

平成 17 年度 修士論文

センサ統合による  
適応型姿勢計測システムの構築

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

0451033 山崎 博貴

指導教員

阪口 豊

出澤 正徳

井上 誠喜

平成 18 年 1 月 31 日提出

# 第 1 章 序論

## 1.1 はじめに

近年、ヒューマンインターフェースをはじめ CG やユーザインターフェース、医療や福祉、スポーツ、セキュリティなどの様々な分野で人間の動作解析が盛んに行われている[1]。具体的には、ゲームや仮想環境、アニメーション、リモート制御などの制御機能としてのユーザインターフェース、運動選手の動作理解の支援などのモーションデータの分析、といった用途が挙げられる。

姿勢計測の手段には、古くは MLD(Moving Light Displays)と呼ばれるマーカを用いて人物の動作を計測[1][2]した研究がある。

その一例として、モーションキャプチャシステムを挙げる。これは、被写体の動作をデジタルデータに変換してコンピュータ内に取り込む手段である。モーションキャプチャシステムにも光学式、磁気式などがある。光学式は、スタジオの中で多数のマーカを装着した被写体を四方からカメラで撮影し、撮影したデータをコンピュータに取り込む方法である。磁気式は被験者の周りに磁場の空間を発生させ、被験者に装着した磁気センサで磁場の情報を読み取り、データを変換して解析するものである。このように姿勢計測はその用途に応じて様々なものがあり、それぞれに長所と短所がある。

本研究では、被写体側にセンサを装着する姿勢計測システムを考え、室内でも屋外でも使える姿勢計測システムの構築を目標としている。

## 1.2 提案する方法の特徴

センサにも加速度センサやジャイロセンサなど、目的や用途に応じて様々なものがある。本研究では磁気センサを用いた場合について考える。磁気センサと磁石の対を関節の付近に装着する。関節を動かすと磁気センサと磁気双極子の位置関係が変化し、それによってセンサ出力が変化する仕組みである。このようなシステムの場合、センサが被験者側にあるため重量的な負荷が少々あること、センサごとに電源を用意する必要があるといった短所が考えられる。しかし、装置の規模は小さく、室内だけでなく屋外でも計測でき、死角の問題がないといった長所も考えられる。

ちなみに、「センサ統合」とは複数のセンサを組み合わせることを示し、「適応型」というのは後ほど述べる推定のシステムがセンサの様々な装着位置に適応することを示している。

## 第2章 姿勢の推定

### 2.1 目的

提案したシステムを構築するには、センサ出力を用いて姿勢の推定を述べたが、センサ出力を求めるにはセンサ位置における磁気双極子が作り出す磁場の強さを求める必要がある。

### 2.2 磁場の求め方

ジョイントの位置を座標軸上での原点に、センサを装着したアームを初期状態として  $x$  軸上に置く。すると、センサの座標  $(x, y, z)$  は以下ようになる。

$$x = t \cos \theta_0 \cos \theta_1$$

$$y = t \sin \theta_0 \cos \theta_1$$

$$z = t \sin \theta_1$$

ただし、 $\theta_0$  はアームと  $x$  軸のなす角、 $t$  は  $\theta_0 = 0$  のときのセンサの  $x$  座標、 $\theta_1$  は  $x$  軸に対する  $z$  軸方向への角度である。

磁気双極子を原点としたときのセンサの座標  $(x_0, y_0, z_0)$  は以下ようになる。

$$x_0 = x - m_x$$

$$y_0 = y - m_y$$

$$z_0 = z - m_z$$

ただし、 $(m_x, m_y, m_z)$  は磁気双極子の座標とする。

$(m_x, m_y, m_z)$ にある磁気双極子が作る $(x_0, y_0, z_0)$ における磁束密度を成分ごとに書くと以下のようなになる。

$$B_x = k(a(3x_0^2 - R^2) + 3x_0(by_0 + cz_0)) / R^5$$

$$B_y = k(b(3y_0^2 - R^2) + 3y_0(cz_0 + ax_0)) / R^5$$

$$B_z = k(c(3z_0^2 - R^2) + 3z_0(ax_0 + by_0)) / R^5$$

ここで、 $(a, b, c)$ は磁気双極子モーメントの成分、 $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ 、 $k = \mu / 4\pi$ 、 $\mu$  = 真空の透磁率である。

求めた $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$ を使うと、センサ向きと磁場のなす角 $ang$ は以下の式で書くことができる。

$$ang = \vec{B} \cdot \vec{l} / (|\vec{B}| |\vec{l}|)$$

ただし、 $\vec{l} = (l_x, l_y, l_z)$ はセンサの方向ベクトルである。また、センサがx-y平面においてアームと垂直(以降、縦向きと呼ぶ)に装着されているときには

$$(l_x, l_y, l_z) = (-\sin \theta_0, \cos \theta_0, \sin \theta_2)$$

センサがx-y平面においてアームと平行(以降、横向きと呼ぶ)に装着されているときには

$$(l_x, l_y, l_z) = (-\cos \theta_0, -\sin \theta_0, \sin \theta_2)$$

である。ただし、 $\theta_2$ はx軸に対するz軸方向への角度である。次に、センサ方向の磁場の強さ $H$ を求めると

$$H = ang \times |\vec{B}| = \vec{B} \cdot \vec{l} = l_x B_x + l_y B_y + l_z B_z$$

ここで求めた  $H$  を、センサ特性のグラフを元に設定した式に代入してセンサ出力を求める。この設定した式については 4.1.1 で述べる。また、図 2.1 に上で設定した図を示す。

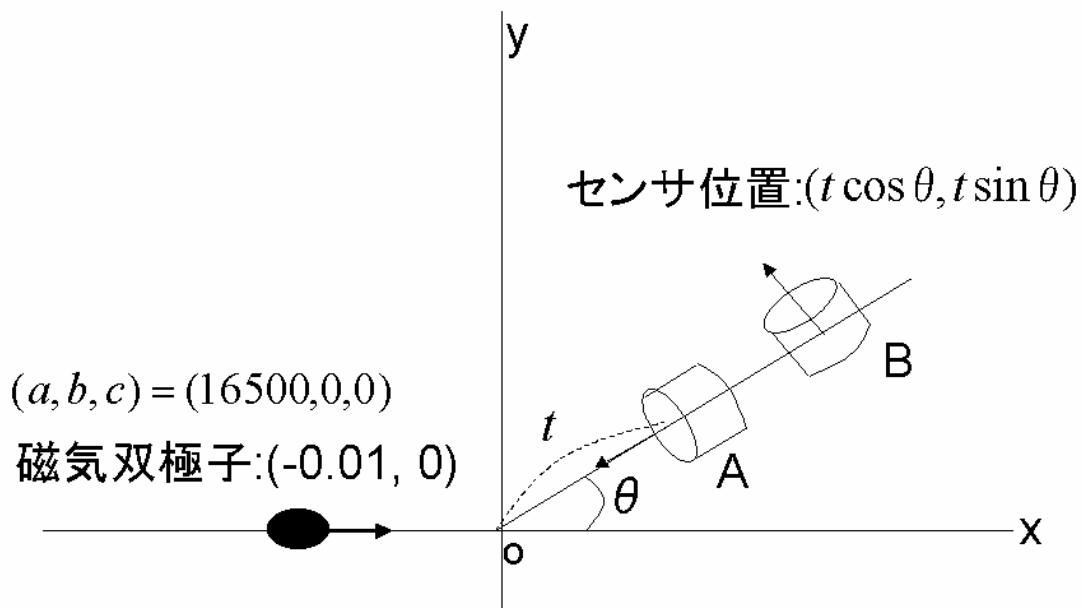


図 2.1 磁気双極子とセンサの設定

x-y 平面に限定している点については 3 章で述べる。

## 2.2.1 結果

2.2 において、

$$(m_x, m_y, m_z) = (-1, 0, 0)$$

$$t = 1.0, 2.0 \dots 5.0$$

$$(a, b, c) = (16500, 0, 0)$$

と設定したときの  $\theta$  とセンサ出力の関係を図 2.2.1 に示す。

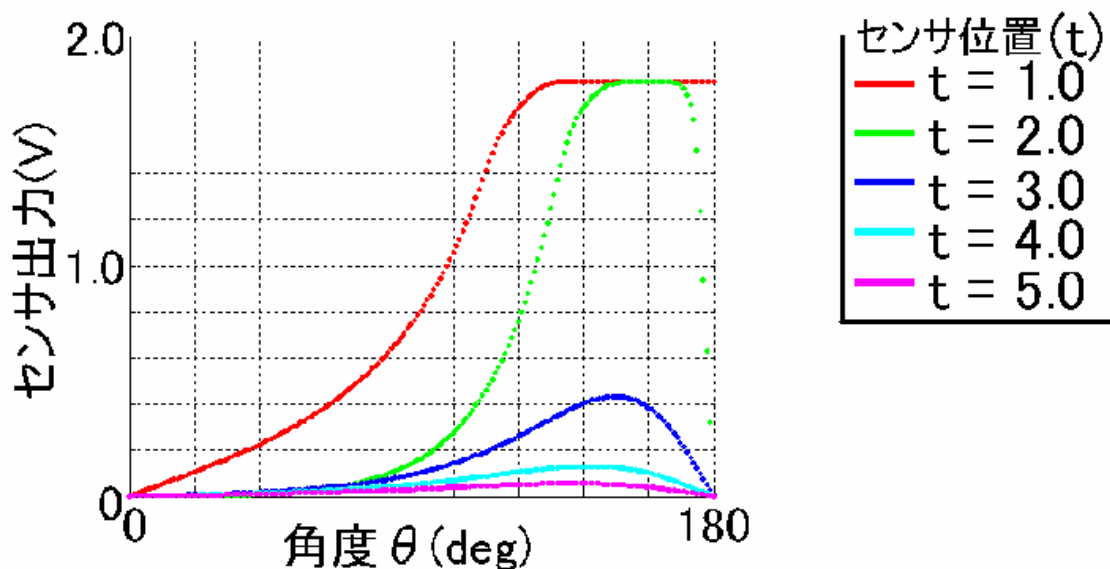


図 2.2.1  $\theta$  とセンサ出力の関係

図 2.2.1 はセンサを縦向きに装着し、右のようにセンサ距離を定めたときのセンサ出力と角度の関係である。このあと 3 章で数値実験を行うが、このグラフから  $t = 5.0$  のときにはどの  $\theta$  でもセンサ出力がこのあと設定するノイズに埋もれているので、この後の実験では  $t = 4.0$  以内で配置を考える。

## 2.3 アルゴリズム

2.2 よりセンサ位置における磁場の強さはセンサ位置と磁気双極子の位置と強さによって変わってくる。センサの位置は角度を使って表すことができるため、角度も関わってくる。しかし、実際にはセンサや磁気双極子の装着位置は不明である。人間の関節の位置が外見では判断がつかないためである。そのため、センサ出力から推定する必要がある。また、推定するものは以下のように分類できる。

- ①, 角度
- ②, センサの装着位置、磁気双極子の装着位置と強さ

①は姿勢が変わると変化する量、②は姿勢が変化しても基本的には変化しない量である。ここからは①、②、①と②の同時推定についての分別し、推定原理とその中身について述べる。

### 2.3.1 原理

- ①, 角度について

センサの装着位置と磁気双極子の装着位置とその強さはわかっているものとして、センサ出力の差を最小 2 乗法の原理(2 乗誤差が最小になるときの値を求める)に基づいて推定する。

- ②, センサの装着位置、磁気双極子の装着位置と強さ

関節の角度はわかっているものとして、センサ出力の差を最小 2 乗法の原理に基づいて推定する。

- ③, ①と②の同時推定

複数の関節角におけるセンサ出力を用いて EM アルゴリズム(最小 2 乗法の反復)に基づいて推定する。反復というのは①と②の推定を繰り返すことである。



## 2.3.2 角度の推定

センサの装着位置と磁気双極子の装着位置が既知であるとき、ジョイントの角度を最小 2 乗法を用いて推定することを考える。まず、以下のように定める。

$\theta_{(0,N)}$  : 仮想的に定めた(真の値)ジョイントの角度( $N = 1, 2, \dots$ )

$\theta_{(1,N)}$  : 求めるジョイントの角度( $N = 1, 2, \dots$ )

$m$  : 磁気双極子の装着位置

$t_x$  : センサ位置( $x = 1, 2, \dots$ )

$\theta_{(0,N)}$  におけるセンサ出力は  $m$  と  $t_x$  を使って求めることができる。これを

$$V_{(0,x,N)} = V(m, t_x, \theta_{(0,N)}) \quad (N = 1, 2, \dots, x = 1, 2, \dots)$$

とする。

求める角度を  $\theta_{(1,N)}$  とし、 $m$ ,  $t_x$  のときのセンサ出力を

$$V_{(1,x,N)} = V(m, t_x, \theta_{(1,N)}) \quad (N = 1, 2, \dots, x = 1, 2, \dots)$$

の関数とする。このとき

$$V_{(1,x,N)} - V_{(0,x,N)} = 0 \Rightarrow V_{(1,x,N)} = V_{(0,x,N)}$$

ならば、

$$\theta_{(0,N)} = \theta_{(1,N)} \quad (N = 1, 2, \dots)$$

と、なることが期待できる。そこで、

$$\begin{aligned} Err = & \{(V_{(1,1,1)} - V_{(0,1,1)})^2 + \dots + (V_{(1,1,N)} - V_{(0,1,N)})^2\} + \dots \\ & + \{(V_{(1,x,1)} - V_{(0,x,1)})^2 + \dots + (V_{(1,x,N)} - V_{(0,x,N)})^2\} \end{aligned}$$

$$(N = 1, 2, \dots, x = 1, 2, \dots)$$

とおく。  $Err$  が最小となるときは  $\theta_{(0,N)} = \theta_{(1,N)}$  となることが期待できる。

### 2.3.3 センサ位置、磁気双極子の位置と強さの同時推定

磁気双極子の位置とセンサ位置が未知のときに、最小 2 乗法を用いて推定することを考える。まず、以下のように定める。

$t_x$  : 仮想的に定めたセンサの装着位置 ( $x = 1, 2, \dots$ )

$t_y$  : 求めるセンサの装着位置 ( $y = 1, 2, \dots$ )

$m_0$  : 仮想的に定めた磁気双極子の装着位置と強さ

$m_1$  : 求める磁気双極子の装着位置と強さ

$\theta_N$  : ジョイントの角度 ( $N = 1, 2, \dots$ )

$t_x, m_0, \theta_N$  のときのセンサ出力は 2.2 から求める事ができる。これを

$$V_{(0,x,N)} = V(t_x, m_0, \theta_N) \quad (N = 1, 2, \dots, x = 1, 2, \dots)$$

とする。  $t_y, m_1, \theta_N$  のときのセンサ出力もやはり 2.2 から求める事ができる。

これを

$$V_{(1,y,N)} = V(t_y, m_1, \theta_N) \quad (N = 1, 2, \dots, y = 1, 2, \dots)$$

とする。そこで、

$$\begin{aligned}
Err = & \{(V_{(0,1,1)} - V_{(1,1,1)})^2 + \dots + (V_{(0,1,N)} - V_{(1,1,N)})^2\} + \dots + \\
& \{(V_{(0,x,1)} - V_{(1,y,1)})^2 + \dots + (V_{(0,x,N)} - V_{(1,y,N)})^2\} \\
& (N = 1,2,\dots, x = 1,2,\dots, y = 1,2,\dots)
\end{aligned}$$

とおき、この  $Err$  が最小になるときには  $(t_1, t_2 \dots t_x) = (t_1, t_2 \dots t_y)$ 、 $m_0 = m_1$  となることが期待できる。

### 2.3.4 角度、センサ位置、磁気双極子の位置と強さの同時推定

2.3.2 と 2.3.3 を繰り返し行う。具体的には

- ①, 2.3.2 において、センサ位置と磁気双極子の強さと位置に適当に値を設け、角度に真の値を設け、角度の推定を行う。
- ②, 2.3.3 において、①で推定した角度についてセンサ位置と磁気双極子の位置と強さに真の値を設け、これらの推定を行う。
- ③, ②で推定した値を①に用いて、再び角度の推定を行う。
- ④, ①から③の操作を繰り返し、センサ位置、磁気双極子の位置と強さ、角度が真の値に収束するか調べる。

## 第3章 数値実験

### 3.1 目的

本章では、第 2 章で述べたアルゴリズムの有効性について実際に数値実験で確認をした。これは、実測の実験に比べてノイズの設定が容易であることやハードウェアの設計の目安とすること、性能の予想をするためである。

### 3.2 条件の設定

これ以降、数値実験を行うにあたって以下のように設定する。

- ・磁気双極子について

1cm の位置に装着し、そのモーメントは(16500, 0, 0)

- ・センサについて

2.2.1 で定めた通り、4cm 以内で考える。

- ・ノイズについて

標準偏差 0.01(V)とする。

- ・センサの配置について

3.3、3.4 については図 3.2 のように設定する。

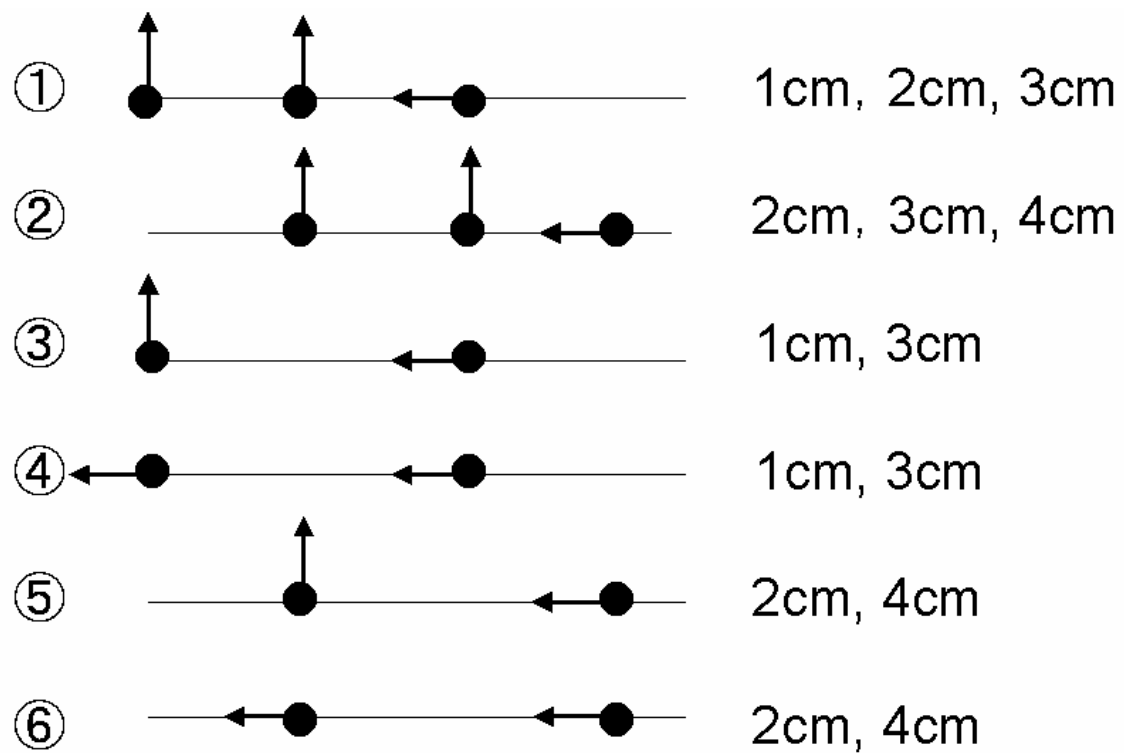


図 3.2 センサ配置について

図 3.2 はセンサ配置についてである。今回は①から⑥のように設定した。これ以外の配置についての結果は付録に掲載した。3.3、3.4 の棒グラフの横軸にある①から⑥はこれと対応している。

・ 自由度について

人間の関節は自由度が複数ある(ねじれの位置など)ので、いきなりこのようにするのは難しいので、今回は 1 自由度で考える。

### 3.3 角度の推定

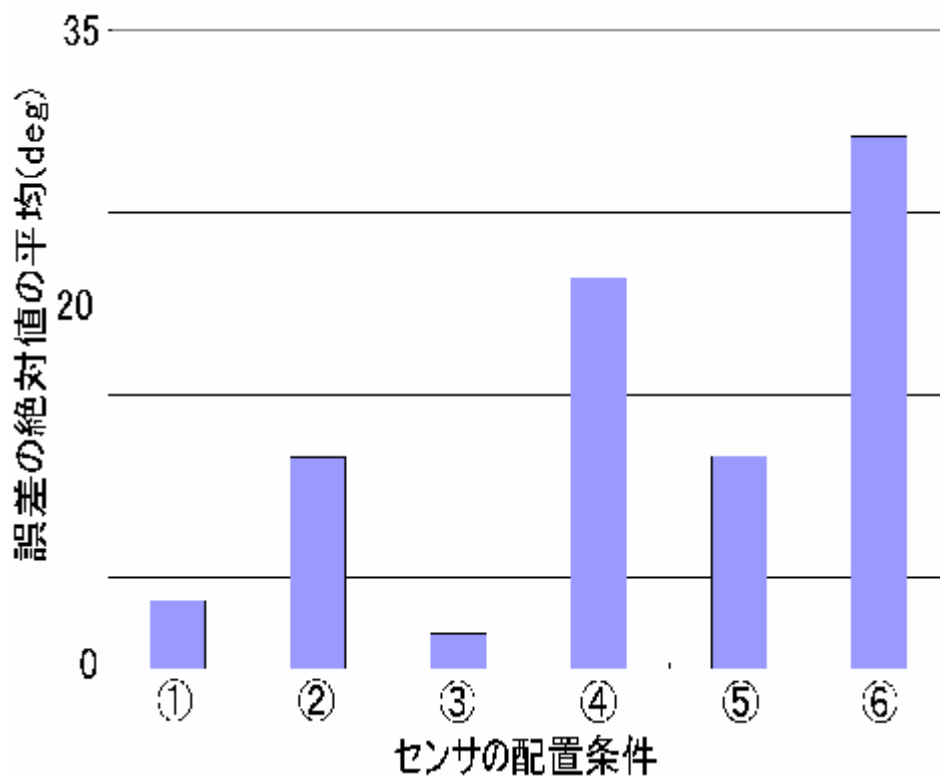


図 3.3 角度の絶対値の誤差について

図 3.3 は、角度の真の値を  $0^{\circ}$  から  $180^{\circ}$  まで  $5^{\circ}$  おきに設定し、それぞれについて 100 回調べその平均をとり真の値との絶対値の誤差をとり、さらにそれぞれの角度について得られた値を合計して平均をとり、角度 1 個についての誤差の絶対値の平均を求めた。

