

磁気ワイヤレスマイクロロボットのための MR 磁気センサを用いた位置検出方法に関する研究

Study on Position Detection Method Using MR Magnetic Sensor for the Magnetic Wireless Micro robot

○山内康弘† 郭書祥†

Yasuhiro Yamauchi†, Shuxiang Guo†

†香川大学大学院工学研究科

†Kagawa University, Graduate school of Engineering

E-mail: s12g535@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp

Abstract

近年、配管のメンテナンスや医療用に、磁気アクチュエータ及び外部磁場装置を利用した様々な磁気ワイヤレス管内マイクロロボットが研究開発されている。しかし、工業用配管や人の体内など目視不能な管内を移動するロボットの位置を検出することは困難である。そこで、非接触方式でロボットの位置検出を行うシステム装置を提案・試作し、その有用性を検証した。

1. 序論

近年のマイクロマシン技術の発展により、人が近づくことが困難な熱交換器などの工業用配管のメンテナンスや体内の消化器系や血管内等の検査・薬物輸送・治療を目的としたマイクロロボットの研究が盛んに行われている。従来研究には、小型モーターや空気アクチュエータを用いたケーブルによるエネルギーの供給方法で駆動するものがある。これらのロボットは小型化に限界があることや移動方向に制約があるなどの問題がある。

そこで、磁気ロボットは、ワイヤレスで電源供給ができ、磁性材には非常に小さい微粒子まで存在し、数 cm オーダーの小型のロボットから様々な形状まで適用でき、ロボット自体がシンプルで制御しやすい特徴があるため、我々の研究室では、これまでに様々な磁気ワイヤレスマイクロロボットを提案及び試作・特性評価を行ってきた[1]-[7]。

そして、工業用配管や体内の消化器系のような複雑で内部が見えない管内環境を移動する磁気マイクロロボットの位置や姿勢を検知することは、制御や安全面において必要不可欠である。そのため、本研究では、磁気ワイヤレスマイクロロボットの制御システムの提案、磁気センサを使用

して、マイクロロボット内部の磁石の位置や向きからロボットの位置及び姿勢を特定する磁場位置検出システムを提案及び試作・特性評価を行う。

2. 研究の目的とアプローチ

人体への磁場の影響はいまだに未知の領域であるため、本研究では、可能な限り小型で低磁場での駆動が可能な磁気ワイヤレスマイクロロボットを使用する。このマイクロロボットが内蔵する磁石のから発生する低磁場を検出するために、高感度 MR 磁気センサを使用し、非接触方式の位置検出を行う。最小二乗法による磁場位置検出システム装置を提案・試作し、その有用性を検証した。

3. 制御システムの提案

提案する磁気ワイヤレスマイクロロボットの制御システムの概要は図 1 の通りである。磁場発生装置は 3 組のヘルムホルツコイルを組み合わせることで三次元磁場を発生させる。磁気ワイヤレスマイクロロボット[3]内部には、リング型磁石を取り付けて駆動させる。位置検出装置はロボット内部の磁気を検出することで、位置及び姿勢情報を得る。この位置情報を用いて外部磁場の方向・強さ・磁場周波数の制御を行うことにより、ロボットの移動速度及び方向などの制御を行う。

4. 磁場位置検出システムの原理

マイクロロボットの非接触方式での位置検出システム概念図を図 2 に示す。本研究の磁気ワイヤレスロボットは内部にリング型永久磁石が配置されておりそこから磁場が発生する。このとき位置情報として、 X , Y , Z 座標の位置

とロール角，ヨー角，ピッチ角の計 6 自由度が存在する。あらかじめ，マイクロロボット内部の磁石の磁束密度を分析し，電磁気学に基づいて， X ， Y ， Z 座標磁界成分及びロール，ヨー，ピッチ角の成分を求めておく。そして，磁気ワイヤレスロボット内部の永久磁石の磁場の強さを，外部に位置する磁気センサ 6 個で検出し，逆算することでその磁石がどの位置，姿勢をしているかを特定することが可能となる。

