情報システム学研究科	博士前期課程	ネットワーク学専攻
氏名	溝尾 元洋	学籍番号	0451031
論文題目	多点眼電位に基づく眼球位置計測システム		
要旨	<p>人は外界（環境）に対する情報を収集する上で視覚は特に重要な役割を果たしている。そのため、人間の視線を計測することは視知覚の研究を進める上で、有効な手段であり、現在まで様々な視線計測装置が開発されてきた。</p> <p>本研究では、眼球が帯電をしていることを利用して計測するEOG法に着目をし、被験者の負担が小さくかつ安定性の高い視線計測法の開発を目指した。従来のEOG法では視線方向と電極間の電位差の関係を近似してそのデータから視線方向を求めていた。しかし、EOG法にはドリフト現象があるため出力電圧と視線方向の関係を維持することはできず、正しい推定は困難であると考えられてきた。これに対し本研究では眼球周辺の電位分布を求める眼球モデルのもとで視線方向を計測するシステムの構築を試みた。</p> <p>具体的には、伊月ら(1995)が示唆した眼球の電池モデルを利用して眼球周辺の電位分布を計算し、多点配置した電極の出力電圧から電池モデルを逆問題として視線方向を推定した。</p> <p>第3章で視線方向、電流密度、電極位置を推定するアルゴリズムを提案して、第4章で数値実験を行った。その結果、多点に電極を貼ることで統計的ノイズの除去や、ドリフト現象の影響と考えられる電流密度を推定することができ眼球位置を計測することを示すことができた。</p> <p>第5章の評価実験では、数値実験の条件を実際に装着した電極を使い、数値実験の条件を電極の観測したデータを用いて眼位の推定を試みた。まだ十分な評価結果は得られていないが、眼球周辺の電位分布については確認できた。</p> <p>本研究では、提案した手法を適用して被験者の負担が少なくより自然な状態で視線方向を計測できる可能性を示すことができた。今回の手法をもとに、他眼による及ぼす電位の影響（クロストーク）の効果を組み込んだモデルを用いればより精度の高いシステムの構築が期待できる。</p>		

# 目次

<b>第1章</b>	<b>序論</b>	<b>1</b>
1-1	研究の背景.....	2
1-1-1	眼の構造.....	3
1-1-2	視線計測の特徴.....	4
1-1-2-1	視線計測とは.....	4
1-1-2-2	眼球運動の種類.....	4
1-2	眼球運動の測定法.....	7
1-2-1	角膜反射法.....	7
1-2-2	強膜反射法.....	8
1-2-3	サーチコイル法.....	8
1-2-4	EOG法(Electro-OculoGraphy).....	8
1-2-5	その他.....	9
1-2-6	各眼球運動測定法の比較.....	10
<b>第2章</b>	<b>EOG法による眼球運動計測実験</b>	<b>12</b>
2-1	実験方法.....	12
2-2	実験結果.....	16
2-3	考察.....	17

## 第3章 多点眼電位に基づく眼球位置計測システム 18

3-1	EOG法の問題点.....	18
3-2	眼球の電池モデル.....	19
3-2-1	眼球位置と電位の関係.....	20
3-3	多点電極を用いたEOG法の改良.....	21
3-4	推定方法.....	22
3-4-1	推定方法の原理.....	22
3-4-2	推定する量の分類.....	22
3-4-3	推定の手続き.....	23
3-5	アルゴリズム.....	24
3-5-1	視線方向推定アルゴリズム.....	24
3-5-2	電流密度, 電極位置推定アルゴリズム.....	24
3-4-3	視線方向, 電流密度推定アルゴリズム.....	25

## 第4章 数値実験 27

4-1	数値実験の条件.....	27
4-2	視線方向推定.....	27
4-2-1	結果.....	28
4-2-3	まとめと結論.....	39
4-3	電流密度, 電極位置推定.....	40
4-3-1	結果.....	40

4-3-2	まとめと結論.....	49
4-4	視線方向, 電流密度推定.....	50
4-4-1	方法.....	50
4-4-2	結果.....	51
4-4-3	まとめと結論.....	54
<b>第5章</b>	<b>評価実験</b>	<b>55</b>
5-1	実験方法.....	56
5-2	まとめ.....	59
<b>第6章</b>	<b>結論</b>	<b>60</b>
	<b>謝辞</b>	<b>61</b>
	<b>参考文献</b>	<b>62</b>
	<b>付録</b>	<b>63</b>
1	電極位置の設置条件.....	63
1-1	視線方向推定データ.....	68
1-2	電流密度, 電極位置推定データ.....	77

# 第1章 序論

人は外界（環境）に対する意識を成立させるために、まず何らかの外界の情報を獲得しなくてはならない。そのために人が備えている感覚諸機関は様々であり、とりわけ視覚系を通して得られる情報量は他の諸機関すべての処理量を併せたものの全てに勝っている。

とりわけ分解能が著しく高い中心窩に視認すべき外界を捕捉する時の眼球の動き（眼球運動）を測定することは視知覚の研究を進める場合、有効な手段となることが多い。それは眼球が、1) 認識すべき外界の対象を中心窩に捕らえる為に行う動作系としての能動的な機能を持ち、2) 外界を視認する感覚受容器としての機能として、識別機能を同時に持つという二種類の異なった機能を一つの小さな器官に備えているところにある。このうちの効果器としての機能である眼球運動は、人の環境に対する情報収集活動の1つの方略を知る目的で計測され様々な検討が加えられてきた。時代の最先端の工学的、電氣的、電子的手段をもってたゆみない新手段の案出がなされ、そして数々の改良の後にまた新しい測定方法に取って代われ多くの測定方法が消滅していった[1]。

しかし、眼球の動きを高精度で測定する実験装置の多くは、被験者の負担が大きい、精度が低いなどの問題点がある。そこで本研究では、従来からある視線計測法の一つであるE O G (Electro-OculoGraphy)法を改良することにより、被験者の負担が小さく、かつ精度の高い視線計測法の開発を目指す。

## 1 - 1 研究の背景

眼球の動きを測定するために現在までさまざまな方法が試みられてきた。その歴史は長く、19世紀末にはすでに文章を読む作業における視線測定が試みられている[2]。

近年はコンピュータの処理速度および画像処理技術の向上に伴う、視線計測装置の信頼性向上が進み、以前ほど扱いにくい道具ではなくなってきた。また、視線データを自動的に分析する手法に関する研究も行われている[3]。研究対象も、文章の読解、絵や風景の認識などの伝統的な研究課題にとどまらず、見ている対象が次々に変化していくリアルタイムゲーム、自動車の運転中や歩行中の視線など、これまで測定が難しいとされてきた分野にも拡大してきている。

ここでは、眼球運動を測定する時に重要な眼球に関する基礎知識、次に視線の特徴について触れ、最後にこれまで行われてきた視線計測法を紹介する。

## 1-1-1 眼の構造

眼球の構造を図 1.1 示す。人間の眼球は個人差や民族による差異があるが、平均的な眼球は直径約 24mm のほぼ球型で、角膜の半径は 7~8mm ほどである。

ひとつの眼球には眼球を動かすための 6 本の強靭な筋肉が備わっており、これを外眼筋(extraocular muscle)と呼ぶ。外眼筋は、外直筋、内直筋、上直筋、および上斜筋の 6 本の異なった種類がある。それら 6 本の外眼筋は相互に連携しながら、上下を貫く  $z$ -軸と両耳を貫く、 $y$ -軸を中心に眼球を回転させることで、網膜上に 2 次元平面座標に変換された視野内の特定の位置を決定することができる[2]。

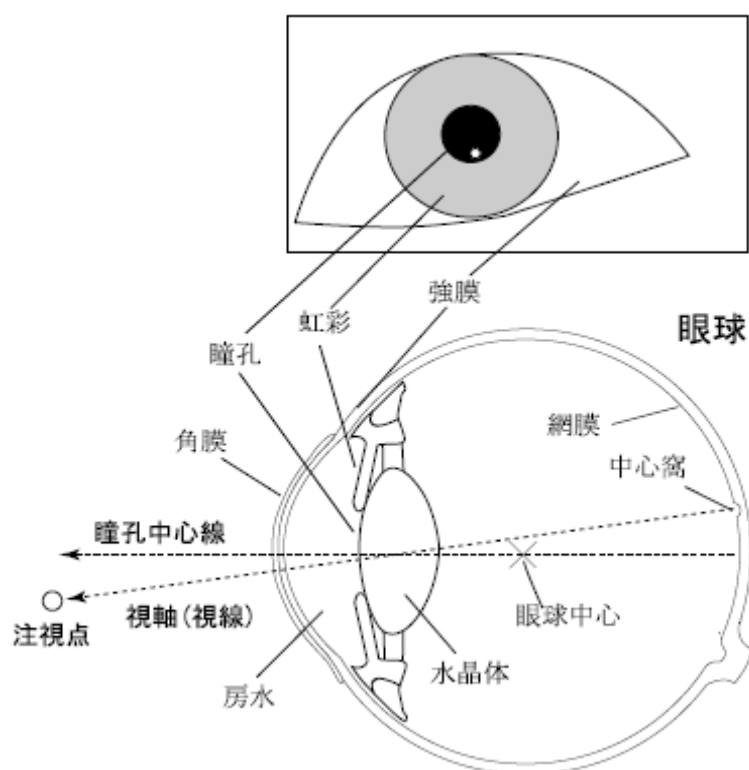


図 1.1 眼球の構造[2]



## 1-1-2 視線計測の特徴

視線計測において、1) 視線計測装置は何を測定しているのか、2) 得られたデータは人の眼球運動にどのように対応しているのか、が重要である。そこで、まずこの2点を整理する。

### 1-1-2-1 視線計測とは

人はものを見ているとき、外界からの入射光は角膜の表面、裏面および水晶体の表面、裏面で屈折し、網膜に到達する。中心窩は視角 5deg 程度であり、その中でもっとも解像度の高い領域は視角 1.2deg 程度である[3]。

現在、多く用いられる手法は、瞳孔中心線に相当する軸をまず算出し、次に個人キャリブレーションと呼ぶ個人別の補正作業によって軸の補正をおこない、視線とするものである。計測段階で算出した軸が何であることを厳密に定義せず、個人キャリブレーションによって視線を推定するシステムも見られる。キャリブレーションが必要なシステムは、頭部位置のわずかな変化等で対応関係の整合性が狂い、視線誤差が生じやすい[2]。

### 1-1-2-2 眼球運動の種類

一般に、眼球運動は2つの主要なタイプに分類される[5]。

第1のタイプは補償性眼球運動で、頭や身体の動きにかかわらず、外界の像を網膜上で安定させるために発達した非随意的な眼球運動である。

第2のタイプは随意性眼球運動で、視対象の像を網膜上中心窩に来るようにするために発達した眼球運動であり、随意的なコントロールが可能である。このタイプの眼球運動には、サッケード、追跡眼球運動および、輻輳・開散眼球運動が含まれる。

この他に、特殊な眼球運動として、微細眼球運動があるが、この眼球運動の発生機序と機能に関しては不明な点が多い。

ここで、視線測定で得られた視線がどのような眼球運動に基づくものであるかを整理する[2]。

### 1. 衝動性眼球運動(saccadic eye movement, saccade)

ものを見ようとして注視点を変えるときに発生する眼球運動。サッカードとも呼ばれる。サッカード中には、ほとんど外界を知覚することができないという現象（サッカード抑制）が知られている。人が知覚する情報は、大半がサッカードとサッカードの間に得られたものである。

### 2. 滑動性眼球運動(smooth pursuit eye movement)

ゆっくりと移動する物体を追尾するとき発生する滑らかな眼球運動。対象の移動速度が 45deg/s 程度までの場合しか追尾できず、それ以上速い場合にはサッカードが発生する。また、追尾対象の物体がない場合に、意識的に滑動性眼球運動をおこなうことはできない。

### 3. 代償性眼球運動(compensatory eye movement)

頭部を回転したときに逆方向へ発生する眼球運動。頭部回転によって内耳半

期管に加わった刺激に対して発生する前庭動眼反射である。なお、この運動は自分が頭を動かしたときにのみ発生する。自分で頭を振ったときには風景が静止して見えるが、他人に頭を揺すられると風景が揺れて見えることで体験できる。

#### 4. 輻輳性眼球運動(convergence eye movement)

量目で物体を注視するとき、物体が前後に動くが発生する眼球運動。物体が近づくと両眼は内側に回転し、遠ざかると外側に回転する。両眼の視線を同時に測定することで、輻輳性眼球運動の測定が可能である。

#### 5. 固視微動(micro saccade)

一点を注視中に発生する細かい眼球運動。固視微動は網膜上の視神経細胞を活性化する役割を果たしており、麻酔等で固視微動を抑止すると、視神経細胞が麻酔して眼が見えなくなることが知られている。

これらを厳密に分離して測定することはかなり難しい。しかしながら測定方法の違いによって、得られた視線に含まれる眼球運動の種類が異なることには留意する必要がある。例えば、視線計測時に頭部を固定する方式の場合、代償性眼球運動は抑制されることになり、一方頭部には何も装着せず、外部に設置したカメラから測定する方式の場合では、視線は眼球運動および頭部運動によって変化する。

## 1 - 2 眼球運動の測定法

眼球運動を測定する試みは19世紀後半から始まり、1世紀以上を経てその技術は大きく進化した。当初の眼球運動の測定法とはコンタクトレンズに装着したペンで紙に直接動きを記録するものであり、被験者への負担は極めて大きかった。また、測定した結果をリアルタイムで利用するという事はまったく不可能であった。現在では、コンピュータの前に座ればすぐに眼球運動を測定することが可能になりつつある[1]。

現在、利用されている方法にいくつかあるが、それぞれに一長一短がある。ここで、各測定法を整理しておく。

### 1 - 2 - 1 角膜反射法

角膜反射法とは、角膜上に映った光源の虚像が、眼球運動に伴って平行移動するのをビデオカメラで検出する方法である。角膜上の虚像をビデオカメラで確認でき、センサの装着が容易である。時間的・空間的解像度はビデオカメラの解像度とフレーム周波数に依存して決まる。

また、角膜表面の反射光と、角膜内部の反射光を組み合わせる位置を検出する、Double Purkinje Image(DPI)法という方式も存在する。

## 1-2-2 強膜反射法

黒目（角膜）と白目（強膜）では光に対する反射率が異なる。強膜反射法は、黒目と白目の境部分に光をあて反射率の違いにより目の動きを検出する方法である。簡単で比較的安価に検出できる。外部光の影響に弱いため、精度を得るには外部光が入らない状況で使用する必要がある。

## 1-2-3 サーチコイル法

サーチコイル法とは、磁界におかれたコイルに磁界と成す角度に比例した電位が発生することを利用して、眼位を測定する方法である。コイルが眼球にうまく装着されていれば、精度・測定域・安定性などに優れ回旋が測定できるなど眼球運動の最も優れた計測法である。しかし、特殊なコンタクトレンズを用いるため、角膜に傷をつける可能性があり、そのため、装着時間を守らなければいけない。

## 1-2-4 EOG法(Electro-OculoGraphy)

ヒトの眼球は、角膜部が正に、網膜部が負に帯電しているため、眼を動かすと目の周辺の皮膚の電位が変化する。この電位差を測定して電位を推定するのが EOG 法である。この方法には、目の周辺に電極を貼付するだけでよいため、被験者の視野をさえぎらず、目を閉じてでも検出できるという利点を有する。しかし、電磁ノイズに弱い、ドリフト現象（眼球の向きに依らずに出力が変化する

る) が起きるといった理由から、信頼性のある眼位測定法としては利用されていない。

## 1 - 2 - 5 その他

研究段階ではあるが、視線計測の労力を軽減するための研究も進められている。視線測定において手間がかかるのが、個人キャリブレーションと呼ばれる調整作業であり、画面上に表示された5から20点程度の点を順次注視する必要がある。そこで、キャリブレーションなしで視線測定を行うために、2組以上の光源とカメラのセットから視線を決定する理論的手法、誤差の発生要因を眼球形状モデルで補正することにより、2点のキャリブレーションのみで測定可能なシステム **FreeGaze** はキャリブレーション結果を保存することで、一度キャリブレーションを終えた人は次回からキャリブレーションを行うことなく利用可能であるという特徴を持つ[2]。

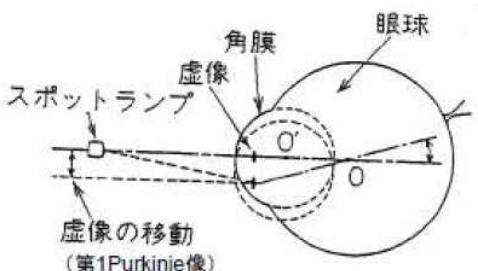
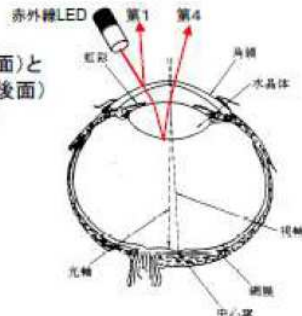
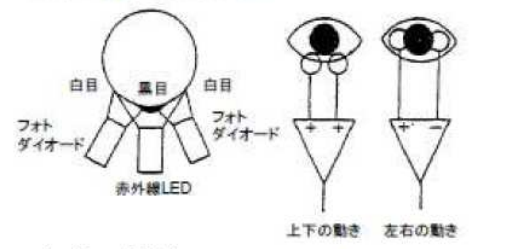
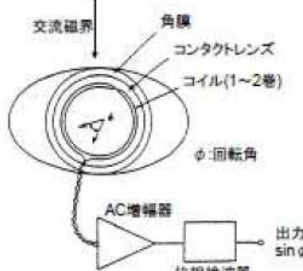
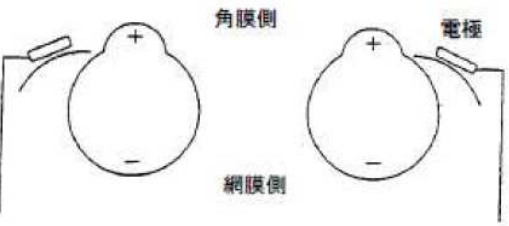

<p>角膜の曲率中心と眼球の回転中心が異なることを利用</p>  <p>&lt;角膜反射法&gt;</p>	<p>第1Purkinje像(角膜前面)と第4Purkinje像(水晶体後面)の移動量の変化を利用</p>  <p>高精度、測定が難しい</p> <p>&lt;Double Purkinje 法&gt;</p>
<p>角膜(黒目)と強膜(白目)の反射率の違いを利用 (リンバストラッキング法)</p>  <p>&lt;強膜反射法-Limbus Tracking&gt;</p>	<p>コイルを埋め込んだコンタクトレンズの位置を計測</p>  <p>高精度、ソフトレンズも</p> <p>&lt;サーチコイル法&gt;</p>
<p>Electro-oculographyを利用 (角膜部が10~30<math>\mu</math>Vの正の電位を有する)</p>  <p>&lt;EOG 法&gt;</p>	 <p>&lt;視線測定システム FreeGaze&gt;</p>

図 1.2 様々な視線計測法[2][6]

## 1-2-6 各眼球運動測定法の比較

各眼球運動測定法について表 1.2.6 にまとめた。

現在までの眼球運動測定法は一長一短があり、それぞれの目的に合わせてど

の方式を採用するかを決めなければならない。

精度・・・水平，垂直眼球運動測定の精度

測定範囲・・・どれくらいの範囲で測定できるか

応答速度・・・周波数帯域

較正の容易さ・・・被験者の眼球回転角と計測により得られた値との

較正の容易さ

安定度・・・時間経過による較正のずれ

頭部の固定・・・頭部固定の必要性及び空間座標系と眼位の関係

被験者への負担・・・実験を行うときの被験者への負担

検出方法	精度	測定範囲	応答速度	較正の容易さ	安定度	頭部の固定	被験者への負担
角膜反射法	○	○	○	△	○	△	○
Double Purkinje	◎	△	◎	△	○	△	○
強膜反射法	○	○	◎	△	○	○	○
サーチコイル法	◎	◎	◎	◎	○	◎	×
EOG 法	×	◎	×	△	△	○	△

◎ 非常に良い ○ 良い (一部問題) △ 可 (問題もある) × 大きな問題あり

表 1.2.6 各眼球運動測定法の比較[6]



## 第2章 EOG法による眼球運動計測実験

現在までの計測法では、サーチコイル法は高精度に眼球運動を測定するには好ましいが、被験者への負担があまりにも大きい。角膜反射法、Double Purkinje、強膜反射法は簡易だが、周辺光の影響を受けてしまうため場所が限定されるほか、閉眼時に視線を計測することができない。そこで本研究では EOG 法に着目をする。EOG 法は電極を顔に貼り付けるだけで測定が可能であるため、被験者の負担も少なく、計測機器によって視野がさえぎられることもない。そのため、より自然な状態で計測することができる。更に、眼球の電気的性質の活用しているため、閉眼時である睡眠中でも計測することが可能である。本章では、実際に EOG 法で眼球運動を計測し、問題点を検証した。