#### 3.3.1 結果

③のときの誤差が①や②に比べて値が小さくなっていることから、推定に用いるセンサの数は 2 個のときでも誤差約  $3^{\circ}$  の範囲で推定できていた。ただし、そのときは③と④を比べてわかるように、向きは互いに異なる向きにしたほう

が良いと思われる。

### 3.4 センサ位置、磁気双極子と強さの位置の同時推定

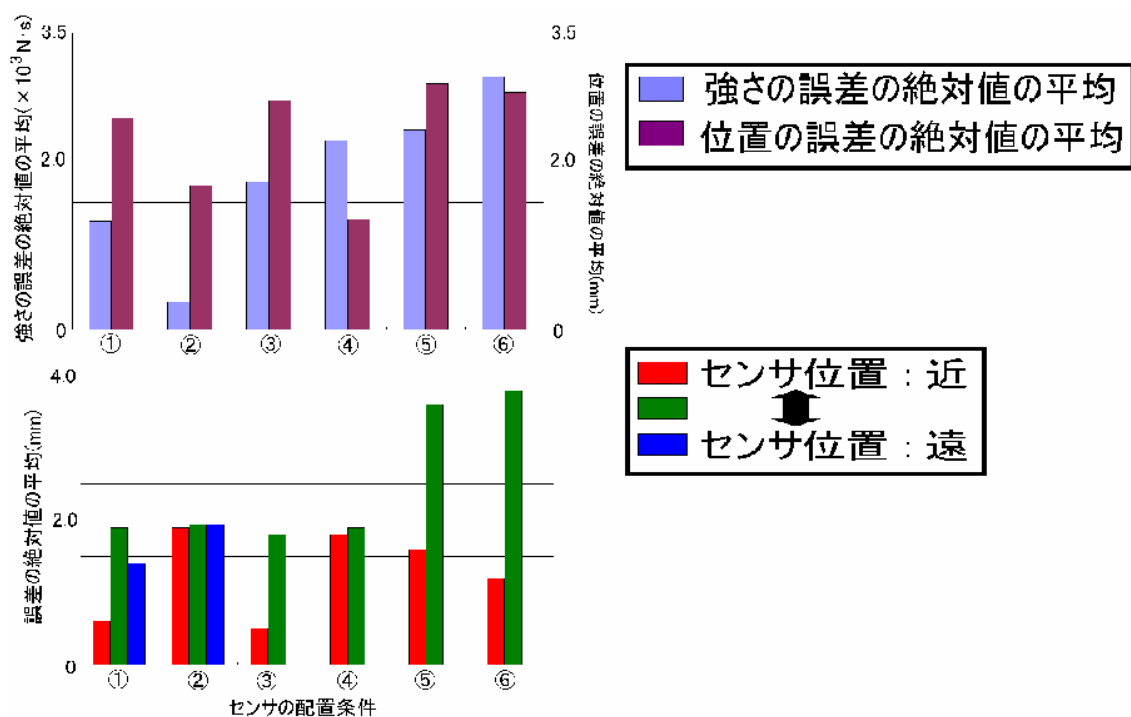


図 3.4 誤差の絶対値の平均について

図 3.4 の上のグラフは磁気双極子の位置と強さについて、下のグラフはセンサ位置について真の値と推定した値の誤差の絶対値の平均についてまとめたものである。センサ位置近とはジョイントから最も近い位置に装着したセンサのことである。

### 3.4.1 結果

いずれの場合も磁気双極子の強さは約 2~18%の範囲の誤差で、磁気双極子の位置は約 1.3~2.9mm の範囲で、センサの位置は約 0.5~3.5mm の誤差の範囲で推定できた。また、センサの装着位置が近いもののほうが遠いものに比べて誤差が小さかった。

### 3.5 角度、センサの位置と磁気双極子の位置と強さの同時推定

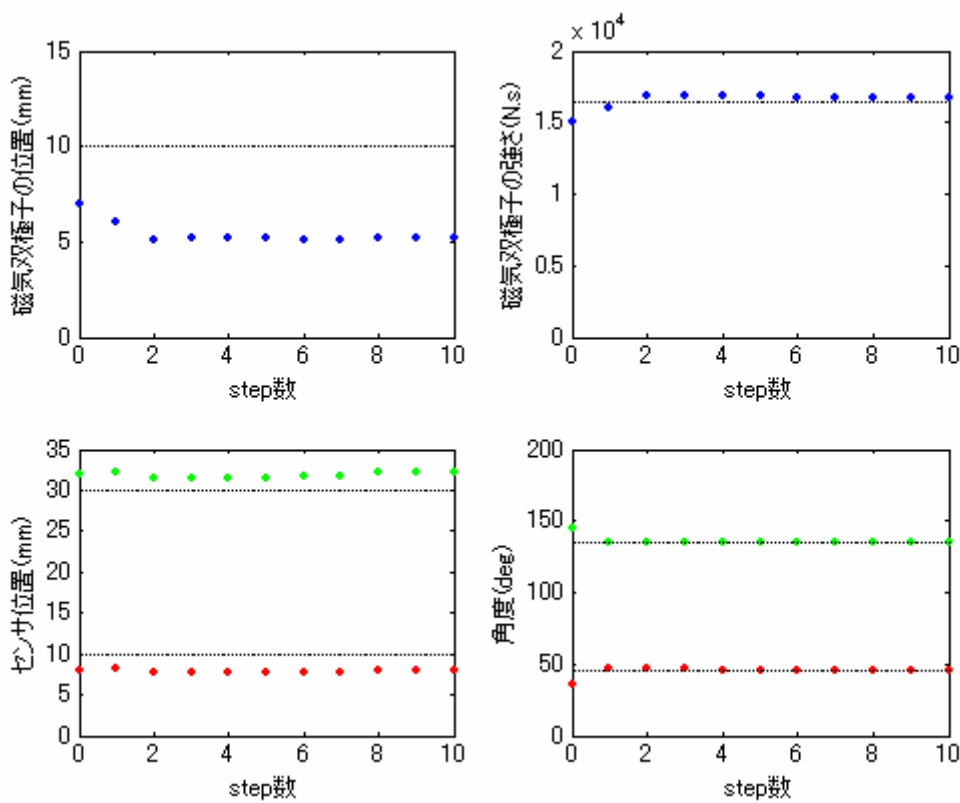


図 3.5.1 同時推定について(角度 2 個)



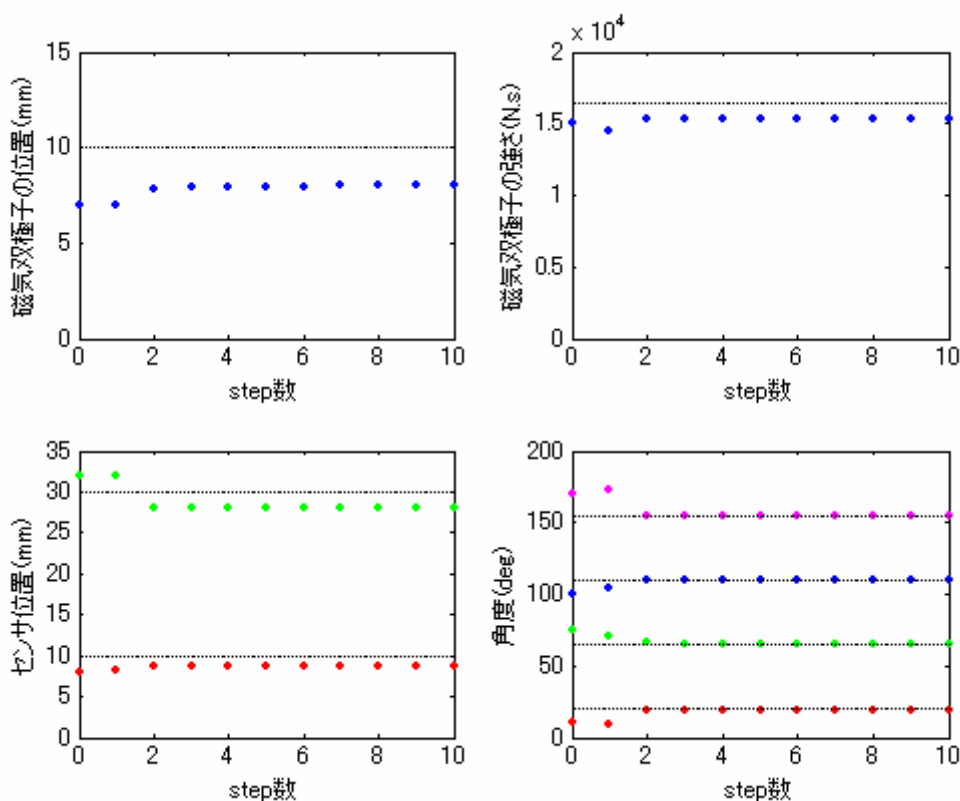


図 3.5.2 同時推定について(角度 4 個)

今回は 3.3 で最も誤差が小さくなった③のケースについて考える。図 3.5.1 と図 3.5.2 は同時推定についての結果をまとめたもので、グラフの黒線は真の値を示している。この黒線に収束することが理想である。図 3.5.1 は推定に用いた角度が 2 個、図 3.5.2 は角度を 4 個用いた場合である。

### 3.5.1 結果

図 3.5.1 ではセンサの装着位置、磁気双極子の位置と強さの推定においては、磁気双極子の位置が真の値から低く推定されても、センサの位置の推定においてその差を補って、その結果角度の推定値を真の値に近づけているといった結果が得られた。つまり、推定に用いた角度が少ない場合には真の値の組み合わせ

せ以外にも同じセンサ出力を生み出すことができるセンサ位置、磁気双極子の位置と強さの組み合わせが他にも多く存在する。図 3.5.2 のように角度の数を増やすことでこの組み合わせを減らして、真の値に近づけることができた。

## 第4章 評価実験

数値実験の結果を踏まえて、実際に磁気センサと磁気双極子を用いた実験で得られたデータを用いた場合でも同様のアルゴリズムで推定できるかについて調べた。

### 4.1 磁気センサ

本研究では、磁気センサとして **GMR** センサを用いる。**GMR** とは **Giant Magneto Resistance** のことで、巨大磁気抵抗効果を応用した磁気センサである。一般に **MR** 素子とは外部磁界の変動に応じて電気抵抗が変化する素子であるが、従来の **AMR**(**Anisotropic Magneto Resistance**)センサやホール効果センサと比べて出力が大きく、**AMR** センサのように強力な磁場によって反転することも、逆極性を出力することもない。

今回は **NVE** 社の **AAH002-02** を使用した。磁気センサのレイアウトは図 4.1 の通りである。センサの内部では磁気抵抗素子と通常の抵抗素子がホイートストンブリッジを構成している。センサにかかっている磁界が変化すると **GMR** 素子の値が変化して、それによって出力電圧も変化する仕組みである。

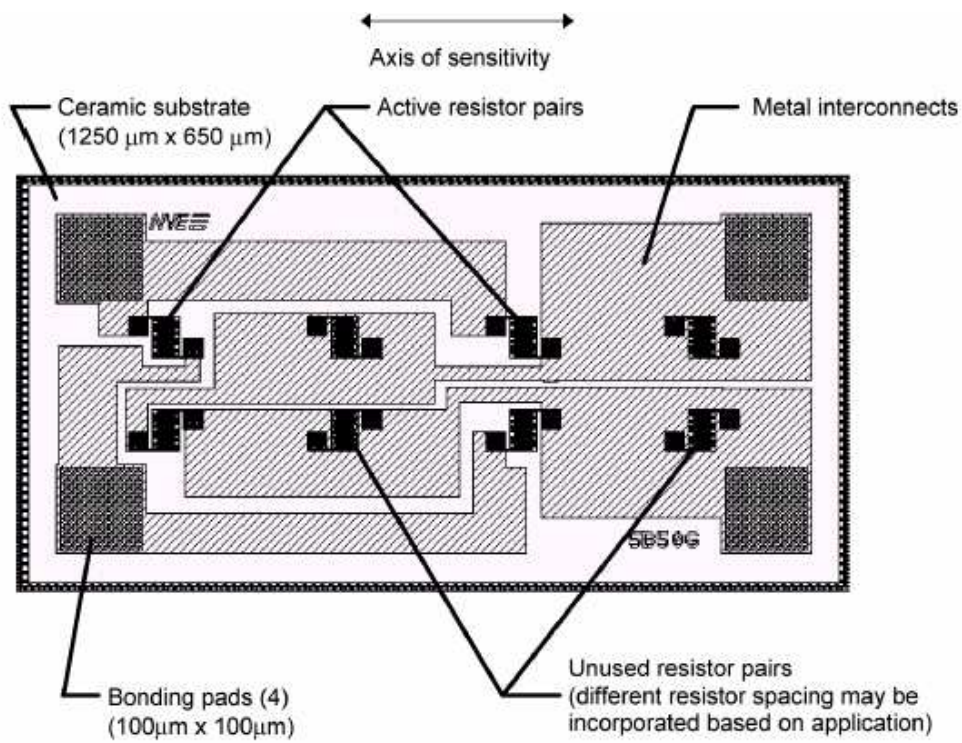


図 4.1 磁気センサのレイアウト

#### 4.1.1 センサの出力特性

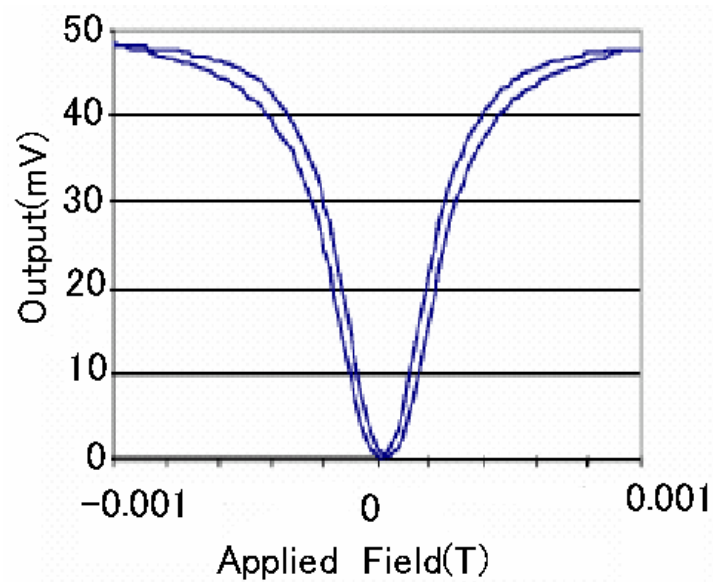


図 4.1.1 GMR センサの出力特性

出力特性は図 4.1.1 に示した通りである。横軸は磁界の強さ(T)、縦軸は出力電圧(V)である。一定の範囲では両者の関係は直線的であるが、頭打ちとなる範囲もある。

ここで図 4.1.1 のセンサ特性を元に、数値実験上での磁場とセンサ出力の関係を以下のように定める。

$-0.0035 \leq H < 0.0035$  のとき

$$V_0 = 62.857143 H$$

$0.0035 \leq H < 0.0050$  のとき

$$V_0 = (5.4636 \times 10^6) H^3 - 85601.3 H^2 + 461.279 H - 0.580112$$

$0.005 \leq H \leq 0.008$  のとき

$$V_0 = (253624) H^3 - 7451.67 H^2 + 70.5308 H + 0.0711347$$

$-0.005 \leq H \leq -0.0035$  のとき

$$V_0 = (-5.4636 \times 10^6) H^3 - 85601.3 H^2 - 461.279 H - 0.580112$$

$-0.008 \leq H \leq -0.005$  のとき

$$V_0 = (-253624) H^3 - 7451.67 H^2 - 70.5308 H + 0.0711347$$

$H < -0.008$ 、 $H > 0.008$  のとき

$$V_0 = 0.289$$

実際に計測したときの似せるために、図 4.1.1 から飽和状態にあるときのセンサ出力を 1.8V とする。センサ位置における磁場の強さが飽和状態であるときには、センサ出力も飽和状態である。そこで、 $1.8 \div 0.289 \doteq 6.228$  を  $V_0$  に掛けることで、センサ出力としている。2,3 章でのセンサ出力はこの式を用いて算出している。

## 4.1.2 増幅回路

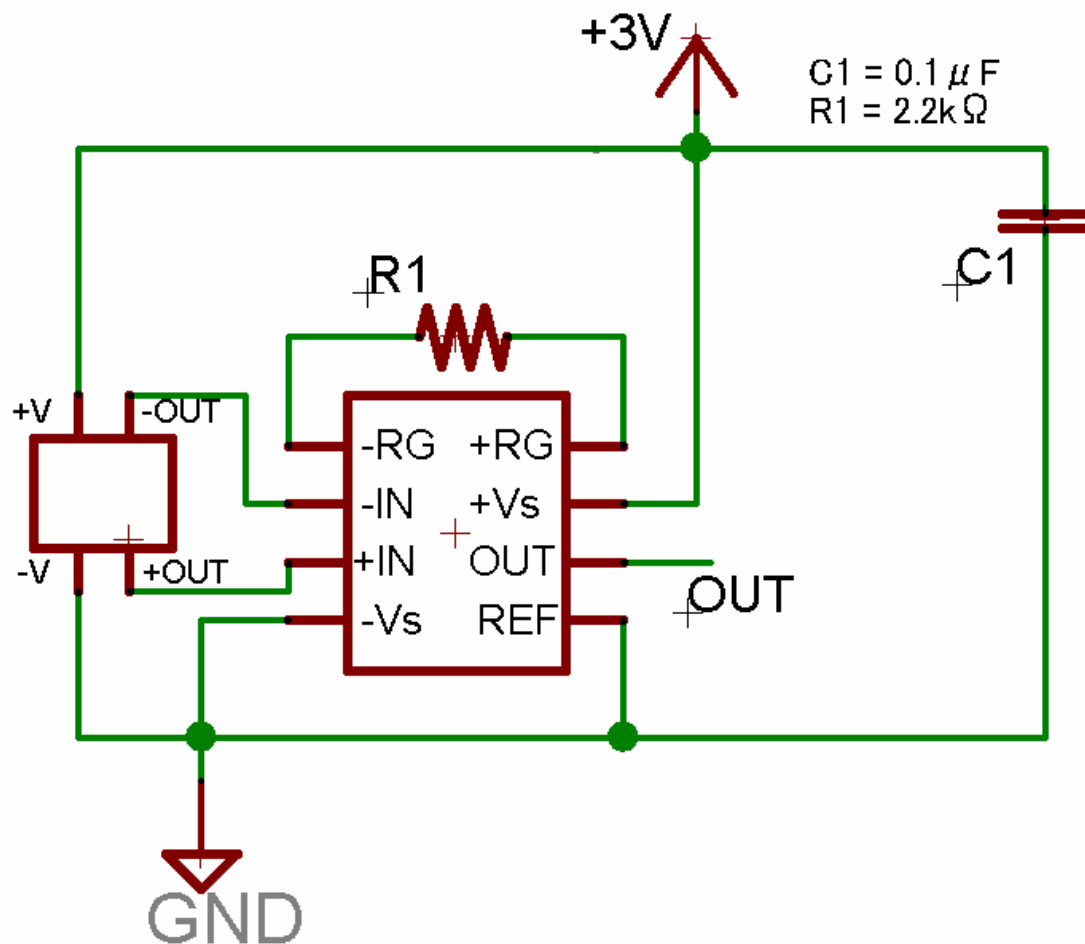


図 4.1.2 計測に使用した回路図

図 4.1.2 は磁場を計測するために用いた回路図である。磁場を計測するにあたってセンサの出力を作動増幅器(Analog Device 社製 AD623)を使用して約 46 倍に増幅している。

## 4.2 計測実験

図 4.2 のように、アームにはアクリルの棒を 2 本、それぞれにセンサと磁気双極子を装着し蝶番で接続する。左側の棒にセンサを装着し、右側の棒に磁気双極子を装着した。磁気双極子はジョイントから 1.0cm の位置に横向きに装着し、ジョイントからセンサまでの距離を 1.0cm, 1.5cm, 2.0cm, 2.5cm, 3.0cm に設定し、それぞれ縦向きと横向きの時について調べた。電源電圧は 3V 設定し、センサを装着した側の棒を磁場の影響を受けない向きに動かないように置き、磁気双極子を装着した側の棒を  $5^\circ$  ずつ動かし、そのときのセンサ出力をテストを用いて計測した。

