

カテーテル先端位置検出のための永久磁石と  
**3 軸磁気センサを用いた 5 軸位置計測装置の研究**  
 A 5-dimensional motion sensor for position detection of a catheter  
 by using a permanent magnet and 3-axial magnetic sensors

電気電子情報通信工学専攻 安藤 凜太郎

Rintaro ANDO

**1. 緒言**

現在,日本において肺炎は3番目に多い死亡原因である.特に高齢者において誤嚥性肺炎による死亡が増加している.誤嚥性肺炎とは細菌が唾液や胃液と共に肺に流れ込んで生じる肺炎である.誤嚥性肺炎は嚥下機能の低下が原因であることが多い.そのため,嚥下機能の低下を防ぎ,発症を予防することが重要である.嚥下機能の低下を防ぐ方法として口腔機能訓練が存在するが,その効果は訓練を行う者の能力に依存する.そのため,嚥下訓練の特別な技能を持たない者でも適切に訓練できる手段や装置が求められている.摂食嚥下訓練法について咽頭内の嚥下誘発域に電気刺激を与えることによる嚥下の誘発が嚥下訓練に有効である.この嚥下訓練を安全かつ効果的に使用するには,カテーテル先端の電極が嚥下誘発域にあることを確認することが求められているが,現在,医療現場においてこのような用途で手軽に使用できる位置計測装置は実用化されていない.

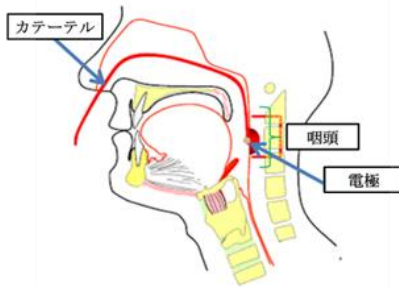


図 1: 嚥下訓練時の様子

**2. 研究目的**

本研究の目的は誤嚥性肺炎の予防となる嚥下訓練をより手軽に行うために,訓練に使用するカテーテル先端の位置を計測する三次元位置計測装置の実現である.本研究では磁石が発する磁気ベクトルの幾何学的特徴に着目し,シンプルな三次元位置計測システムの実現を目指す.本修士研究では学士研究で課題であった,測定が不可能となる条件の特定と計測速度の向上に取り組んだ.

**3. 提案する三次元位置計測システム**

本研究ではカテーテル先端に取り付けた磁石が生成する磁場を体外に固定した複数の磁気センサで計測し,磁気ベクトルを解析することで磁石の座標と角度を測定する.

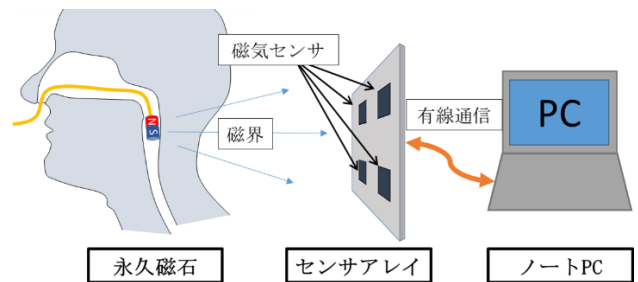


図 2: 提案する三次元位置計測装置の構成

**4. 三次元位置計測アルゴリズム**

永久磁石を原点とする座標系を図 3 のように定義すると,任意の点における磁場の強さは次式(4.1)で求めることができる.

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \frac{3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{R})\mathbf{R} - \mathbf{M}|\mathbf{R}|^2}{|\mathbf{R}|^5} \right\} \quad (4.1)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = |\mathbf{M}| \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{pmatrix}$$