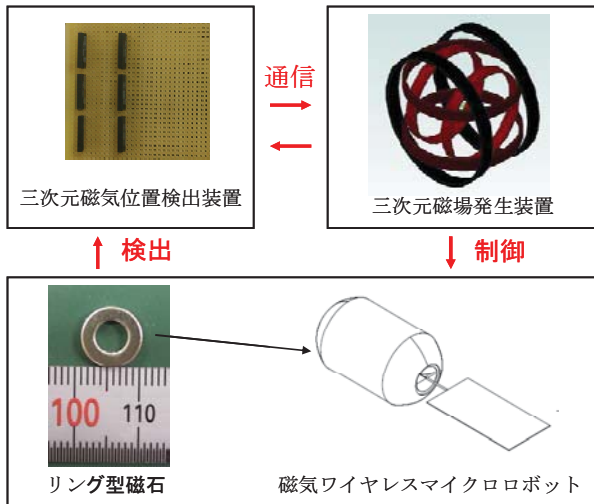


図1 提案する制御システム

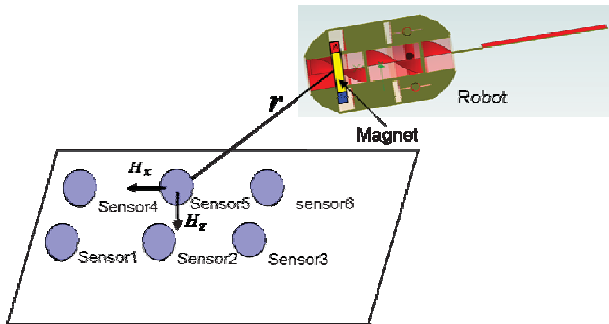


図2 マイクロロボットの位置検出システム

5. 磁場解析

5.1 任意の位置の磁場モデル

永久磁石を磁位ベクトルとみなし，磁位ベクトルから任意の位置(r 距離と θ 角離れた位置)における磁界の成分は図3に示す通りそれぞれ H_X ， H_Y ， H_Z のようになる。電磁気学の基礎式をもとに H_r ， H_θ を求め，図3に示す異なる2つの磁位ベクトルのそれぞれの r および θ を数式化し，これらの数式をもとに，2つの磁位ベクトルより発生する任意の位置点 P における OP 方向の磁界と θ 方向の磁界成分の式にそれぞれの位置，姿勢のパラメータを入ると，2つの

永久磁石(磁気双極子モーメント)から作られる任意の位置 P でのそれぞれの磁界成分が求められる。

H_X 成分の磁界は

$$H_X = \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(\frac{3ml}{4\pi\mu_0 r_1^3} \sin\theta_1 \cos\theta_1 + \frac{3ml}{4\pi\mu_0 r_2^3} \sin\theta_2 \cos\theta_2 \right) \quad (1)$$

H_Y 成分の磁界は，

$$H_Y = \frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(\frac{3ml}{4\pi\mu_0 r_1^3} \sin\theta_1 \cos\theta_1 + \frac{3ml}{4\pi\mu_0 r_2^3} \sin\theta_2 \cos\theta_2 \right) \quad (2)$$

H_Z 成分の磁界は，

$$H_Z = \frac{ml}{4\pi\mu_0 r_1^3} (2\cos^2\theta_1 - \sin^2\theta_1) + \frac{ml}{4\pi\mu_0 r_2^3} (2\cos^2\theta_2 - \sin^2\theta_2) \quad (3)$$