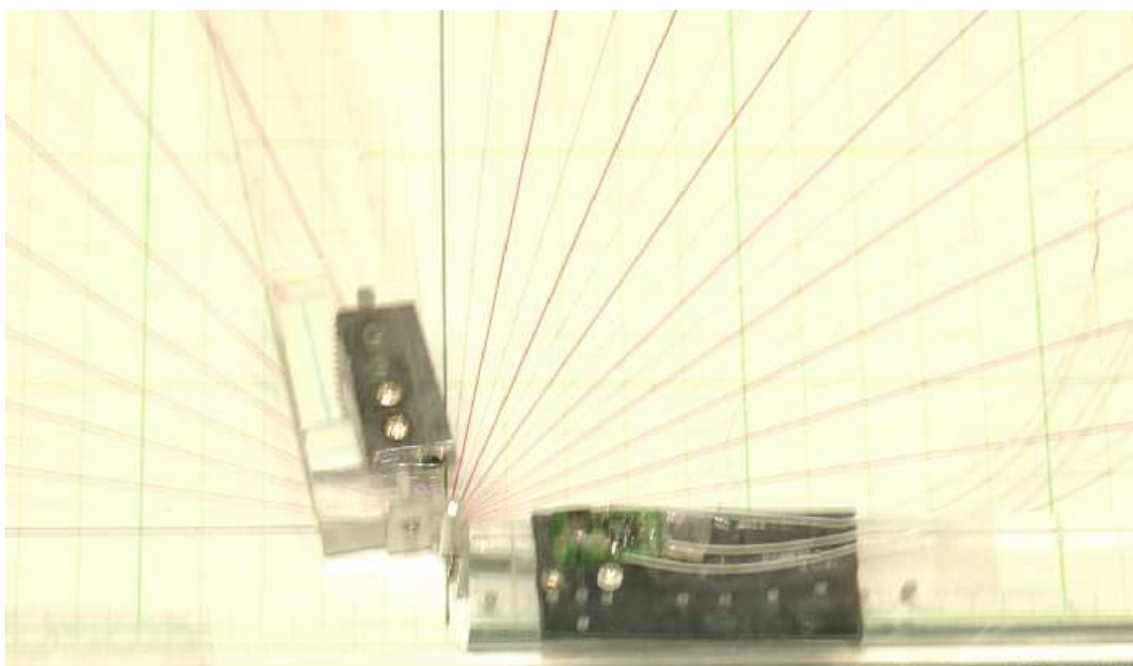


図 4.2 センサと磁気双極子を棒に装着した図

## 4.3 結果

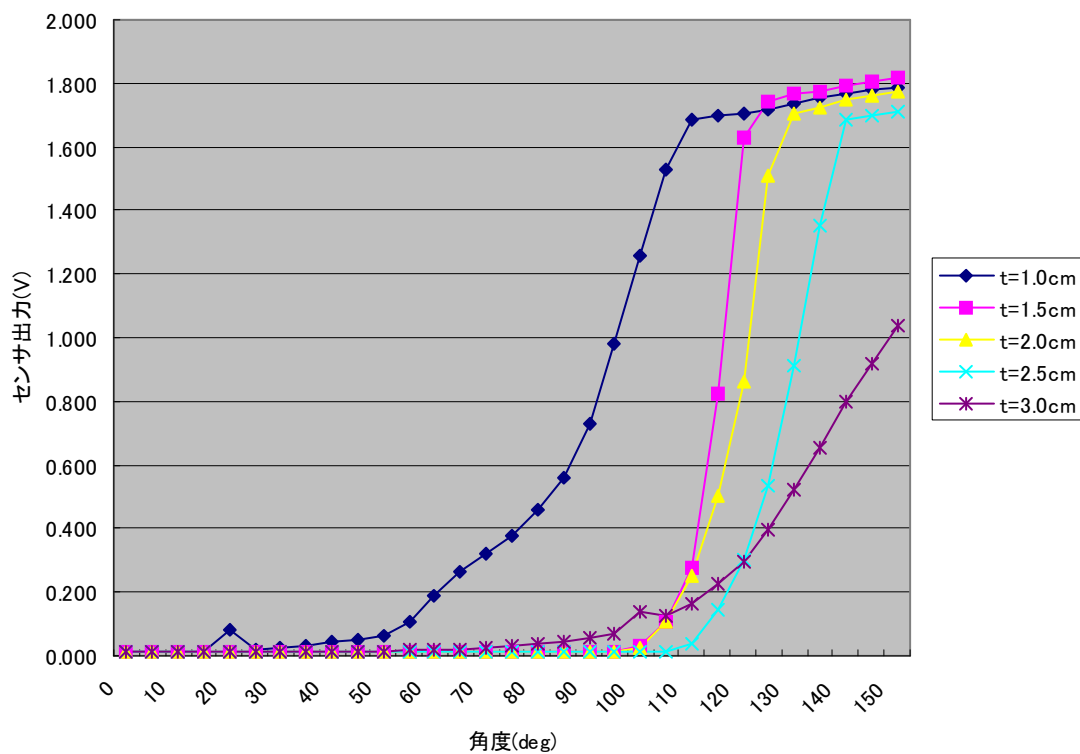


図 4.3.1 センサを縦向きに装着したときのセンサ出力とジョイント角度の関係



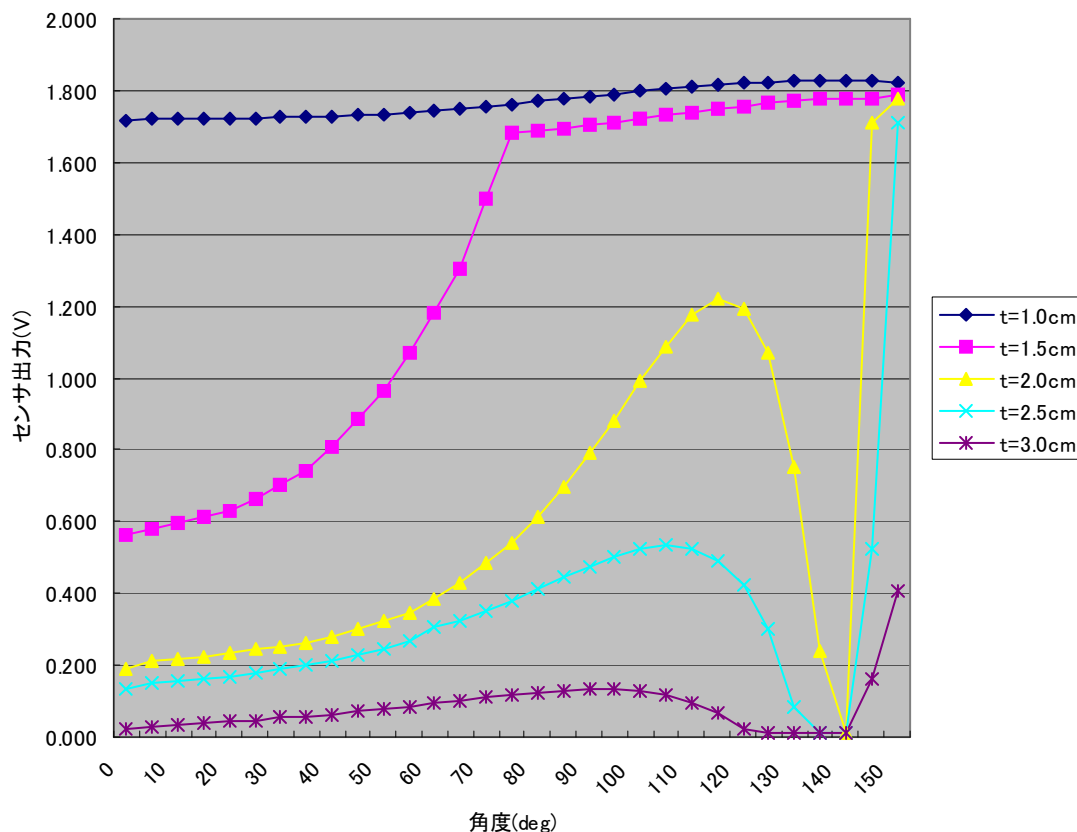


図 4.3.2 センサを横向きに装着したときのセンサ出力とジョイント角度の関係

図 4.3.1、図 4.3.2 は、磁気双極子をジョイントから 1.0cm の位置に縦向き、横向きに装着し、センサをジョイントからそれぞれ 1.0cm、1.5cm、2.0cm、2.5cm、3.0cm に装着したときのジョイント角度とセンサ出力の関係をグラフにしたものである。

図 4.3.1 においては、どの角度についても  $0^{\circ}$  から  $50^{\circ}$  くらいまではセンサ出力はほぼ 0 となった。ジョイントから 1.0cm の位置に装着したセンサの出力は、 $50^{\circ}$  あたりから徐々に上昇し、 $110^{\circ}$  あたりからは増加しにくくなった。ジョイントから 1.5cm、2.0cm、2.5cm に装着したセンサについても、ある一定のセン

サ出力になってからは増加しにくくなった。これはセンサ出力が飽和するほど磁場が強くなっているものだと思われる。

図 4.3.2 においては、ジョイントから 1.0cm の位置に装着したセンサの出力はすでに  $0^\circ$  の状態からセンサ出力がほぼ振り切れた状態であり、ジョイントの角度を動かしてもほとんどセンサ出力に変化が見られなかった。ジョイントから 1.5cm の位置に装着したセンサの出力は増加するのみであったが、2.0cm、2.5cm の位置に装着したセンサは、 $140^\circ$  から  $150^\circ$  の付近で大きく減少していた。これはこのジョイント角度の位置におけるセンサの向きと磁場の向きのなす角がより直角に近いためだと思われる。

## 4.4 評価実験

第 3 章は数値実験として、磁気双極子の位置や強さ、センサの位置、ジョイント角度の推定をしてきたが、ここでは 4.3 で得られた実験データでも同じアルゴリズムで推定できるかの検証を行う。

### 4.4.1 方法

角度の推定については 2.3.2 で、磁気双極子の位置と強さ、センサ位置については 2.3.3 でそれぞれ述べたアルゴリズムで推定する。

## 4.4.2 結果

### 4.4.2.1 角度の推定

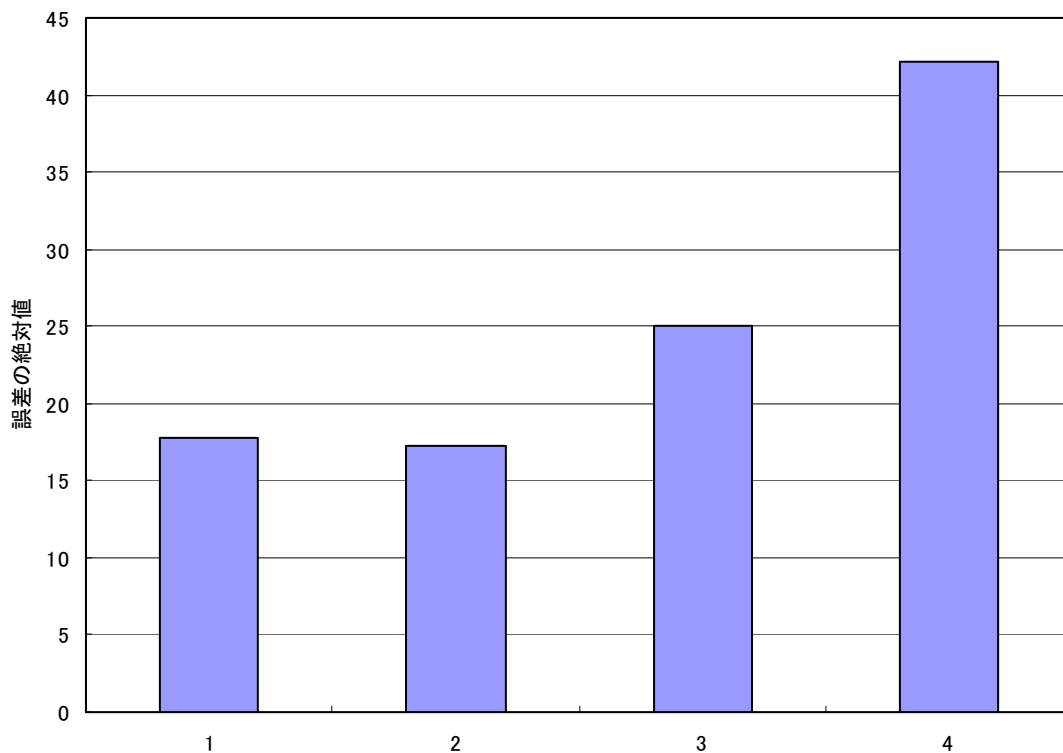


図 4.4.2.1 誤差の絶対値の平均について

図 4.4.2.1 のグラフはセンサを 1cm,3cm の位置に装着し、角度の真の値を  $0^{\circ}$  から  $150^{\circ}$  まで  $5^{\circ}$  おきに設定し真の値と推定した値の誤差の絶対値をとり、さらにそれぞれの角度について得られた値を合計して平均をとり、角度 1 個あたりの誤差の絶対値の平均を求めた。横軸はセンサの向きの組み合わせで、以下のように設定した。

- 1 どちらも縦向き
- 2 1cm のセンサは縦向き、3cm のセンサは横向き
- 3 1cm のセンサは横向き、3cm のセンサは縦向き
- 4 どちらも横向き

いずれの場合も誤差が  $15^{\circ}$  ~  $45^{\circ}$  の範囲となった。どの向きの場合でも大きく真の値とずれる角度の区間があると思われる。

#### 4.4.2.2 センサ位置、磁気双極子の位置と強さの推定

ここでのグラフについて、横軸は以下のように定める。

- 1…推定に用いた角度が  $0^{\circ}$  と  $150^{\circ}$
- 2…推定に用いた角度が  $40^{\circ}$  と  $110^{\circ}$
- 3…推定に用いた角度が  $0^{\circ}$  と  $75^{\circ}$  と  $150^{\circ}$
- 4…推定に用いた角度が  $25^{\circ}$  と  $75^{\circ}$  と  $125^{\circ}$
- 5…推定に用いた角度が  $0^{\circ}$  と  $50^{\circ}$  と  $100^{\circ}$  と  $150^{\circ}$
- 6…推定に用いた角度が  $30^{\circ}$  と  $60^{\circ}$  と  $90^{\circ}$  と  $120^{\circ}$

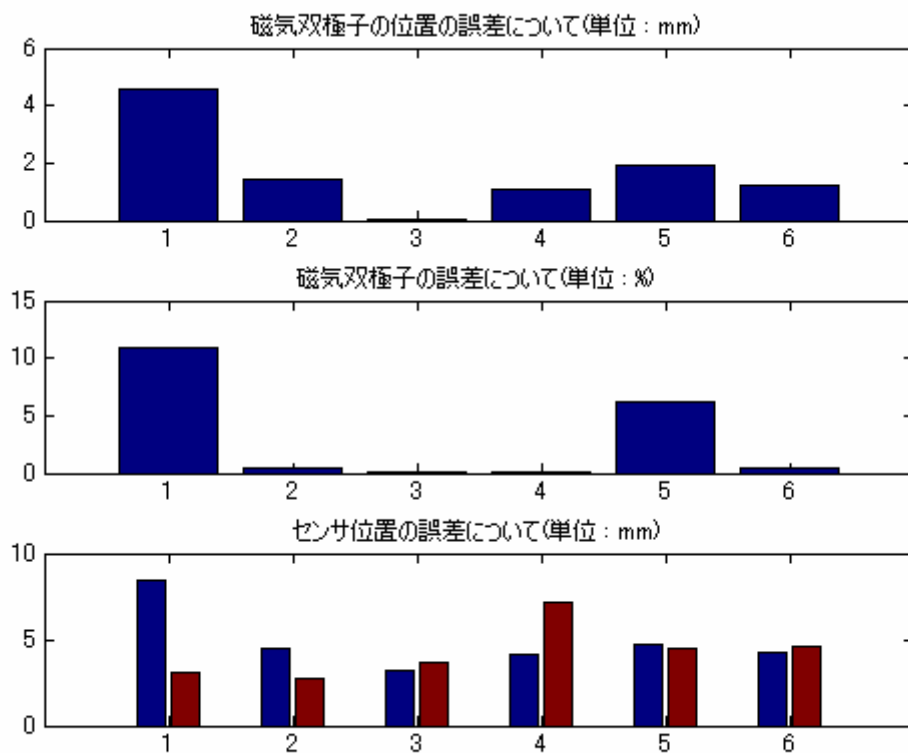


図 4.4.2.2 実測の時の値と推定で得られた値との誤差

ここでは1つの例として、センサは1cm、3cm(いずれも横向き)に装着したときの実測データを用いて推定を行ったものである。この配置では横軸3のときが最も誤差が小さくなり、磁気双極子の位置については誤差約0.2mm、強さは誤差約1%、センサの位置は誤差約4mm以内で推定できた。

## 第5章 結論

本研究では、第 1 章で被写体の関節の付近に磁気双極子とセンサの対を装着し、関節角の変化に応じたセンサ出力の変化を用いて姿勢の推定を提案した。第 2 章、第 3 章では可動方向を 1 方向に限定し、提案したアルゴリズムのもとで数値実験を行った結果、センサ出力から角度、センサの装着位置、磁気双極子の装着位置と強さを第 3 章の数値実験の結果で述べた誤差の範囲内で推定できた。センサ配置については、まずできるだけジョイントの近く(第 3 章では 1cm)に装着し、そこから 2cm ほど間隔を空けてもう 1 つセンサを装着することで推定できるようである。また、第 4 章での実測のデータを用いた実験においても同様のアルゴリズムを用いて推定できる可能性を示した。

これらの手法が発展を遂げることで、関節の自由度が高く、磁場や電気といったノイズに左右されずに腕の姿勢の計測ができることを期待する。また、人間の身体の様々な箇所に装着することで、計測場所に拘束されない身体の姿勢計測を期待する。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご助言頂いた阪口 豊助教授、出澤 正徳教授、石田 文彦助手、島井 博行助手に深く感謝いたします。また、多くの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皆様に心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 平尾公男”モーションキャプチャデータと距離画像による上半身の姿勢推定” 修士論文
- [2] R.F. Rashid: “Towards a system for the interpretation of moving light display,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.2, No.6,pp.574-581, 1980



# 付録

## 角度の推定(数値実験)

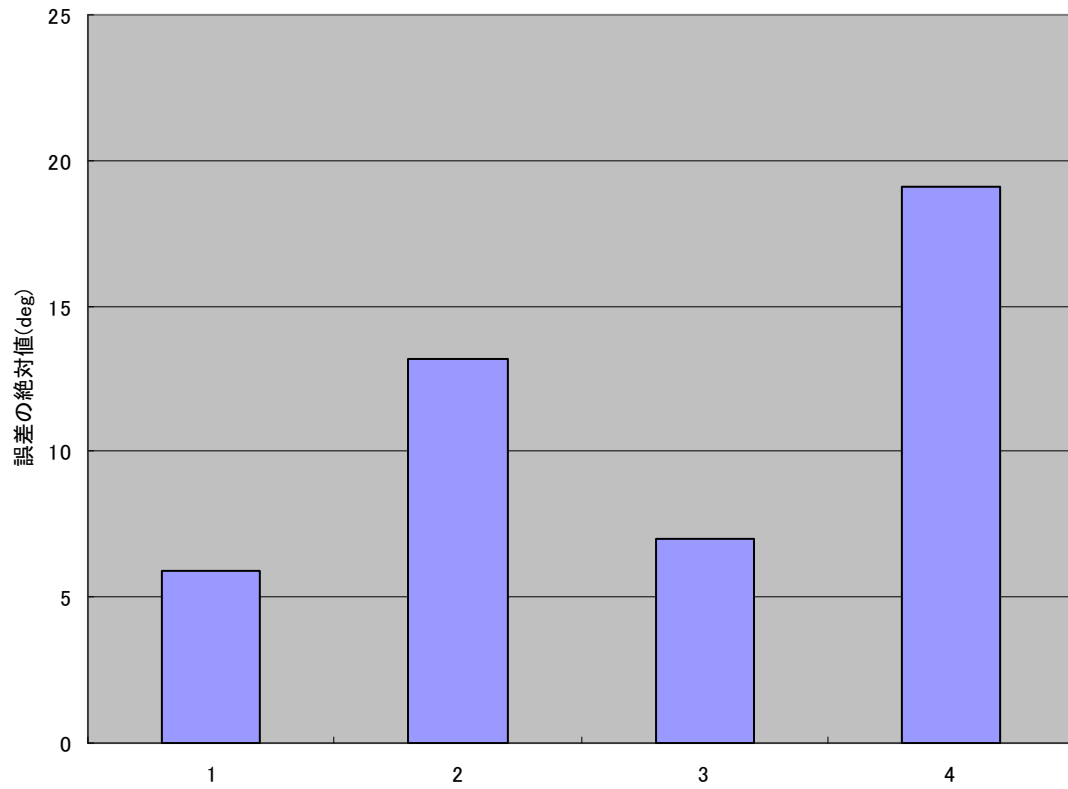
・センサが 2 個のとき

- 5 どちらも縦向き
- 6 関節に近いほうから縦向き、横向き
- 7 関節に近いほうから横向き、縦向き
- 8 どちらも横向き

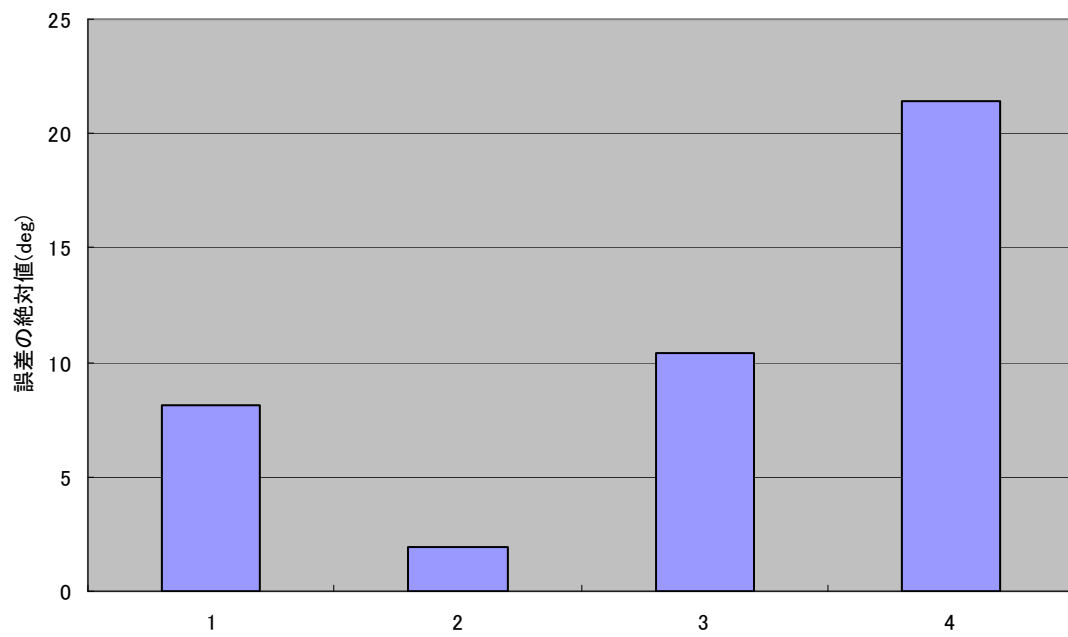
・センサが 3 個のとき

- 1 いずれも縦向き
- 2 関節に近いほうから横向き、縦向き、縦向き
- 3 関節に近いほうから横向き、縦向き、縦向き
- 4 関節に近いほうから縦向き、縦向き、横向き
- 5 関節に近いほうから縦向き、横向き、横向き
- 6 関節に近いほうから横向き、縦向き、横向き
- 7 関節に近いほうから横向き、横向き、縦向き
- 8 いずれも横向き

