

磁気式モーションキャプチャに関する研究(第2報)

- 直方体励磁コイルの実装と誤差解析 -

Improvement of Magnetic Type Motion Capture System

- Realization of Rectangular Excitation Coil and Error Analysis -

熊谷 正朗* , 赤松 和禎*

Masaaki Kumagai* , Kazuyoshi Akamatsu*

*東北学院大学

*Tohoku Gakuin University

キーワード： モーションキャプチャ(Motion capture) , 交流磁界(Alternating magnetic field) ,
励磁コイル(Excitation coil) , ピックアップコイル(Pickup coil) ,
協調磁界(Cooperative magnetic field) , 差動磁界(Differential magnetic field)

連絡先： 〒985-8537 宮城県多賀城市中央一丁目13-1 東北学院大学工学部 機械創成工学科
熊谷正朗, Tel: 022-368-7358 , Fax: 022-368-7070

1. はじめに

近年, マルチメディアやロボットに関する業界では, 人間の動作情報を必要とする機会が多くなってきた. その人間の動作を取得する手段として, モーションキャプチャが使われている. 一般的には体の関節等にセンサ等を取り付けて, センサからの情報を3次元データに変換することによって, 人間の動作をコンピュータに取り込むことが可能になる. 種類もTable.1に示すよう, 機械式, 光学式, 磁気式など様々な方式が存在する.

本研究室では, 低コストでのモーションキャプチャの実現を目指して, 磁気式の研究を行っている. センサ単体で3次元の姿勢・位置を検出する磁気式特有の性能を生かすことで, 将来的には, ヘッド・マウント・ディスプレイ(HMD)とセンサを人間の頭に取り付けて, 人間の立ち位置や向いた方向に応じてHMDに表示される風景が変化する

バーチャル・リアリティによるビジュアライゼーションを行ったり, 人間の手先にセンサを取り付けて動きに連動してロボットアームが動作する研究などに利用できると考えられる.

本研究では, 今まで取り扱ってきた装置の改良を行った. 特にFig.1に示す, 現在使用している装置の一部であり, 測定する空間に交流磁界を発生させる役割の励磁コイルに,

- 立方体形状でしか検討してこなかったので, 使用・測定範囲を制限してしまう.
- 組立解体が不可能なため, 常に非常に多くの空間を占有し, 運搬も困難である.

という問題があったため, 新たに励磁コイルの設計を試みた.

前回の磁場解析の結果¹⁾から, 立方体だけではなく直方体形状でも利用できると確認されたことをふまえて, 本稿では, 任意の直方体形状に可変

Table 1 代表的なモーションキャプチャの特徴

方式	機械式(リンク式)	光学式(カメラ)	磁気式
原理	関節を有する対象に固定し、対象物の動きに応じた関節の角度を計測する	対象物に光点等を取り付け、複数のカメラで撮影して解析することで動きを測定する	対象空間に磁界を発生させ、コイルで磁界の違いを読み取り姿勢と位置を観測する
長所	検出が確実 応答性が良好	同時に複数点の観測が可能	運動にともなう死角がない 比較的低コスト
短所	測定物の動作に制限がある	カメラの死角になると計測不可 非常に高コスト	磁性体が近くにあると、磁界が歪み精度に影響する

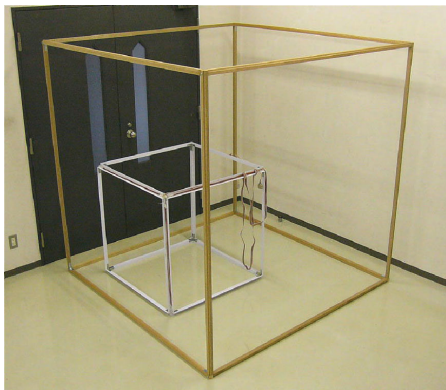


Fig. 1 従来の励磁コイル
骨組みは木材を用いて、立方体形状で組立解体が不可能

できる励磁コイルの製作、実装、測定評価を行い、精度や応答性など考慮したうえでシステムを改良したことについて報告する。

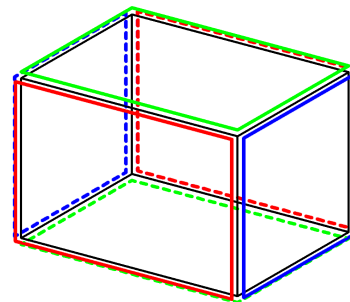
2. 交流磁界を用いた磁気式モーションキャプチャの原理

2.1 システムの概要

この磁気式モーションキャプチャは、Fig.2(a)に示す測定空間に交流磁界を生成する励磁コイルと、Fig.2(b)に示す空間内で磁界を拾うピックアップコイルの2種類のコイルを用いることが特徴である。