となる。

ここでは， U : 磁位 m : 磁気モーメント l : 磁極間距離

θ : 計測点と磁石との間の角度

r : 計測点と磁石との間の距離

μ_0 : 真空の透磁率 L : 2つの磁位の間の距離の半分

H_r : r 方向の磁界強さ H_θ : θ 方向の磁界強さ

r_1 : 磁位1と計測点までの距離

r_2 : 磁位2と計測点までの距離

X ， Y ， Z : 磁石中心と計測点との座標

θ_1 : 磁位1と計測点との間の角度

θ_2 : 磁位2と計測点との間の角度

H_X : x 座標の磁界成分 H_Y : y 座標の磁界成分

H_Z : z 座標の磁界成分

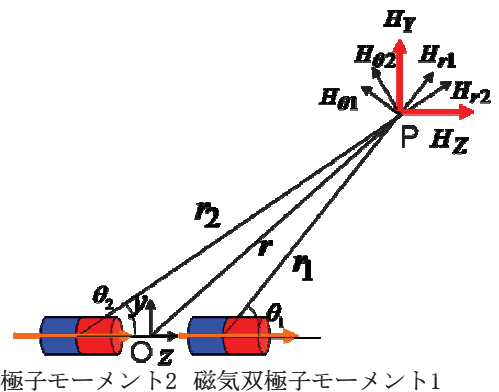


図3 永久磁石より発生する任意の位置での磁界モデル

式(4)は磁石をロール角，ヨー角，ピッチ角で回転させて，姿勢が変更された時の磁界成分の変換後の成分を表す。このように回転変換行列を利用することで，磁石の向きが変わった場合での任意の位置での磁界成分を容易に表すことができる。

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\cos\beta & -\sin\alpha\cos\gamma+\cos\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\alpha\sin\gamma+\cos\alpha\sin\beta\cos\gamma \\ \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\gamma+\sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & -\cos\alpha\sin\gamma+\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma \\ -\sin\beta & \cos\beta\sin\gamma & \cos\beta\cos\gamma \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

5.2 リング型磁石の磁気モデル

リング型磁石は図 4 のような形状をしており，その磁化ベクトルは，同心円周状に分布したような配置となる．そのため，それぞれの磁位ベクトルから得られる任意の位置の磁界分布を円周状に計算することで任意の位置での磁界成分を計算する．

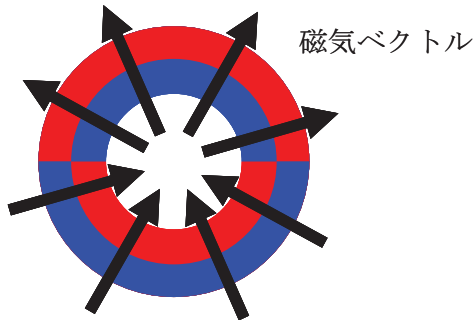


図 4 リング型磁石のモデル

実際にここまでで述べた理論式をもとに，リング型磁石の磁界成分を解析した結果を図 5 に示す．この図は Matlab を利用して，グラフ中心にリング型磁石を配置し，±100mm の間に磁石から発生している磁場をスカラ表示で表したものである．Y 軸方向を軸方向にした磁界成分を表したものである．

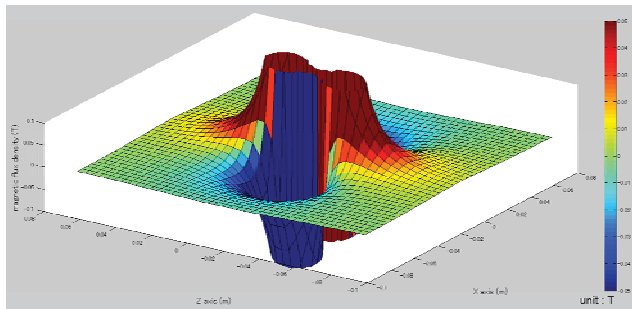


図 5 O-Ring 型磁石の磁界解析結果（単位:T）

5.3 位置の特定方法

次に，得られた 6 個のセンサの出力結果をもとに磁石の位置を特定する手法として，最小二乗法を用いた．式(5)，(6)に最小二乗法による評価関数を示す．磁界が検出可能なエリアにおいて 6 つの実験値とそれに最も近い値を示す理論値を見つけ出し，その二乗和が最も小さくなる値の時の