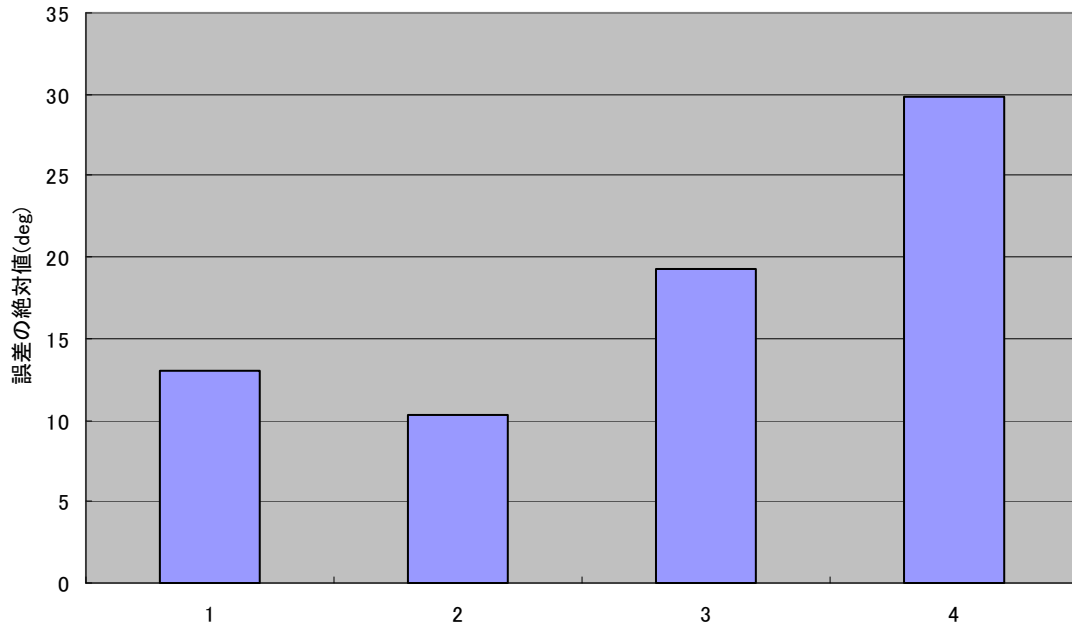
センサ位置が 1cm,2cm のとき



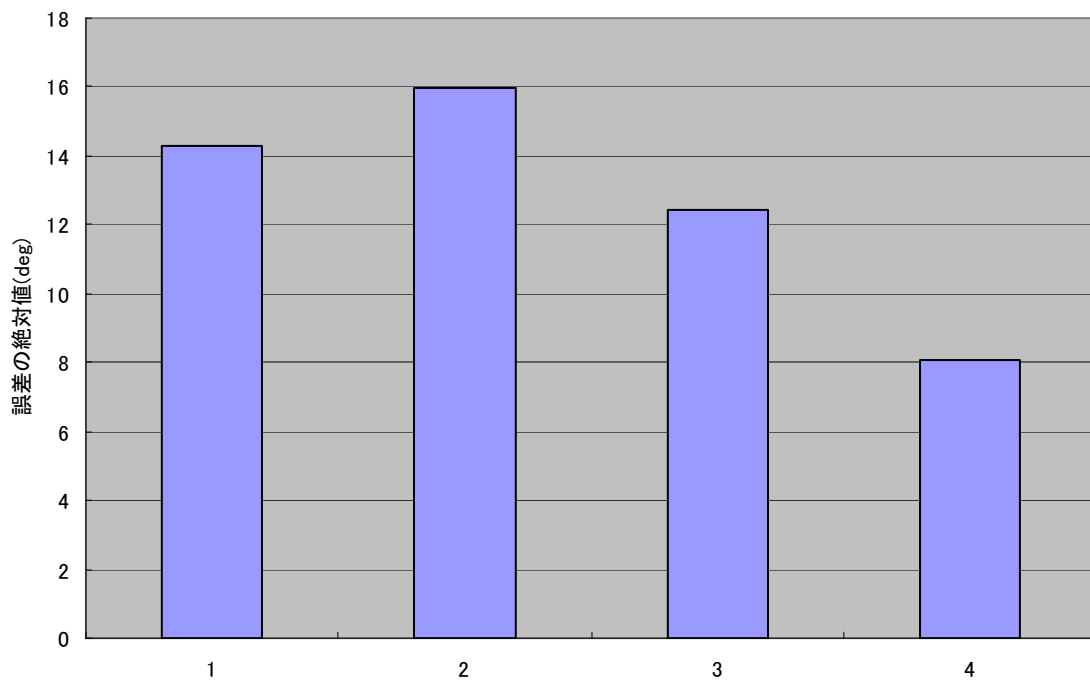
センサ位置が 1cm,3cm のとき



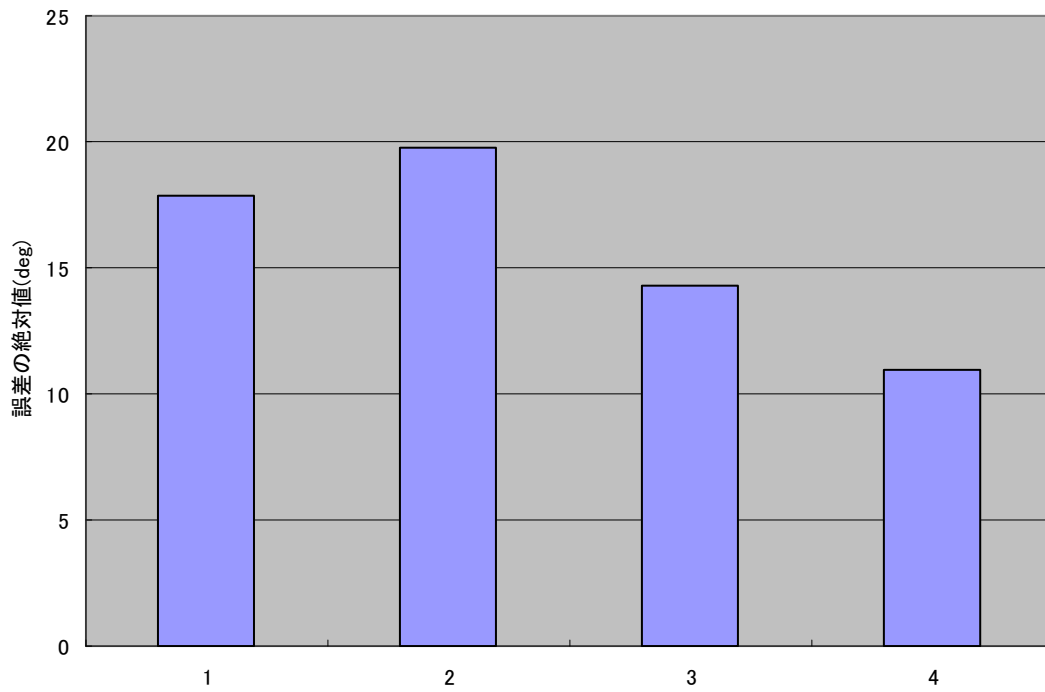
センサ位置が 2cm,3cm のとき



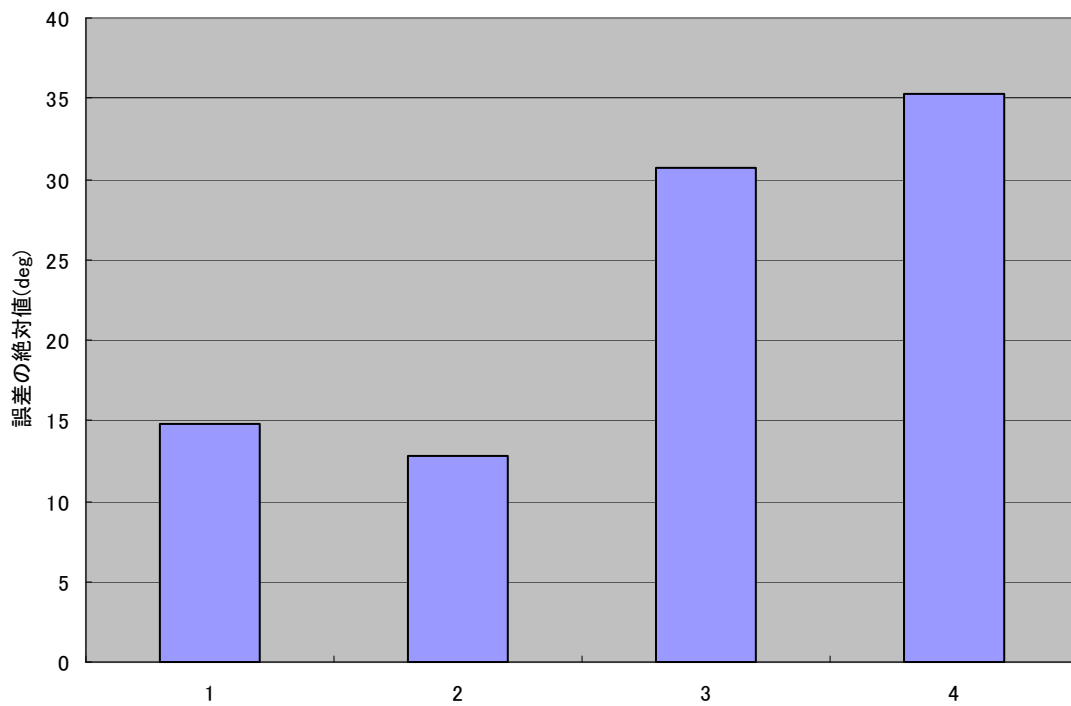
センサ位置が 1.5cm,2.5cm のとき



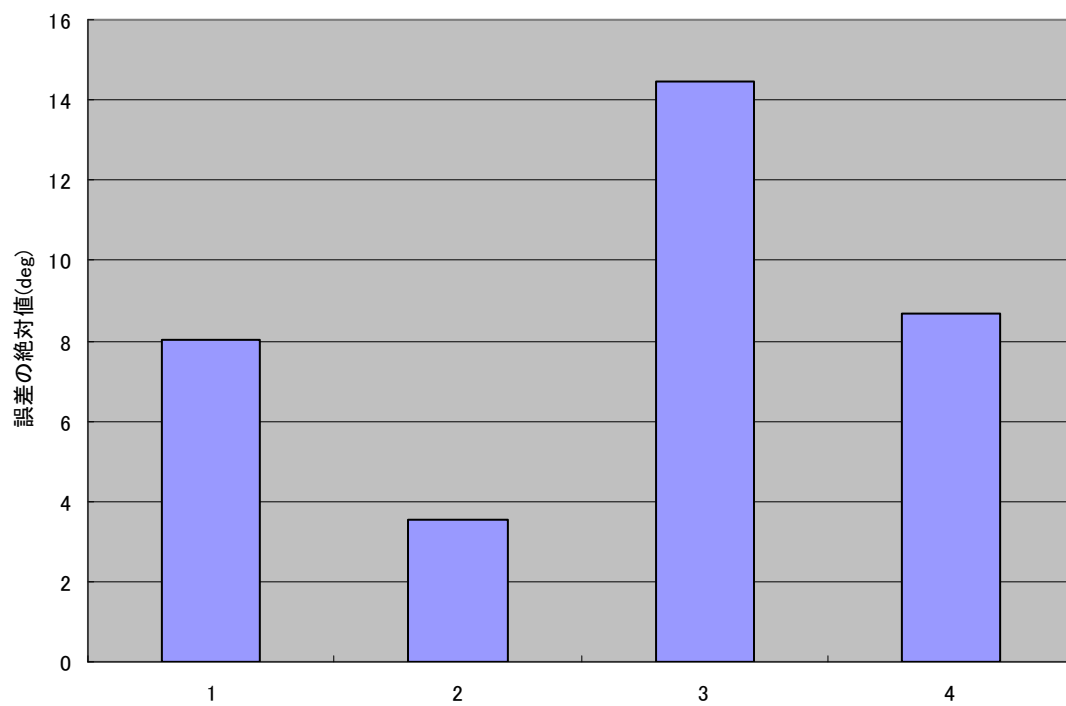
センサ位置が 1.5cm,3.5cm のとき



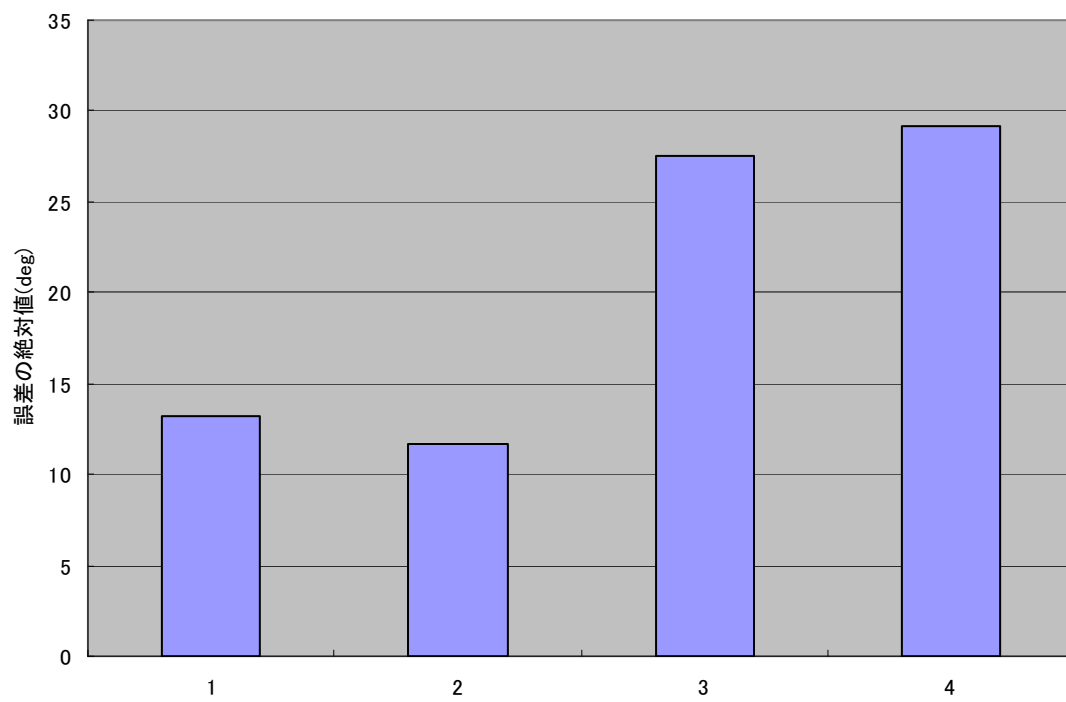
センサ位置が 2.5cm,3.5cm のとき



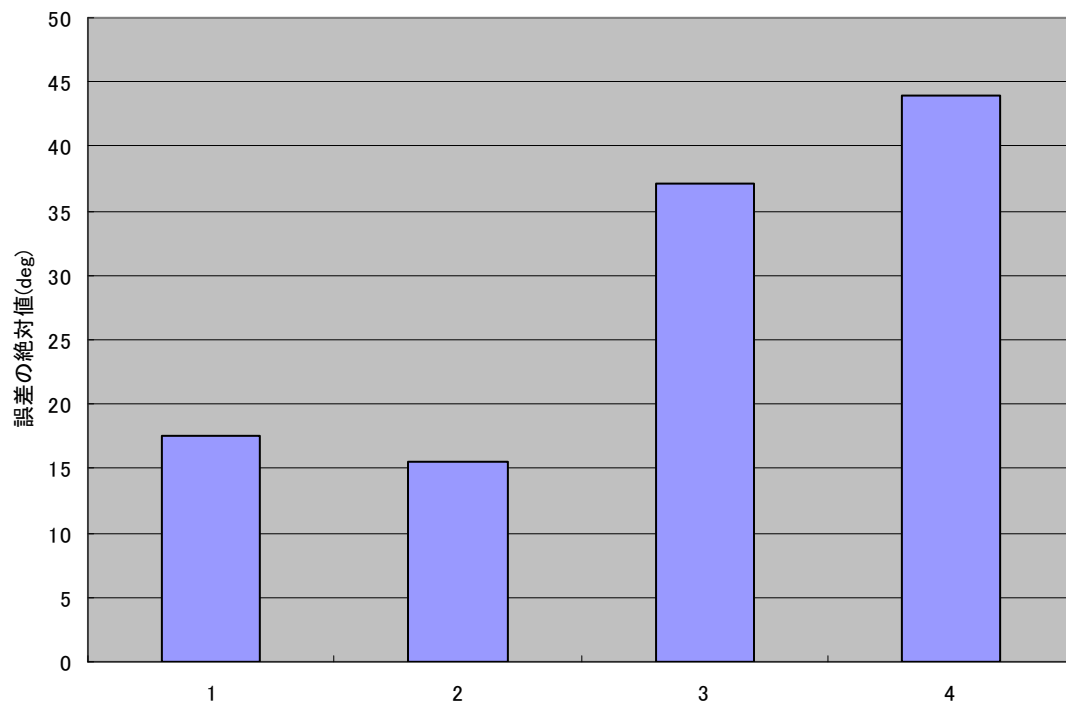
センサ位置が 1cm,4cm のとき



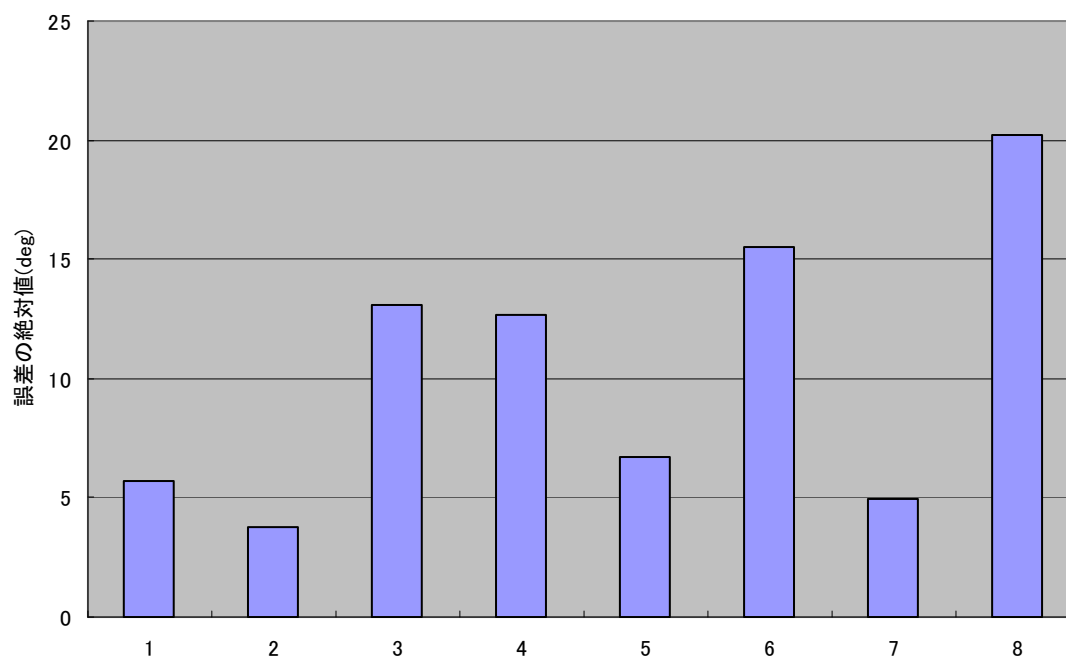
センサ位置が 2cm,4cm のとき



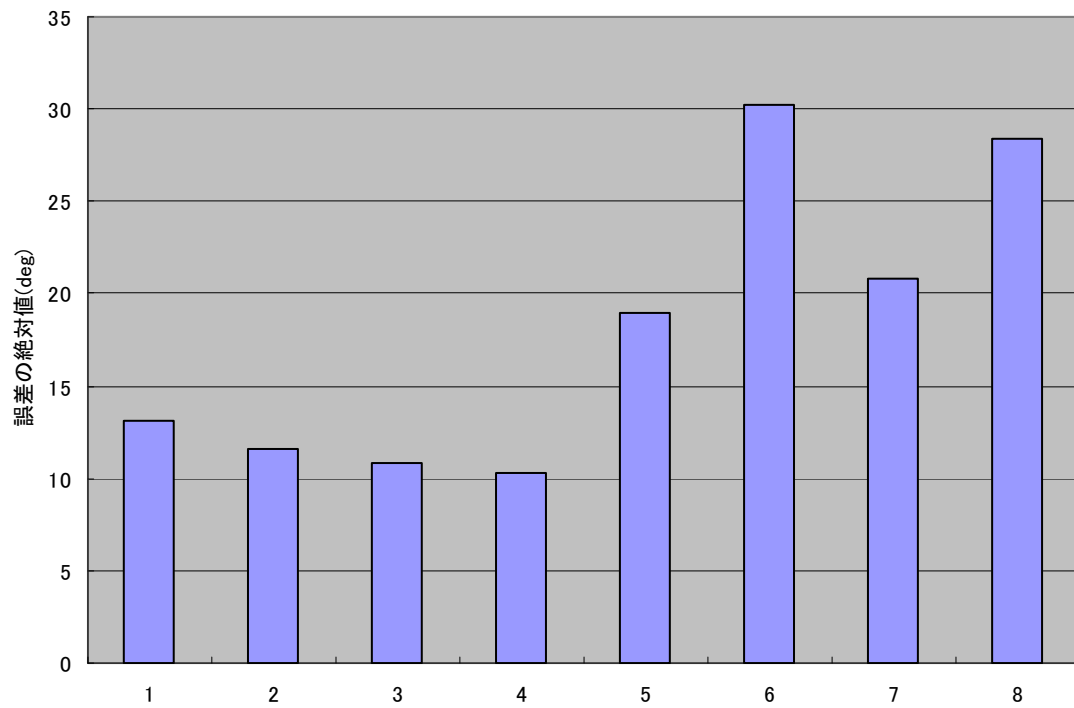
センサ位置が 3cm,4cm のとき



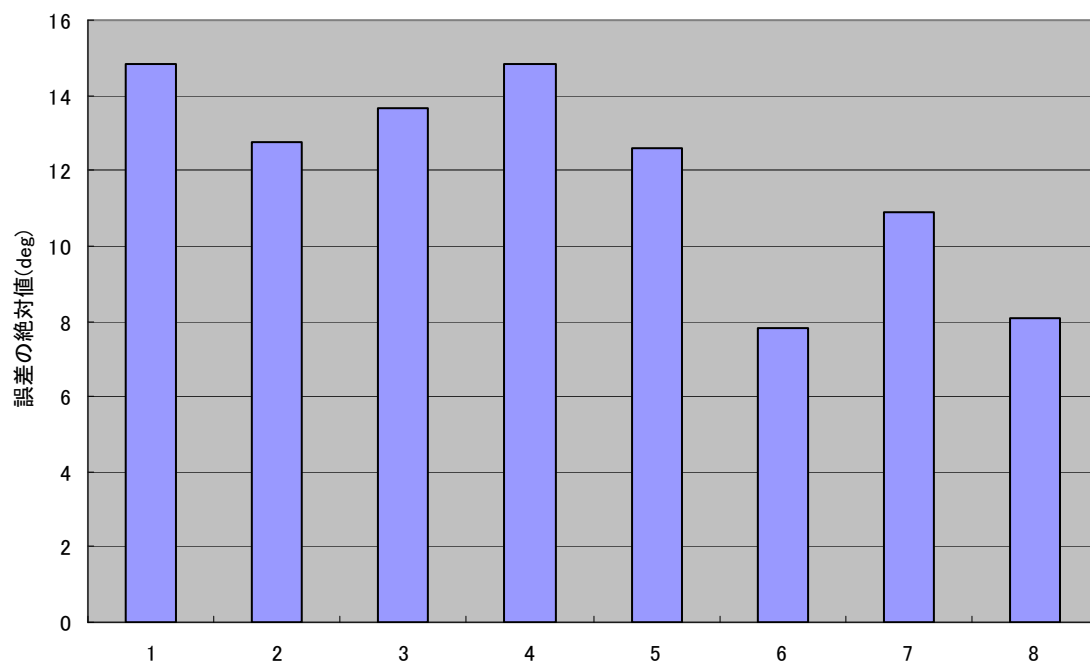
センサ位置が 1cm,2cm,3cm のとき



センサ位置が 2cm,3cm,4cm のとき



センサ位置が 1.5cm,2.5cm,3.5cm のとき



## センサ位置、磁気双極子の位置と強さの推定 (数値実験)

・横軸について

角度が 2 個のとき

1~4 推定に用いた角度が  $0^\circ$  ,  $180^\circ$

5~8 推定に用いた角度が  $30^\circ$  ,  $150^\circ$

角度が 3 個のとき

1~4 推定に用いた角度が  $0^\circ$  ,  $90^\circ$  ,  $180^\circ$

5~8 推定に用いた角度が  $30^\circ$  ,  $90^\circ$  ,  $150^\circ$