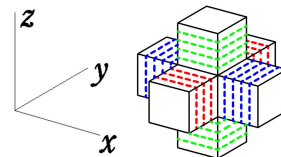
この2種類のコイルを用いた本システムの概要を簡単に述べると、以下ようになる。

1. 測定対象空間を囲む励磁コイルに交流電流を流すことで、計測空間に直線的な強度分布特性を持つ交流磁界を発生させる。



(a) 励磁コイル

矩形のコイルに交流電流を流すことで空間内に交流磁界を発生させる



(b) ピックアップコイル

センサとなる部分で、交流磁界内でコイルに電圧が誘起する

Fig. 2 2種類のコイルの概略図

2. 交流磁界内で、測定対象に取り付けたピックアップコイルに電圧が誘起する。
3. ピックアップコイルに生じた電圧から、励磁した各成分の振幅を取り出して、処理することで姿勢と位置を求める。

ピックアップコイルに誘起する信号の振幅は、その位置での磁界の大きさと測定対象となるピックアップコイルの方向によって決まるので、空間に姿勢の基準となる磁界と、位置の基準となる磁界の2種類の交流磁界を生成すれば各々検出が可能となる。そのため、姿勢の検出には空間内で均一で一定方向に向く平行な磁界が、位置の検出には

位置によって直線的な変化が得られるような磁界が望ましい。

ちなみに改良前のシステムで使っていた2種類のコイルについては、励磁コイルは一辺が約2[m]の立方体で、この立方体の各6面に正方形のコイルを設け、コイルの巻き数は20回である。実際に流す交流電流は40mA_{P-P}であり人体に悪影響及ぼすほど強い磁界は発生しない。一方、ピックアップコイルには巻き数約8000回の小型円筒空芯コイルを使用することで、起電力を増加させて高感度にするよう設計した。

2.2 コイルに誘起する電圧の関係

交流磁界内でピックアップコイルが誘起する電圧の関係を簡単に説明する。

コイルに誘起する起電力 $e(t)$ は、コイルの巻き数 n と、コイルを貫く磁束 $\Phi(t)$ により、

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

と表される。つまり、磁束の時間変化が誘起する電圧となる。磁束は磁力線の数の多さを意味して、ピックアップコイルのコイル断面積で、各交流磁界の磁束密度ベクトル場 B を面積分したものである。そして、ピックアップコイルが十分小さくて、コイル面内で磁束密度の大きさも方向も一定と見なして考えれば、コイルの断面積 S とコイル面の法線方向と磁束密度の方向がなす角度 θ より、

$$\Phi = S|B| \cos \theta \quad (2)$$

と、簡単にコイルに貫く磁束を求めることができる。これは、ある点での磁束密度の方向に対し、どれだけコイルの角度がずれているかによって磁束変化することを表し、方向が一致している($\theta = 0$)のときは磁束 Φ が最大になり、コイルが直交している場合($\theta = \pi/2$)は磁束 Φ が0となる。さらにピックアップコイルの方向ベクトル v (正規化して $|v| = 1$)

を用いると式(2)は、

$$\Phi = SB \cdot v \quad (3)$$

と、ベクトルの内積により求めることができる。そして、この関係を利用することで次に述のように、ピックアップコイルの姿勢は計算で求めることができる。

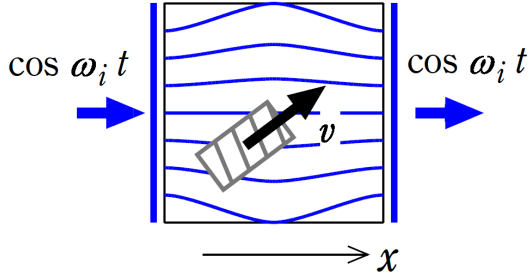
2.3 姿勢の計測

姿勢を計測するためには、式(2)における磁束密度の方向に対して、どの程度測定対象の方向が違つかにより出力が変化することを利用する。そのため、磁束密度つまりは交流磁界の方向ができるだけそろっているものが理想的であるので、ここでは協調磁界と呼ぶ交流磁界を用いた。この協調磁界とは1組の対向する励磁コイルの各々に、同周波数、同位相、同強度の正弦波電流を与えることにより生成した交流磁界である。Fig. 3(a)のように計測空間の両側から同じ方向に磁力を与えるため、内部では横に平行な磁界が作られる。実際に2対の励磁コイルから生成される協調磁界を数値解析したものをFig. 3(b)に示す。図中の矢印は協調磁界の磁束密度の大きさと方向を表している。励磁コイル内部では磁界が同じ方向に整っているが、コイル周辺と外側では磁界が一様になっていないため、測定範囲として使用しない。