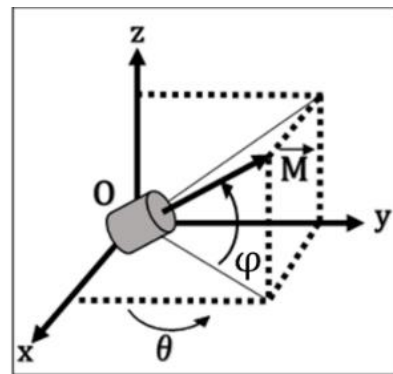


図 3: 永久磁石の座標系

$\mu_0$ は真空中の透磁率であり、その値は $4\pi \times 10^{-7}$  [H/m]である。 $\mathbf{R}$ は磁石からの距離、 $\mathbf{M}$ は磁気双極子ベクトルであり、その大きさは磁石により、固有の値をもつ。また、 $x, y, z$  は空間位置ベクトル (3次元)、 $\theta, \varphi$  は空間座標系に対するセンサの角度 (2次元) であり、三次元の位置計測を行う場合、この5つが未知数となる。

磁気センサを用いて計測できるのはある一点における磁気ベクトルのみであり、1つの磁気センサのデータだけでは磁石の位置と姿勢を決定することはできない。そのため、複数点に磁気センサを配置し、複数点の磁気データから位置と姿勢を求め、今回は4つの磁気センサを用いて試作装置を作成し、実験を行った。

磁石の向きを図4のように定めたとき、Y-Z平面に磁気ベクトルを投影すると、図4に示すように磁石中心から放射状に広がるベクトルと、磁石中心へ向かっていくベクトルのみになる。

そこで、この磁石の性質を利用して磁気センサが測定した磁気ベクトルを仮定した角度 $\theta, \varphi$ 回転させた平面に投影し、それらの磁気ベクトルが一点で交わったときの $\theta, \varphi$ を磁石の角度としている。実際には投影された4つ磁気ベクトルから交点を2つ求め、その差が一定値以下になるまで $\theta, \varphi$ の探索を行っている。この際に交点を求める磁気ベクトルの組み合わせは全部で6つあるが、従来のアルゴリズムではこの組み合わせが固定されていた。以下の図7にフローチャートを示す。