角度が 4 個のとき

1~4 推定に用いた角度が  $0^\circ$  ,  $60^\circ$  ,  $120^\circ$  ,  $180^\circ$

5~8 推定に用いた角度が  $20^\circ$  ,  $65^\circ$  ,  $110^\circ$  ,  $155^\circ$

向きについて

1,5 どちらも横向き

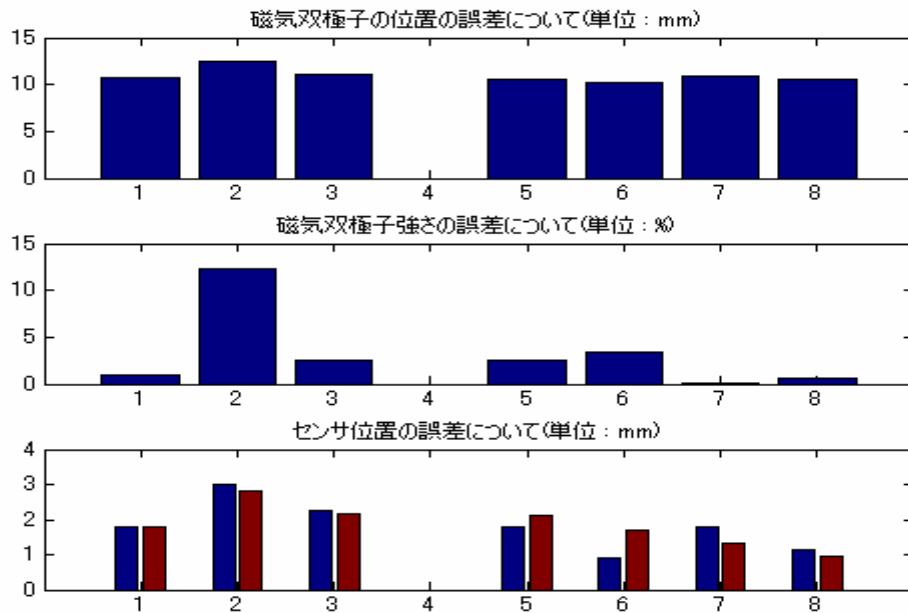
2,6 関節から近い順に縦向き、横向き

3,7 関節から近い順に横向き、縦向き

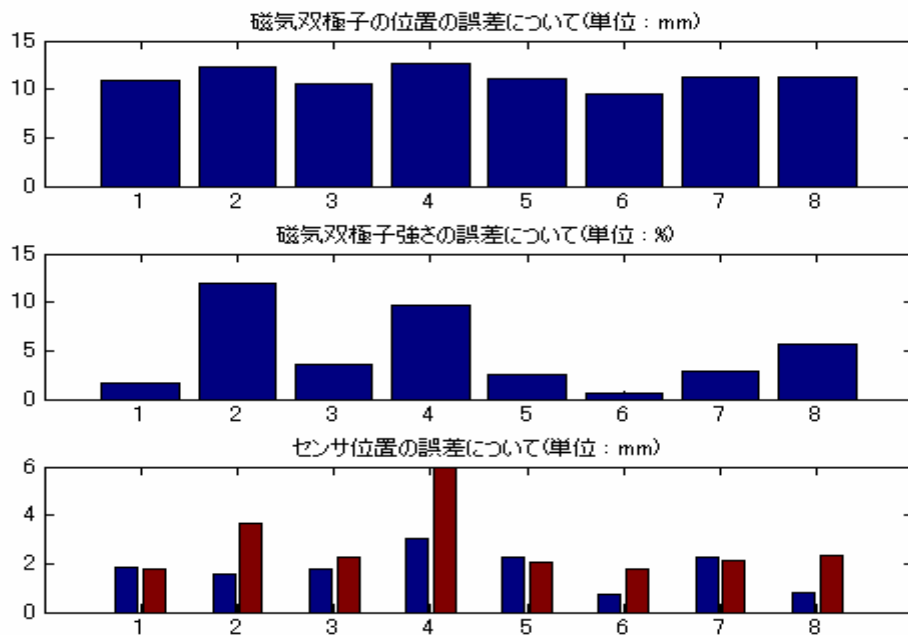
4,8 いずれも縦向き



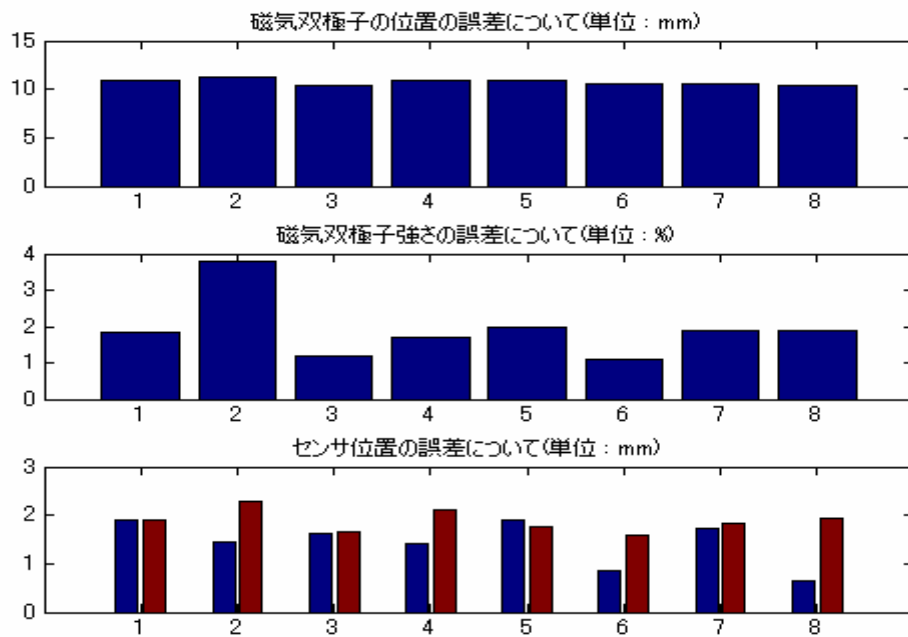
センサ位置が 1cm,2cm、角度が 2 個のとき



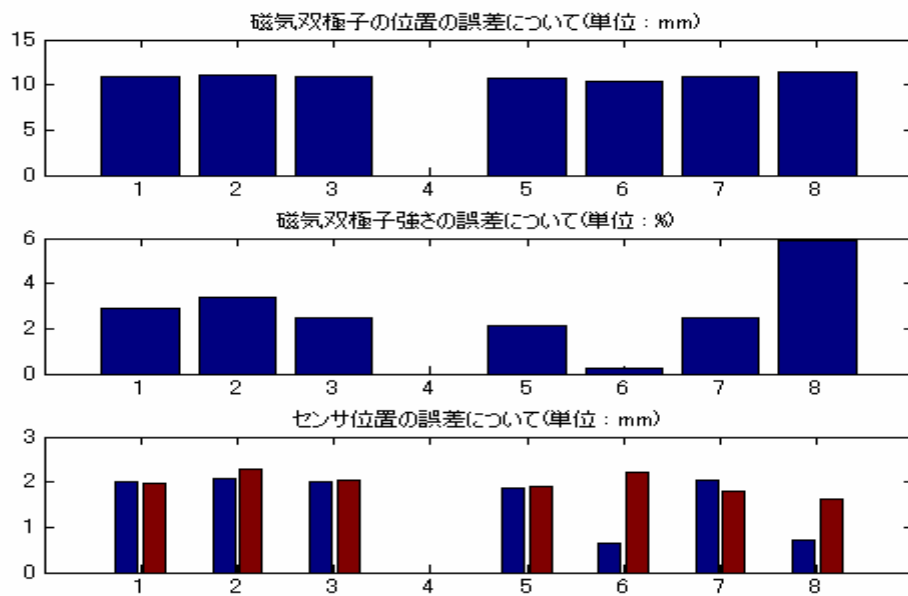
センサ位置が 1cm,2cm、角度が 3 個のとき



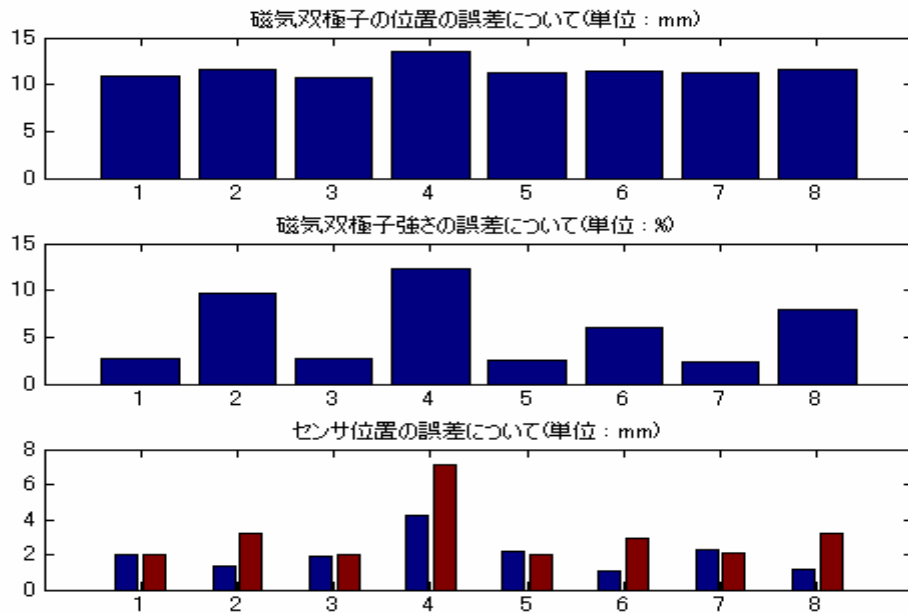
センサ位置が 1cm,2cm、角度が 4 個のとき



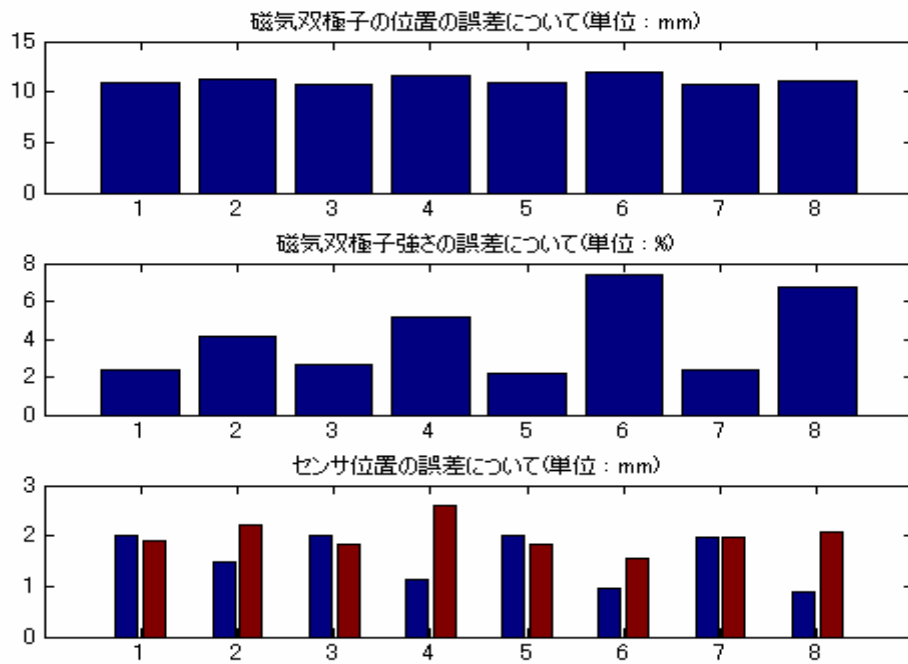
センサ位置が 1cm,3cm、角度が 2 個のとき



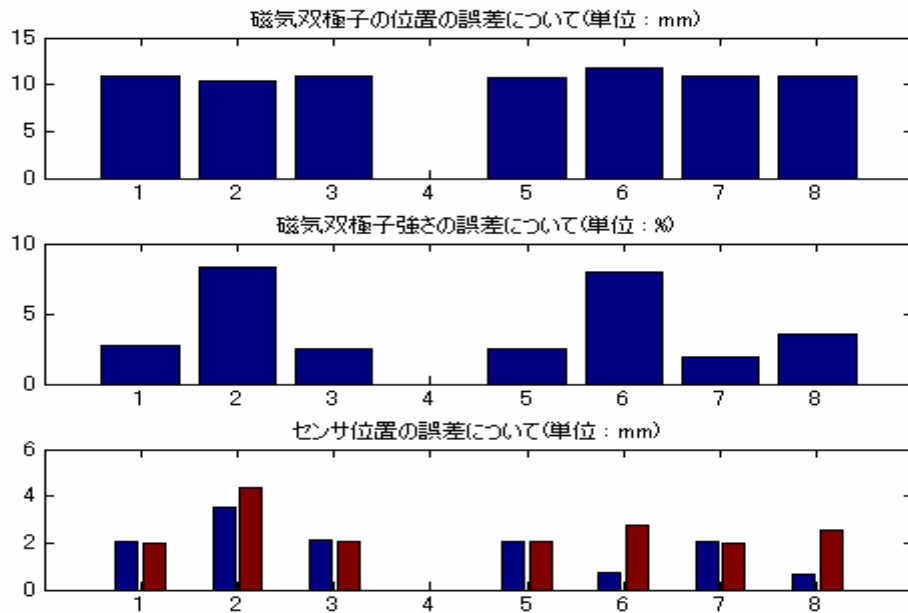
センサ位置が 1cm,3cm、角度が 3 個のとき



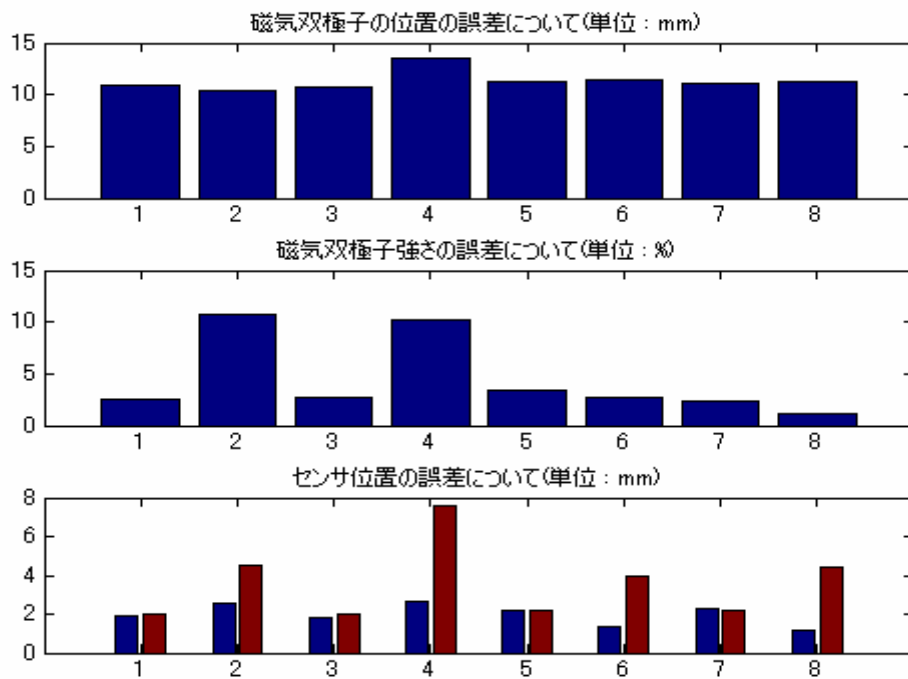
センサ位置が 1cm,3cm、角度が 4 個のとき



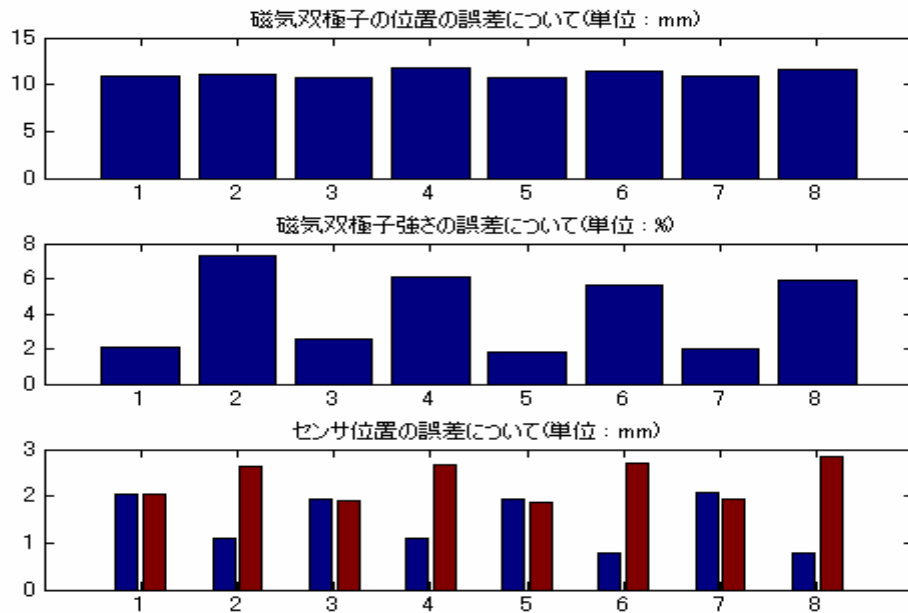
センサ位置が 1cm,4cm、角度が 2 個のとき



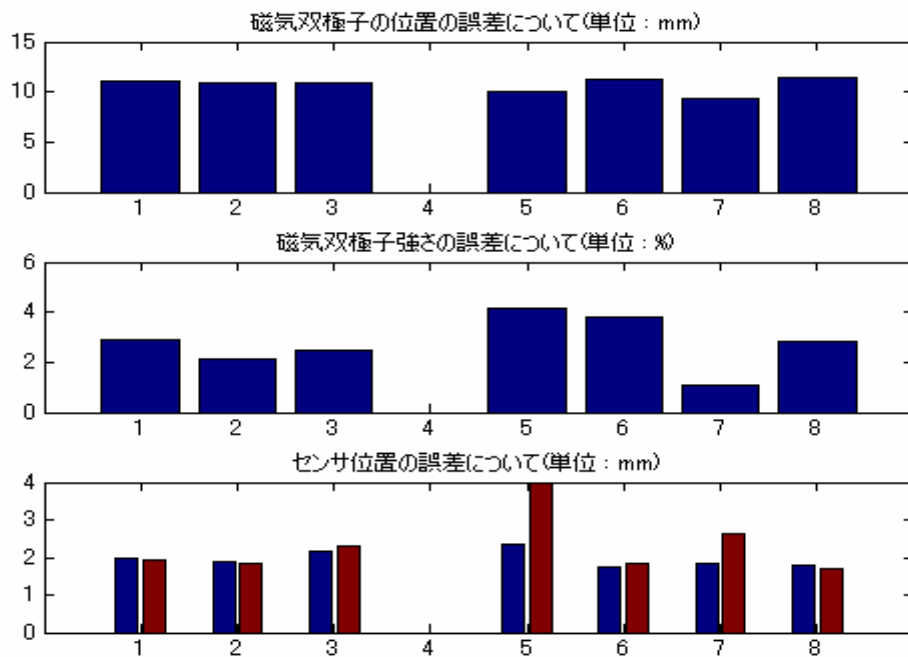
センサ位置が 1cm,4cm、角度が 3 個のとき



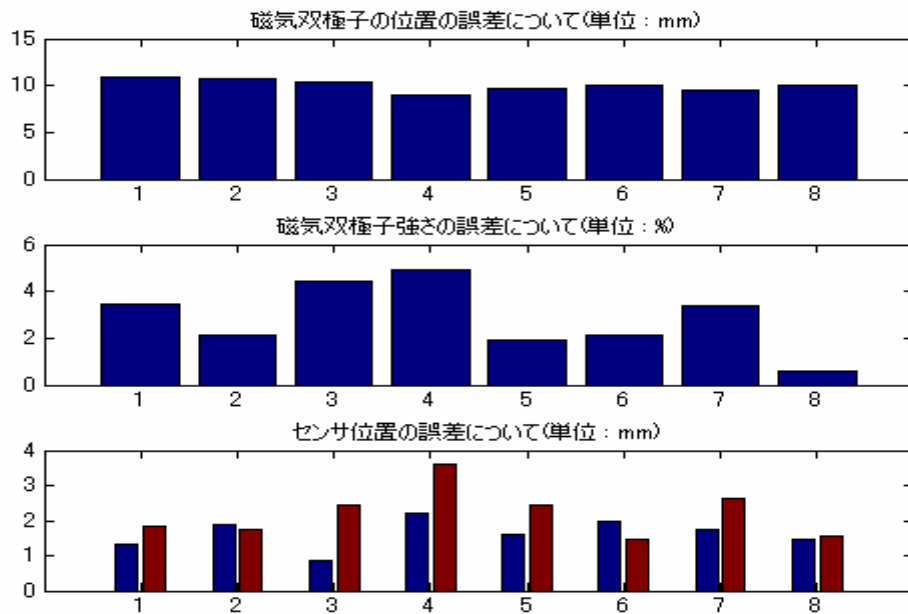