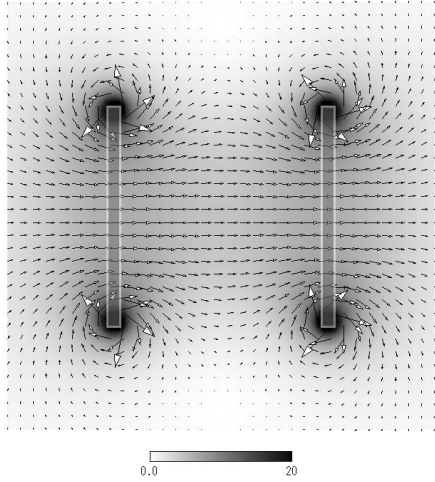
この協調磁界を用いることで、磁界内にあるピックアップコイルの姿勢を求める。まず協調磁界を生成する対向した励磁コイル対の番号を $i(= 1, 2, 3)$ とする。ピックアップコイルもコイルに3個あり、 $j(= 1, 2, 3)$ とおいて考える。

それで、このピックアップコイルを貫く磁束 $\Phi_{i,j}(t)$ は以下の式で与えられ、

$$\Phi_{i,j}(t) = SB_{C_i} c_i \cdot v_j \cos \omega_i t \quad (4)$$



(a) 協調磁界の生成の概念



(b) 数値計算で得た協調磁界の様子
励磁コイルの内部であれば、横にほぼ平行な磁界分布が表れる

Fig. 3 協調磁界

- S : ピックアップコイルの断面積
- B_{Ci} : 励磁コイルの形状や励磁電流振幅など装置によって決定される定数
- c_i : 励磁コイル直方体中央で大きさ1となるよう正規化した振幅ベクトル場
- v_j : ピックアップコイルの方向ベクトル
- ω_i : 励磁電流の角周波数

ピックアップコイルに誘起する電圧は、

$$\begin{aligned}
 e_{i,j}(t) &= -n \frac{d\Phi_{i,j}}{dt} \\
 &= nS\omega_i B_{Ci} c_i \cdot v_j \sin \omega_i t \\
 &= K_{Ci} c_i \cdot v_j \sin \omega_i t
 \end{aligned} \quad (5)$$

と求められる。

また、式の簡略するため $K_{Ci} = -nS\omega_i B_{Ci}$ と定数部は1つにまとめた。そして誘起した電圧に参照波 $\sin \omega_i t$ を乗じて、

$$r_{i,j}(t) = e_{i,j}(t) \cdot \sin \omega_i t$$

$$\begin{aligned}
 &= K_{Ci} c_i \cdot v_j \sin^2 \omega_i t \\
 &= K_{Ci} c_i \cdot v_j \{1 - 2 \cos(2\omega_i t)\} / 2 \quad (6)
 \end{aligned}$$

角振動数 $2\omega_i t$ の部分をローパスフィルタを用いて除去することで、ピックアップコイルの誘起電圧信号に含まれる励磁成分強度 $R_{i,j}$ を求めることができる。

$$R_{i,j} = K_{Ci} c_i \cdot v_j / 2 \quad (7)$$

この相関値 $R_{i,j}$ は、各励磁コイルにおける磁束密度ベクトル場とピックアップコイルの方向ベクトルの内積を含んでおり、これがモーションキャプチャ上で得られる姿勢に関する検出値そのものとなる。

この9個のパラメータ $R_{i,j}$ をもとにピックアップコイルの姿勢を計算で求める。式(7)をみると $R_{i,j}$ は計測して得られる検出値であり、 K_{Ci} は装置定数で、 $c_i(x, y, z)$ もあらかじめ数値計算すれば求められる値であるので、未知数であり本来求めるべき方向ベクトル $v_j(v_{jx}, v_{jy}, v_{jz})$ について式を立てればよい。

よって、式(7)より

$$\begin{aligned}
 c_{1x}v_{jx} + c_{1y}v_{jy} + c_{1z}v_{jz} &= 2R_{1,j}/K_{C1} \\
 c_{2x}v_{jx} + c_{2y}v_{jy} + c_{2z}v_{jz} &= 2R_{2,j}/K_{C2} \\
 c_{3x}v_{jx} + c_{3y}v_{jy} + c_{3z}v_{jz} &= 2R_{3,j}/K_{C3} \quad (8)
 \end{aligned}$$

と、3元1次連立方程式を解けば、方向ベクトル $v_j(v_{jx}, v_{jy}, v_{jz})$ を求めることができる。

ただし、姿勢を求める段階ではピックアップコイルの位置 (x, y, z) がわからず c_i を決定できないので、コイルが励磁コイルの中央にあるものと仮定して姿勢を計算している。よって、正確な姿勢を求めることはできず、あくまで仮の姿勢を求めたにすぎない。そのため、次の過程で得る位置を利用して姿勢を再計算する必要があるが、その前に姿勢が仮定や磁界の歪みの影響で検出した各ピックアップコイルの方向ベクトルが直交していない