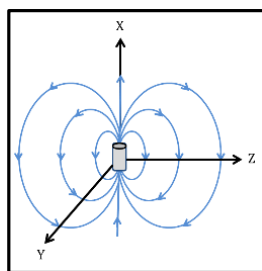


図4：磁気ベクトル

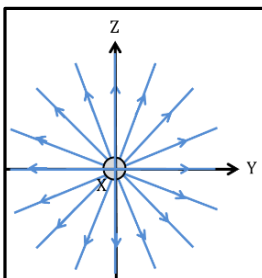


図5：YZ平面

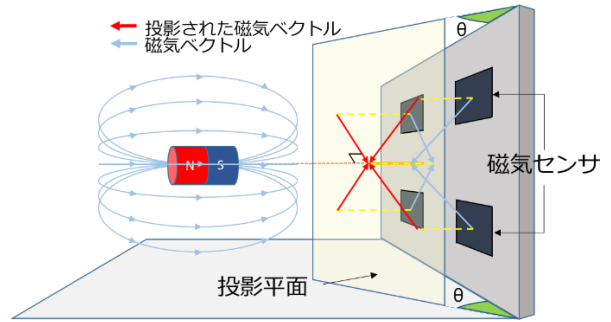


図6：回転させた平面に投影された磁気ベクトル

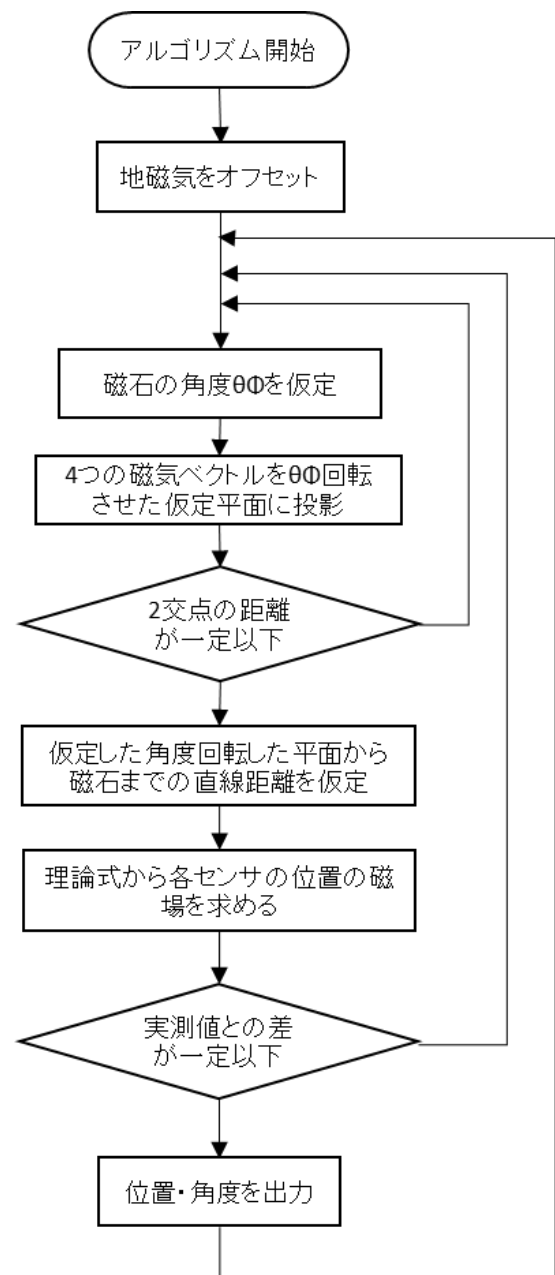


図7：フローチャート

以上の手順が本研究で用いる永久磁石の三次元位置計測法である。

## 5. 測定精度改善に向けた取り組み

### 5.1 磁気ベクトルが平行になる場合について

前節で説明した磁石位置計測アルゴリズムの中で、磁気センサと磁石の位置関係によって誤差が大きくなる場合がある。回転後のセンサ座標系の Y-Z 平面上に投影した 2 つのベクトルの交点を求める際、2 つの磁気センサを結ぶ線上に磁石の中心線が一致する場合などはそれらのベクトルが図 8 図 6 に示すように Y-Z 平面上で平行となるのでこれらのベクトルからは交点が定まらない。また、投影した磁気ベクトルの 1 本または複数がきわめて小さい場合には交点を求めることができない。

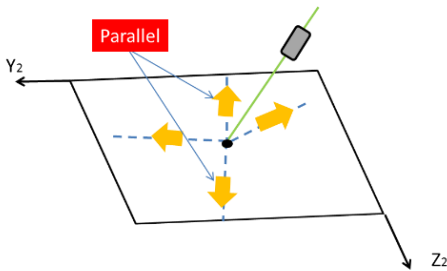


図 8 : Y-Z 平面上に投影した磁気ベクトルが平行関係の場合

そこで、平面上に投影した 2 本の磁気ベクトル同士の内積を計算し、平行な関係にない磁気ベクトルの組み合わせから、前節で説明した仮定平面上で交点を求めるアルゴリズムを提案した。

### 5.2 仮定平面の探索方法と探索時間について

本磁石位置計測アルゴリズムの中で磁石の角度  $(\varphi, \theta)$  を  $1^\circ$  刻みで仮定すると、 $-90 \leq \varphi \leq 90^\circ$ 、 $0 \leq \theta < 360^\circ$  で計 65160 回の繰り返し計算が必要になる。従来のアルゴリズムではこの繰り返し計算を総当たりで行っており、リアルタイムで計測を行う妨げとなっていた。そこで以下の手順で探索を 2 段階に分けることで計算回数を削減する方法を提案した。

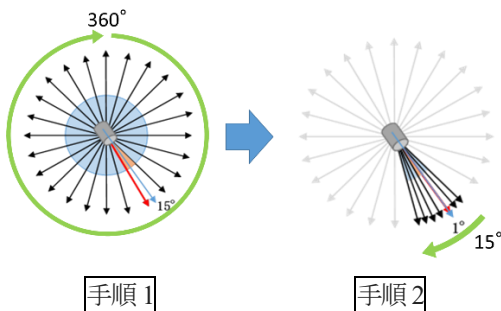


図 9 : 二段階で磁石の角度を探索する様子

#### 手順 1

探索を二回に分けるうえで一段階目の探索範囲を  $\gamma^\circ$  ] とすると、一段階目の探索は磁石の角度を  $-90 \leq \varphi \leq 90^\circ$  ]、 $0 \leq \theta < 360^\circ$  ] の範囲、 $\gamma^\circ$  ] 刻みで探索する。このとき仮定平面上に投影した磁気ベクトルの交点  $C_1$ 、 $C_2$  の差  $\delta_c$  は無視し、各センサの磁場の強さの理論値との測定値の差  $\delta_B$  が最小となった時の角度  $(\varphi_1, \theta_1)$  を記録する。