### 2-1 実験方法

#### (1) 環境と装置

以下に実験で利用した装置を挙げる。

- ・ニスタグモグラフ用アンプ AN-601G (日本光電) (図 2.3)
- ・ニスタグモグラフ用誘導パネル PN-640G (日本光電) (図 2.3)
- ・ニスタグモグラフ用入力箱 JN-640G (日本光電)
- ・小型生体電極 (日本光電) (図 2.3)

これらの器具を使用して図 2.1 に示した設定で実験を行った。

## (2) 電極の装着

実験では、利き目が右目の被験者の右眼の両端に電極を貼り付けた。右の耳たぶに貼り付けた電極はアースである(図 2.2)。被験者の左眼は眼帯を装着し、上記の条件で左眼の両端に貼り付けた①と②の電位の差分を計算した。頭を固定するためにあご台を使用した。

## (3) 手続き

実験は利き目が右眼の筆者の左眼に眼帯を装着して、右眼で以下に示す手順で実験を行った。

「指標の中心を3秒間見てその後、水平方向に角度  $x^\circ$  の指標を3秒間見る」というパターンを40秒間続け、眼電位を計測した。なお、視線方向の移動は水平方向のみで、垂直方向は  $0^\circ$  のままである。

この実験を  $x = \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, \pm 25^\circ, \pm 30^\circ$  と設定して行い、40秒間を1ブロックとして、それぞれの条件で3ブロック行った。

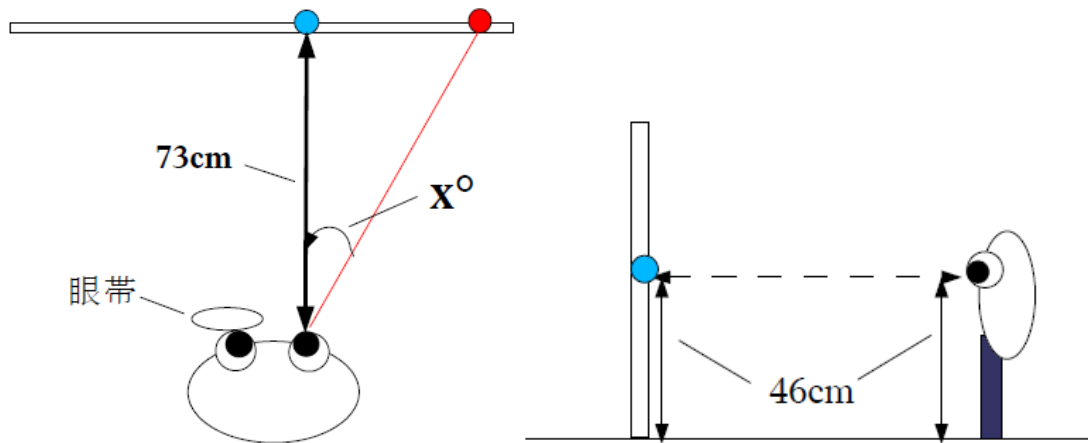


図 2.1 設定条件 (左：真上から見た図，右：真横から見た図)

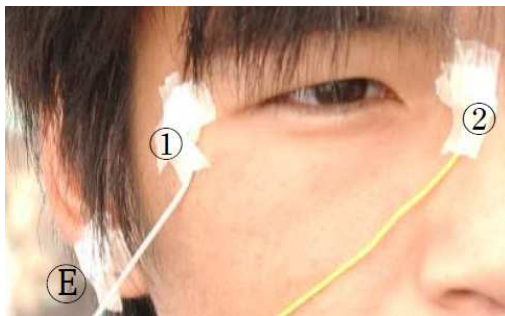


図 2.2 電極の位置

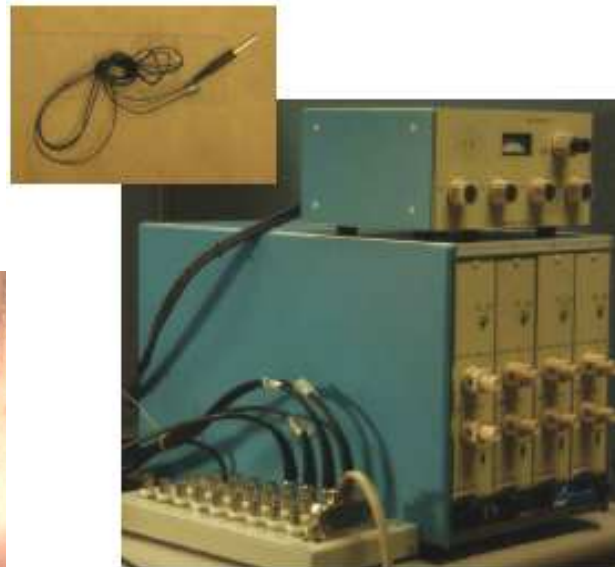


図 2.3 実験器具

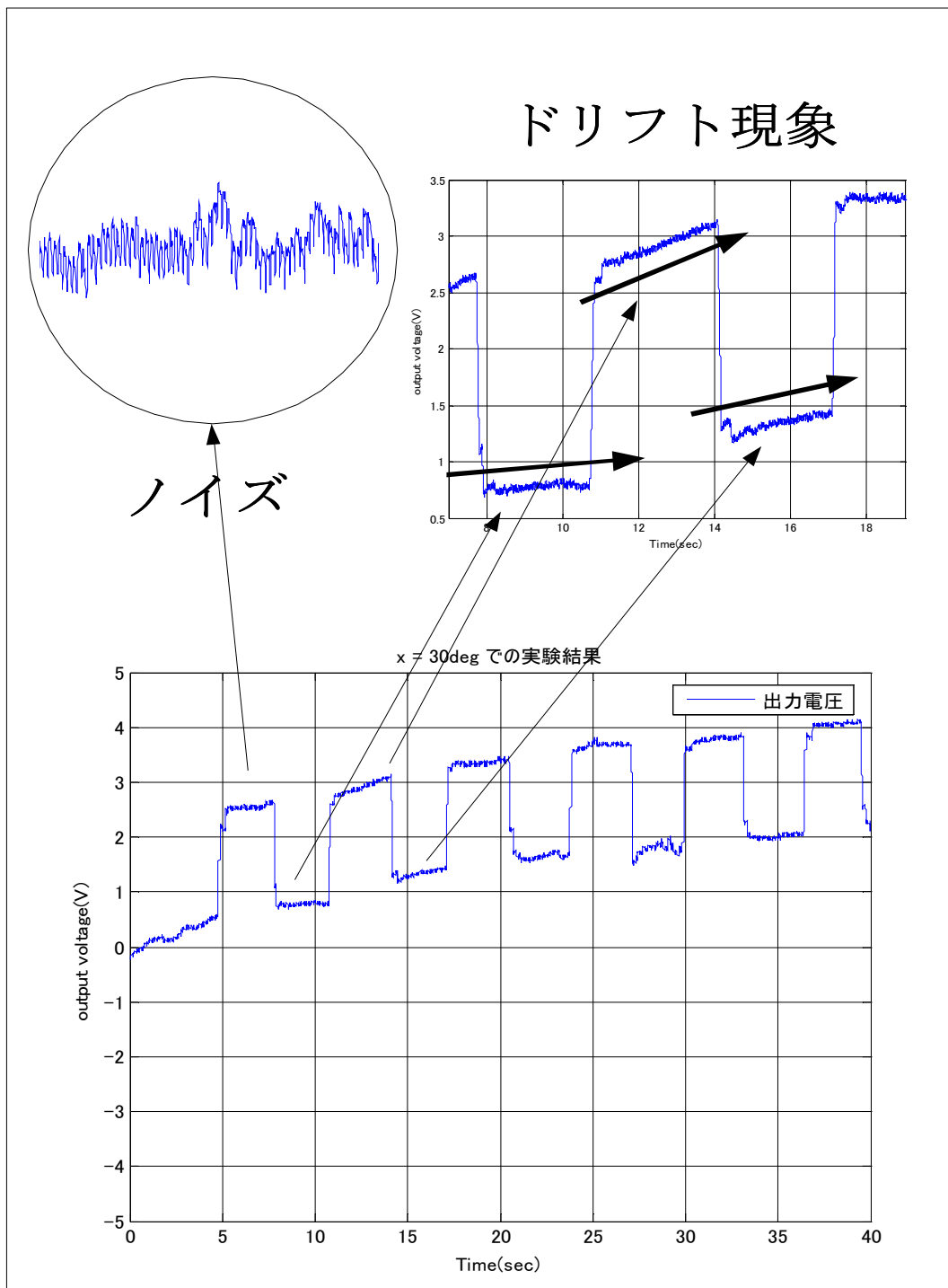


図 2.4  $x = 30^\circ$  の場合の実験結果

## 2-2 実験結果

図 2.4 は  $x=30$  における実験結果の一つである。このグラフを見るとわかるように指標の中心を見るときと、角度  $x^\circ$  の指標を見るときの場合で電位が異なることがわかる。更に、指標の中心を見ているときと、角度  $x^\circ$  を見ているときの直前・直後の電位差の平均値をブロックごとに取り角度ごとに平均値・標準偏差・回帰直線を求めた (図 2.4)。その結果が図 2.5 である。

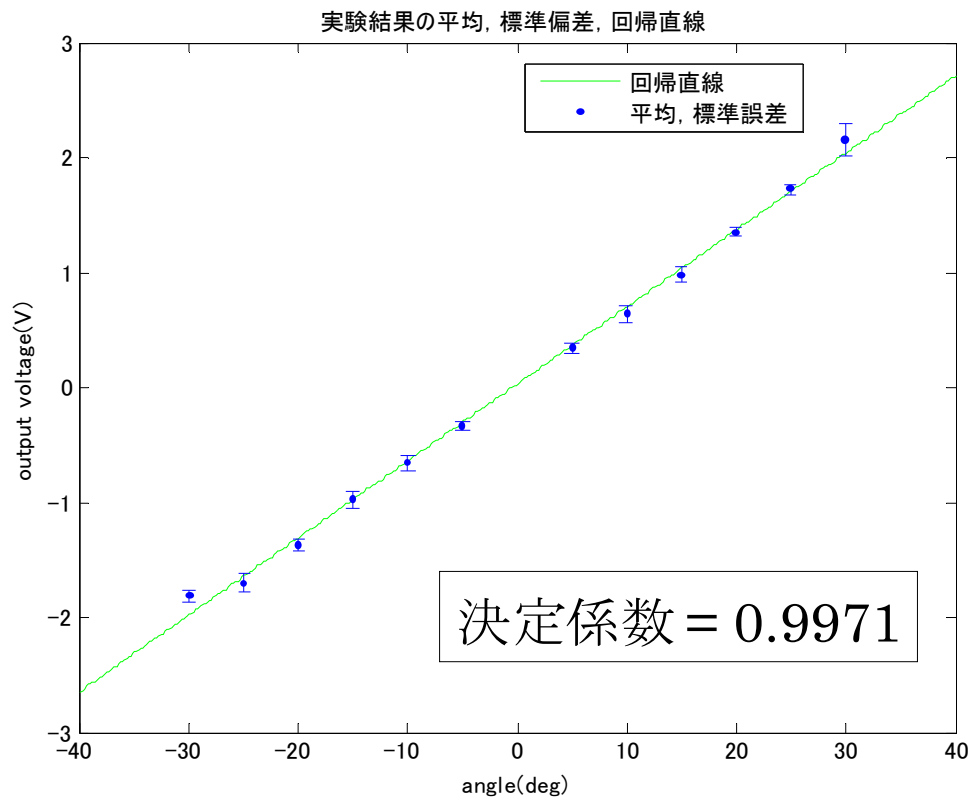


図 2.5  $x = \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ, \pm 25^\circ, \pm 30^\circ$  における  
平均, 標準偏差, 回帰直線

## 2-3 考察

今回行った実験は十分にシールドのされていない実験室で測定をしたため外部ノイズが混入した。そして、同じ指標を見ている時には、ドリフトが起こり電位に変化が生じる問題が出た。

視線が動く直前・直後を記録した図からは、決定係数がほぼ1に近かった。回転角と出力された電圧の関係はほぼ比例していると考えられ、ドリフトとノイズの影響を低減することができれば実用性の高い視線計測法になることが期待できる。

## 第3章 多点眼電位に基づく

### 眼球位置計測システム

#### 3-1 EOG法の問題点

従来の EOG 法では, 前節の図 2.5 のように視線方向と電極間の電位差の関係を近似してそのデータから視線方向を求めている. そのため, 得られたデータの状況なら出力電圧から正確に視線方向を求めることができるが, EOG 法にはドリフト現象があるため出力電圧と視線方向の関係を維持することはできず, 精度が悪くなる. そこで本研究ではなく多点からのデータを伊月ら(1995) [8]が示唆した眼球の電池モデルで視線方向を推定することでドリフト減少の影響をキャンセルすることを考える方法で克服することを試みた.

#### 3-2 電池モデルによる眼位推定

伊月ら(1995) [8]は眼球を電池とみなすと考えて, 眼周辺の皮膚電位を計算できることを示唆した. そのモデルでは, 人の眼球に電流が流れていることが示されている. 現在までドリフト現象について原因を数値的に示されていなかったが, 比例定数として眼球内部に流れている電流がモデル全体にかかっているため, 電流の影響で出力電圧が変化していることが考えられる. 逆に電流を推定することができればドリフト現象の問題が解消される. そこで, 多点配置した電極間の電位差から逆問題として視線方向を推定する.

### 3-2 眼球の電池モデル

人の眼球は角膜が陽極で網膜が陰極の電池と考えることができる。この電池モデルを適用して、眼球を回転させたときに生じる常在電位の変化を理論式で計算できることを伊月ら(1995)[8]が示唆している。

人の眼球を図 3.1 に示すような球形モデルとして、眼球回転中心をO、角膜中心点をA、網膜中心点をB、電極の位置をNとし、NからAまでの距離を $r$ 、NからBまでの距離を $r'$ とする。図に示すように眼球内部では電流 $I$ が網膜から角膜のほうへ流れ、角膜に達した電流は角膜から放射状に流れだし、網膜に達して眼球内に流れ込むとする。さらに眼球周辺の導電率を $\sigma$ とすると、点Nの電位 $V_N$ は

$$V_N = \frac{I}{4\pi\sigma} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) \text{----- ①,}$$

で表すことができる[8].

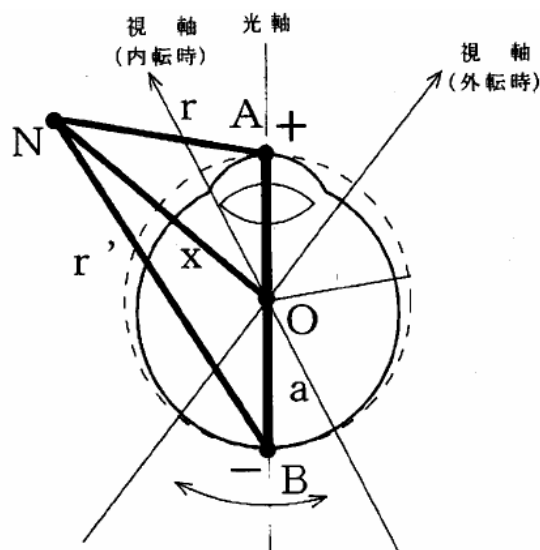


図 3.1 眼球モデル[9]



### 3-2-1 眼球位置と電位の関係

以下の図 3.2 のような設定で行う。図 3.2 のように、半径  $a$  の眼球の回転中心を原点  $O$  とするとき、後頭部より顔面に突き抜ける軸を  $x$ 、顔面に平行で水平な軸を  $y$ 、同様に平行で垂直な軸を  $z$  とする。更に、眼球が  $z$  軸に対して、回転運動している角度を水平方向  $\theta$ 、 $y$  軸に対して回転運動している角度を垂直方向  $\xi$  とし、眼球の網膜から角膜に電流  $I$  が流れているとする。

図 3.2 の設定で電極の位置を  $(x, y, z)$  と  $\theta = \theta'$ 、 $\xi = \xi'$  とすると、(1)式における  $r$ 、 $r'$  は、

$$r = \sqrt{(x - a \cos \theta' \cos \xi')^2 + (y - a \sin \theta' \cos \xi')^2 + (z + a \sin \xi')^2} \text{ ----- } \textcircled{2}$$

$$r' = \sqrt{(x + a \cos \theta' \cos \xi')^2 + (y + a \sin \theta' \cos \xi')^2 + (z - a \sin \xi')^2} \text{ ----- } \textcircled{3}$$

と、表せる。したがって(1)式は、視線方向  $(\theta, \xi)$  を

$$V(\theta, \xi; x, y, z; I) = \frac{I}{4\pi\sigma} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right) \text{ ----- } \textcircled{1}$$

と示すことができる。

更に、電流密度  $I = \frac{I}{4\pi\sigma}$  とおくと、

$$V(\theta, \xi; x, y, z; I) = I \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right)$$

と示すことができる。

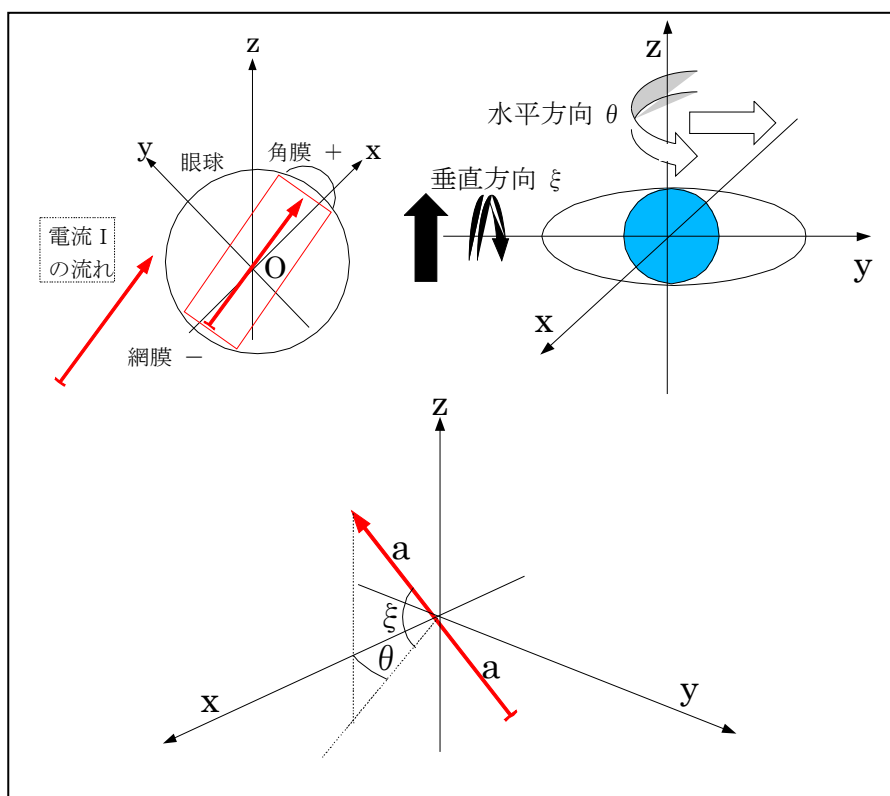


図 3.2 眼位と電位の関係

### 3-3 多点電極を用いた EOG 法の改良

電池モデルからドリフト現象の影響をキャンセルするには電極間の電位差のデータが複数必要になるため電極を多点（3点以上）に貼り付ける必要がある。もし、電位差の記録が一つしかなければ電位が変化したときにドリフト現象によって変化したのか、視線が動いて変化したのかがわからない。そこで多点に電極を貼り複数の記録をとることで、ドリフトを反映したパラメータを推測することを考えた。

## 3-4 推定方法

本システムの目標は眼球位置を計測することである。そのために、電流密度と電極位置を求める必要があるが、電流密度と電極位置は直接求めることができないので推定する必要がある。

ここで、本システムの推定方法を述べる。

### 3-4-1 推定方法の原理

推定の原理は、多点電極の電極間の電位差と眼球の電池モデルの誤差を最小二乗法の原理（二乗誤差が最小になる値を求める）に基づき推定を行う。例えば、N個の出力電圧を $V_a$  ( $a=1,2,\dots,N$ ), 眼球の電池モデルを $V_a'$  とするときに、

$$F = \sum_{a=1}^N \left( V_a - V_a' \right)^2$$

の式を最小にする値を求めることで推定を行う。

### 3-4-2 推定する量の分類

本システムで求めなければならない値は3つあるが、それらの値は分類することが可能である。まず、「電極位置」と「電流密度、視線方向」に分類することができる。電極位置はほとんど変化しない変数、電流密度と視線方向は時間ごとに変化していく変数と分類することができる。これにより電極位置は実測

をするとき、最初に1度推定をすればよい。

さらに細かく分類すると、電流密度と視線方向は個々に分類することができる。電流密度は時間ごとに値が変化するが、短時間であればほとんど変化がないため数秒から数十秒くらいの間であればほぼ一定であると考えることができる。一方視線方向は、ミリ秒単位で変化していく変数である。サッカードと呼ばれる眼球運動の高速な眼球位置変位が起きると最大速度は  $500^{\circ}$  から  $600^{\circ}$  /秒を超えることもある[1]。この電流密度が短時間ではほとんど変化しないことを利用して、数十秒間の出力電圧から電流密度、視線方向を推定する。