い場合があるので，求めた方向ベクトルが直交するように補正している．

2.4 位置の計測

次に位置を求めるためには，姿勢の計測で利用した協調磁界とは違う差動磁界と呼ぶ交流磁界を用いる．この差動磁界とは，3組の対向する励磁コイルの各対に，同出力，逆位相の正弦波電流を与えることにより生成した交流磁界のことである．Fig. 4(a)のように励磁コイルの両側から押しつけるように磁力を与えるため，中央に近づくにつれて磁界が打ち消し合っ無くなるような磁界が作られる．生成される差動磁界を数値解析したものをFig. 4(b)に示す．特徴としては，向かい合う励磁コイルに対して垂直方向の成分だけ取り出すと，中央に近づくにしたがって大きさが直線的に減少してゼロになるほぼ平行な等高線が描ける磁界分布が得られる．この成分を利用して位置を求める．ただし協調磁界と同様に，励磁コイル近辺と外側は磁界が意図した分布と大きく異なるので，計測範囲として利用していない．

位置の計測では，場所によって直線的な出力が得られる差動磁界と，はじめに求めた姿勢を利用して使って計算する．考え方は姿勢と同じで差動磁界で励磁コイルの面に対向したコイルを1組として $i(=4, 5, 6)$ と添え字をおき，ピックアップコイルもコイルが3軸あるので3個あるもとして $j(=1, 2, 3)$ とおいて考える．

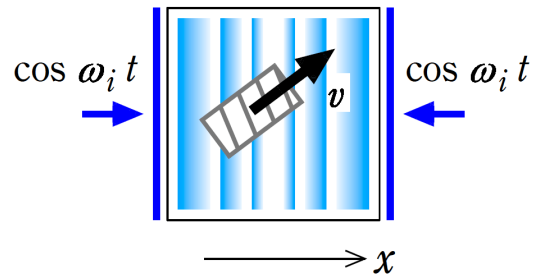
それで，差動磁界内でピックアップコイルを貫く磁束 $\Phi_{i,j}(t)$ は以下の式で与えられ，

$$\Phi_{i,j}(t) = SB_{Di} \mathbf{d}_i \cdot \mathbf{v}_j \cos \omega_i t \quad (9)$$

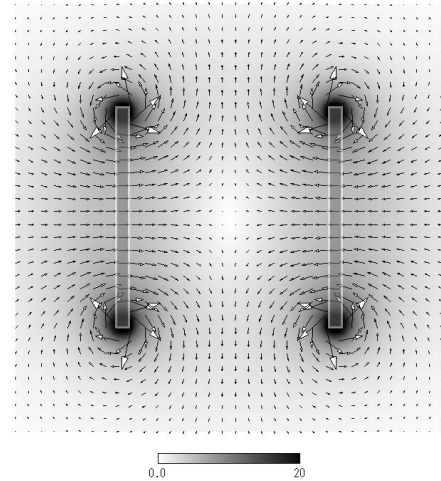
B_{Di} : 励磁コイルの形状や励磁電流振幅など装置によって決定される定数

\mathbf{d}_i : 各励磁コイル矩形部分中央で大きさ1とする正規化した振幅ベクトル場

磁界内でピックアップコイルに誘起する電圧は，



(a) 差動磁界の生成の概念



(b) 数値計算で得た差動磁界の様子
横方向の成分だけ取り出すと，縦にほぼ垂直な磁界分布が表れる

Fig. 4 差動磁界

協調磁界と同様に，

$$e_{i,j}(t) = K_{Di} \mathbf{d}_i \cdot \mathbf{v}_j \sin \omega_i t \quad (10)$$

と求められる．また $K_{Di} = -nS\omega_i B_{Di}$ と定数部は式を簡略するため1つにまとめた．

そして，同様に誘起した電圧に参照波 $\sin \omega_i t$ を乗じ，角振動数 $2\omega_i t$ をローパスフィルタを用いて除去することで，差動磁界内のピックアップコイルの誘起電圧信号に含まれる励磁成分強度 $R_{i,j}$ を求めることができる．

$$r_{i,j}(t) = K_{Di} \mathbf{d}_i \cdot \mathbf{v}_j \{1 - 2 \cos(2\omega_i t)\} / 2 \quad (11)$$