#### 手順 2

二段階目の探索では一段階目で記録した  $(\varphi_1 - \gamma) \leq \varphi_1 \leq (\varphi_1 + \gamma)^\circ$  ]、 $(\theta_1 - \gamma) \leq \theta_1 \leq (\theta_1 + \gamma)^\circ$  ] の範囲を  $1^\circ$  ] 刻みで仮定する。この探索では仮定平面上に投影した磁気ベクトルの交点  $C_1$ 、 $C_2$  の差  $\delta_c$  が一定値以下、かつ各センサの磁場の強さの理論値との測定値の差  $\delta_B$  が最小になった時の角度  $(\theta_2, \varphi_2)$  をアルゴリズムの計算結果の角度として出力する。

#### 補足

探索回数  $n$  は

$$n = \frac{360}{\gamma} \times \left( \frac{180}{\gamma} + 1 \right) + (2\gamma)^2 \quad (4.21)$$

と表せる。式 4.21 から  $n$  の最小値を求めると  $\gamma = 11^\circ$  ] のとき  $n=1052$  [回] となる。しかし、 $180^\circ$  ] を 11 で割り切れないため本実験では  $\gamma = 15^\circ$  ]、 $n=1212$  [回] で探索を行っている。このような探索方法を採用することで計算回数を大幅に削減することができる。

## 6. 評価実験

以上のアルゴリズムを適用した三次元位置計測装置を試作し、アルゴリズムごとの精度検証を行った。作成した三次元位置計測装置は磁気センサを 50[mm] 四方に固定しており、4 つの磁気センサの中心を座標系の原点としている。また、角度については磁石がセンサアレイに垂直で X 軸上にある状態を  $\theta=0$ 、 $\varphi=0$  の状態とする。実験は  $Z=0$  [mm] の状態で  $(\theta, \varphi)$  それぞれ  $30^\circ$  ] ごとに磁石を Y 軸方向に 20[mm] 間隔、 $-40 \leq Y \leq 40$  [mm]、X 軸方向に 10[mm] 間隔、 $50 \leq X \leq 100$  [mm] の計 30 箇所での 50 回計測を行い、誤差の絶対値の平均と計測時間にかかった時間の分布を記録した。

## 6.1 検証結果

検証結果を図 11～図 14 に示す。図 11, 図 13 のプロットの大きさは各座標における誤差の絶対値の平均を示しており、図 12, 図 14 のプロットは各座標における測定間隔の平均時間を示している。プロットのない座標は測定が不可能であった座標である。探索を二段階に分けるアルゴリズムを適用したことで測定精度を損なうことなく、測定間隔を平均約 1306[ms] から平均約 138[ms] まで約 89% 削減することができた。また、仮定平面に投影した磁気ベクトルの内積を考慮し、磁気ベクトルの交点を求めるセンサの組み合わせを決定するアルゴリズムを適用したところ、測定可能領域を拡大させることができた。

## 7 結言

今回の実験で二段探索が測定時間の短縮に有効であることを示すことができた。また磁気ベクトル同士の内積を考慮し、投影平面に交点を求める磁気ベクトルの組み合わせを決定するアルゴリズムは測定可能領域を拡大させることに有効であることを示すことができた。しかし、内積を用いてベクトルの組み合わせを決めたとしても測定が不可能な領域があった。原因は以下の二つの場合と考えている。一つは投影した磁気ベクトル 4 つのうち 1 つでも投影平面に垂直に近くなってしまうと、投影した磁気ベクトルが極めて小さくなってしまう場合である。もう一つは 2 ベクトルが完全に平行になってしまった場合などが考えられる。この問題は磁気センサの配置を変えるか、磁気センサの数を増やし、磁気ベクトルが投影できる関係にある 4 つの磁気センサの値をアルゴリズムに採用することで回避できると考えられる。このようにセンサが増えた場合でもセンサの組み合わせを考慮する必要性はある。今回提案した平行度比較のアルゴリズムはこのような場合においても測定範囲の拡大や誤差の低減に貢献できると考えられる。