### 3-4-3 推定の手続き

3つの値はそれぞれ別の意味を持つ変数である。そのため、それぞれ推定方法を変える必要がある。電極の位置は一度決まるとほとんど変化することがないので1度だけ推定を行えばよい。それにより、測定中の電極位置が決まる。電極位置推定をするときには、電流密度を一定と考え電流密度も同時に推定する。

次に出力電圧から視線方向と電流密度を推定していく。電流密度を把握しながら視線方向を推定していく。

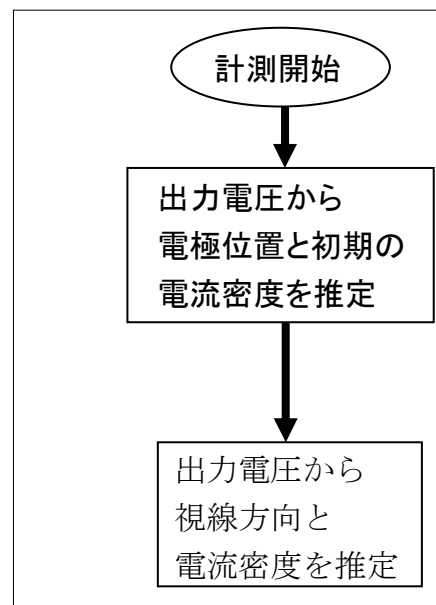


図 3.3 実測の流れ

## 3-5 アルゴリズム

本システムは図 3.3 のように電極位置，電流密度推定を行い，視線方向，電流密度推定を行うことで視線方向を計測する．そのための電極位置，電流密度推定と視線方向，電流密度推定のアルゴリズムを説明する．加えてまず準備段階として，電極位置と電流密度がわかっている条件での視線方向推定アルゴリズムについて説明する．

### 3-5-1. 視線方向推定アルゴリズム

被験者に貼る電極の位置，電流密度，被験者の眼球の半径がわかっている状況を想定して多点電極の電位から視線方向 $(\theta, \xi)$ を推定する．

電極の電極間の $N$ 個の電位差のデータ  $V_a(a=1,2,\dots,N)$ と眼球の電池モデル  $V_a'$  の二乗誤差が最小になる値を求める．以下の式  $F(\theta, \xi; I; x, y, z)$ を最小にする $(\theta, \xi)$ が推定する視線方向である．

$$F(\theta, \xi; I; x, y, z) = \sum_{a=1}^N \left( V_a - V_a'(\theta, \xi; I; x, y, z) \right)^2$$

### 3-5-2 電流密度，電極位置推定アルゴリズム

実測のはじめに電流密度，電極位置推定を行う．電流密度が短い間ほとんど変化しないことを利用する．測定中の電流密度は一定であると考えて複数方向

での出力電圧を取得する。視線方向は指標などを使いわかっているとして、出力電圧と電池モデルから初期の電流密度と電極位置の値を推定する。

多点電極の電極間の  $N$  個の電位差を  $X$  個所の方向ごとに得た値,  $V_{a,b}(a=1,2,\dots,N;b=1,2,\dots,X)$  と眼球の電池モデル  $V_{a,b}'$  の二乗誤差が最小になる値を求める。以下の式  $F(\mathbf{I}; \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  を最小にする  $\mathbf{I}$ ,  $(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  が推定した電流密度, 電極位置である。

$$F(\mathbf{I}; \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \sum_{b=1}^X \left( \sum_{a=1}^N \left( V_{a,b} - V_{a,b}'(\theta_b, \xi_b; \mathbf{I}; \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \right)^2 \right)$$

### 3-5-3 視線方向, 電流密度推定アルゴリズム

電極の位置を推定したとして, 視線方向と電流密度を推定する。電流密度が短い間ほとんど変化しないことを利用する。数十秒間の電流密度は一定であると考え, 複数の出力電圧取得する。数十秒間の出力電圧と電池モデルから繰り返し計算を行い, 電流密度を把握しつつ視線方向を推定していく。

1. 実測をする場合, 電極の位置はわかっているとして初期の電流密度の値はこれまでに推定をした値とする。
2. 電極の位置, 電流密度は推定しているとする。多点電極の電極間の  $N$  個の電位差を  $X$  個所の方向ごとに得た値,

$V_{a,b}(a=1,2,\dots,N, b=1,2,\dots,X)$ と眼球の電池モデルで計算した  $V_{a,b}'$  の二乗誤差が最小になる値を視線方向ごとに求める．以下の(4)式  $F_{\text{eye}}(\theta_b, \xi_b)$  を最小にする  $(\theta_b, \xi_b)$  が推定した視線方向である（更新する）．

$$F_{\text{eye}}(\theta_b, \xi_b) = \sum_{a=1}^N \left( V_{a,b} - V_{a,b}'(\theta_b, \xi_b; \mathbf{I}; \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \right)^2 \cdots (4)$$

3．電極の位置，X 個所の視線方向は推定しているとする．多点電極の電極間の N 個の電位差の X 個所のデータ

$V_{a,b}(a=1,2,\dots,N, b=1,2,\dots,X)$ と眼球の電池モデルで計算した  $V_{a,b}'$  の二乗誤差が最小になる値を求める．以下の(5)式  $F_{\text{cur}}(\mathbf{I}; \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z})$  を最小にする  $\mathbf{I}$  が推定した電流密度である（更新する）．

$$F_{\text{cur}}(\mathbf{I}; \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \sum_{b=1}^X \sum_{a=1}^N \left( V_{a,b} - V_{a,b}'(\theta_b, \xi_b; \mathbf{I}; \mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) \right)^2 \cdots (5)$$

4．2に戻ることを繰り返す．

5．繰り返し計算を行い，得られた  $(\theta_b, \xi_b)$ ， $\mathbf{I}$  が得られた視線方向と電流密度である．

## 第4章 数値実験

前章で紹介をしたアルゴリズムが眼球位置を計測するとき、原理的に可能かどうかを調べるために数値実験を行った。さらに、視線方向を推定するとき、どのような電極の配置条件が推定に適しているのか、ノイズの値を変化させたときの推定誤差の関係を検証した。

### 4-1 数値実験の条件

数値実験では眼球の半径 12.0mm、実測値は眼球の電池モデルに平均 0mV、標準偏差 0.1mV,  $\sqrt{0.001}$  mV, 0.01mV を加えたそれぞれの値の場合で行った。電極の数は 3, 4, 5 で、電極の配置条件は図 4.1 のように眼の下に水平に並べた場合と L 字型の 2 パターンで行い、それぞれの電極間の電位差から推定を行う。具体的な配置位置は付録にある表 4.1 から表 4.8 の配置条件である。

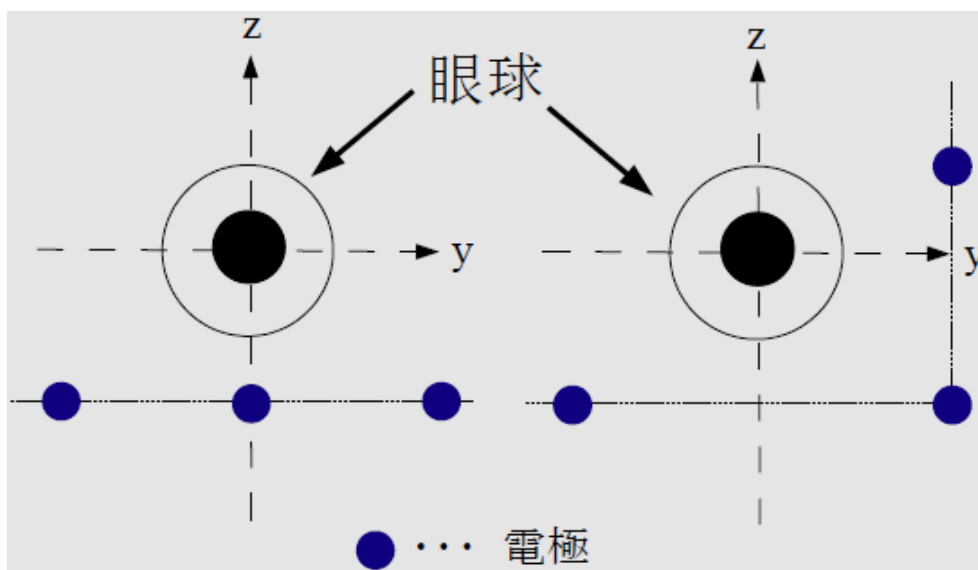


図 4.1 電極の配置図 (3 電極の場合)



## 4-2 視線方向推定

測定者が電流密度，電極位置がわかっているときに出力電圧と電池モデルから視線方向を推定する．どのような電極配置条件が推定に適しているのか．理想的な条件で眼球位置を求めることができるのかを検証した．内容は，被験者が水平方向：-20deg から 20deg まで 2deg おき，垂直方向：-5deg から 5deg まで 0.5deg おきの方向を見たとした場合で行った．

### 4-2-1 結果

以下のグラフは付録1の表4.1から表4.8の電極配置のもとで視線方向を推定したときのグラフである．計測結果のデータは付録1-1に示す．グラフはデータをもとに，横軸は，電極の配置条件，縦軸は，水平方向（ $\theta$ ）：誤差の絶対値の平均値，垂直方向（ $\xi$ ）：誤差の絶対値の平均値，としたときのグラフである．なおノイズ0.1mVの場合において電極のx座標はx=12.0mm, x=11.0mmの2パターンで行った．

### - 3 電極の場合

ノイズ 0.1mV

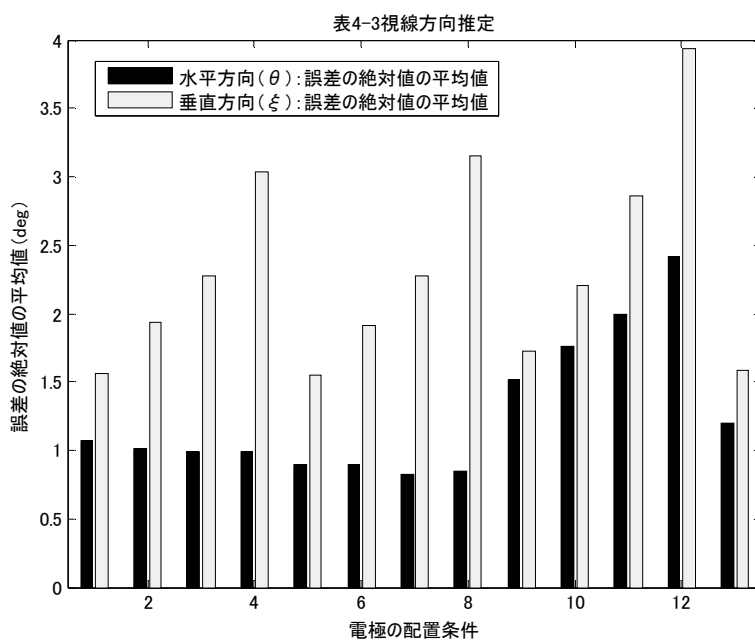


図 4.1.1 3 電極配置 - 視線方向推定(x=12.0mm)

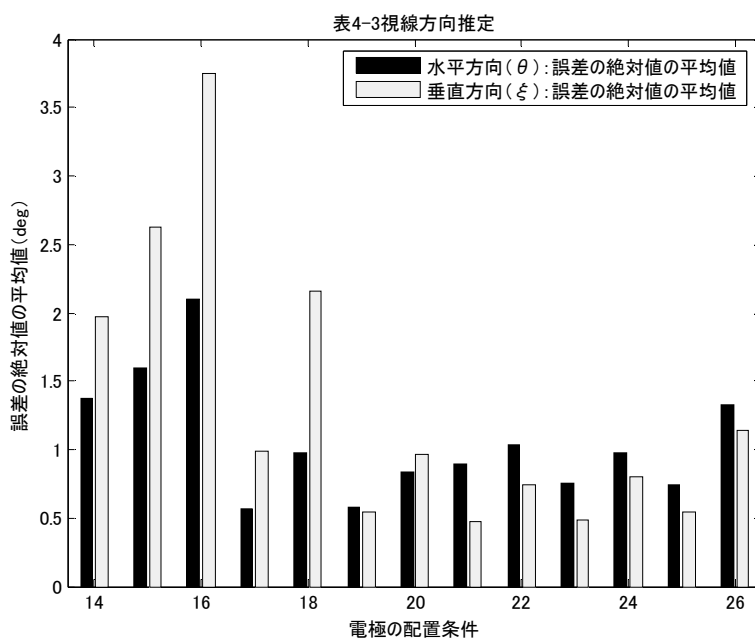


図 4.1.2 3 電極配置 - 視線方向推定(x=12.0mm)

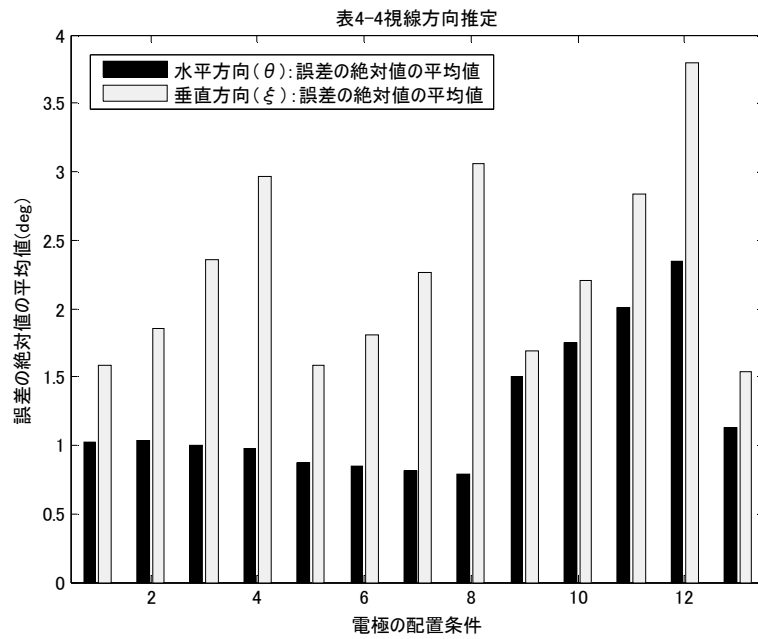


図 4.1.3 3 電極配置 - 視線方向推定(x=11.0mm)

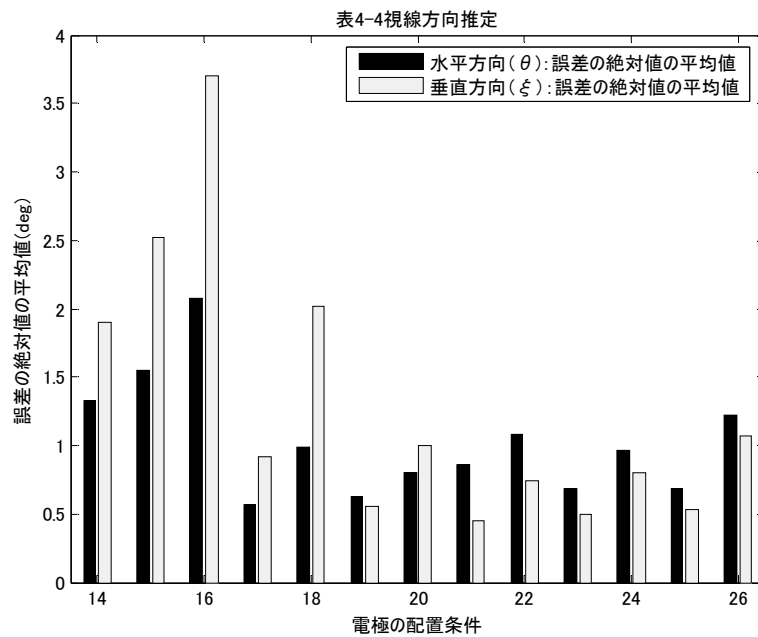


図 4.1.4 3 電極配置 - 視線方向推定(x=11.0mm)

ノイズ  $\sqrt{0.001}$  mV

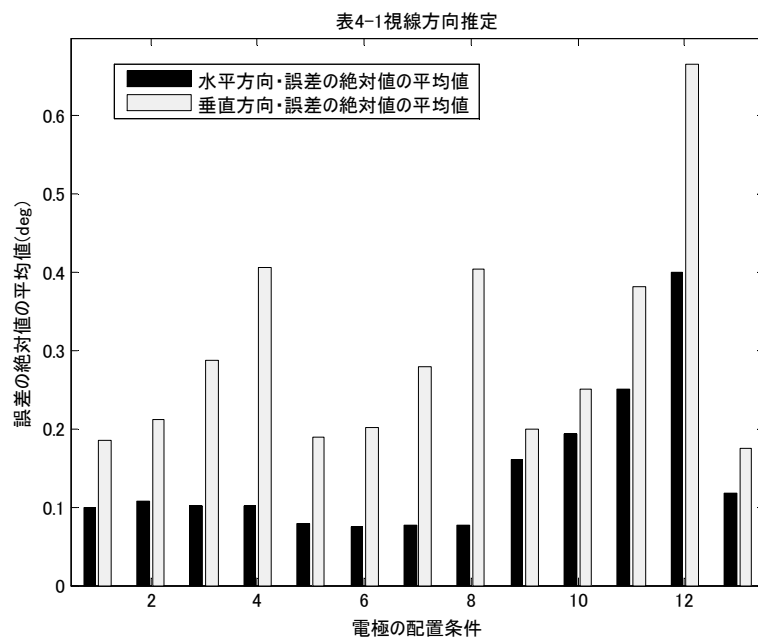


図 4.1.5 3 電極配置 - 視線方向推定

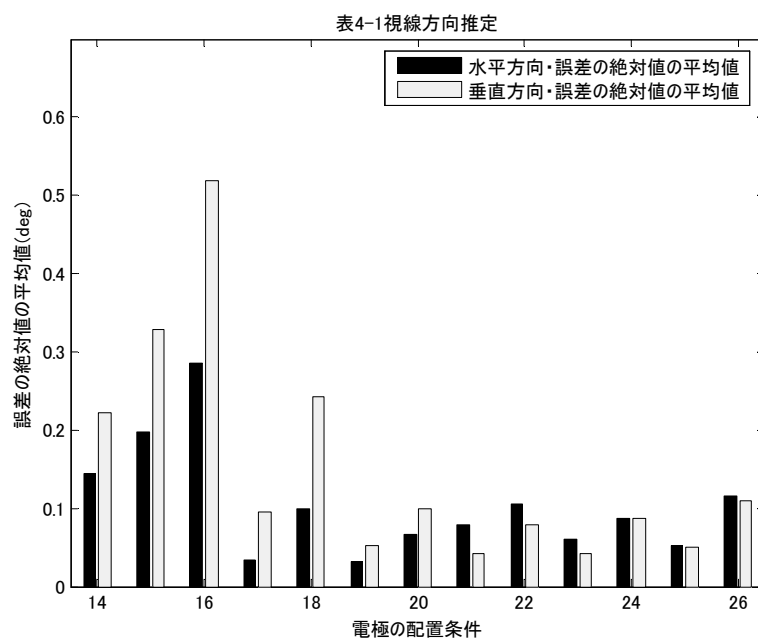


図 4.1.6 3 電極配置 - 視線方向推定

ノイズ 0.01mV

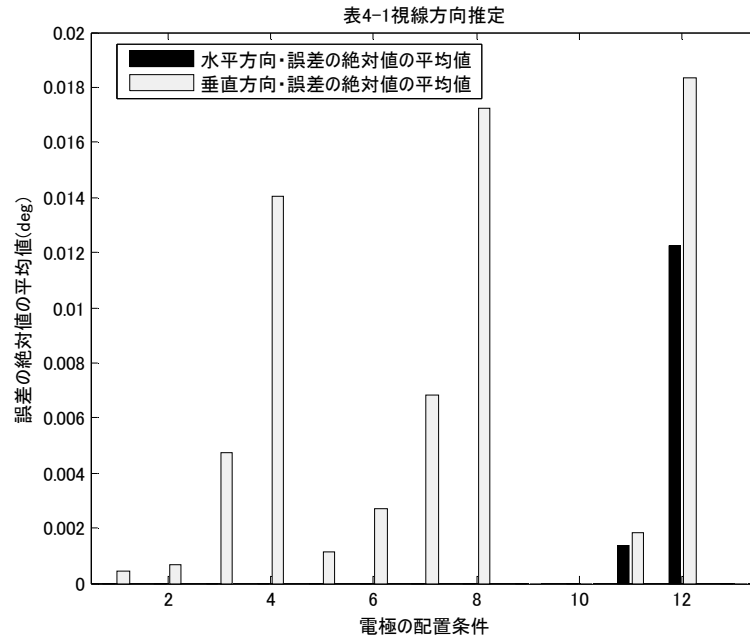


図 4.1.7 3 電極配置 - 視線方向推定

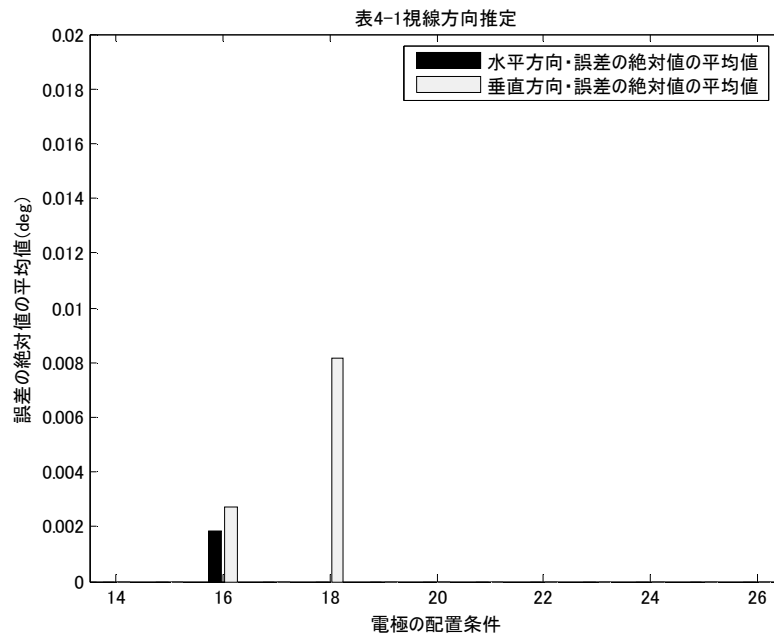


図 4.1.8 3 電極配置 - 視線方向推定

3 電極の場合，水平方向を推定する場合，垂直方向を推定する場合ともに視線方向を計測する場合においては，L字型に並べた場合より水平方向に電極を3つ配置する場合において精度が高かった。