$$R_{i,j} = K_{Di} \mathbf{d}_i \cdot \mathbf{v}_j / 2 \quad (12)$$

この相関値 $R_{i,j}$ は，各励磁コイルにおける差動磁界での磁束密度ベクトル場と先に計算したピックアップコイルの方向ベクトルの内積を含む．

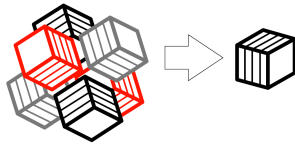


Fig. 5 仮想ピックアップコイルの概略図
3軸分あるコイルを仮想的に1つのコイルにおいて出力強度を評価する

そして、励磁コイルに垂直な成分を得るために、Fig. 5のように3軸直交にコイルを取り付けたピックアップコイルを結合して仮想的に1つのピックアップコイルがあるものとして扱う²⁾。実際のピックアップコイル3軸の出力強度 $P_{i,j}$ と方向ベクトル v_j を利用して、実在するピックアップコイルの中心に位置し、ベクトル v_I に沿った仮想のピックアップコイルの強度を求める。各ピックアップコイルで検出された振幅を

$$P_{i,j} = 2R_{i,j}/K_{Di} \quad (13)$$

とすると、仮想ピックアップコイルで得られる振幅 $P_{i,I}$ は次式で得られる。

$$P_{i,j} = v_1 \cdot v_I P_{i,1} + v_2 \cdot v_I P_{i,2} + v_3 \cdot v_I P_{i,3} \quad (14)$$

ただし、仮想ピックアップコイルの方向ベクトル v_I は、 $|v_I| = |v_j| = 1$ とする。

式(14)から各励磁コイルに垂直な成分を得ることで、Fig. 4(b)でも示した強度分布と照合させて、ピックアップコイルの位置が求められる。

2.5 姿勢と位置の計算手順

上述の原理式より、測定対象となるピックアップコイルの姿勢と位置は、励磁コイルから発生する協調磁界と差動磁界を利用することで得られるが、具体的な流れは以下の手順のようになる。

1. ピックアップコイルの誘起電圧信号に含まれる励磁成分強度 $R_{i,j}$ を求める。
2. ピックアップコイルの位置を励磁コイルの中

央に仮定し、協調磁界の磁束密度ベクトルを用いて仮の姿勢を求める。

3. 求めた仮の姿勢の方向ベクトルと、各成分強度及び差動磁界の磁束密度ベクトル場より位置を求める。
4. 得た位置をもとに姿勢と位置を再計算する。

このように、仮の姿勢で求めた位置から姿勢と位置を最低1回以上再計算するれば、ピックアップコイルの姿勢と位置が求まる。

3. システムのシミュレーション

3.1 磁場演算のシミュレーションの開発

前報を含め、励磁コイル形状が直方体でも対応可能と検証するために行ってきたシミュレーションについて説明する。このシステムのシミュレーションをコンピュータ上で行う際には、下記に示すいくつかの入力条件を与える必要がある。

- 励磁コイル直方体各成分の長さ $L(x, y, z)$
- 測定対象となるピックアップコイルの姿勢 $v_j(v_{jx}, v_{jy}, v_{jz})$ と位置 $P(x, y, z)$

そして、設定したピックアップコイルの位置に発生する磁束密度を求めるため、ビオ・サバールの法則³⁾を使って励磁コイルからピックアップコイルのある点 P の磁束密度 $B_i(b_{ix}, b_{iy}, b_{iz})$ を計算することにした。こうして、求めた各交流磁界の磁束密度 B_i と、条件として与えたピックアップコイルの姿勢 v_j を内積することで、各励磁成分の強度 $R_{i,j}$ を計算で求めることができる。

実際に直方体形状3[m] × 2[m] × 2[m]の場合で解析した結果をFig. 6(協調磁界)、Fig. 7(差動磁界)に示す。これによると、協調磁界では励磁コイル内部で横に平行な磁界が生成されていることや、差動磁界ではコイルに垂直な成分を取ったときの磁界分布など、立方体形状の時と比べてほとんど

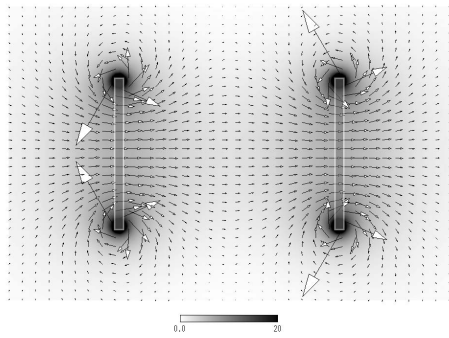


Fig. 6 直方体形状での協調磁界

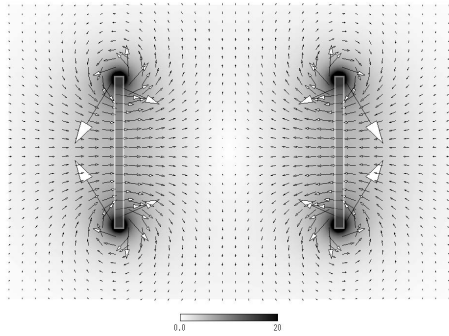


Fig. 7 直方体形状での差動磁界

性質に違いはない。Fig. 3とFig. 4に比較して、励磁コイル周辺や外側で磁界が歪みの現れかたが若干目立つ程度で、実際に測定範囲として利用する励磁コイル内部においては、期待する協調磁界と差動磁界が生成されているので問題ないといえる。