センサ位置が 1cm,4cm、角度が 4 個のとき



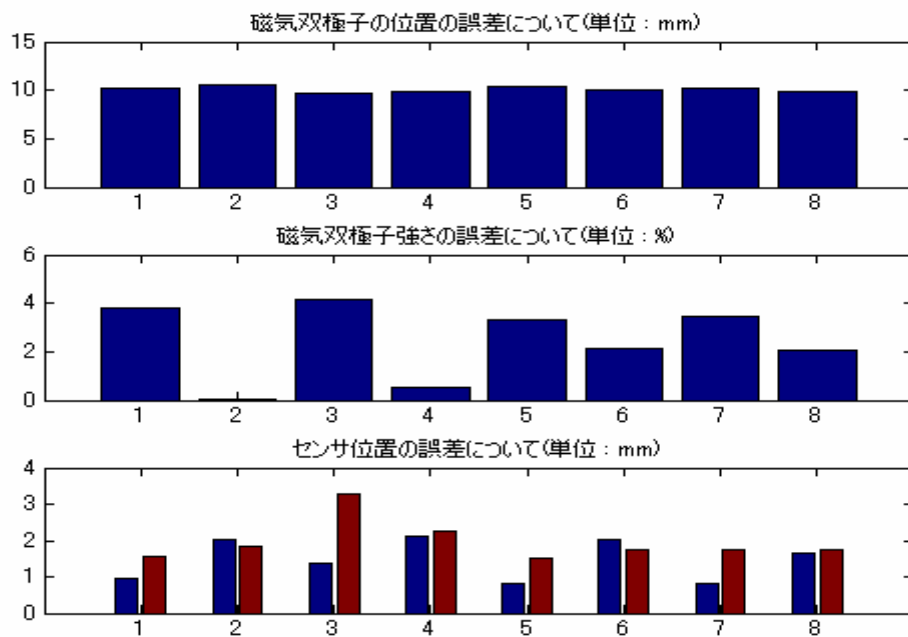
センサ位置が 2cm,3cm、角度が 2 個のとき



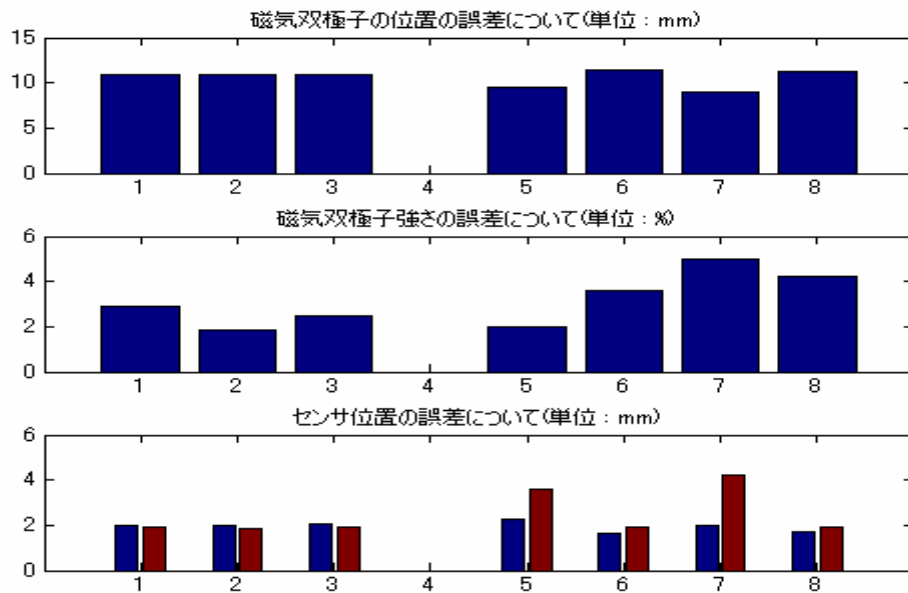
センサ位置が 2cm,3cm、角度が 3 個のとき



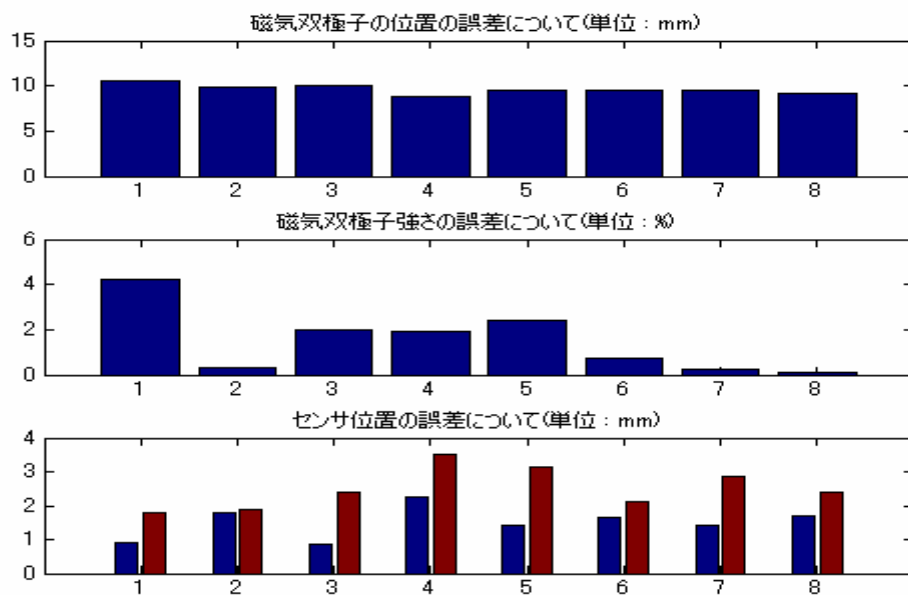
センサ位置が 2cm,3cm、角度が 4 個のとき



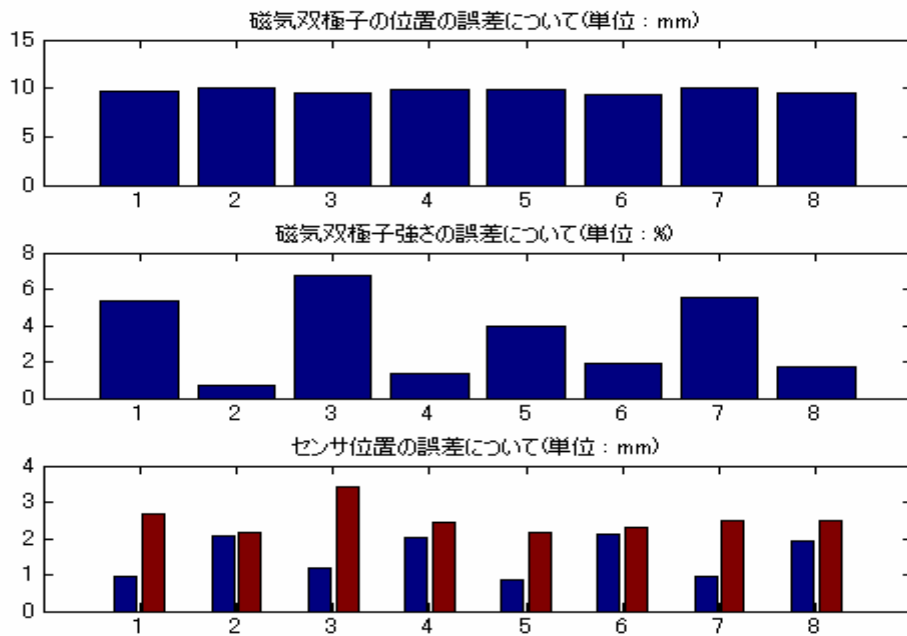
センサ位置が 2cm,4cm のとき、角度が 2 個のとき



センサ位置が 2cm,4cm のとき、角度が 3 個のとき



センサ位置が 2cm,4cm のとき、角度が 4 個のとき



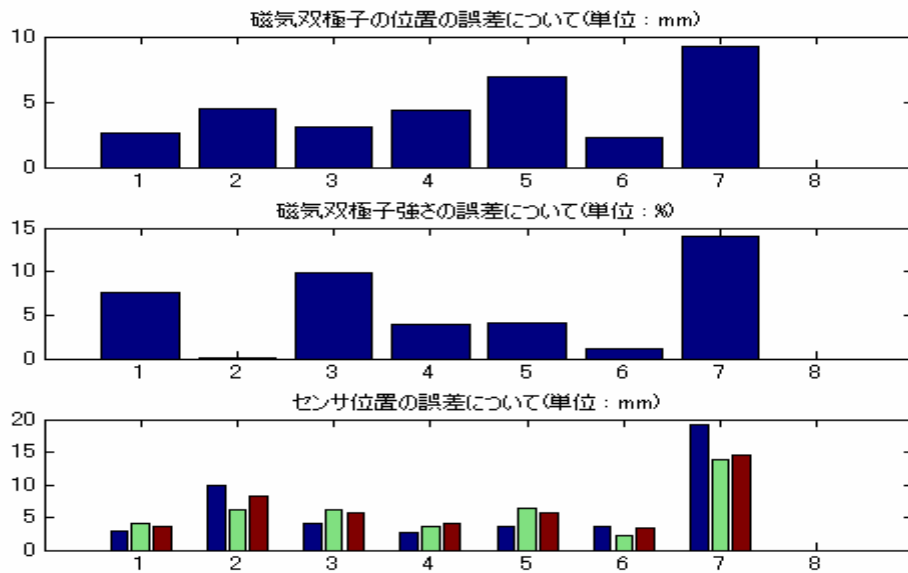
センサが 3 個

横軸について

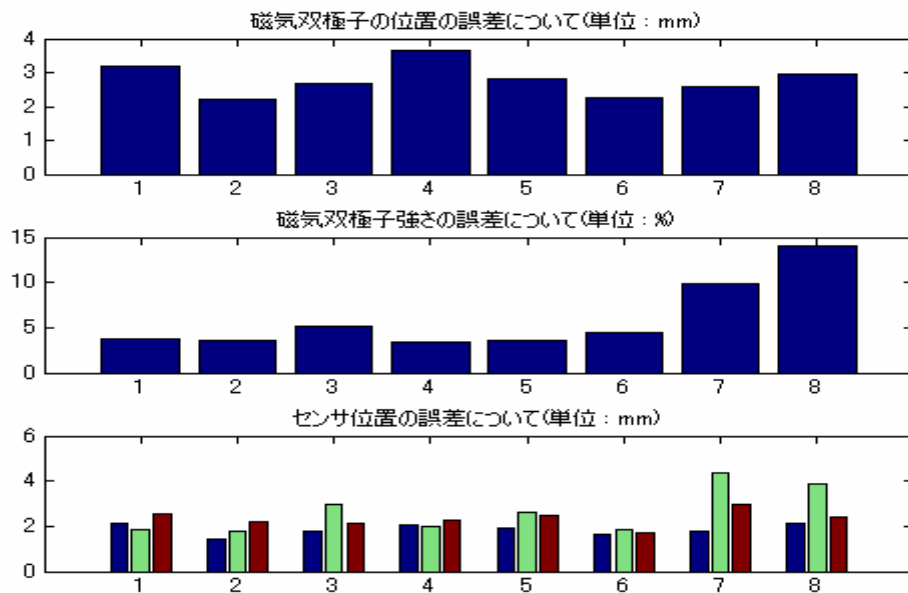
- 1 いずれも横向き
- 2 関節から近い順に縦向き、横向き、横向き
- 3 関節から近い順に横向き、縦向き、横向き
- 4 関節から近い順に横向き、横向き、縦向き
- 5 関節から近い順に横向き、縦向き、縦向き
- 6 関節から近い順に縦向き、横向き、縦向き
- 7 関節から近い順に縦向き、縦向き、横向き
- 8 いずれも縦向き



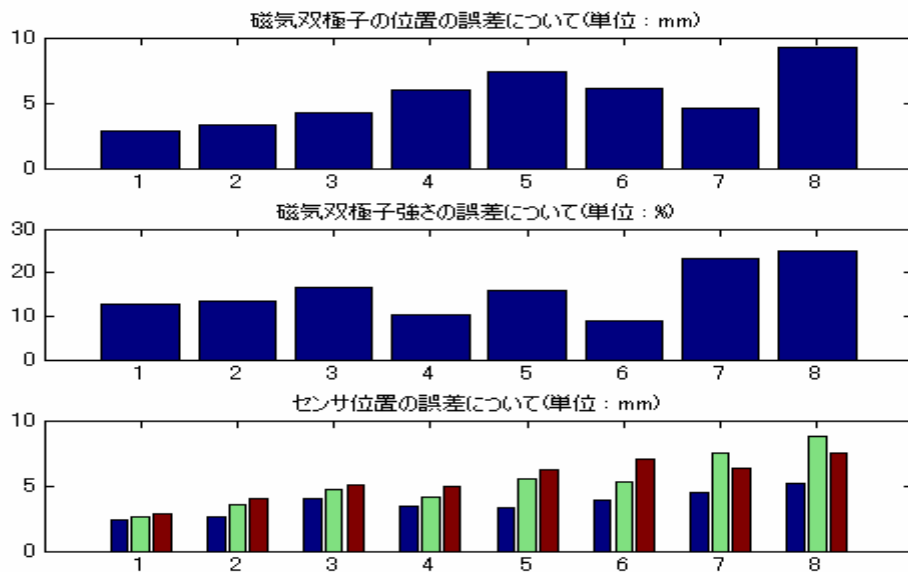
センサが 1cm,2cm,3cm、推定に用いた角度が  $0^\circ$   $180^\circ$



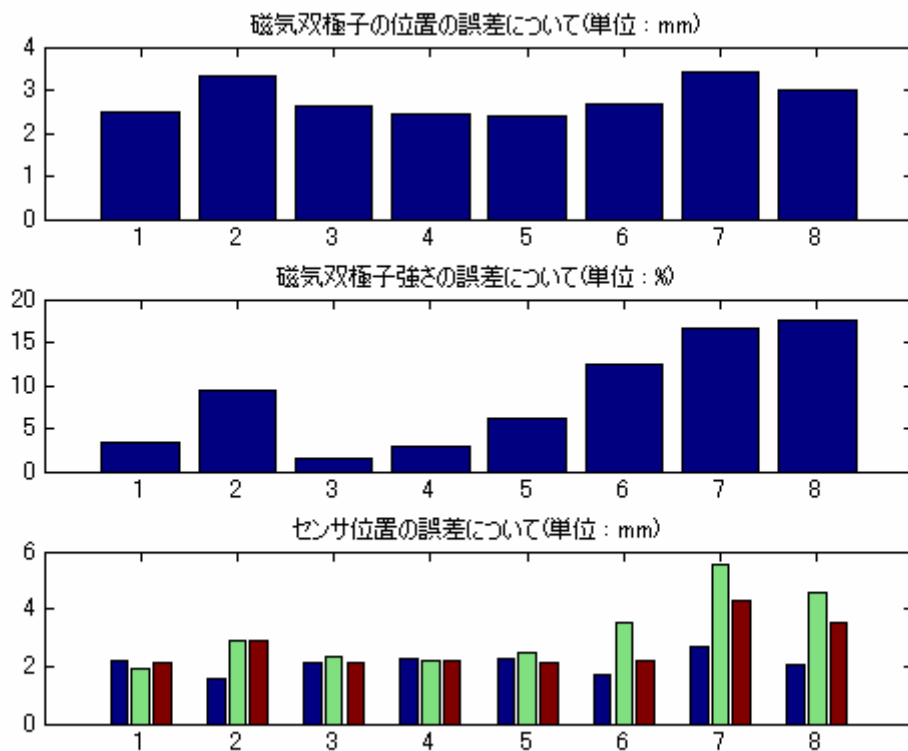
センサが 1cm,2cm,3cm、推定に用いた角度が  $30^\circ$   $150^\circ$



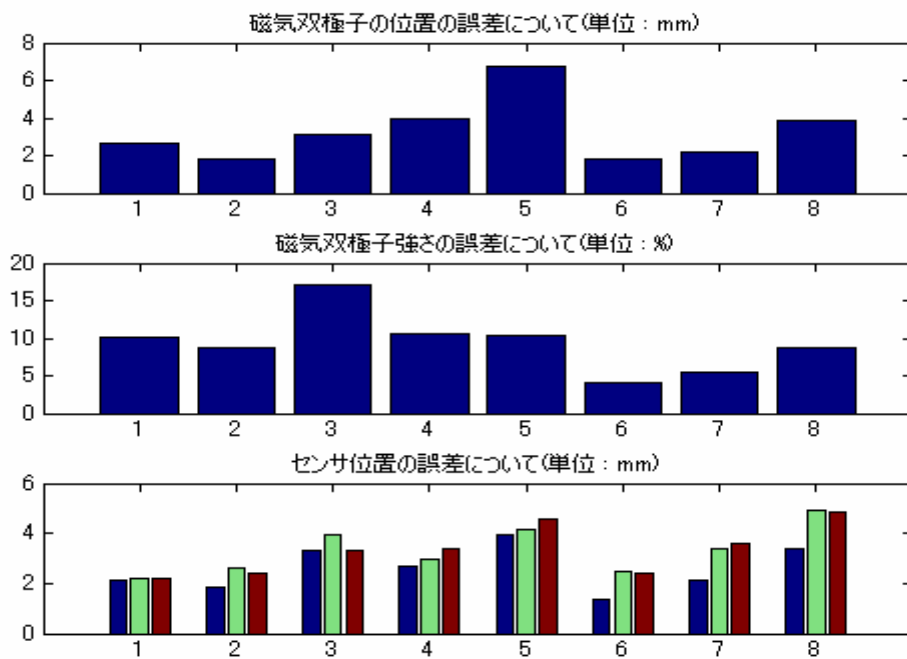
センサが 1cm,2cm,3cm、推定に用いた角度が  $0^\circ$   $90^\circ$   $180^\circ$