X ， Y ， Z 座標， α ， β ， γ 角をロボットの位置情報として取得する．

$$E(x) = \frac{1}{2} \|e(x)\|^2 = \frac{1}{2} \sum_k e_k^2 \quad (5)$$

$$e_i = B_i - P_i \quad (i=0,1,\sim 5) \quad (6)$$

ここでは， $E(x)$:評価関数 e_i :理論値と測定値の誤差
 B_i :センサの測定値 P_i :理論値 i :センサの番号

6. 試作した磁気センサの性能評価

磁気センサには，ホール素子や MR センサ，MI センサ，FG センサ，SQUID などの多種多様なセンサが存在する．本研究で使用する磁気マイクロロボットの磁石及び外部磁場装置の磁気は，数百 μT ～数 T までであり，この範囲の磁気感度を持つセンサは，ホール素子及び MR センサである[8]．本研究では磁石から発生する磁場を検出するために以下のような高感度磁気センサを用いた．この磁気センサは Honeywell 社製の HMC1021Z という製品で，8.5nT の分解能を持ち，1 軸 MR センサである．

このセンサを図 6 に示すような配列（センサ同士の距離 1.2mm 間隔）をさせる．センサの垂直方向の磁束密度成分を検出し，それを電圧にして検出する．6 個の高感度 MR センサからの出力値をもとにして，磁気ワイヤレスマイクロロボットに内蔵されているリング型磁石（ $\phi 9.5 \times \phi 5.1 \times 1.5\text{mm}$ ）と同じ磁石を用いて磁石の位置を特定する評価実験を行った．センサの垂直方向に 3，4，5cm 離れた位置から 0.5cm 間隔に磁石の位置を水平方向にずらし計 75 点の位置においてセンサでその磁石から発生する磁界の強さを測定する．その結果を表 1 及び図 7 に示す．このとき，磁場測定装置は X 軸座標方向に 40mm，Y 軸座標方向に 40mm，Z 軸座標方向に 100mm のエリアをカバーしている．磁石の 4 倍程度の範囲がカバーできる．位置誤差は最大でも 10mm であったため，ロボットの位置を知るためには，十分な精度であると考えられる．

次に，磁石を当てる位置を四角形になるように順番に記録し，実際の位置と計算から導き出した値をグラフ化したものを図 8 に示す．おおよその位置が検出できていると考えられる．