3.2 測定対象を計算するソフトウェアの開発

直方体形状での磁場の妥当性を調べるためシミュレーションを行ったが、磁界の歪みでどの程度計測誤差に影響するかを確認するため、計算して得た各励磁成分の強度 $R_{i,j}$ から測定対象のピックアップコイルの姿勢と位置を算出するプログラムを開発して、誤差の大きさを調べた。入力をピックアップコイルの姿勢と位置として、ピオ・サバルの法則より各励磁成分の強度を得て、その検出値を利用して姿勢と位置を求めるといった、実装置のハードウェア部分とソフトウェア部分を一括したプログラムを開発し、任意の励磁コイル形状での

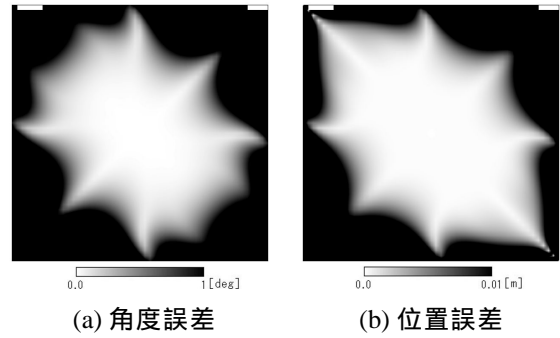


Fig. 8 2[m]の立方体コイルの誤差分布

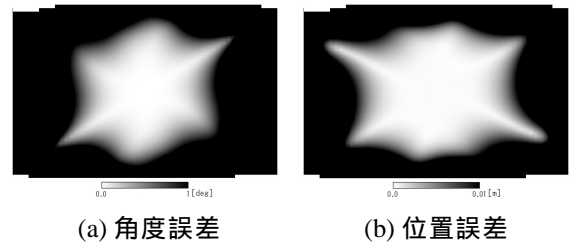


Fig. 9 直方体3[m] × 2[m] × 2[m]の誤差分布

入出力の違いを調べることにした。

まず開発したソフトウェアの動作を確認するために、立方体形状について解析して誤差の度合いを調べてみた。3個の方向ベクトルの角度誤差の平均値をFig. 8(a)に示す。この場合、周辺部に1[deg]以上の誤差がみられるが、主に利用する内側ではほとんど誤差が見られない。位置の誤差(Fig. 8(b))も同じく、励磁コイル周辺では10[mm]以上の誤差が見られるが、内側では誤差がほとんどない。また、両者の誤差分布傾向が酷似している理由は、計算過程上で先に姿勢を求めてから位置を算出しているため、姿勢誤差の影響がそのまま位置誤差に反映されたためと考えられる。このことから、全体の精度を向上させるためには、姿勢の求め方を改善する必要であるといえる。本シミュレーションについては、従来のシステム通り励磁コイルの周辺と内部の精度の傾向は実際のもものと同等であることがわかったので、このソフトウェアは致命的な欠点がないことが確認できた。

次に、直方体形状での励磁コイルの誤差分布を調べた。3[m] × 2[m] × 2[m]の励磁コイルの誤差分

布をFig.9に示す．立方体形状と見比べれば多少誤差が目立ってくるものの，内側では誤差は小さく十分扱うことができる．占有している空間に比較し高精度に検出できる割合が多くはないが，励磁コイル周辺でない限り誤差は50[mm]以上となることないので，直方体形状でも想定している用途には十分な精度は得られていると考えられる．このシミュレーションにより，直方体励磁コイルでもシステムが動作することを確認することができた．

4. システムの実装

4.1 励磁コイルの設計・製作

シミュレーションで立方体以外の励磁コイルでも動作することが確認できたので，新しい励磁コイルの製作を行った．今回は励磁コイルの長さを変えることを目的としたので，直方体の辺と頂点を別々に作り，組立解体できるように設計した．

まず直方体の辺となる部分是非磁性体である紙管を利用して，その両端に穴を開けてコイル部分となる40本のフラットケーブルを通して，その両端に着脱用のコネクタを取り付けた．次に直方体の頂点部分はコイルとなる辺を電氣的に接続し，構造的にも互いに直交するように接続する必要がある．なおかつ4本からなる矩形部分はコイルを巻いた状態にしなければならない．そのため，ケーブルを単に接続することで一周させるコネクタを6個と，給電点付きのコネクタ2個の計8個用意した．実際にジョイント部分にケーブル付き紙管を取り付けるとFig.10のようなになる．また，一辺で40本あるケーブルは隣接する矩形面にそれぞれ20本ずつ使用され，1面のコイル巻き数は20回となる．これで必要なコイルの長さを用意し組み立てれば，Fig.11に示すような直方体形状を作ることができる．なお，中間右寄りに見られる枠は，延長用かつ強度向上のためのものでありコイルは入っていない．