- 4 電極の場合  
ノイズ 0.1mV

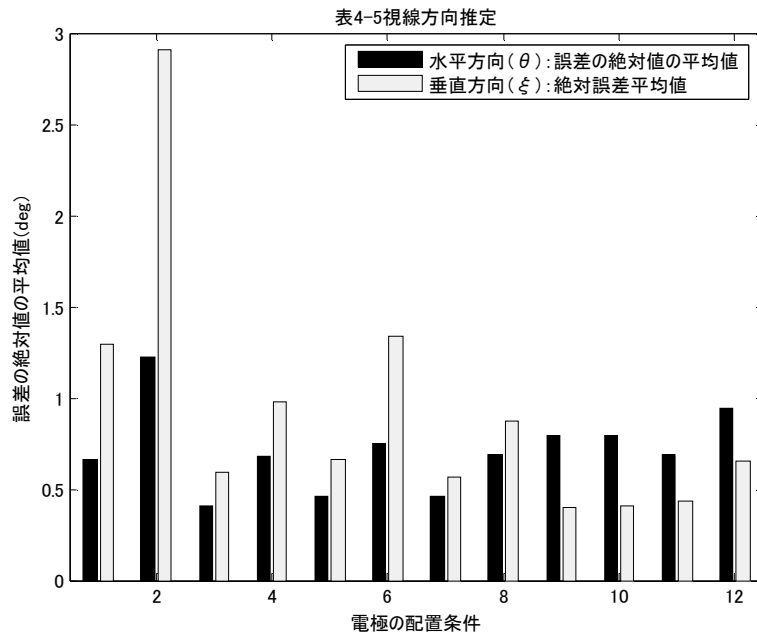


図 4.1.9 4 電極配置 - 視線方向推定(x=12.0mm)

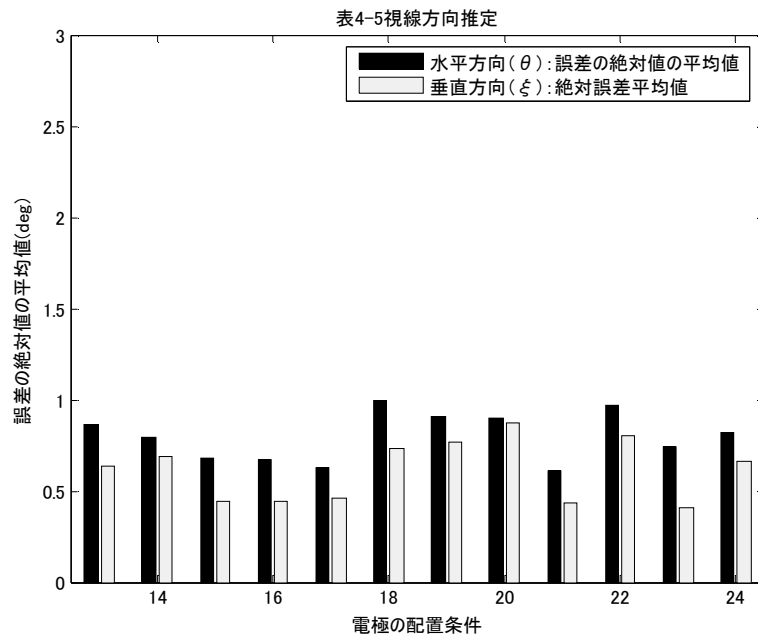


図 4.1.10 4 電極配置 - 視線方向推定(x=12.0mm)

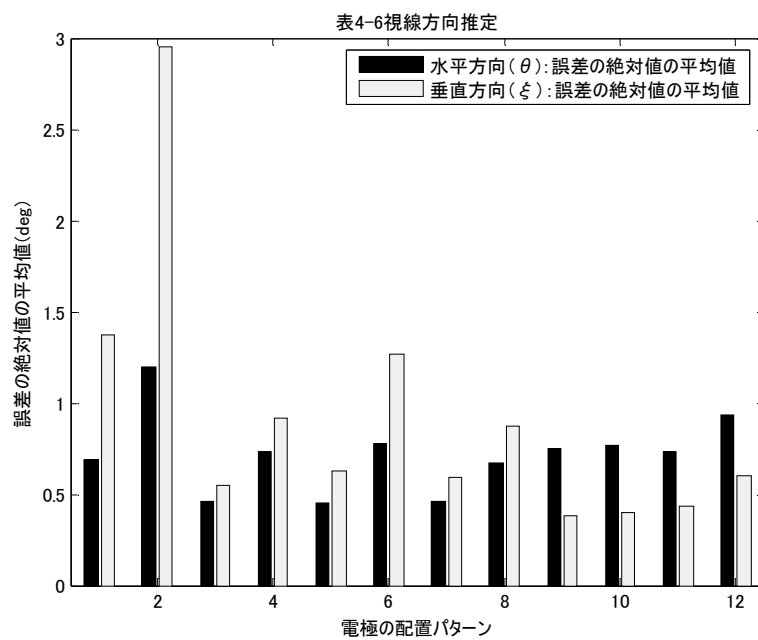


図 4.1.11 4 電極配置 - 視線方向推定(x=11.0mm)

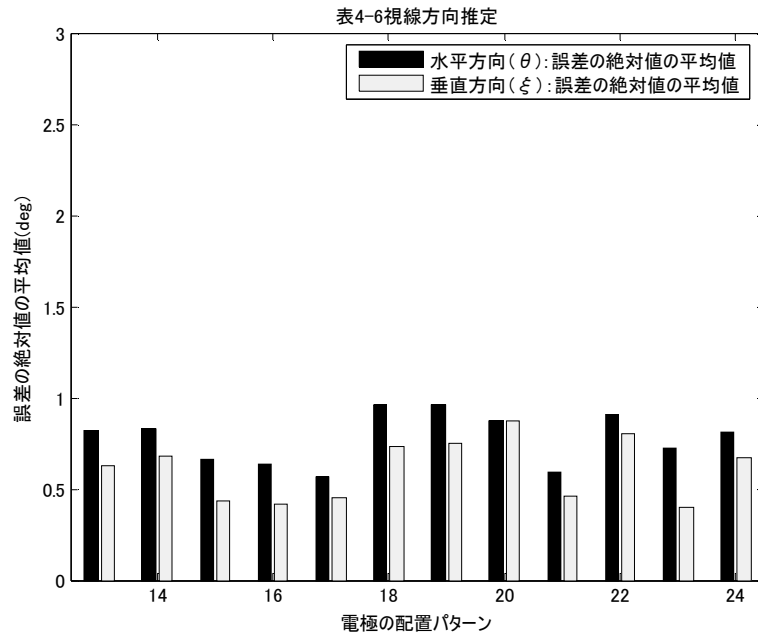


図 4.1.12 4 電極配置 - 視線方向推定(x=11.0mm)

ノイズ  $\sqrt{0.001}$  mV

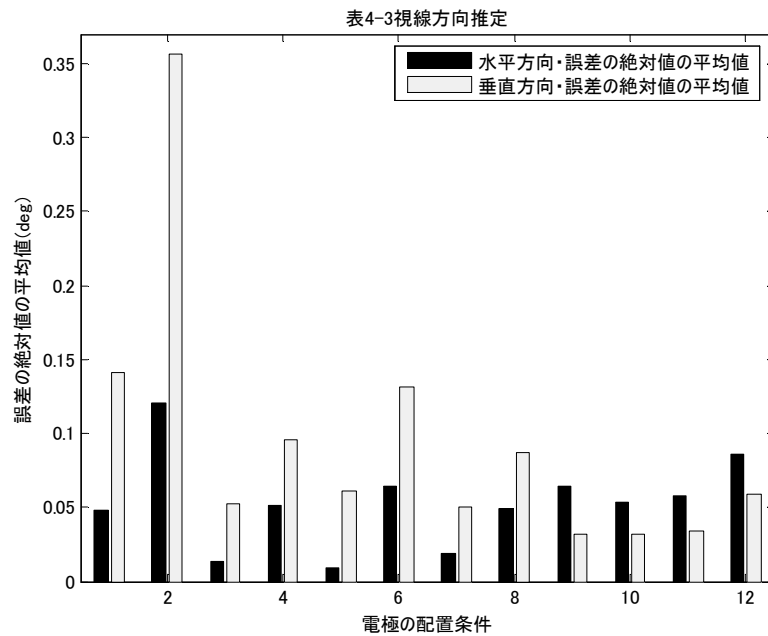


図 4.1.13 4 電極配置 - 視線方向推定



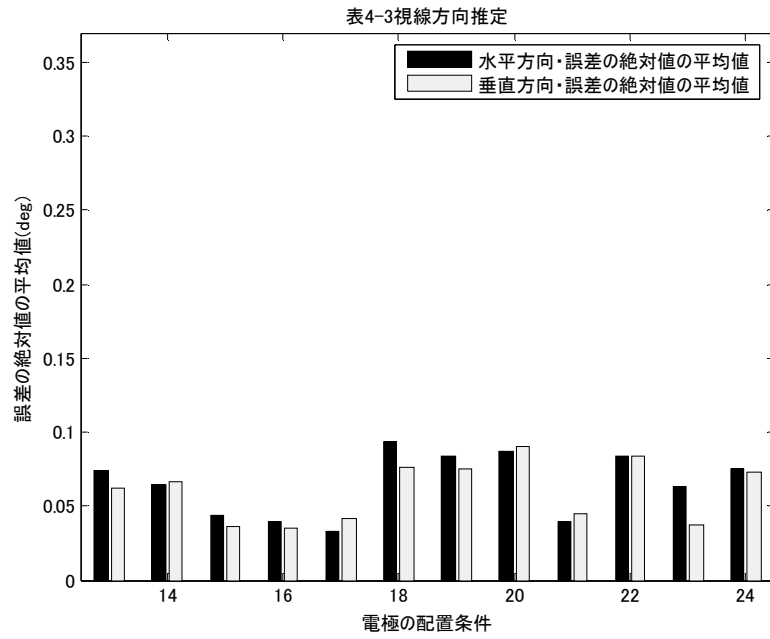


図 4.1.14 4 電極配置 - 視線方向推定

ノイズ 0.01mV

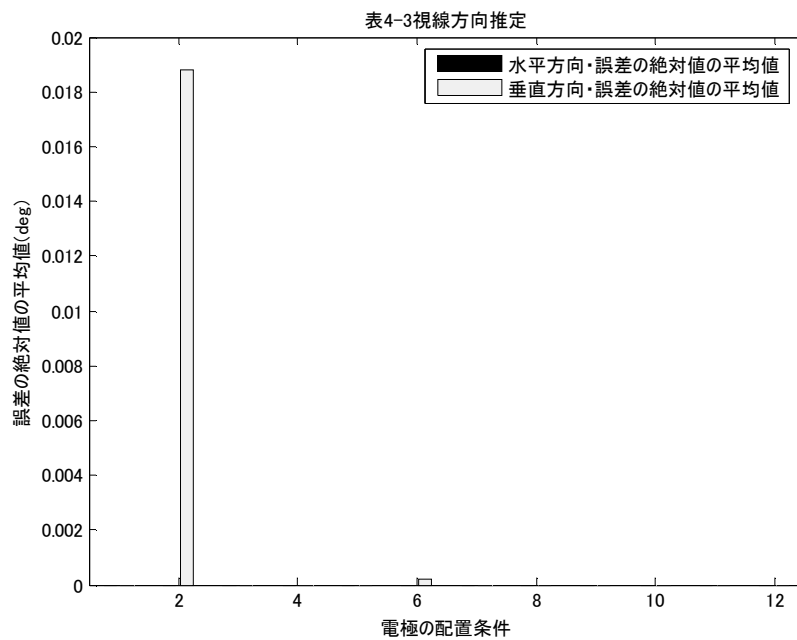


図 4.1.15 4 電極配置 - 視線方向推定

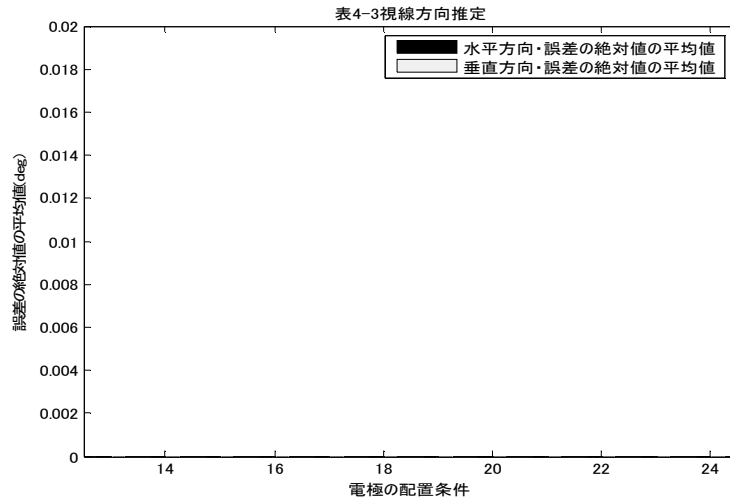


図 4.1.16 4 電極配置 - 視線方向推定

4 電極の場合，水平方向を推定する場合は水平に電極を 4 つ並べた場合，垂直方向を推定する場合は 3 つの電極を水平に配置し，電極を 1 つ目の横に配置する L 字型の場合において精度が高かった。

- 5 電極の場合

ノイズ 0.1mV

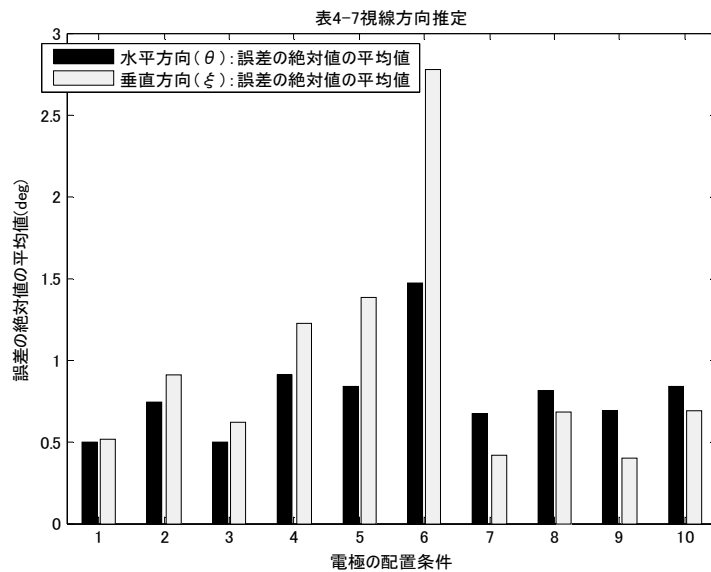


図 4.1.17 5 電極配置 - 視線方向推定(x=12.0mm)

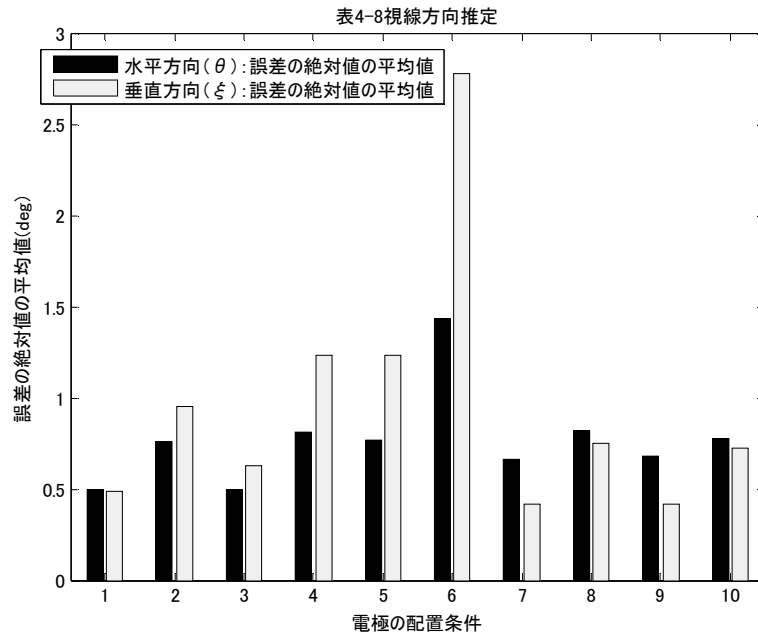


図 4.1.18 5 電極配置 - 視線方向推定(x=11.0mm)

ノイズ  $\sqrt{0.001}$  mV

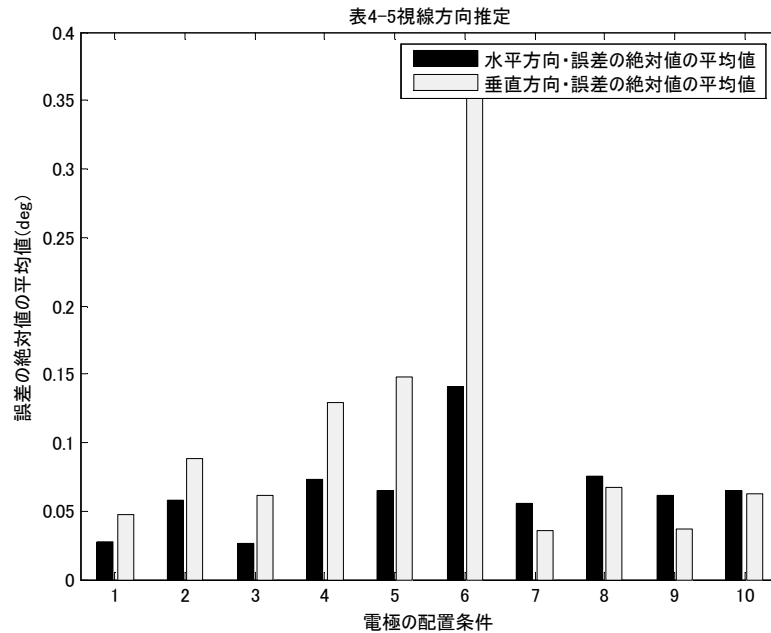


図 4.1.19 5 電極配置 - 視線方向推定

ノイズ 0.1mV

—電極 5つ

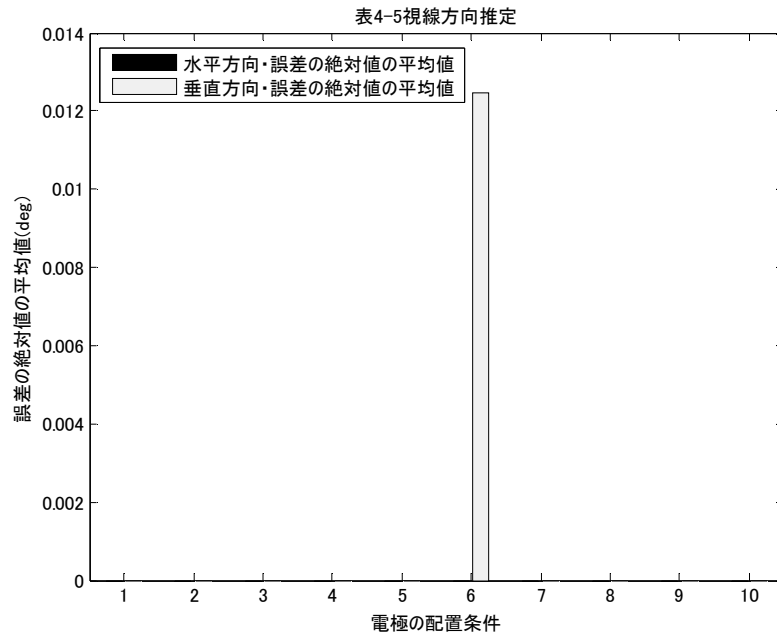


図 4.1.20 5 電極配置 - 視線方向推定

5 電極の場合、水平方向を推定する場合、垂直方向を推定する場合ともに視線方向を計測する場合においては、水平方向に電極を配置する場合、L字型に配置する場合ともに精度が高かった。