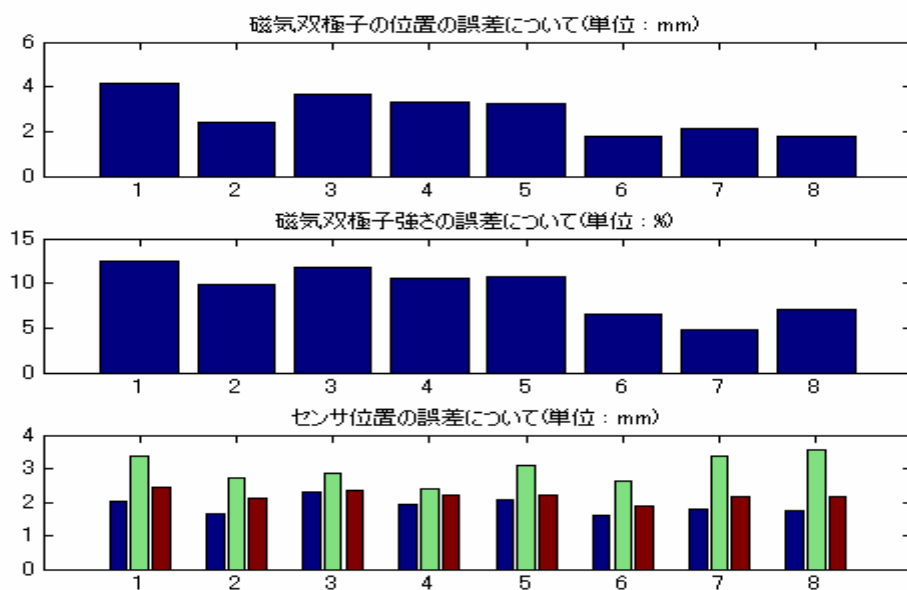
センサが 1cm,2cm,3cm、推定に用いた角度が  $45^\circ$   $90^\circ$   $135^\circ$



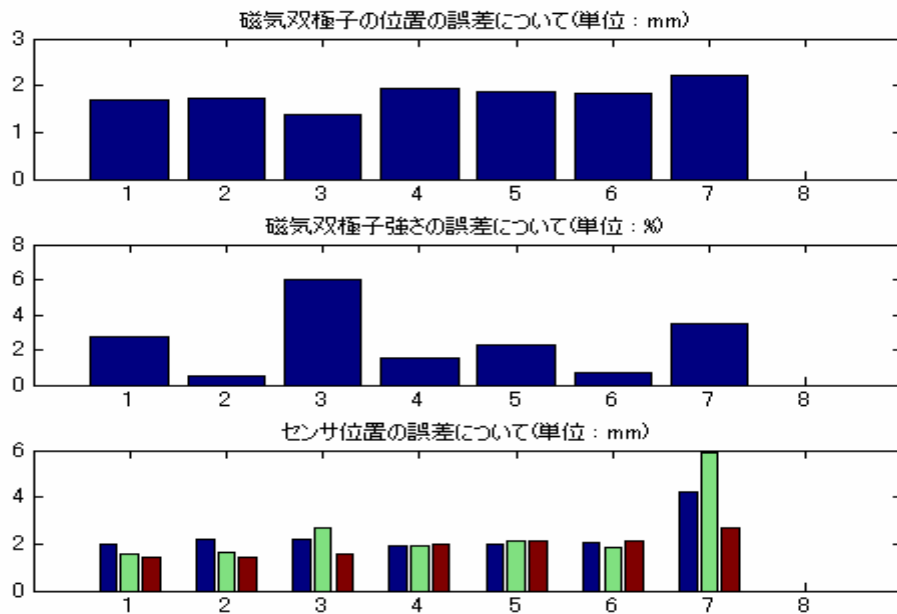
センサが 1cm,2cm,3cm、推定に用いた角度が  $0^\circ$   $60^\circ$   $120^\circ$   $180^\circ$



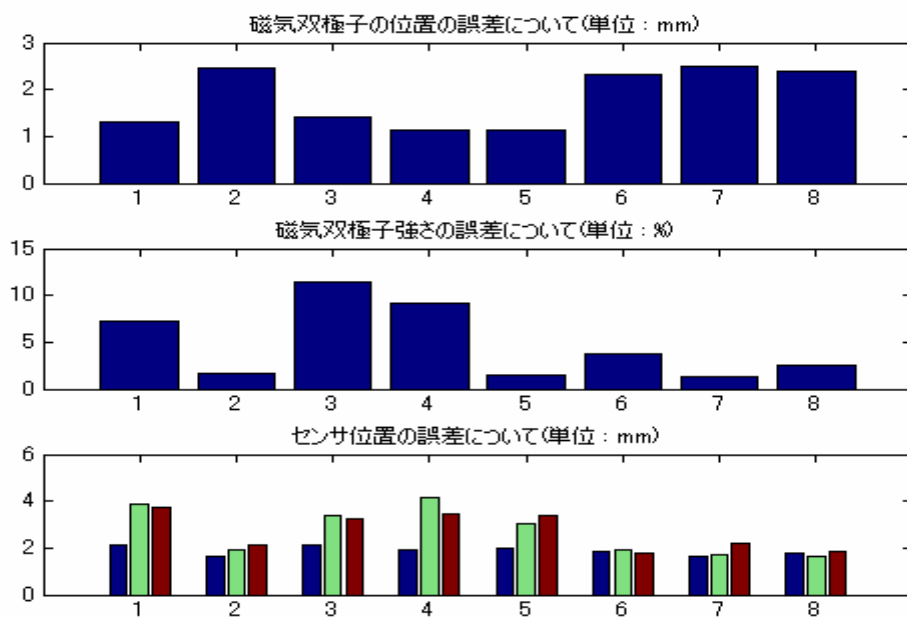
センサが 1cm,2cm,3cm、推定に用いた角度が  $20^\circ$   $65^\circ$   $110^\circ$   $155^\circ$



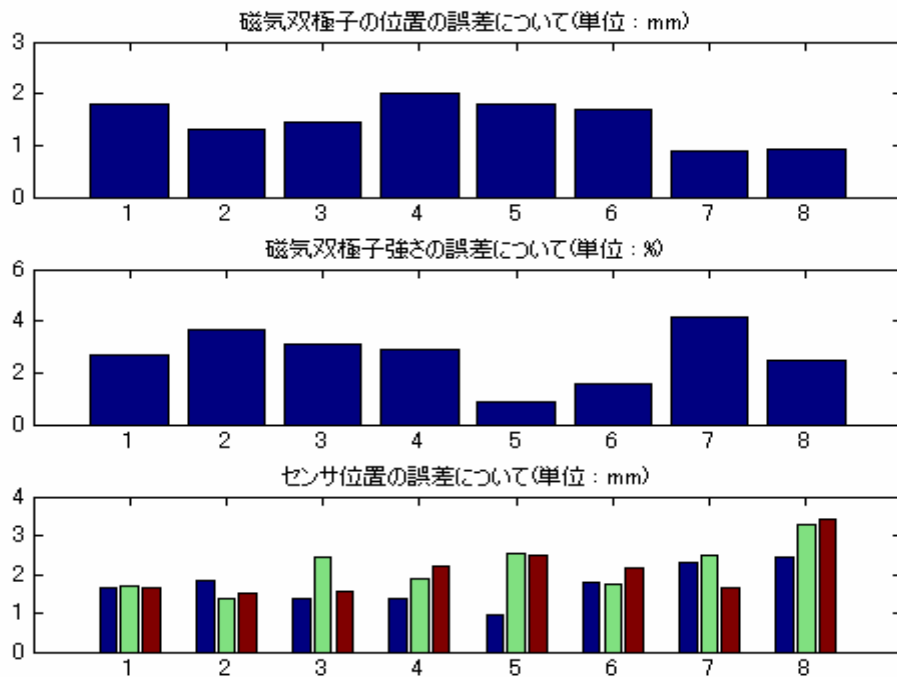
センサが 2cm,3cm,4cm、推定に用いた角度が  $0^{\circ}$   $180^{\circ}$



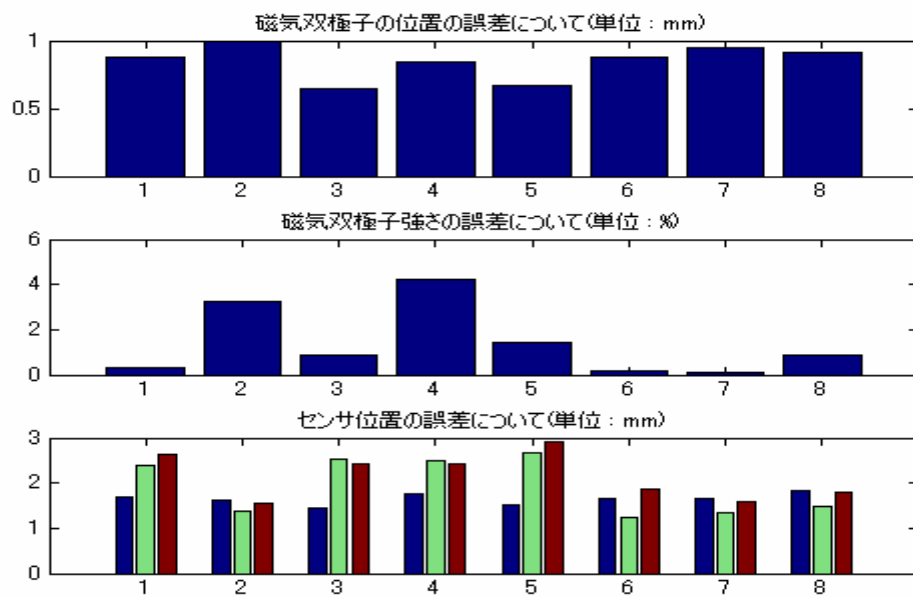
センサが 2cm,3cm,4cm、推定に用いた角度が  $30^{\circ}$   $150^{\circ}$



センサが 2cm,3cm,4cm、推定に用いた角度が  $0^\circ$   $90^\circ$   $180^\circ$



センサが 2cm,3cm,4cm、推定に用いた角度が  $45^\circ$   $90^\circ$   $135^\circ$





## 角度の推定(評価実験)

・センサが2個のとき

9 どちらも縦向き

10 関節に近いほうから縦向き、横向き

11 関節に近いほうから横向き、縦向き

12 どちらも横向き

・センサが3個のとき

1 いずれも縦向き

2 関節に近いほうから横向き、縦向き、縦向き

3 関節に近いほうから横向き、縦向き、縦向き

4 関節に近いほうから縦向き、縦向き、横向き

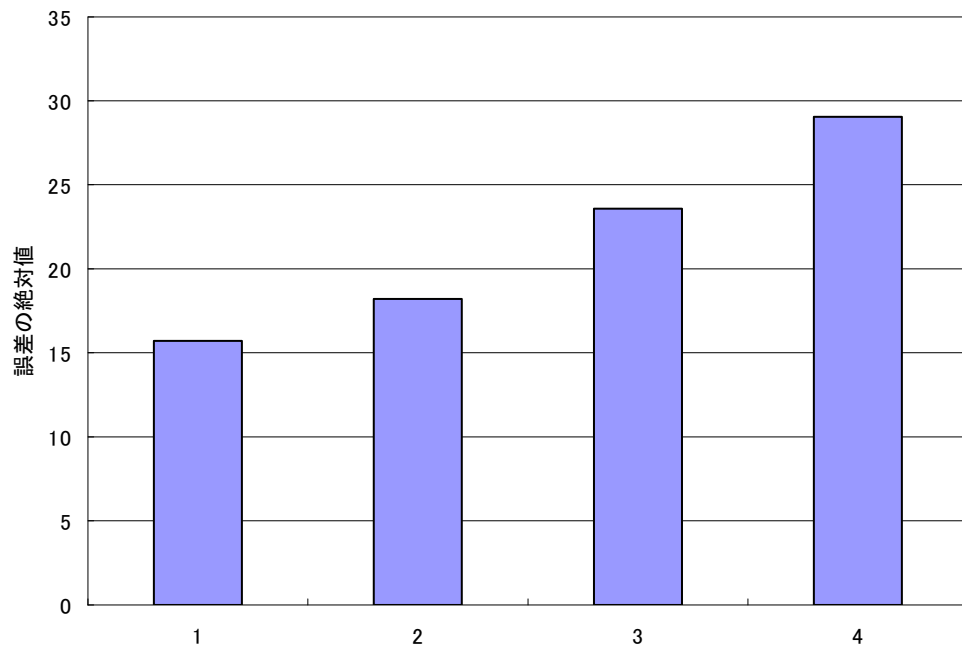
5 関節に近いほうから縦向き、横向き、横向き

6 関節に近いほうから横向き、縦向き、横向き

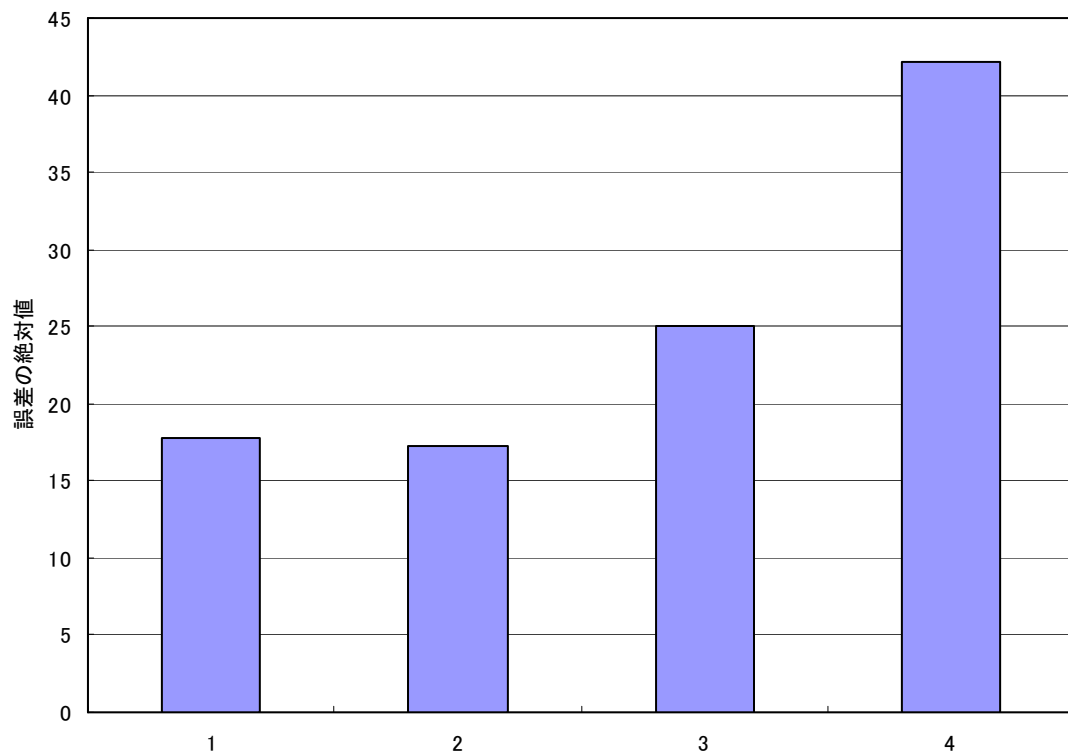
7 関節に近いほうから横向き、横向き、縦向き

8 いずれも横向き

センサ位置が 1cm,2cm のとき

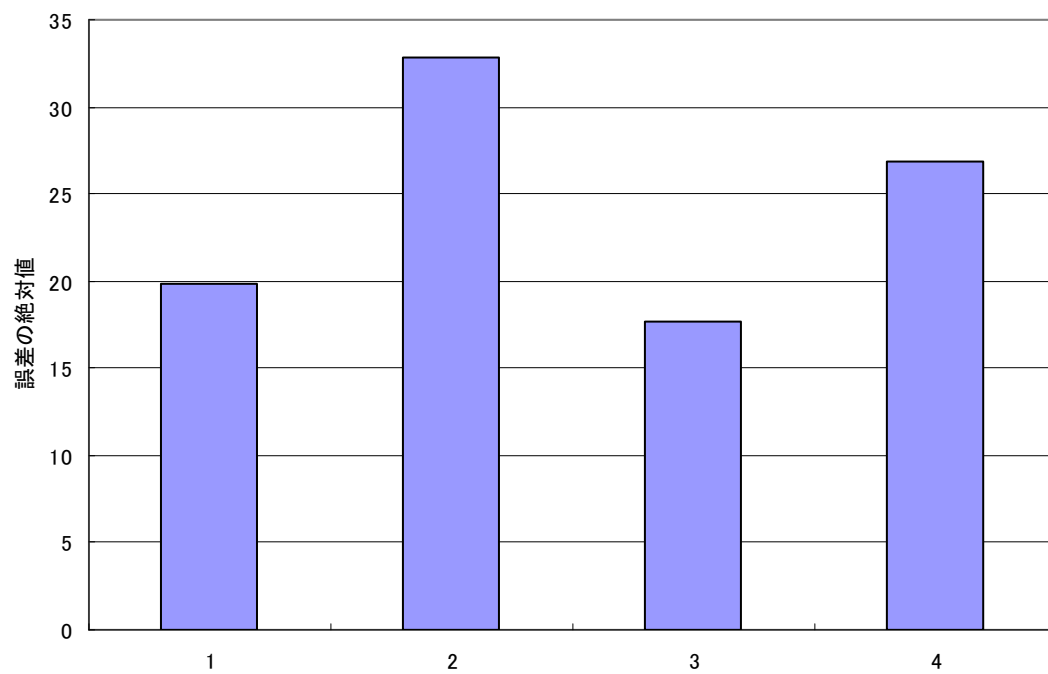


センサ位置が 1cm,3cm のとき

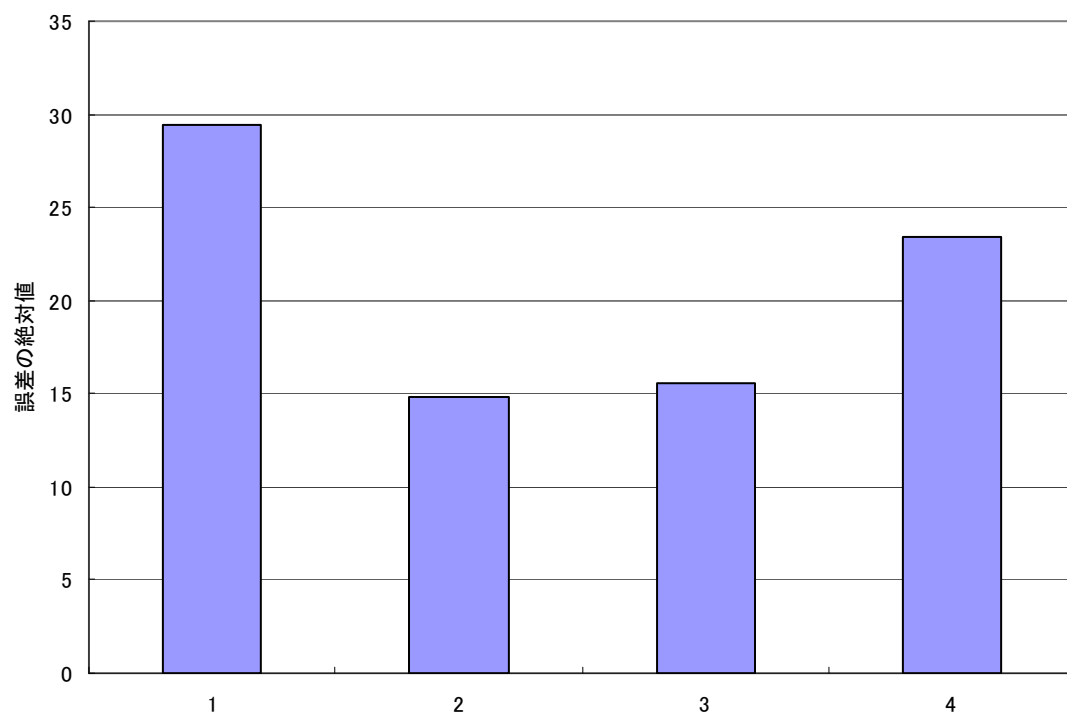




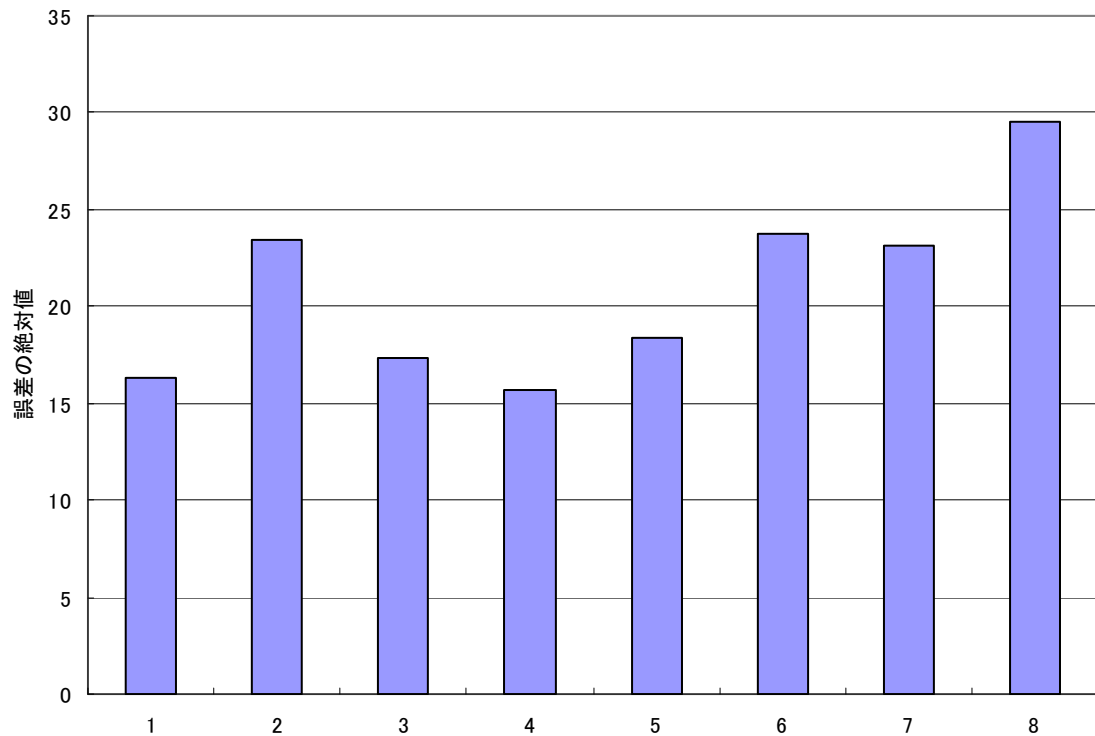
センサ位置が 2cm,3cm のとき



センサ位置が 1.5cm,2.5cm のとき



センサ位置が 1cm,2cm,3cm のとき



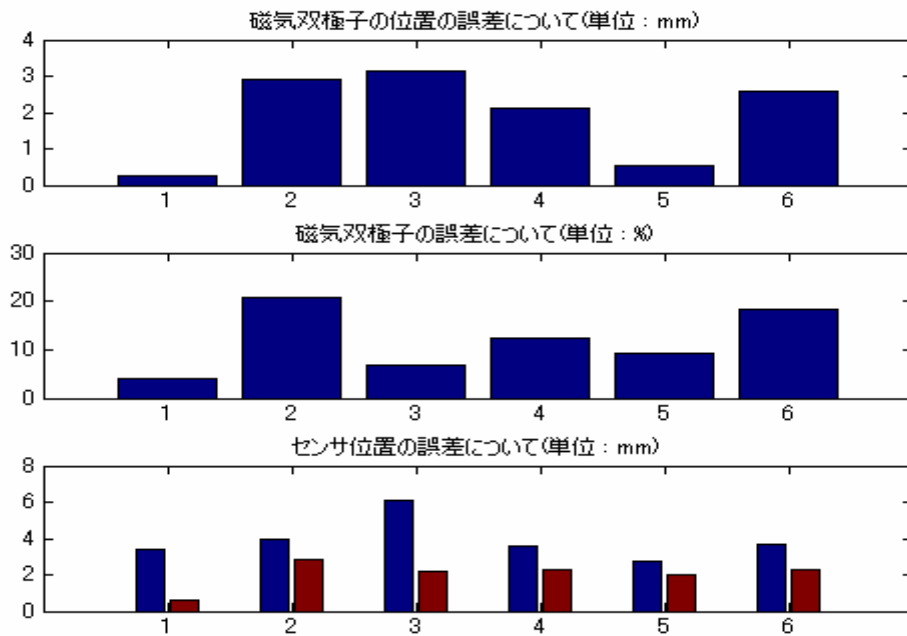
センサ位置、磁気双極子の位置と強さの推定

(評価実験)