Fig. 10 励磁コイルの頂点となるジョイント部分．コイル(紙管)をさすと直交に連結される



Fig. 11 本研究で作成した励磁コイル(直方体形状)

4.2 直方体形状対応のシステムの実装

実際に直方体で組立解体可能な励磁コイルの設計・製作を行ったので，次に本システムへの実装を試みた．しかし，従来のシステムは各成分同じ計算として扱い簡略化しているので直方体には対応していない．さらに計算過程上，相関値に対して姿勢と位置に関する励磁コイル形状固有のテーブルを必要とし，コイル形状に応じて用意しなければならない．そこで，解析用プログラムを試験的に本システムに組み込んで，実際に直方体形状でも動作するか調べた．結果，2[m]の立方体で従来とほぼ近い姿勢・位置が得られ，高さだけ1[m]に変えた直方体で計測した場合では，若干精度は下がったものの十分利用可能な姿勢・位置が検出できた．これで直方体励磁コイルの実装は一通り実現はできたが，この解析用プログラムは収束計算を基本としているため，テーブル参照法と比べて少し精度はよくなる一方で処理速度が大幅に劣る．リアルタイム性を要求するモーションキャプチャではこの手法は実用性に欠けるので，既存の

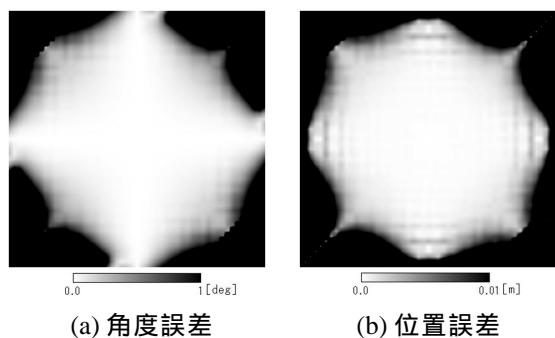


Fig. 12 テーブル参照での立方体形状の誤差分布

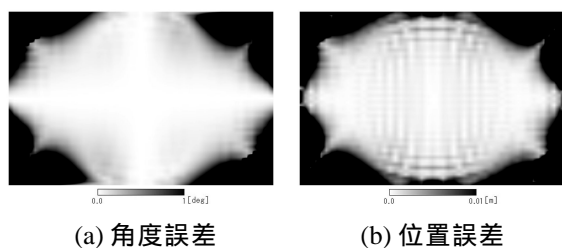
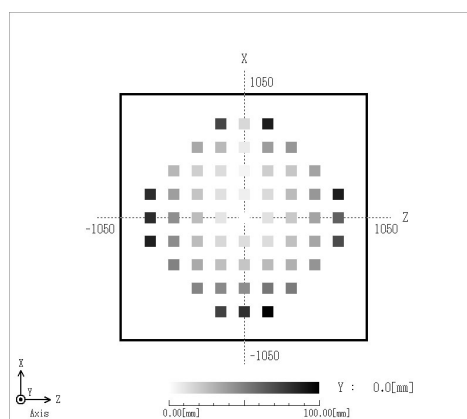


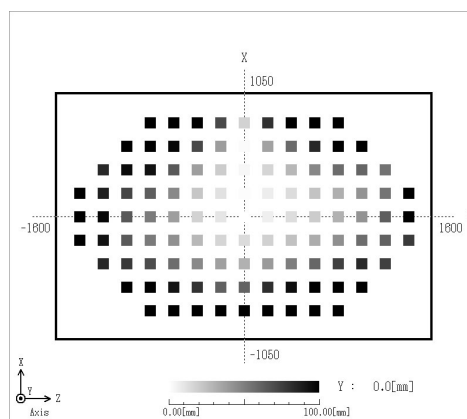
Fig. 13 テーブル参照での直方体形状の誤差分布

システムで行われていたテーブル参照を使って高速化を図ることにした。

そのため、テーブル参照を利用した場合の精度をシミュレーションで評価したところFig. 12とFig. 13に示すように、立方体・直方体ともに励磁コイル内部であれば十分精度があることが確認できたので、従来のテーブル参照するシステムを直方体形状でも利用できるように改良し、特定の励磁コイル長さに応じたテーブルを生成するプログラムを開発した。生成するテーブルに関しては、励磁コイルから任意の距離にある位置 $P(x, y, z)$ に対する協調磁界の振幅ベクトル場 $c_i(x, y, z)$ と、差動磁界より求められる仮想ピックアップコイルの振幅 $P_{i,I}$ に対する位置 $P(x, y, z)$ の2種類の格子点状のテーブルを必要とする。そこで、各長さに応じた参照テーブルを用意して、必要な大きさの励磁コイルを組み立てて設置すれば簡単に利用でき、実際に動作としても従来のシステム通りの性能で直方体形状でも姿勢と位置を検出することが確認できた。