## 4-2-2 まとめと結論

電極 3つ、4つ、5つのそれぞれのパターンにおいて、電極位置を  $x=12.0\text{mm}$  で推定した場合と、電極位置  $x=11.0\text{mm}$  で推定した場合においてほとんど変化が見られなかった。

電極数で比べてみると、水平方向、垂直方向ともに、誤差にあまり変化はなかった。視線方向を推定する場合は、3 電極を平行に並べる配置で十分に推定

できる。

## 4-3 電流密度，電極位置推定

実測のはじめに電流密度，電極位置推定を行う。指標を使い被験者に，視線方向：(水平方向(deg)，垂直方向(deg))=(0,0)，(-15,0)，(15,0)，(0,5)，(0,-5)の5箇所を与えた場合を想定してそれらの出力電圧から電流密度，電極位置の推定を行った。

### 4-3-1. 結果

—電極3つ

ノイズ0.1mV

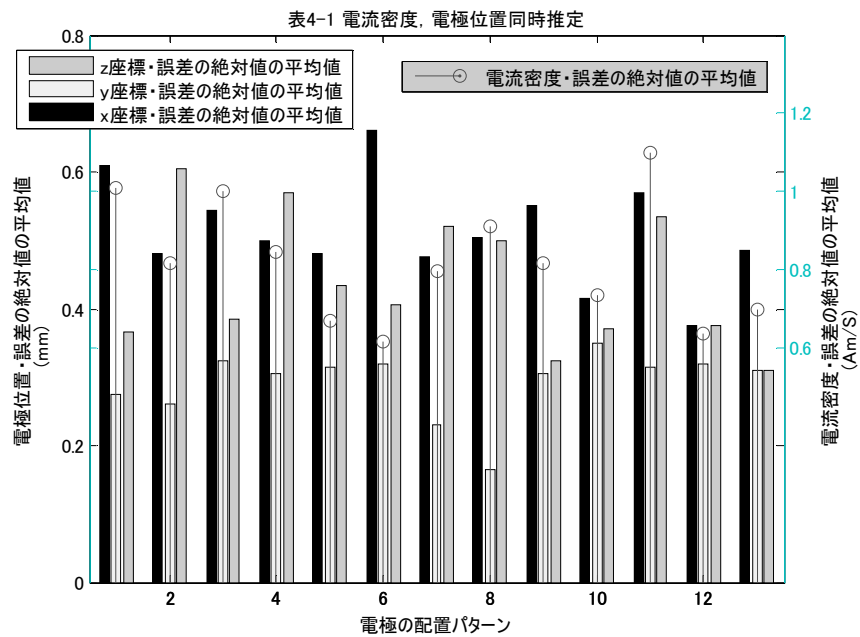


図 4.2.1 3 電極配置 - 電流密度，電極位置推定

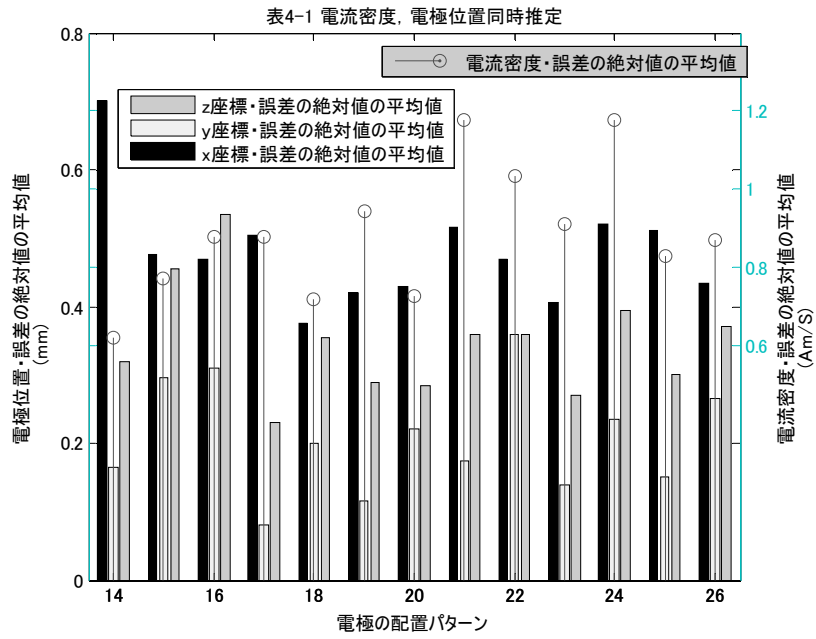


図 4.2.2 3 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

ノイズ  $\sqrt{0.001}$  mV

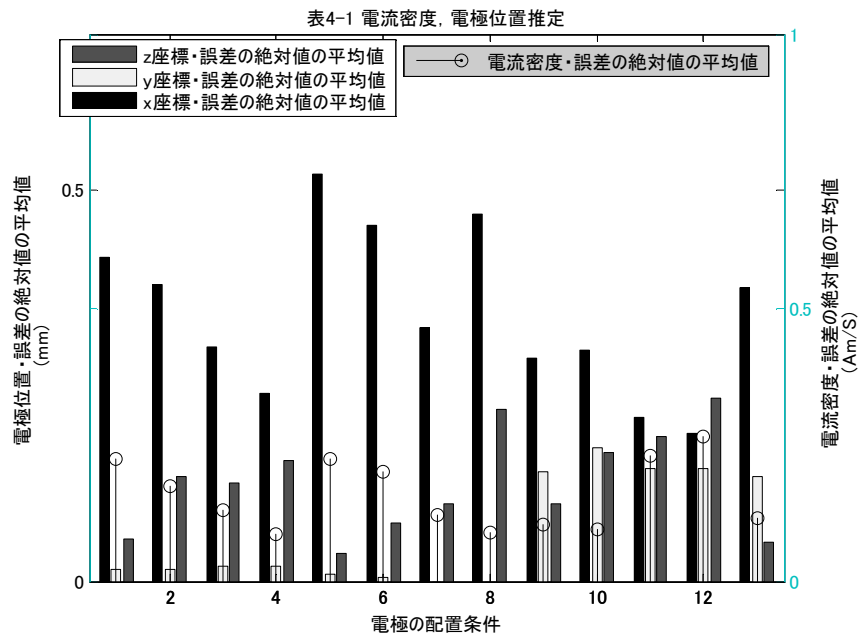


図 4.2.3 3 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

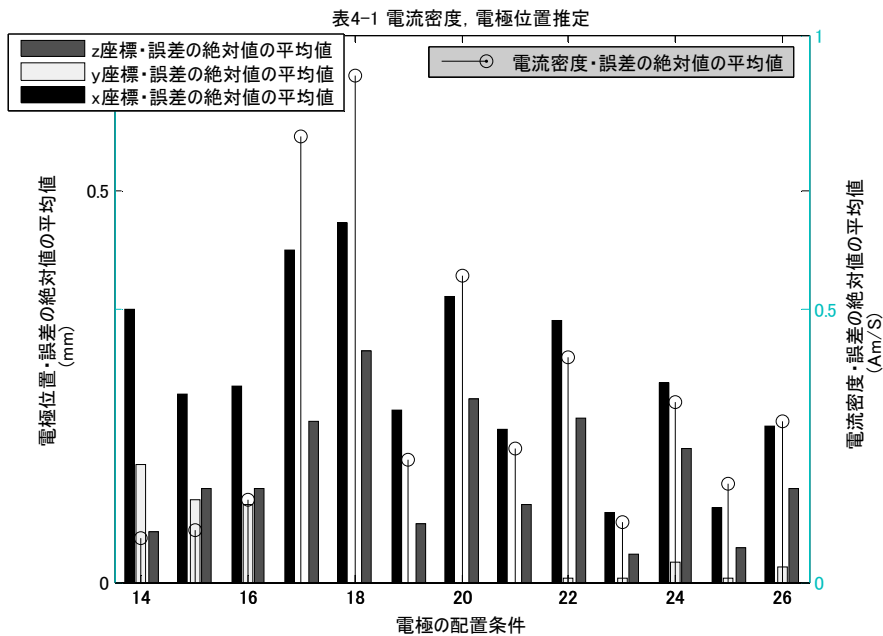


図 4.2.4 3 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

ノイズ 0.01mV

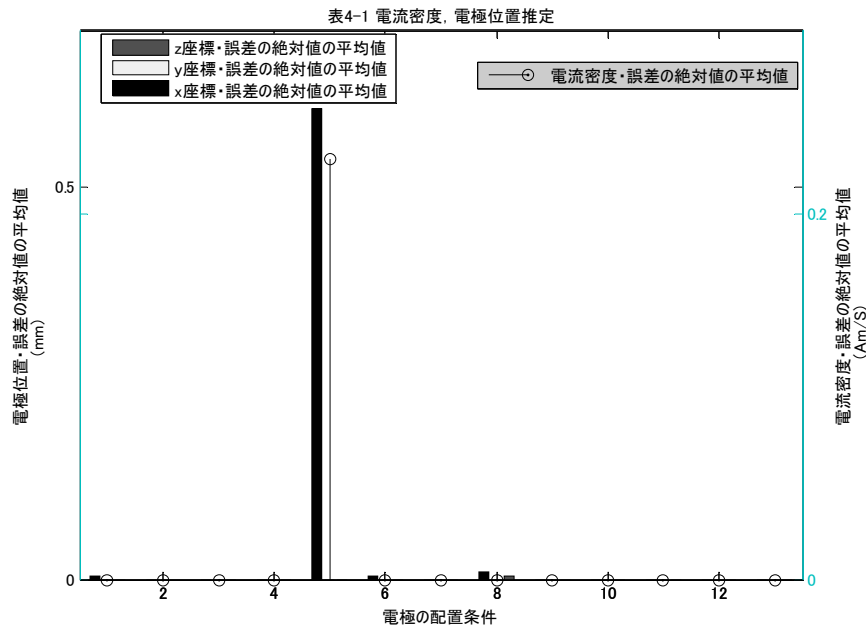


図 4.2.5 3 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

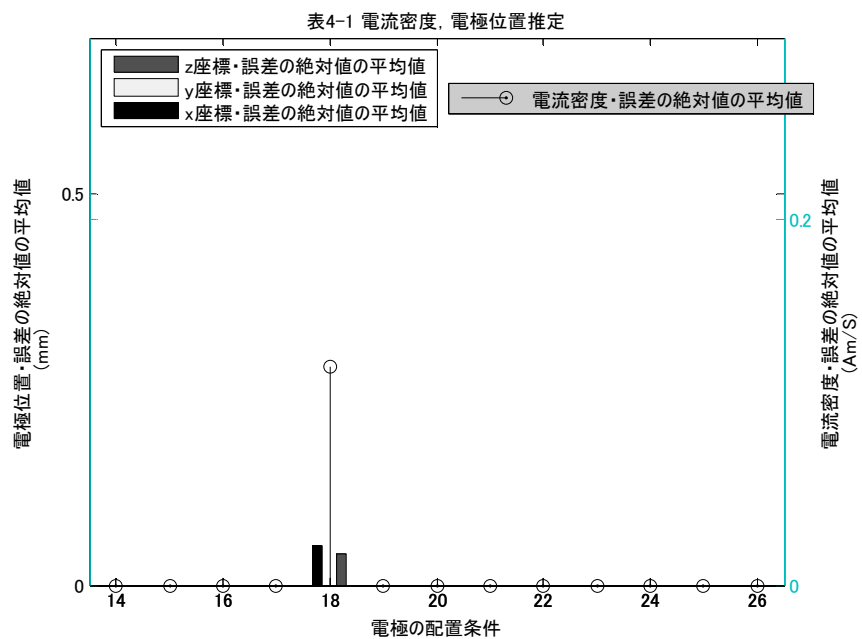


図 4.2.6 3 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

3 電極の場合, 電極位置を推定するにことも, 電流密度を推定することも水平, L字型ともに精度に変化は見られなかった.