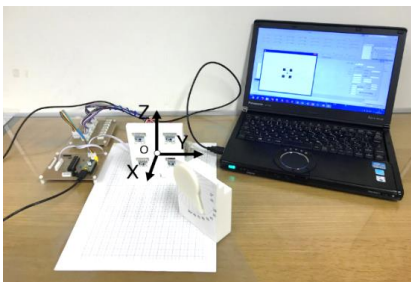


図 10 : 試作した三次元位置計測装置の外観

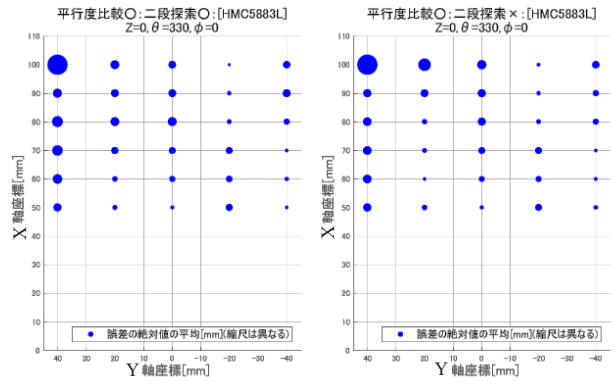


図 11 : 誤差の絶対値の平均の分布(二段探索有無)

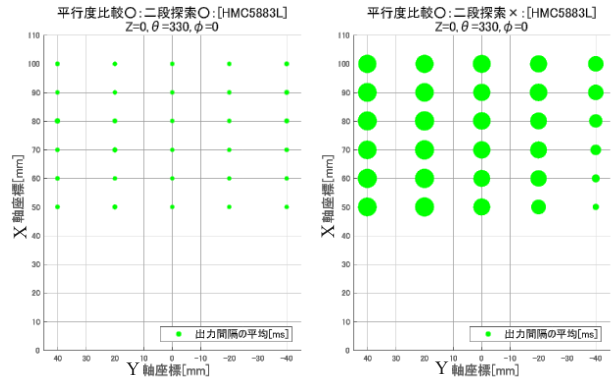


図 12 : 測定間隔の平均時間の分布 (二段探索有無)

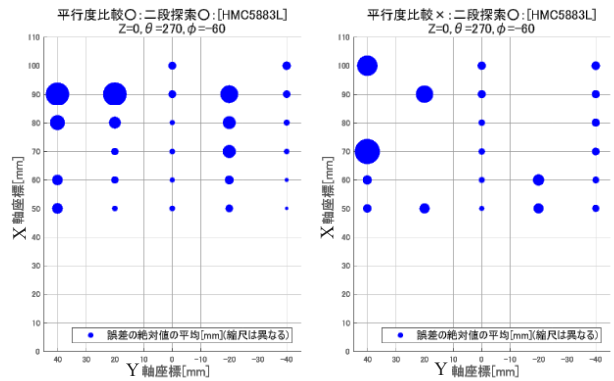


図 13 : 誤差の絶対値の分布 (平行度比較有無)

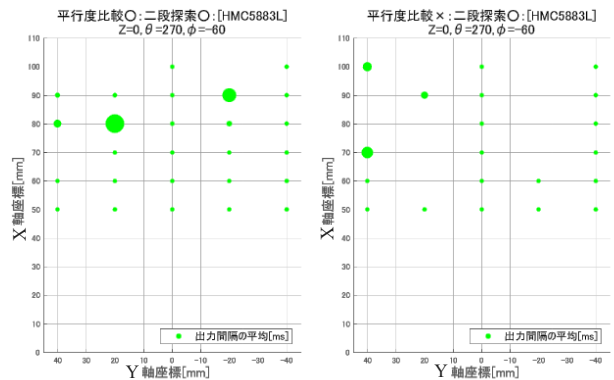


図 14 : 測定間隔の平均時間の分布 (平行度比較有無)