(a) 立方体形状



(b) 直方体形状

Fig. 14 テーブル参照で位置の誤差分布

4.3 直方体形状での実証実験

実際に立方体・直方体形状でテーブル参照法を利用した場合に、どの程度精度が出るか実測して検討した。実際に計測した立方体及び直方体での中央を原点とする相対的な位置誤差をFig. 14に示す。

結果としては予想通り内側は精度が良く外側は悪くなる分布傾向にはなったが全体的な精度はいいとは言えず、原因として装置周辺の磁性体の影響、特に床面の鉄筋による磁界に歪みが大きく、その影響も考慮に入れ励磁コイル自体を床から500[mm]以上持ち上げて計測したものの誤差が生じてしまった。この対策については後述するが、励磁コイルから生成する磁界の歪みによる影響なので、テーブル参照を用いた計算による問題ではない。

5. 測定誤差の検討

前回の直方体実用化の検証を含め、実際に計測を行った際にシステム特有の誤差傾向が見られることがわかったので、条件を色々変えてデータを集めて解析することにした。その結果、以下のような原因があると判明した。

- 姿勢・位置の繰り返し計算回数による影響
- 参照テーブルの格子点の分割数による影響
- 励磁コイル周辺での磁場の歪みによる誤差
- 姿勢の直交補正の手法による影響
- 設置環境による磁性体等による影響

特に、姿勢・位置の繰り返し計算部分については2回行えば十分な精度が得ると考えられてきたが、回数を増やすとより励磁コイル周辺でも幾らか高い精度を出すことができることが判明した。この処理部分は(テーブル参照では姿勢・位置演算は0.015[ms]以下と)時間を要さないので、回数を増やせば簡単に安定した測定空間を広く確保することができる。また、差動磁界に関しては中央から7割程度過ぎると直線的な強度分布は崩れかけ、線形補完をする都合上、テーブルの格子点が荒いと外側の誤差が余計に目立ってくるので、分割数を増やして外側の精度を向上させた。

磁界の歪みと直交補正の手法については、特に測定空間として利用しない励磁コイル周辺で起こる問題で、コイル内部と比較して磁束が強すぎるため分解能の都合でもともと無視していることもあり、この部分に関しては考慮していない。

また、磁性体の影響については小規模な物なら影響は少ないが、鉄筋などの規模が大きくなると磁界全体が歪んでしまう。対策としては一番ひずみの影響を受ける高さ成分の交流電流の振幅を強くし、他成分との位相を合わせればある程度動作はする。しかし、歪みそのものを取り除くことはできず、CRTディスプレイのような周期的な磁界を出す物を置くと、測定にばらつきが生じることもあるので、周りに注意する必要がある。

6. おわりに

本論文では動作原理を含め、前回の試験的な収束計算を利用した直方体励磁コイルの適用から、応答性を重視するため従来通りのテーブル参照を行い、そのための励磁コイルの設計・開発、システムの実装について述べた。そして、新たに励磁コイル形状に応じたテーブルを生成するソフトウェアを開発を行い、元のシステムでも適用できるように改良することで、直方体形状でも従来通りに姿勢・位置を計測することが確認できた。

またシミュレーションや実際の計測での検証の過程で、本システム特有の測定誤差があることが判明したので、原因を追及してそれに対する対策方法を考え、いくつか精度を向上させる方法を見つけることができた。非接触による姿勢・位置検出としては、現状のシステムでも励磁コイル内部であれば十分な精度とは言えるが、実装レベルの場合になるといくらか精度が落ちるため、これからは広範囲での測定空間の精度向上を目指して、今回の結果をもとに改良を行いたいと思う。

最後に、励磁コイル装置周辺部品の開発及び計測に協力していただいた本研究室と東北学院大学工学部ロボット研究会一同に、感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 赤松和禎: 磁気式モーションキャプチャに関する研究, 計測自動制御学会 東北支部 第226回研究集会, 226-10,(2005)
- 2) 熊谷正朗: 交流磁界を用いたモーションキャプチャの開発, Interface 2004年11月号, pp.107-122, CQ出版(株)
- 3) 宮田浩: わかる! コイルと磁気と回路の世界, トランジスタ技術 2004年8月号別冊付録, CQ出版(株)