表 1 位置検出の検出精度評価

	X 座標	Y 座標	Z 座標
最大誤差	15mm	17mm	7mm
平均誤差	6.09mm	3.65mm	2.87mm

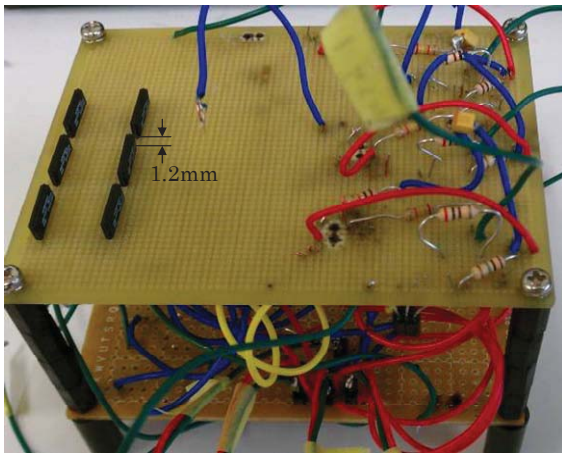


図6 試作した磁気センサを用いた磁場測定装置

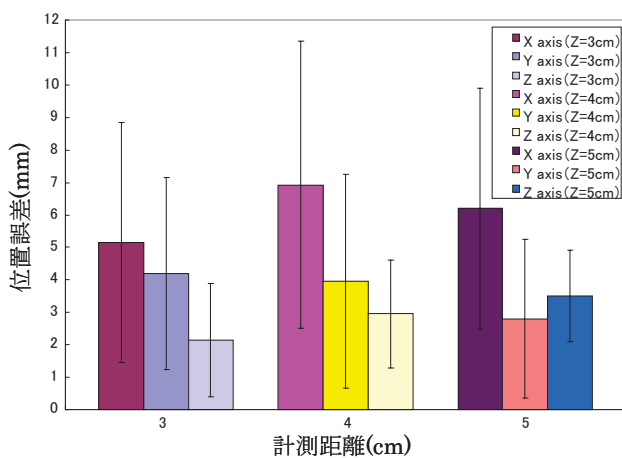


図7 位置検出の検出精度の特性評価結果

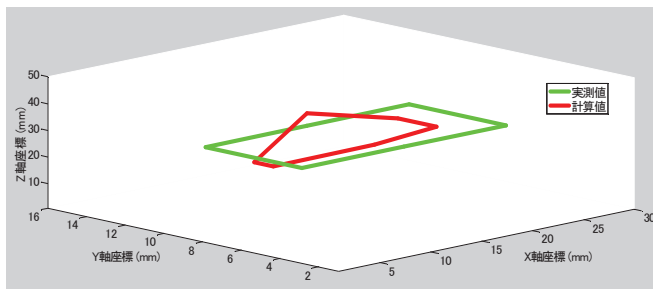


図8 位置検出の検出精度の特性評価結果

7. 結論

本研究では、磁気ワイヤレスマイクロロボットの制御システムを提案し、ロボットの位置及び姿勢を特定する磁場位置検出システムを提案及び試作・センサの特性評価を行った。位置検出システムは、あらかじめ、任意の位置の磁場成分のパラメータを算出し、高感度磁気センサを使用して、これらのロボット内部の磁石の磁場の向きや大きさの情報を取得、最小二乗法を用いてロボットの位置及び姿勢を特定する。センサの特性評価実験を行った結果、磁場測

定装置は X 軸座標方向に 40mm, Y 軸座標方向に 40mm, Z 軸座標方向に 100mm のエリアをカバーでき、位置誤差は最大でも 10mm であったため、ロボットの位置を知るためには、十分な精度であると考えられる。今後の課題として、さらなる精度の改善のため磁気センサの性能を改善することや、磁石の磁気モーメントの違いによる検出精度の評価や姿勢の評価及び制御システム全体の評価が挙げられる。

謝辞

本研究は、平成 24 年度香川大学特色ある重点研究費によって助成されたものである。

参考文献

- [1] Takuya Okada, Shuxiang Guo, Yasuhiro Yamauchi, "A Wireless Microrobot with 3 DOFs in Pipe for Medical Applications", Proceedings of the 2011 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering, pp. 79-84, 2011
- [2] 山内 康弘, 岡田 拓哉, 郭 書祥, 肖 楠, 吉田 俊一, "管内水中マイクロロボットの構造と特性評価に関する研究", 第 16 回知能メカトロニクスワークショップ, D3, 2011
- [3] Takuya Okada, Shuxiang Guo, Fu Qiang and Yasuhiro Yamauchi, "A Wireless Microrobot with Two Motions for Medical Applications", Proceedings of the 2012 ICME International Conference on Complex Medical Engineering, pp. 306-311, 2012
- [4] Takuya Okada, Shuxiang Guo, Nan Xiao, Fu Qiang and Yasuhiro Yamauchi, "Control of the Wireless Microrobot with Multi-DOFs Locomotion for Medical Applications", Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.2405-2410, 2012
- [5] Shuxiang Guo, Q. Fu, Y. Yamauchi, "A Wireless Microrobot in Pipe Driven by Magnetic Field for Medical Applications", 平成 24 年度 電気関係学会四国支部連合大会, 14-22, 2012
- [6] 山内 康弘, 郭 書祥, 付 強, "磁気ワイヤレスマイクロロボットの位置検出方法に関する研究", 平成 24 年度 電気関係学会四国支部連合大会, 14-21, 2012
- [7] Shuxiang Guo, Qiang Fu, Yasuhiro Yamauchi, Chunfeng Yue, "Characteristic Evaluation of a Wireless Capsule Microrobotic System", Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp.831-836, 2013
- [8] 毛利佳年雄, "磁気センサ理工学", コロナ社, 1998