ー電極 4つ

ノイズ 0.1mV

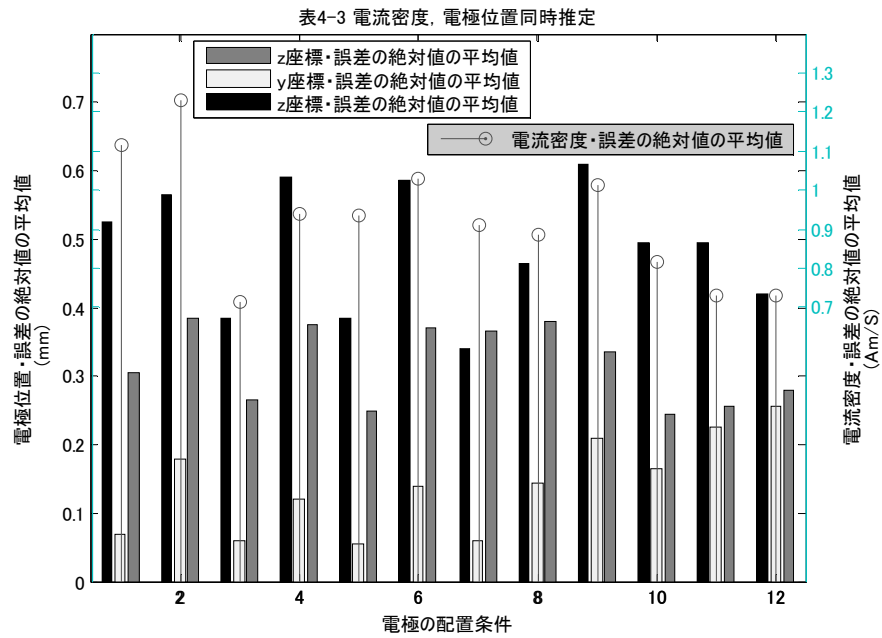


図 4.2.7 4 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

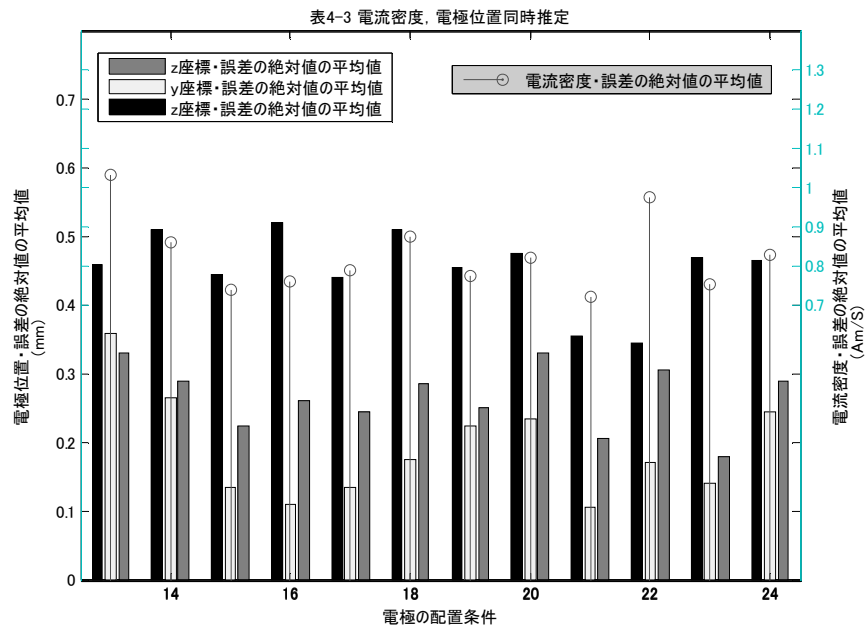


図 4.2.8 4 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

ノイズ  $\sqrt{0.001}$  mV

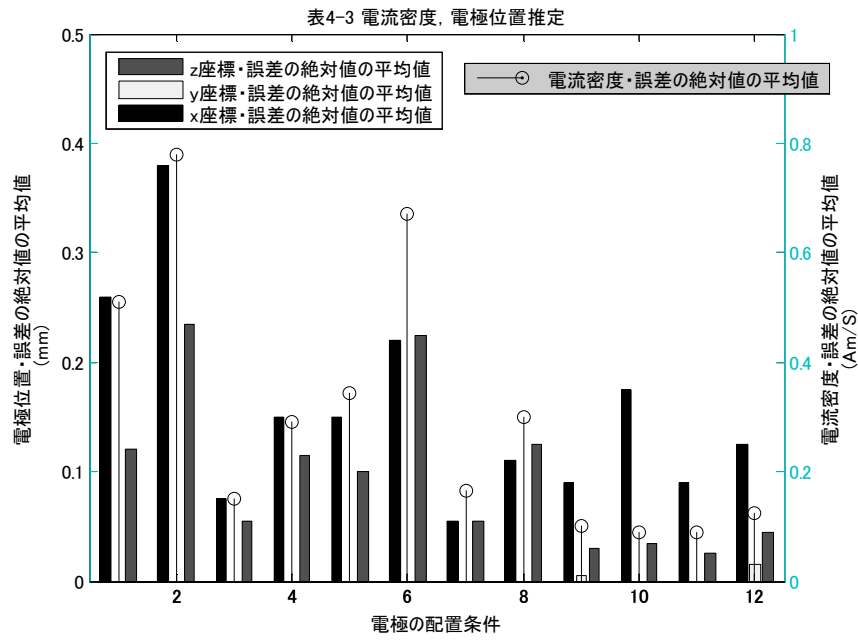


図 4.2.9 4 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

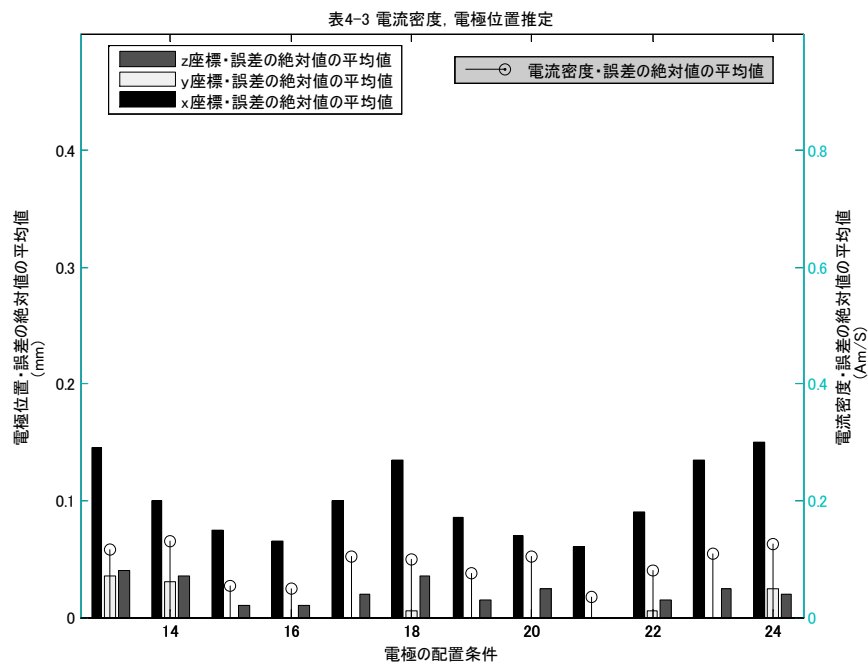


図 4.2.10 4 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

一電極5つ

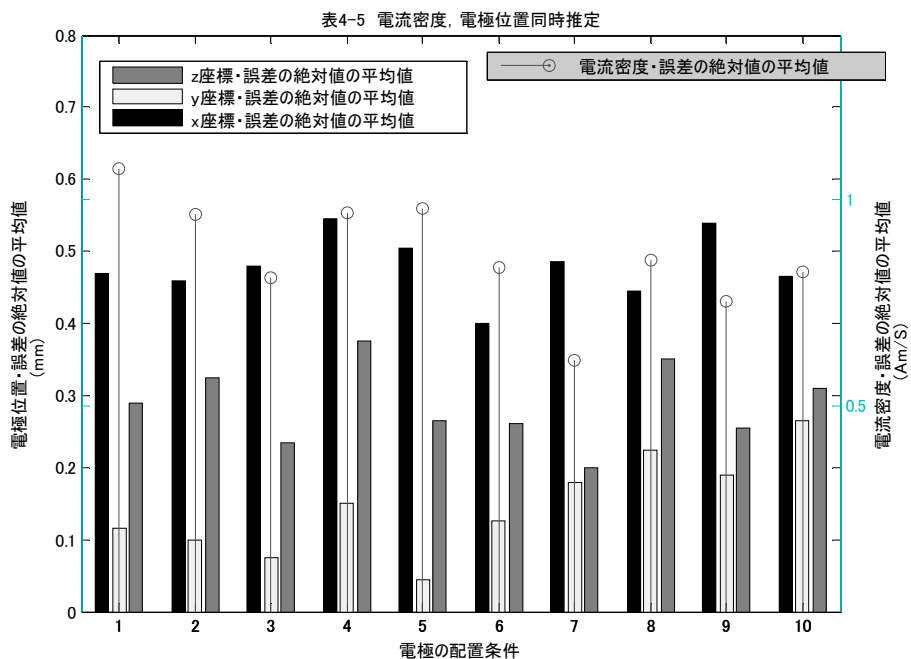


図 4.2.11 5電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

ノイズ 0.01mV

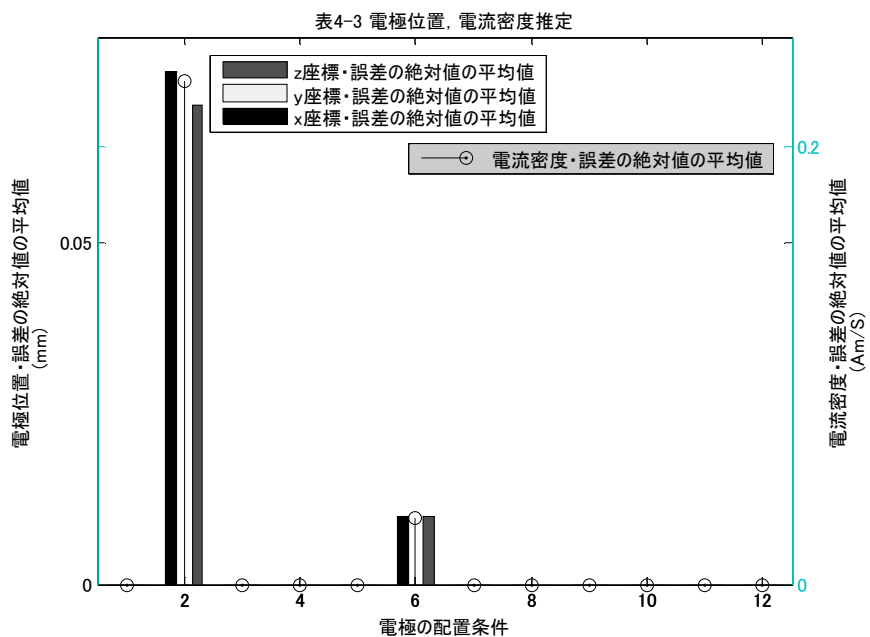


図 4.2.14 4電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

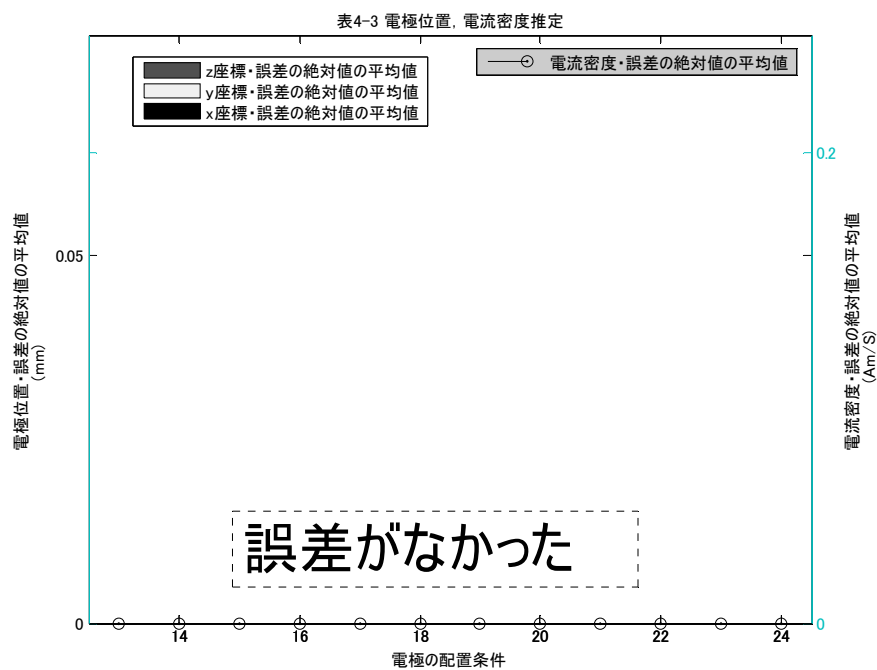


図 4.2.15 4 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

電極 4 つの場合, 電極を水平に並べる場合に比べ L 字型のほうが高精度で計測できることを示せた.

ー電極 5つ

ノイズ 0.1mV

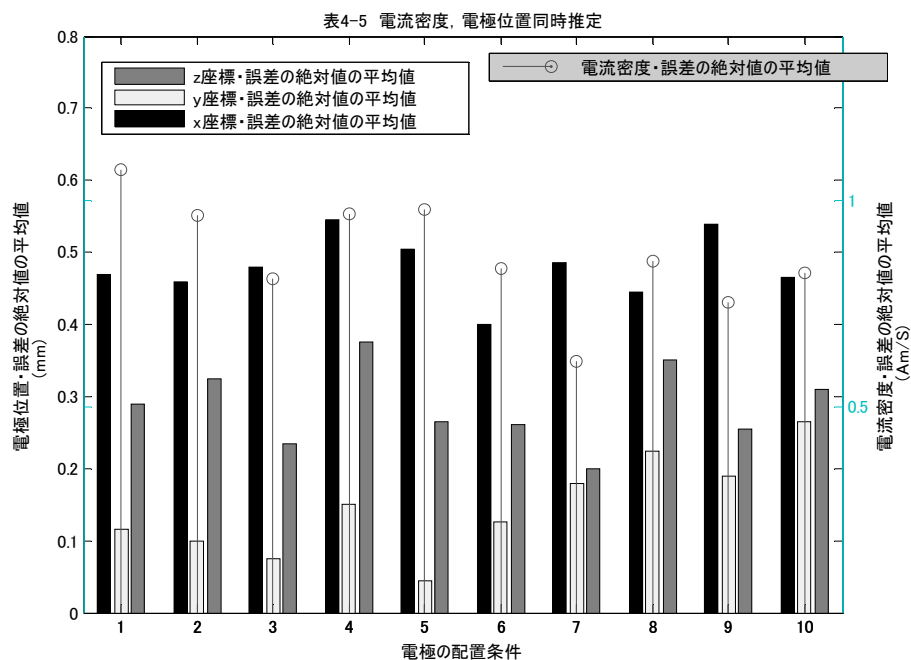


図 4.2.16 5 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

ノイズ  $\sqrt{0.001}$  mV

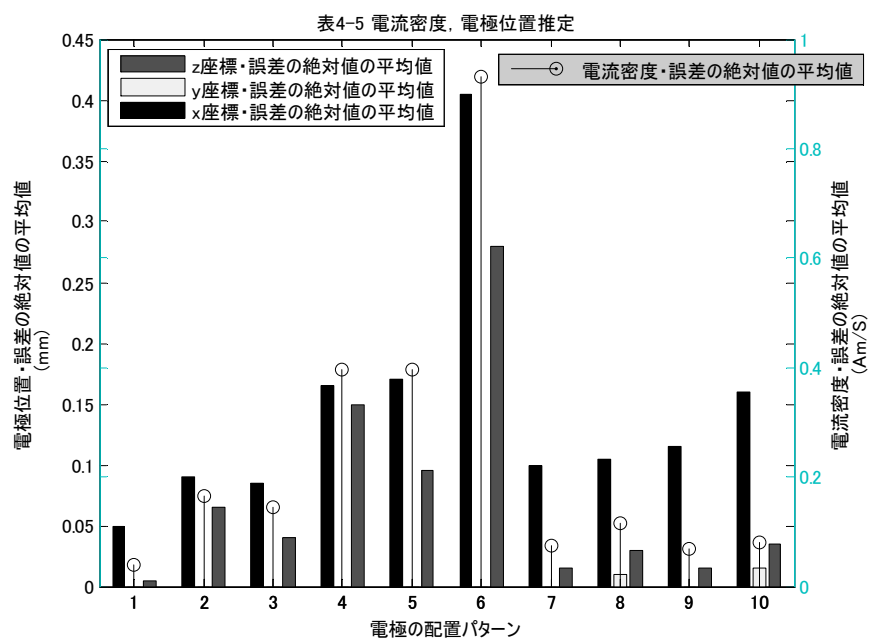


図 4.2.17 5 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

ノイズ 0.01mV

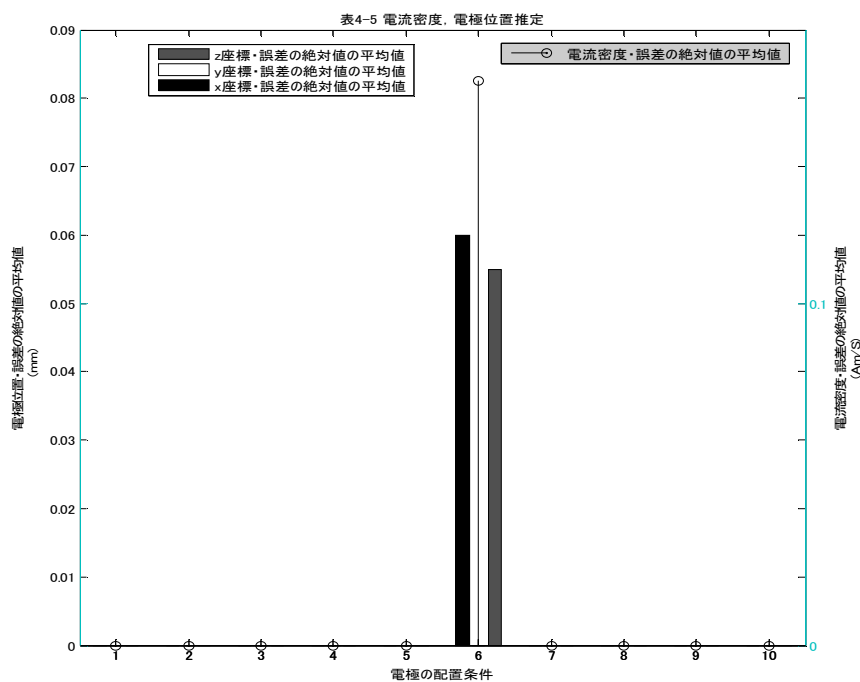


図 4.2.18 5 電極配置 - 電流密度, 電極位置推定

電極 5 つの場合, 水平に並べた場合でも, L字型に並べた場合でも両方高精度で測定できることを示すことができた。

#### 4-3-2. まとめと結論

電流密度, 電極位置を推定するにおいて, 電極が 3 つの場合に比べ 4 つ, 5 つと数を増やしたほうが高精度で測定することができた。しかし, 4 つ以上は増やしてもほとんど変化が無い。電流密度, 電極位置を推定するときは, 電極の数を 4 つ以上使用することが望ましいことが示唆することができた。

## 4-4. 視線方向, 電流密度推定

### 4-4-1. 方法

3-8のアルゴリズムにより, 視線方向, 電流密度同時推定を行った. 電極位置がわかっているとして, どのような電極配置が視線方向, 電流密度を同時推定に適しているのかを探るために視線方向, 電流密度同時推定を行った.

前節までの結果から本節では, 表4.3の配置条件17, 19, 23, 25, 表4.5の配置条件1, 3, 5, 7, 16, 表4-7の配置条件1, 3, 7のもとで以下のとおりに行った. ここで, 電流密度( $I/(4\pi\sigma)$ )は $25\times 10^{-6} Am/S$ , 眼球の半径は12.0mmで固定した.

1. 真の電流密度の値を( $I/(4\pi\sigma)$ )は $25\times 10^{-6} Am/S$ として, 初期値 $20\times 10^{-6} Am/S$ の場合と, 初期値 $30\times 10^{-6} Am/S$ の場合ではじめる.
2. 視線を水平方向( $\theta$ )は, -20deg から 20deg まで 5deg おきに, 垂直方向( $\xi$ )は, -4deg から 4deg まで 2deg おきに変化させた場合の真の電極位置での出力電圧 (実際の眼電位に平均 0mV, 分散 0.01mV の値が加えられている) と初期の電極位置から視線方向を推定 (更新) する.
3. 推定した視線方向と出力電圧から電極位置を推定 (更新) する.
4. 2→3→…と19回 (最初の場合を含めて20回) 繰り返す.

## 4-4-2. 結果

以下のグラフは、表 4.3 の配置条件 17, 19, 23, 25, 表 4.5 の配置条件 1, 3, 5, 7, 16, 表 4.7 の配置条件 1, 3, 7 のもとで視線方向、電流密度同時推定を行ったグラフである。グラフは横軸、更新回数、縦軸、予想される電流密度としたときのグラフである。

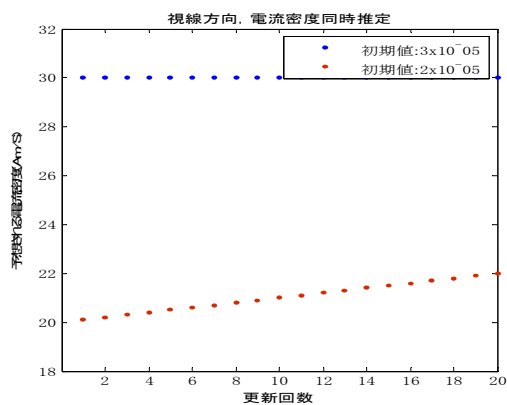


図 4.5.1 表 4.3 (3電極) の配置条件 7 で行った視線方向、電流密度推定

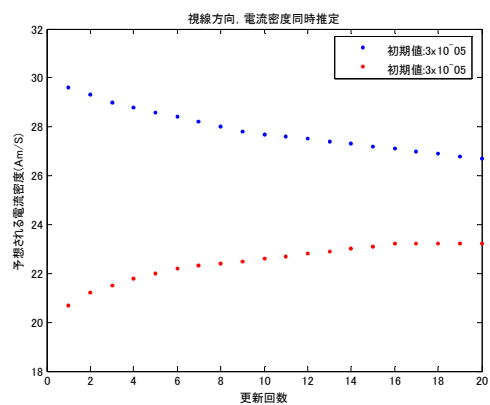


図 4.5.2 表 4.3 (3電極) の配置条件 17 で行った視線方向、電流密度推定

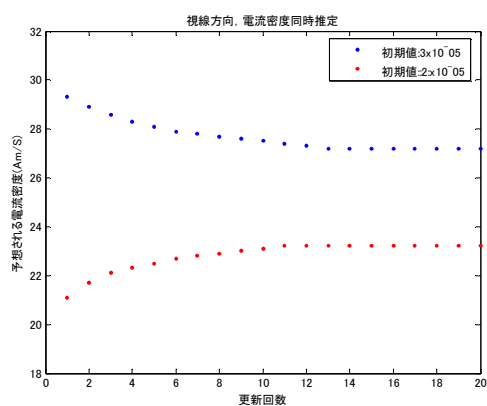


図 4.5.3 表 4.3 (3電極) の配置条件 19 で行った視線方向、電流密度推定

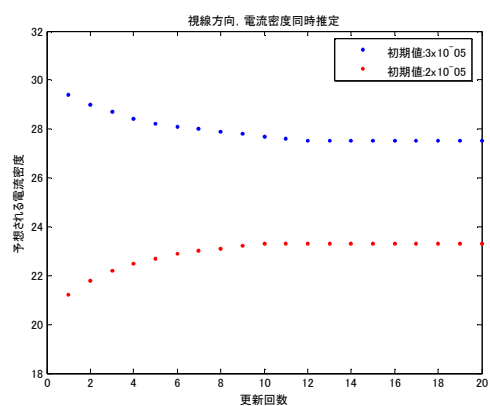


図 4.5.4 表 4.3 (3電極) の配置条件 23 で行った視線方向、電流密度推定



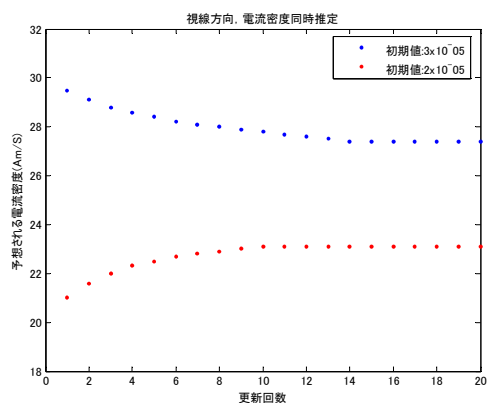


図 4.5.5 表 4.3 (3電極) の配置条件 2  
5で行った視線方向, 電流密度推定

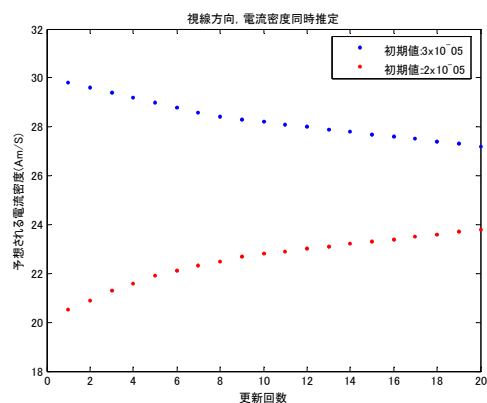


図 4.5.6 表 4.5 (4電極) の配置条件 1  
で行った視線方向, 電流密度推定

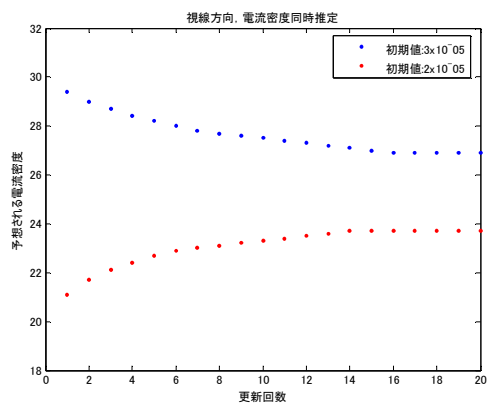


図 4.5.7 表 4.5 (4電極) の配置条件 3  
で行った視線方向, 電流密度推定

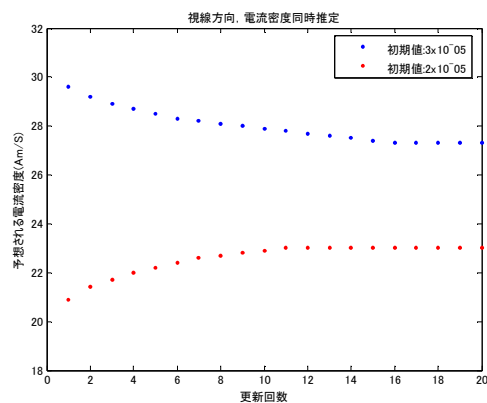


図 4.5.8 表 4.5 (4電極) の配置条件 5  
で行った視線方向, 電流密度推定

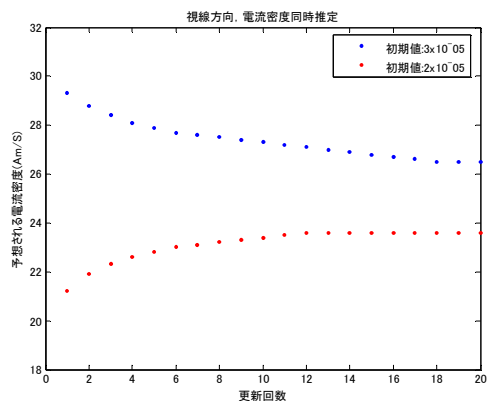


図 4.5.9 表 4.5 (4電極) の配置条件 7  
で行った視線方向, 電流密度推定

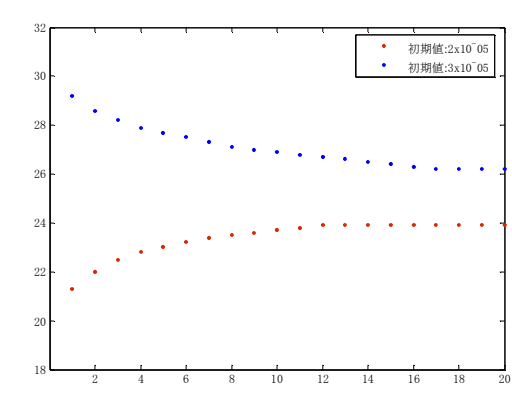


図 4.5.10 表 4.5 (4電極) の配置条件  
11 視線方向, 電流密度推定

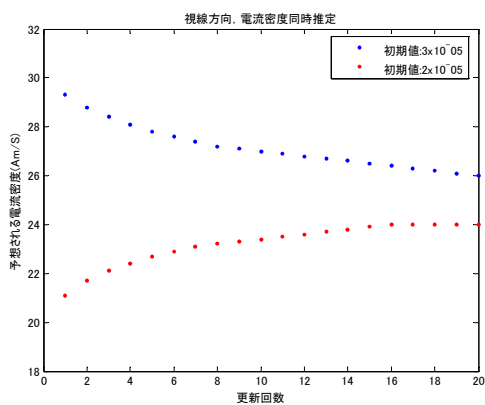


図 4.5.1.1 表 4.5 (4 電極) の配置条件 1 6 で行った視線方向, 電流密度推定

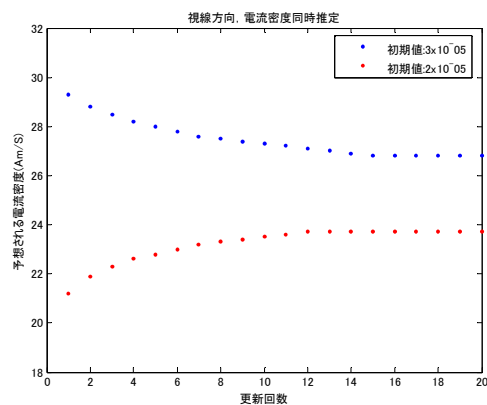


図 4.5.1.2 表 4.7 (5 電極) の配置条件 1 で行った視線方向, 電流密度推定

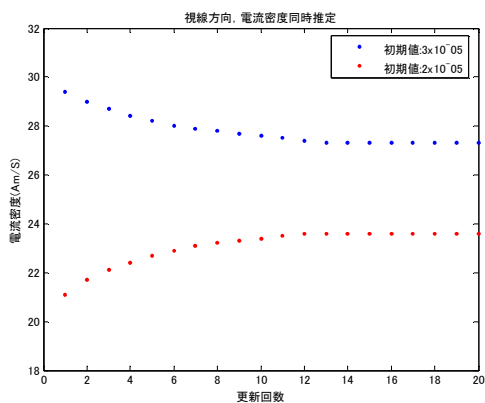


図 4.5.1.3 表 4.7 (5 電極) の配置条件 3 で行った視線方向, 電流密度推定

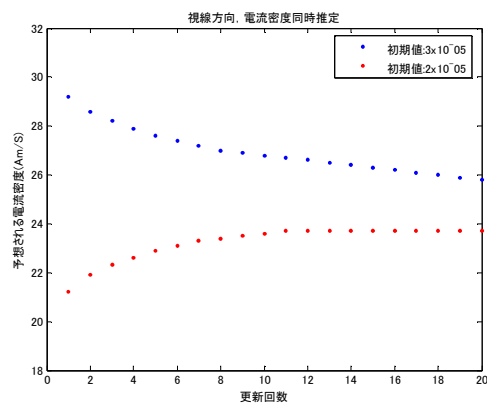


図 4.5.1.4 表 4.7 (5 電極) の配置条件 7 で行った視線方向, 電流密度推定

今回行った条件で, 全ての場合において推定した電流密度の値と真の電流密度の値の誤差は減少したが, 誤差がなくなることは無かった。

### 4-4-3. まとめと結論

今回の実験では、誤差が無くならず完全な推定をすることができなかったが、アルゴリズム通り行えば誤差が無くなり、電流密度、視線方向を同時に推定できるはずである。数値実験での条件を再考して、今後より良い結果を出すことが望まれる。

## 第5章 評価実験

前章の数値実験から，電極配置を工夫することにより第3章のアルゴリズムで視線方向が高精度で求まることが示された．ここでは，数値実験の結果から高精度で視線方向を推定できた電極配置のもと，実際の実験でも視線を推定できるかを検証するための方法を示す．実験では，主に第2章で使用した装置を使用する．

## 5-1 実験方法

### (1) 環境と装置

以下に実験で利用する装置を挙げる.