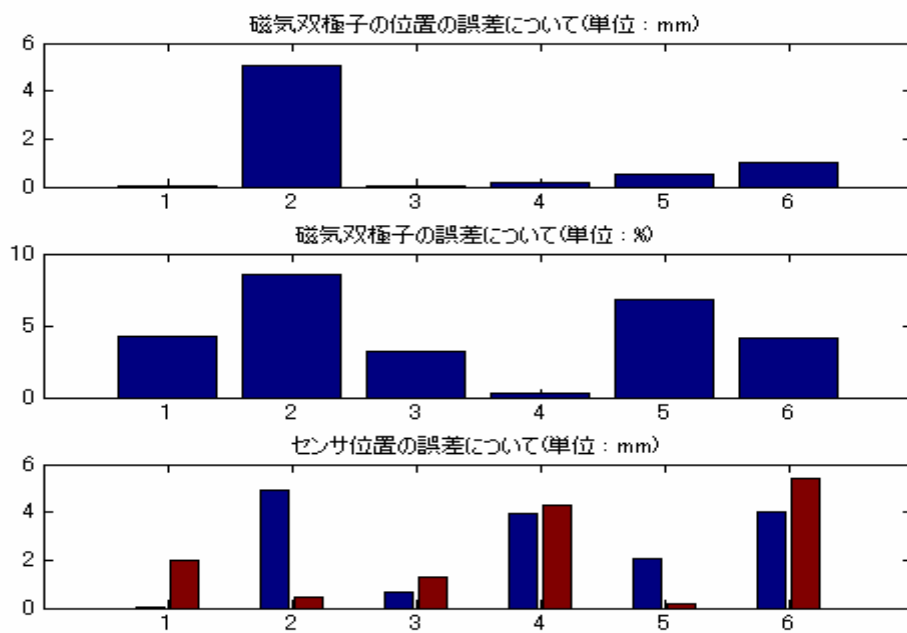
横軸について

- 1 推定に用いた角度が  $0^{\circ}$   $150^{\circ}$
- 2 推定に用いた角度が  $45^{\circ}$   $135^{\circ}$
- 3 推定に用いた角度が  $0^{\circ}$   $50^{\circ}$   $150^{\circ}$
- 4 推定に用いた角度が  $25^{\circ}$   $75^{\circ}$   $125^{\circ}$
- 5 推定に用いた角度が  $0^{\circ}$   $50^{\circ}$   $100^{\circ}$   $150^{\circ}$
- 6 推定に用いた角度が  $30^{\circ}$   $60^{\circ}$   $90^{\circ}$   $120^{\circ}$

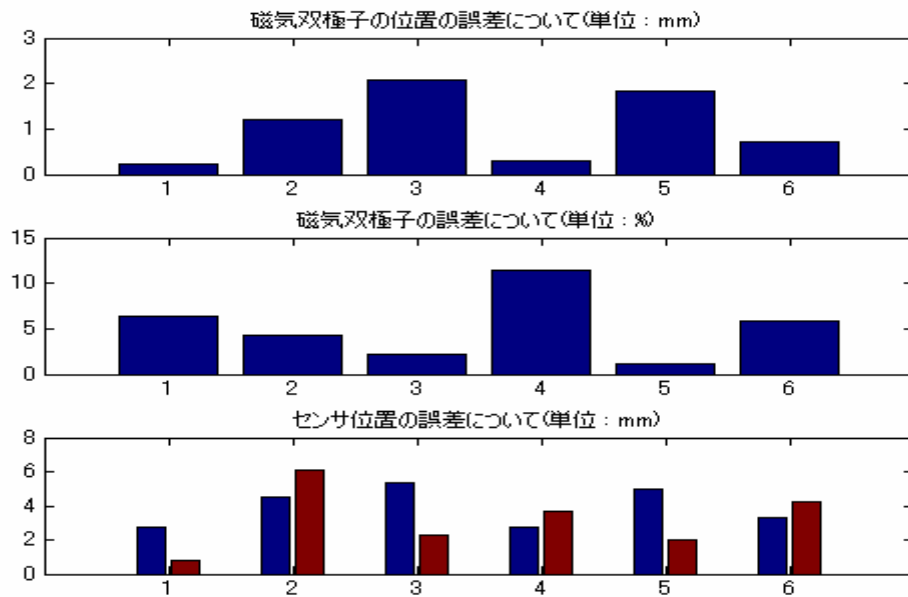
センサの装着位置が 1cm(横向き),2cm(横向き)



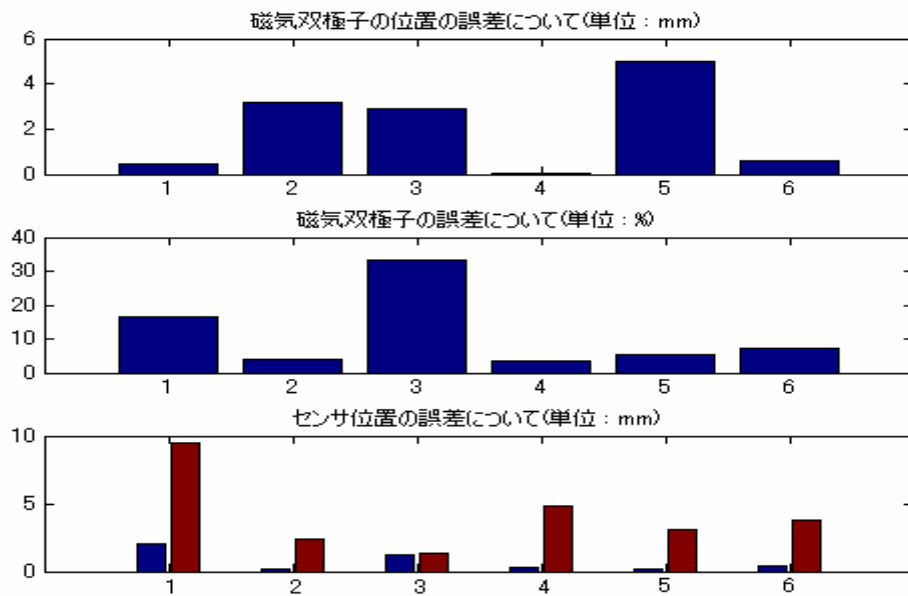
センサの装着位置が 1cm(縦向き),2cm(横向き)



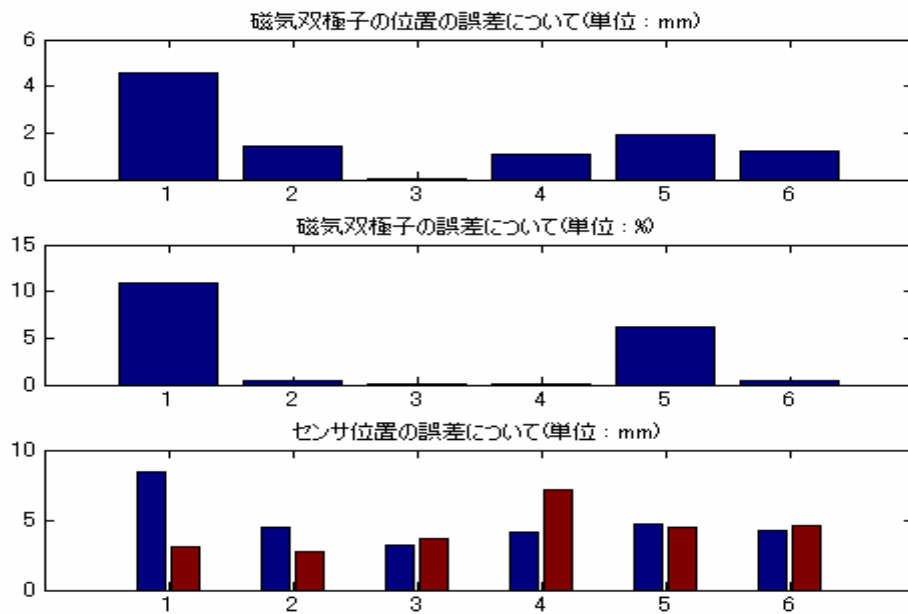
センサの装着位置が 1cm(横向き),2cm(縦向き)



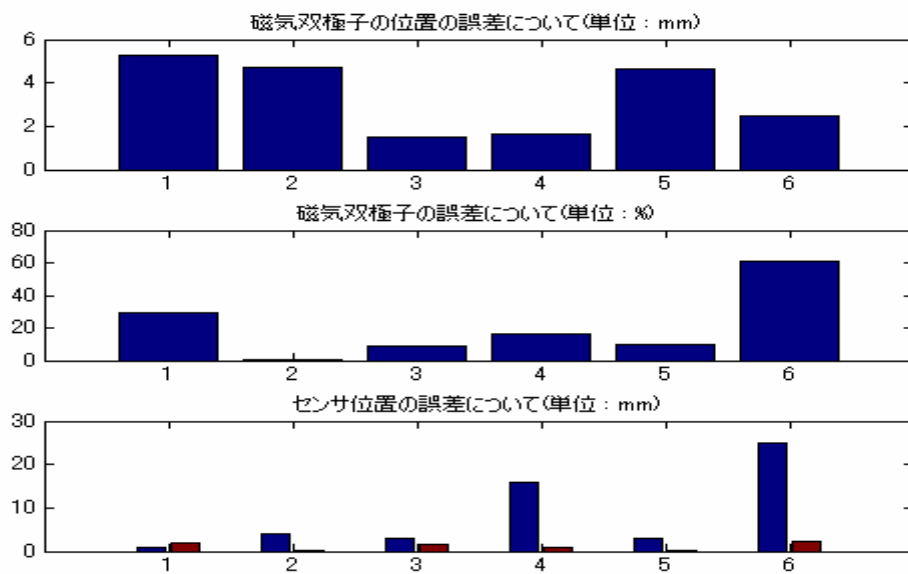
センサの装着位置が 1cm(縦向き),2cm(縦向き)



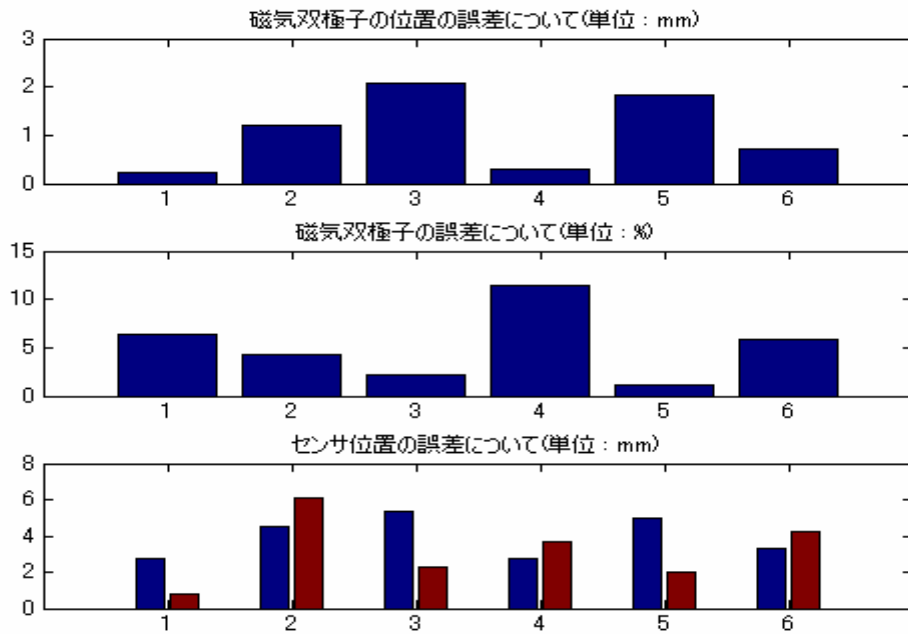
センサの装着位置が 1cm(横向き),3cm(横向き)



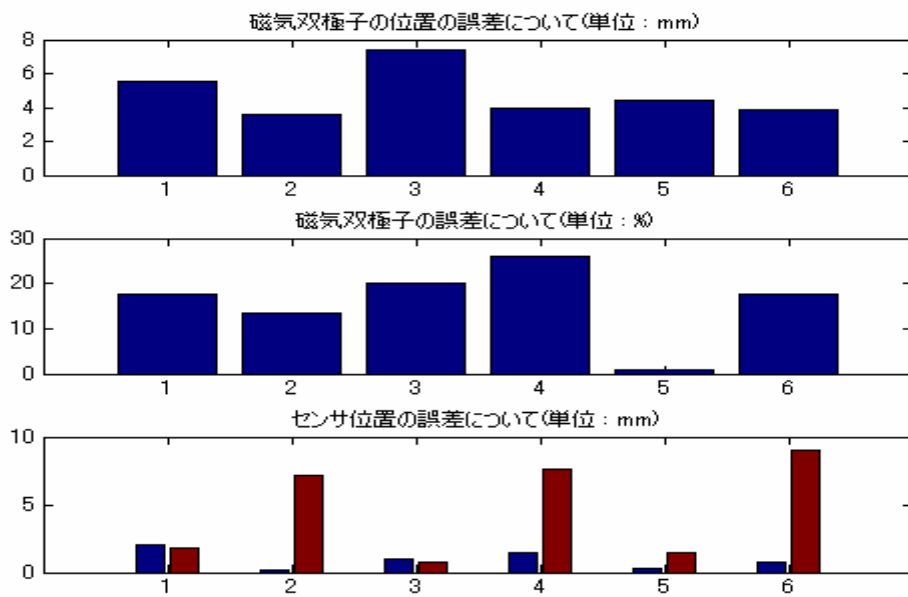
センサの装着位置が 1cm(縦向き),3cm(横向き)



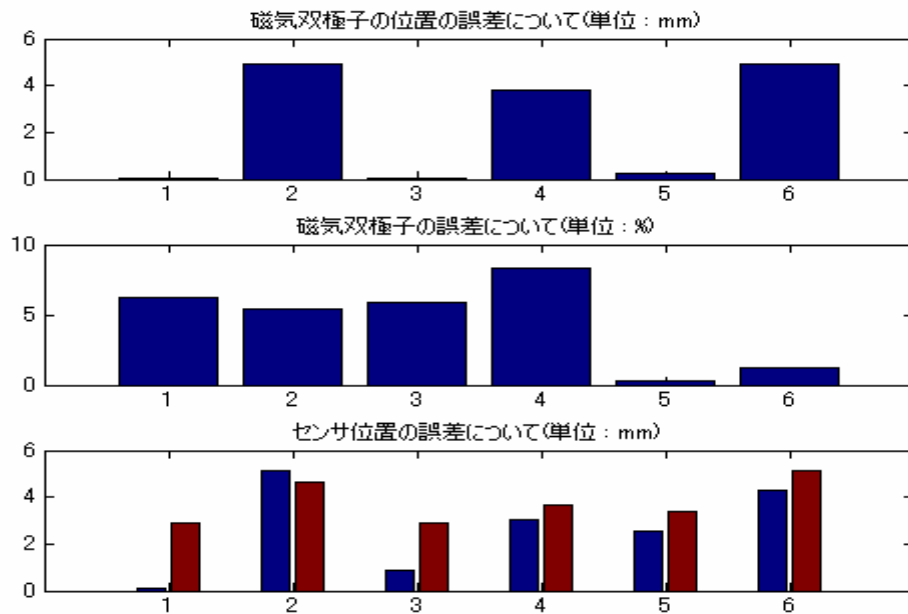
センサの装着位置が 1cm(横向き),3cm(縦向き)



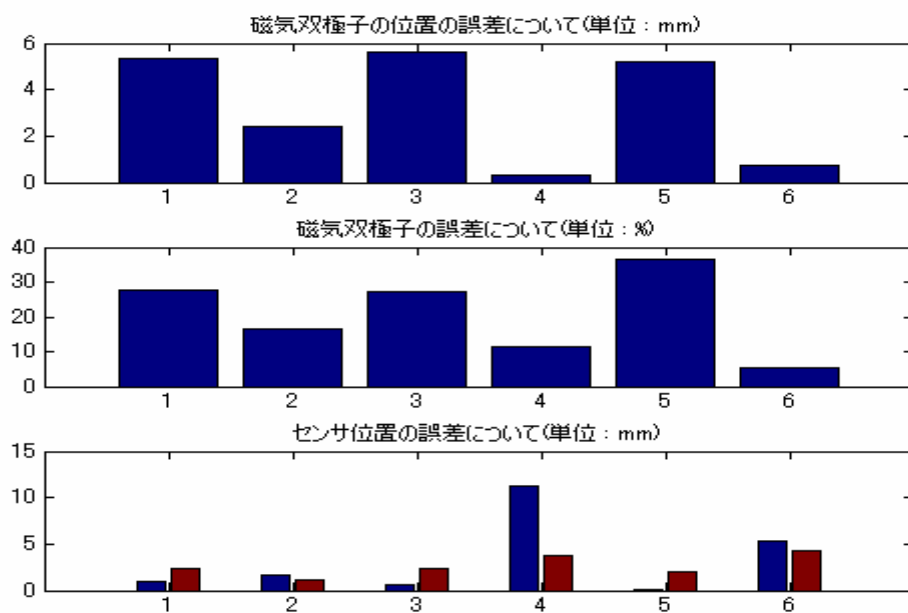
センサの装着位置が 1cm(縦向き),3cm(縦向き)



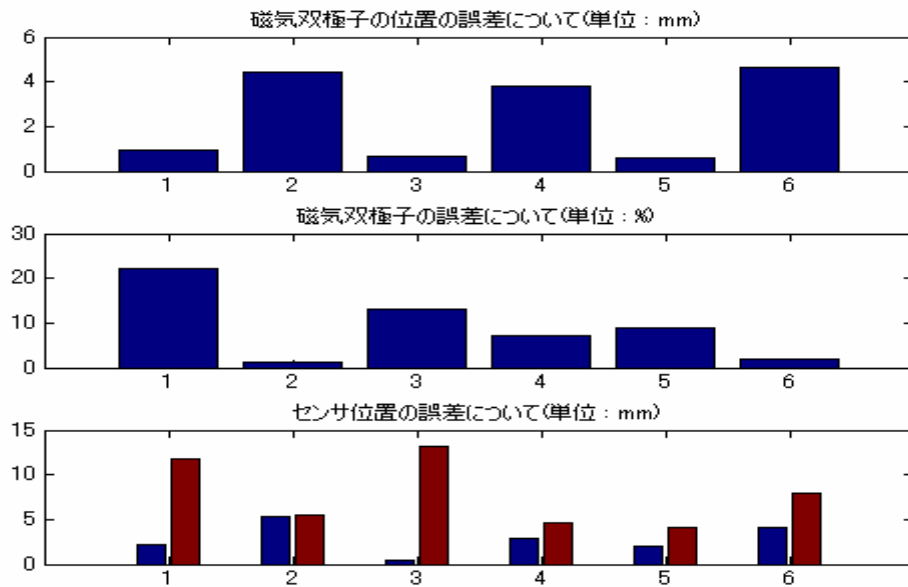
センサの装着位置が 2cm(横向き),3cm(横向き)



センサの装着位置が 2cm(縦向き),3cm(横向き)



センサの装着位置が 2cm(横向き),3cm(縦向き)



センサの装着位置が 2cm(縦向き),3cm(縦向き)