- ・ニスタグモグラフ用アンプ AN-601G (日本光電) (図 2.3)
- ・ニスタグモグラフ用誘導パネル PN-640G (日本光電) (図 2.3)
- ・ニスタグモグラフ用入力箱 JN-640G (日本光電)
- ・小型生体電極 (日本光電) (図 2.3)

これらの機器を使用して, ノイズなどの影響が入りにくい場所で測定を行う.

### (2) 電極の作成

数値実験の結果より視線方向を求めるには, 電極の数は3つで3電極を平行に並べる電極配置で十分であることがわかる. 本実験では3電極間の距離を一定に保つために図 5.1 のような電極の組み合わせを小型生体電極を用いて作る.

ここで, 電極A-B間, 電極B-C間の長さは糸など曲がるもので固定する. それにより, 電極を配置するとき電極間の距離は変化しないようにする.

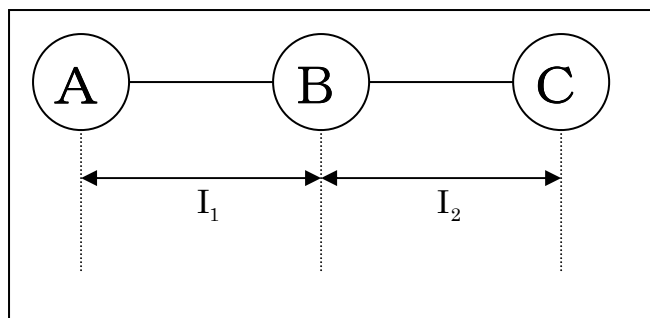


図 5.1 電極の配置条件

### (3) 電極の装着

実験では、被験者の利き目の下に顔面に平行で水平な軸（ $y$  軸）と平行に、図 5.1 のように電極 B が眼球の中心にくるように、図 5.1 のような電極を利き目に

配置する。正面から見た場合、図 5.2 の①のように装着できれば数値実験どおりだが、実際は図 5.2 の②のように人の顔は平行ではない。つまり、間隔は正面から見た場合  $y$  軸方向に若干短くなり、 $x$  方向も多少ずれる。本実験において、それらの多少のずれはあるがそれほど大きなずれではないので、顔によるずれは特に気にしないことにする。

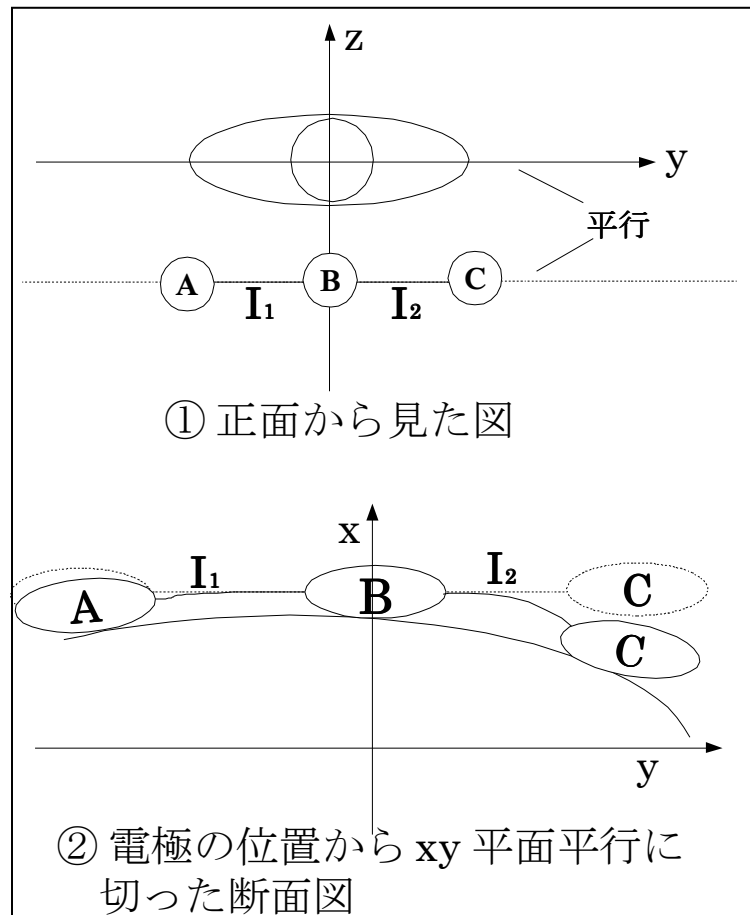
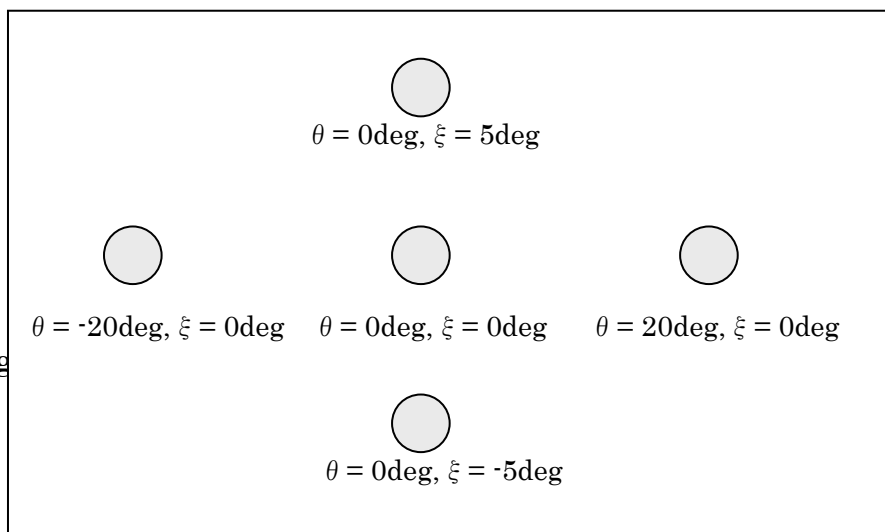


図 5.2 電極の装着

実験では、利き目でないほうに眼帯を装着し、頭を固定するためにあご台を使用する。

## (4) 指標

図 5.3 のような指標を作り（座標の点は小さく）  
 $\theta = 0\text{deg}, \xi = 0\text{deg}$   
 の点を図 2.1 の設定条件のように眼



球と同じ高さで、

図 5.3 実験で使用する指標（例）

かつ正面を見たときの点とする。

## (5) 手続き

以下の手順で行い、実際に多点眼電位で視線方向が推定できるかをする。

1. 電極の位置は (3) で設定してわかっているとする。
2. (4) の指標を使用して、視線方向がわかっているとする。
3. (4) の指標を見た出力電圧から電流密度推定アルゴリズムより、電流密度を求める。（電流密度推定）
4. 1 から電極位置, 3 で求めた電流密度から電流密度はわかっているとして、視線方向を推定する。（視線方向推定）

5. 2から視線方向, 3で求めた電流密度から電流密度はわかっているとして電極位置を推定する。(電極位置推定)

6. 4で求めた電極位置から電極位置はわかっているとして出力電圧から, 視線方向と電流密度を同時推定する(視線方向, 電流密度同時推定)

## 5-2 まとめ

実際に実験は行っていないが, 前節のように実験を行えば本研究で紹介したシステムの性能が評価できる。実験は, 従来の EOG 法で用いた装置を使うことのできるなので今後システムの性能を評価していきたい。



## 第6章 結論

本研究では，従来の EOG 法の問題点である，ドリフト現象の解決策として多点に電極を貼り，それらのデータから視線方向を推定する手法を提案した．この提案手法は眼球の仕組みから電池モデルを考えて，モデルの下で眼球周辺の眼球常在電位を計算し，視線方向を推定することを考えているため実際の眼球位置計測システムで有効な手法といえる．

提案したアルゴリズムのもとで数値実験を行った結果，多点に電極を貼ることにより，ドリフトやノイズの影響が低減できることを示すことができた．電極を多点に貼る場合，どの電極の配置でより高精度の眼球位置計測を期待できるかも示すことができた．

これらの手法が適用され，多点に電極を貼るだけで視線方向を高精度で計測することができるようになれば，視線方向を計測する場合，負担が少なく，より自然な状態で視線方向を計測することができるようになる．更なる応用として，多点電極により計測した眼位を無線で飛ばし，データを処理することにより，被験者が計測機器に拘束されることなく，より自由度の高い条件での眼球位置計測ができることが考えられる．

今回の手法では，片眼が他眼に及ぼす電位の影響（クロストーク）は考えなかった．微小ではあるが，クロストークを考えることで今後より精度が高い眼球位置計測を期待する．

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導，ご助言を下された阪口豊助教授に心から感謝の意を表します。同様に，出澤正徳教授，石田文彦助手，島井博行助手，吉野大輔研究員に心から感謝の意を表します。ならびに，ゼミ発表などでご意見や激励を下されたヒューマンインターフェース学講座の学生，研究生，昨年度の修了生，職員の皆様方に深く感謝いたします。そして，本年度修了生の同期の皆様，ともにすごした日々の生活は刺激があり，研究に楽しく取り組むことができました。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 古賀一男, 眼球運動実験・ミニハンドブック, (財) 労働科学研究所出版部, 1998.
- [2] 大野健彦, 視線から何がわかるかー視線計測に基づく高次認知処理の解明, *Cognitive Studies*, Dec.2002,9(4),565-579.
- [3] 淀川英司, 東倉洋一, 中根一成, 視聴覚の認知科学, コロナ社, 1998.
- [4] 小松崎篤, 篠田義一, 丸尾敏夫, 眼球運動の神経学, 医学書院, 1985.
- [5] 本田仁視 著, 眼球運動と空間定位, 風間書房, 1994.
- [6] 下田宏, 視覚系の整理指標(1) ～眼球運動～  
<http://hydro.energy.kyoto-u.ac.jp/Lab/staff/shimoda/lecture2003/mms/eye1.pdf>
- [7] 齊田真也, 各種眼球運動測定方式の比較, *VISION*, 3, 95-100, 1991
- [8] 伊月信之, 久保賢倫, 白石学, 西川偉一, 三村康男, 眼球常時電位解析のための眼球の電池モデル, *日本眼科学会雑誌*, Vol.99, pp.1012-1016, 1995
- [9] 伊月宣之, 四宮加容, 久保賢倫, 片上健太, 山田正史, 久保弥栄子, 塩田洋, 眼球電池モデルを適用した眼球電図の特性解析, 2005

## 付録

### 1 電極位置の設定条件

単位は mm である.

配置条件	電極位置 A	電極位置 B	電極位置 C
1	(12, -30, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 15)
2	(12, -30, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 10)
3	(12, -30, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 5)
4	(12, -30, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 0)
5	(12, -30, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 15)
6	(12, -30, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 10)
7	(12, -30, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 5)
8	(12, -30, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 0)
9	(12, -15, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 15)
1 0	(12, -15, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 10)
1 1	(12, -15, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 5)
1 2	(12, -15, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 0)
1 3	(12, -15, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 15)
1 4	(12, -15, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 10)
1 5	(12, -15, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 5)
1 6	(12, -15, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 0)
1 7	(12, -10, -15)	(12, 0, -15)	(12, 10, -15)
1 8	(12, -10, -20)	(12, 0, -20)	(12, 10, -20)
1 9	(12, -20, -15)	(12, 0, -15)	(12, 20, -15)
2 0	(12, -20, -20)	(12, 0, -20)	(12, 20, -20)
2 1	(12, -30, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)
2 2	(12, -30, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)
2 3	(12, -20, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)
2 4	(12, -20, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)
2 5	(12, -10, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)
2 6	(12, -10, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)

表 4-1. 3 電極の場合 I

配置条件	電極位置 A	電極位置 B	電極位置 C
1	(11, -30, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 15)
2	(11, -30, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 10)
3	(11, -30, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 5)
4	(11, -30, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 0)
5	(11, -30, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 15)
6	(11, -30, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 10)
7	(11, -30, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 5)
8	(11, -30, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 0)
9	(11, -15, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 15)
1 0	(11, -15, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 10)
1 1	(11, -15, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 5)
1 2	(11, -15, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 0)
1 3	(11, -15, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 15)
1 4	(11, -15, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 10)
1 5	(11, -15, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 5)
1 6	(11, -15, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 0)
1 7	(11, -10, -15)	(11, 0, -15)	(11, 10, -15)
1 8	(11, -10, -20)	(11, 0, -20)	(11, 10, -20)
1 9	(11, -20, -15)	(11, 0, -15)	(11, 20, -15)
2 0	(11, -20, -20)	(11, 0, -20)	(11, 20, -20)
2 1	(11, -30, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)
2 2	(11, -30, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)
2 3	(11, -20, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)
2 4	(11, -20, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)
2 5	(11, -10, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)
2 6	(11, -10, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)

表 4-2. 3 電極の場合 II

配置条件	電極位置A	電極位置B	電極位置C	電極位置D
1	(12, -7.5, -15)	(12, -2.5, -15)	(12, 2.5, -15)	(12, 7.5, -15)
2	(12, -7.5, -20)	(12, -2.5, -20)	(12, 2.5, -20)	(12, 7.5, -20)
3	(12, -22.5, -15)	(12, -7.5, -15)	(12, 7.5, -15)	(12, 22.5, -15)
4	(12, -22.5, -20)	(12, -7.5, -20)	(12, 7.5, -20)	(12, 22.5, -20)
5	(12, -15, -15)	(12, -5, -15)	(12, 5, -15)	(12, 15, -15)
6	(12, -15, -20)	(12, -5, -20)	(12, 5, -20)	(12, 15, -20)
7	(12, -30, -15)	(12, -10, -15)	(12, 10, -15)	(12, 30, -15)
8	(12, -30, -20)	(12, -10, -20)	(12, 10, -20)	(12, 30, -20)
9	(12, -30, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 15)
1 0	(12, -30, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 10)
1 1	(12, -30, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 0)
1 2	(12, -30, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 15)
1 3	(12, -30, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 10)
1 4	(12, -30, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 0)
1 5	(12, -15, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 15)
1 6	(12, -15, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 10)
1 7	(12, -15, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 0)
1 8	(12, -15, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 15)
1 9	(12, -15, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 10)
2 0	(12, -15, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 0)
2 1	(12, -15, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 5)
2 2	(12, -15, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 5)
2 3	(12, -30, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 5)
2 4	(12, -30, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 5)

表4-3. 4電極の場合I

配置条件	電極位置A	電極位置B	電極位置C	電極位置D
1	(11, -7.5, -15)	(11, -2.5, -15)	(11, 2.5, -15)	(11, 7.5, -15)
2	(11, -7.5, -20)	(11, -2.5, -20)	(11, 2.5, -20)	(11, 7.5, -20)
3	(11, -22.5, -15)	(11, -7.5, -15)	(11, 7.5, -15)	(11, 22.5, -15)
4	(11, -22.5, -20)	(11, -7.5, -20)	(11, 7.5, -20)	(11, 22.5, -20)
5	(11, -15, -15)	(11, -5, -15)	(11, 5, -15)	(11, 15, -15)
6	(11, -15, -20)	(11, -5, -20)	(11, 5, -20)	(11, 15, -20)
7	(11, -30, -15)	(11, -10, -15)	(11, 10, -15)	(11, 30, -15)
8	(11, -30, -20)	(11, -10, -20)	(11, 10, -20)	(11, 30, -20)
9	(11, -30, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 15)
1 0	(11, -30, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 10)
1 1	(11, -30, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 0)
1 2	(11, -30, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 15)
1 3	(11, -30, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 10)
1 4	(11, -30, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 0)
1 5	(11, -15, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 15)
1 6	(11, -15, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 10)
1 7	(11, -15, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 0)
1 8	(11, -15, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 15)
1 9	(11, -15, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 10)
2 0	(11, -15, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 0)
2 1	(11, -15, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 5)
2 2	(11, -15, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 5)
2 3	(11, -30, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 5)
2 4	(11, -30, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 5)

表 4-4. 4電極の場合Ⅱ

配置条件	電極位置A	電極位置B	電極位置C	電極位置D	電極位置E
1	(12, -30, -15)	(12, -15, -15)	(12, 0, -15)	(12, 15, -15)	(12, 30, -15)
2	(12, -30, -20)	(12, -15, -20)	(12, 0, -20)	(12, 15, -20)	(12, 30, -20)
3	(12, -20, -15)	(12, -10, -15)	(12, 0, -15)	(12, 10, -15)	(12, 20, -15)
4	(12, -20, -20)	(12, -10, -20)	(12, 0, -20)	(12, 10, -20)	(12, 20, -20)
5	(12, -10, -15)	(12, -5, -15)	(12, 0, -15)	(12, 5, -15)	(12, 10, -15)
6	(12, -10, -20)	(12, -5, -20)	(12, 0, -20)	(12, 5, -20)	(12, 10, -20)
7	(12, -30, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 0)	(12, 30, 15)
8	(12, -30, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 0)	(12, 30, 20)
9	(12, -30, -15)	(12, 0, -15)	(12, 30, -15)	(12, 30, 0)	(12, 30, 20)
10	(12, -30, -20)	(12, 0, -20)	(12, 30, -20)	(12, 30, 0)	(12, 30, 15)

表4-5. 5電極の場合I

配置条件	電極位置A	電極位置B	電極位置C	電極位置D	電極位置E
1	(11, -30, -15)	(11, -15, -15)	(11, 0, -15)	(11, 15, -15)	(11, 30, -15)
2	(11, -30, -20)	(11, -15, -20)	(11, 0, -20)	(11, 15, -20)	(11, 30, -20)
3	(11, -20, -15)	(11, -10, -15)	(11, 0, -15)	(11, 10, -15)	(11, 20, -15)
4	(11, -20, -20)	(11, -10, -20)	(11, 0, -20)	(11, 10, -20)	(11, 20, -20)
5	(11, -10, -15)	(11, -5, -15)	(11, 0, -15)	(11, 5, -15)	(11, 10, -15)
6	(11, -10, -20)	(11, -5, -20)	(11, 0, -20)	(11, 5, -20)	(11, 10, -20)
7	(11, -30, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 0)	(11, 30, 15)
8	(11, -30, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 0)	(11, 30, 20)
9	(11, -30, -15)	(11, 0, -15)	(11, 30, -15)	(11, 30, 0)	(11, 30, 20)
10	(11, -30, -20)	(11, 0, -20)	(11, 30, -20)	(11, 30, 0)	(11, 30, 15)

表4-6. 5電極の場合II



## 1-1 視線方向推定データ

以下の表は表4-1から表4-6のパターンのもとで視線方向を推定したときのデータである。表の値は左から、

電極の配置条件  $\theta$  絶対誤差平均値  $\theta$  絶対誤差最小値  $\theta$  絶対誤差最大値  
 $\xi$  絶対誤差平均値  $\xi$  絶対誤差最小値  $\xi$  絶対誤差最大値

の順で書かれている。

表4-1のもとで行った視線方向推定データ

標準偏差 0.1mV

1	1.07	0.00	4.20	1.56	0.00	7.20
2	1.01	0.00	4.60	1.94	0.00	8.50
3	0.99	0.00	3.80	2.27	0.00	9.40
4	0.99	0.00	3.60	3.03	0.00	10.50
5	0.90	0.00	3.60	1.55	0.00	6.10
6	0.90	0.00	3.40	1.91	0.00	8.00
7	0.82	0.00	3.20	2.28	0.00	10.10
8	0.85	0.00	3.40	3.15	0.00	11.00
9	1.52	0.00	7.40	1.73	0.00	6.80
10	1.76	0.00	8.00	2.20	0.00	9.00
11	2.00	0.00	9.60	2.86	0.00	10.00
12	2.41	0.00	8.60	3.93	0.00	11.00
13	1.20	0.00	5.00	1.58	0.00	5.90
14	1.37	0.00	6.60	1.97	0.00	8.70
15	1.60	0.00	6.40	2.63	0.00	10.40
16	2.10	0.00	9.00	3.75	0.00	11.00
17	0.57	0.00	2.60	0.99	0.00	3.70
18	0.98	0.00	4.00	2.16	0.00	7.10
19	0.58	0.00	2.80	0.54	0.00	2.00
20	0.84	0.00	3.20	0.96	0.00	4.00

21	0.90	0.00	4.80	0.47	0.00	3.40
22	1.04	0.00	4.00	0.74	0.00	3.50
23	0.76	0.00	2.80	0.48	0.00	2.30
24	0.98	0.00	3.40	0.80	0.00	3.60
25	0.74	0.00	3.00	0.54	0.00	2.40
26	1.33	0.00	4.60	1.14	0.00	5.20

標準偏差 $\sqrt{0.001}$  mV

1	0.098413	0.000000	0.400000	0.185714	0.000000	0.800000
2	0.106576	0.000000	0.600000	0.211111	0.000000	0.800000
3	0.100680	0.000000	0.400000	0.287075	0.000000	1.100000
4	0.101587	0.000000	0.600000	0.407256	0.000000	1.400000
5	0.079819	0.000000	0.400000	0.188889	0.000000	0.700000
6	0.074830	0.000000	0.400000	0.202268	0.000000	0.800000
7	0.077098	0.000000	0.400000	0.280045	0.000000	1.500000
8	0.075737	0.000000	0.400000	0.403401	0.000000	2.000000
9	0.160091	0.000000	0.600000	0.198866	0.000000	0.800000
10	0.194104	0.000000	0.800000	0.249887	0.000000	1.100000
11	0.250794	0.000000	1.200000	0.382313	0.000000	1.300000
12	0.399546	0.000000	2.400000	0.665986	0.000000	3.100000
13	0.117914	0.000000	0.600000	0.175283	0.000000	0.700000
14	0.143311	0.000000	0.800000	0.222222	0.000000	1.000000
15	0.197732	0.000000	1.200000	0.328798	0.000000	1.500000
16	0.286168	0.000000	1.800000	0.518367	0.000000	2.900000
17	0.034014	0.000000	0.400000	0.095011	0.000000	0.500000
18	0.099773	0.000000	0.400000	0.241950	0.000000	1.100000
19	0.030839	0.000000	0.400000	0.052608	0.000000	0.200000
20	0.066213	0.000000	0.200000	0.099546	0.000000	0.400000
21	0.078458	0.000000	0.400000	0.041723	0.000000	0.300000
22	0.105215	0.000000	0.400000	0.077778	0.000000	0.300000
23	0.060771	0.000000	0.200000	0.042404	0.000000	0.200000
24	0.087982	0.000000	0.400000	0.087075	0.000000	0.300000
25	0.051247	0.000000	0.200000	0.049887	0.000000	0.300000
26	0.115646	0.000000	0.600000	0.108844	0.000000	0.400000

標準偏差 0.01mV

1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000454	0.000000	0.100000
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000680	0.000000	0.100000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.004762	0.000000	0.100000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.014059	0.000000	0.100000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.001134	0.000000	0.100000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.002721	0.000000	0.100000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.006803	0.000000	0.100000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.017234	0.000000	0.100000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.001361	0.000000	0.200000	0.001814	0.000000	0.300000
12	0.012245	0.000000	0.400000	0.018367	0.000000	0.500000
13	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	0.001814	0.000000	0.200000	0.002721	0.000000	0.300000
17	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	0.000000	0.000000	0.000000	0.008163	0.000000	0.100000
19	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
21	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
22	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
23	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
25	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
26	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

表 4-2 のもとで行った視線計測データ

標準偏差 0.1mV

1	1.07	0.00	4.20	1.56	0.00	7.20
2	1.01	0.00	4.60	1.94	0.00	8.50

3	0.99	0.00	3.80	2.27	0.00	9.40
4	0.99	0.00	3.60	3.03	0.00	10.50
5	0.90	0.00	3.60	1.55	0.00	6.10
6	0.90	0.00	3.40	1.91	0.00	8.00
7	0.82	0.00	3.20	2.28	0.00	10.10
8	0.85	0.00	3.40	3.15	0.00	11.00
9	1.52	0.00	7.40	1.73	0.00	6.80
10	1.76	0.00	8.00	2.20	0.00	9.00
11	2.00	0.00	9.60	2.86	0.00	10.00
12	2.41	0.00	8.60	3.93	0.00	11.00
13	1.20	0.00	5.00	1.58	0.00	5.90
14	1.37	0.00	6.60	1.97	0.00	8.70
15	1.60	0.00	6.40	2.63	0.00	10.40
16	2.10	0.00	9.00	3.75	0.00	11.00
17	0.57	0.00	2.60	0.99	0.00	3.70
18	0.98	0.00	4.00	2.16	0.00	7.10
19	0.58	0.00	2.80	0.54	0.00	2.00
20	0.84	0.00	3.20	0.96	0.00	4.00
21	0.90	0.00	4.80	0.47	0.00	3.40
22	1.04	0.00	4.00	0.74	0.00	3.50
23	0.76	0.00	2.80	0.48	0.00	2.30
24	0.98	0.00	3.40	0.80	0.00	3.60
25	0.74	0.00	3.00	0.54	0.00	2.40
26	1.33	0.00	4.60	1.14	0.00	5.20

表4-3のもとで行った視線計測データ

標準偏差 0.1mV

1	0.66	0.00	3.20	1.29	0.00	5.90
2	1.22	0.00	5.40	2.91	0.00	9.80
3	0.41	0.00	2.00	0.59	0.00	2.20
4	0.68	0.00	2.80	0.98	0.00	3.40
5	0.46	0.00	1.80	0.66	0.00	2.40
6	0.75	0.00	3.60	1.34	0.00	6.40

7	0.46	0.00	2.20	0.57	0.00	2.40
8	0.69	0.00	3.40	0.87	0.00	2.80
9	0.79	0.00	2.80	0.40	0.00	1.60
10	0.79	0.00	3.00	0.41	0.00	2.20
11	0.69	0.00	2.80	0.43	0.00	1.80
12	0.94	0.00	4.60	0.65	0.00	2.80
13	0.86	0.00	3.20	0.64	0.00	2.70
14	0.79	0.00	3.40	0.69	0.00	2.90
15	0.68	0.00	3.20	0.44	0.00	2.00
16	0.67	0.00	2.80	0.44	0.00	1.70
17	0.63	0.00	2.80	0.46	0.00	2.10
18	1.00	0.00	3.80	0.73	0.00	2.70
19	0.91	0.00	3.80	0.77	0.00	2.70
20	0.90	0.00	3.20	0.87	0.00	4.20
21	0.61	0.00	2.40	0.43	0.00	2.10
22	0.97	0.00	3.40	0.80	0.00	3.40
23	0.74	0.00	2.40	0.41	0.00	1.70
24	0.82	0.00	3.60	0.66	0.00	2.40

標準偏差 $\sqrt{0.001}$  mV

1	0.048526	0.000000	0.200000	0.140816	0.000000	0.600000
2	0.121088	0.000000	0.600000	0.356689	0.000000	1.700000
3	0.013605	0.000000	0.200000	0.052381	0.000000	0.200000
4	0.051701	0.000000	0.200000	0.095465	0.000000	0.400000
5	0.009524	0.000000	0.200000	0.060771	0.000000	0.200000
6	0.064399	0.000000	0.400000	0.131746	0.000000	0.600000
7	0.018594	0.000000	0.200000	0.050794	0.000000	0.200000
8	0.049433	0.000000	0.200000	0.087075	0.000000	0.400000
9	0.063946	0.000000	0.400000	0.032200	0.000000	0.200000
10	0.053515	0.000000	0.400000	0.032200	0.000000	0.200000
11	0.058050	0.000000	0.400000	0.034014	0.000000	0.200000
12	0.085714	0.000000	0.400000	0.058503	0.000000	0.200000
13	0.073923	0.000000	0.400000	0.062132	0.000000	0.300000
14	0.063946	0.000000	0.400000	0.066213	0.000000	0.200000
15	0.043991	0.000000	0.200000	0.036735	0.000000	0.200000



表 4-4 のもとで行った視線計測データ

標準偏差 0.1mV

1	0.69	0.00	2.40	1.37	0.00	5.50
2	1.20	0.00	5.40	2.95	0.00	11.00
3	0.46	0.00	2.00	0.55	0.00	2.20
4	0.73	0.00	2.20	0.92	0.00	4.20
5	0.45	0.00	2.80	0.63	0.00	2.60
6	0.78	0.00	3.60	1.27	0.00	6.10
7	0.46	0.00	2.00	0.59	0.00	2.20
8	0.67	0.00	2.60	0.87	0.00	3.70
9	0.75	0.00	3.20	0.38	0.00	1.30
10	0.77	0.00	3.20	0.40	0.00	1.30
11	0.73	0.00	2.60	0.43	0.00	1.60
12	0.93	0.00	4.00	0.60	0.00	2.60
13	0.82	0.00	3.60	0.63	0.00	2.60
14	0.83	0.00	3.20	0.68	0.00	3.40
15	0.66	0.00	2.40	0.43	0.00	1.70
16	0.64	0.00	2.80	0.42	0.00	1.60
17	0.57	0.00	2.00	0.45	0.00	1.80
18	0.96	0.00	4.00	0.73	0.00	2.60
19	0.96	0.00	4.20	0.75	0.00	3.00
20	0.87	0.00	4.40	0.87	0.00	3.70
21	0.59	0.00	2.20	0.46	0.00	1.70
22	0.91	0.00	3.80	0.80	0.00	3.00
23	0.72	0.00	2.80	0.40	0.00	1.90
24	0.81	0.00	3.80	0.67	0.00	2.70

表 4-5 のもとで行った視線方向推定データ

標準偏差 0.1mV

1	0.50	0.00	2.00	0.51	0.00	1.70
2	0.74	0.00	2.60	0.91	0.00	4.00
3	0.50	0.00	2.00	0.62	0.00	2.70

4	0.91	0.00	5.20	1.22	0.00	4.80
5	0.84	0.00	5.00	1.38	0.00	5.00
6	1.47	0.00	6.80	2.78	0.00	11.00
7	0.67	0.00	2.60	0.42	0.00	1.50
8	0.81	0.00	2.80	0.68	0.00	3.00
9	0.69	0.00	2.60	0.40	0.00	1.70
10	0.84	0.00	2.80	0.69	0.00	2.60

標準偏差  $\sqrt{0.001}$  mV

1	0.027211	0.000000	0.200000	0.047619	0.000000	0.200000
2	0.058050	0.000000	0.200000	0.087755	0.000000	0.300000
3	0.026757	0.000000	0.200000	0.061905	0.000000	0.200000
4	0.073016	0.000000	0.400000	0.129252	0.000000	0.500000
5	0.064853	0.000000	0.600000	0.148073	0.000000	0.600000
6	0.141497	0.000000	0.800000	0.358277	0.000000	2.200000
7	0.055782	0.000000	0.400000	0.035828	0.000000	0.200000
8	0.075737	0.000000	0.200000	0.066893	0.000000	0.300000
9	0.061224	0.000000	0.200000	0.037415	0.000000	0.200000
10	0.064853	0.000000	0.400000	0.062358	0.000000	0.300000

標準偏差 0.1mV

1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.000000	0.000000	0.000000	0.012472	0.000000	0.100000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000



表 4-6 のもとで行った視線方向推定データ

標準偏差 0.1mV

1	0.50	0.00	2.20	0.49	0.00	1.70
2	0.76	0.00	3.00	0.95	0.00	3.60
3	0.50	0.00	2.40	0.63	0.00	2.60
4	0.81	0.00	3.80	1.23	0.00	4.70
5	0.77	0.00	4.60	1.23	0.00	4.50
6	1.43	0.00	6.40	2.78	0.00	10.50
7	0.66	0.00	3.20	0.42	0.00	1.50
8	0.82	0.00	3.00	0.75	0.00	2.50
9	0.68	0.00	2.60	0.42	0.00	1.50
10	0.78	0.00	3.60	0.72	0.00	2.50

## 1-2 電流密度，電極位置推定データ

以下の表は表4-1から表4-8のパターンのもとで視線方向を推定したときのデータである。表の値は左から、

電極の配置条件 x座標誤差平均値 y座標誤差平均値 z座標誤差平均値

電流密度誤差平均値

の順で書かれている

表4-1のもとで行った視線方向推定データ

標準偏差 0.1mV

1	0.610000	0.275000	0.365000	1.010000	0
2	0.480000	0.260000	0.605000	0.815000	0
3	0.545000	0.325000	0.385000	1.000000	0
4	0.500000	0.305000	0.570000	0.845000	0
5	0.480000	0.315000	0.435000	0.670000	0
6	0.660000	0.320000	0.405000	0.615000	0
7	0.475000	0.230000	0.520000	0.795000	0
8	0.505000	0.165000	0.500000	0.910000	0
9	0.550000	0.305000	0.325000	0.815000	0
10	0.415000	0.350000	0.370000	0.735000	0
11	0.570000	0.315000	0.535000	1.100000	0
12	0.375000	0.320000	0.375000	0.635000	0
13	0.485000	0.310000	0.310000	0.700000	0
14	0.700000	0.165000	0.320000	0.620000	0
15	0.475000	0.295000	0.455000	0.770000	0
16	0.470000	0.310000	0.535000	0.880000	0
17	0.505000	0.080000	0.230000	0.880000	0
18	0.375000	0.200000	0.355000	0.720000	0
19	0.420000	0.115000	0.290000	0.945000	0
20	0.430000	0.220000	0.285000	0.725000	0

21 0.515000 0.175000 0.360000 1.175000 0  
22 0.470000 0.360000 0.360000 1.035000 0  
23 0.405000 0.140000 0.270000 0.910000 0  
24 0.520000 0.235000 0.395000 1.175000 0  
25 0.510000 0.150000 0.300000 0.830000 0  
26 0.435000 0.265000 0.370000 0.870000 0

標準偏差  $\sqrt{0.001}$  mV

1 0.415000 0.015000 0.055000 0.225000  
2 0.380000 0.015000 0.135000 0.175000  
3 0.300000 0.020000 0.125000 0.130000  
4 0.240000 0.020000 0.155000 0.085000  
5 0.520000 0.010000 0.035000 0.225000  
6 0.455000 0.005000 0.075000 0.200000  
7 0.325000 0.000000 0.100000 0.120000  
8 0.470000 0.000000 0.220000 0.090000  
9 0.285000 0.140000 0.100000 0.105000  
10 0.295000 0.170000 0.165000 0.095000  
11 0.210000 0.145000 0.185000 0.230000  
12 0.190000 0.145000 0.235000 0.265000  
13 0.375000 0.135000 0.050000 0.115000  
14 0.350000 0.150000 0.065000 0.080000  
15 0.240000 0.105000 0.120000 0.095000  
16 0.250000 0.100000 0.120000 0.150000  
17 0.425000 0.000000 0.205000 0.815000  
18 0.460000 0.000000 0.295000 0.925000  
19 0.220000 0.000000 0.075000 0.225000  
20 0.365000 0.000000 0.235000 0.560000  
21 0.195000 0.000000 0.100000 0.245000  
22 0.335000 0.005000 0.210000 0.410000  
23 0.090000 0.005000 0.035000 0.110000  
24 0.255000 0.025000 0.170000 0.330000  
25 0.095000 0.005000 0.045000 0.180000  
26 0.200000 0.020000 0.120000 0.295000

標準偏差 0.01mV

1	0.005000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.600000	0.000000	0.000000	0.230000
6	0.005000	0.000000	0.000000	0.000000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.010000	0.000000	0.005000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	0.050000	0.000000	0.040000	0.120000
19	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
21	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
22	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
23	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
24	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
25	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
26	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

表4-3のもとで行った視線方向推定データ

標準偏差 0.1mV

1	0.525000	0.070000	0.305000	1.115000
2	0.565000	0.180000	0.385000	1.230000

3	0.385000	0.060000	0.265000	0.715000
4	0.590000	0.120000	0.375000	0.940000
5	0.385000	0.055000	0.250000	0.935000
6	0.585000	0.140000	0.370000	1.030000
7	0.340000	0.060000	0.365000	0.910000
8	0.465000	0.145000	0.380000	0.885000
9	0.610000	0.210000	0.335000	1.015000
10	0.495000	0.165000	0.245000	0.815000
11	0.495000	0.225000	0.255000	0.730000
12	0.420000	0.255000	0.280000	0.730000
13	0.460000	0.360000	0.330000	1.030000
14	0.510000	0.265000	0.290000	0.860000
15	0.445000	0.135000	0.225000	0.740000
16	0.520000	0.110000	0.260000	0.760000
17	0.440000	0.135000	0.245000	0.790000
18	0.510000	0.175000	0.285000	0.875000
19	0.455000	0.225000	0.250000	0.775000
20	0.475000	0.235000	0.330000	0.820000
21	0.355000	0.105000	0.205000	0.720000
22	0.345000	0.170000	0.305000	0.975000
23	0.470000	0.140000	0.180000	0.755000
24	0.465000	0.245000	0.290000	0.830000

標準偏差  $\sqrt{0.001}$  mV

1	0.260000	0.000000	0.120000	0.510000
2	0.380000	0.000000	0.235000	0.780000
3	0.075000	0.000000	0.055000	0.150000
4	0.150000	0.000000	0.115000	0.290000
5	0.150000	0.000000	0.100000	0.345000
6	0.220000	0.000000	0.225000	0.670000
7	0.055000	0.000000	0.055000	0.165000
8	0.110000	0.000000	0.125000	0.300000
9	0.090000	0.005000	0.030000	0.100000
10	0.175000	0.000000	0.035000	0.090000
11	0.090000	0.000000	0.025000	0.090000

12	0.125000	0.015000	0.045000	0.125000
13	0.145000	0.035000	0.040000	0.115000
14	0.100000	0.030000	0.035000	0.130000
15	0.075000	0.000000	0.010000	0.055000
16	0.065000	0.000000	0.010000	0.050000
17	0.100000	0.000000	0.020000	0.105000
18	0.135000	0.005000	0.035000	0.100000
19	0.085000	0.000000	0.015000	0.075000
20	0.070000	0.000000	0.025000	0.105000
21	0.060000	0.000000	0.000000	0.035000
22	0.090000	0.005000	0.015000	0.080000
23	0.135000	0.000000	0.025000	0.110000
24	0.150000	0.025000	0.020000	0.125000

標準偏差 0.01mV

1	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0.075000	0.000000	0.070000	0.230000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.010000	0.000000	0.010000	0.030000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
11	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
12	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
13	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
14	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
15	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
16	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
17	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
18	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
19	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
20	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

21 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000  
 22 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000  
 23 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000  
 24 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000

表 4-5 のもとで行った視線方向推定データ

標準偏差 0.1mV

1 0.470000 0.115000 0.290000 1.075000  
 2 0.460000 0.100000 0.325000 0.965000  
 3 0.480000 0.075000 0.235000 0.810000  
 4 0.545000 0.150000 0.375000 0.970000  
 5 0.505000 0.045000 0.265000 0.980000  
 6 0.400000 0.125000 0.260000 0.835000  
 7 0.485000 0.180000 0.200000 0.610000  
 8 0.445000 0.225000 0.350000 0.855000  
 9 0.540000 0.190000 0.255000 0.755000  
 10 0.465000 0.265000 0.310000 0.825000

標準偏差  $\sqrt{0.001}$  mV

1 0.050000 0.000000 0.005000 0.040000  
 2 0.090000 0.000000 0.065000 0.165000  
 3 0.085000 0.000000 0.040000 0.145000  
 4 0.165000 0.000000 0.150000 0.395000  
 5 0.170000 0.000000 0.095000 0.395000  
 6 0.405000 0.000000 0.280000 0.930000  
 7 0.100000 0.000000 0.015000 0.075000  
 8 0.105000 0.010000 0.030000 0.115000  
 9 0.115000 0.000000 0.015000 0.070000  
 10 0.160000 0.015000 0.035000 0.080000

標準偏差 0.01mV

1 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000

2	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.060000	0.000000	0.055000	0.165000
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
9	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
10	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000