バッテリーおよび給電線を持たない LC 共振型磁気マーカの 位置検出システム

Development of a Position-Sensing System for a Wireless Magnetic Marker

藪上 信・栢修一郎*・徳永裕樹*・河野丈志・荒井賢一・岡崎靖雄*

東北大学電気通信研究所, 仙台市青葉区片平2-1-1 (〒980-8577)

*岐阜大学工学部, 岐阜市柳戸1-1 (〒501-1193)

S. Yabukami, S. Hashi*, Y. Tokunaga*, T. Kohno, K.I. Arai, and Y. Okazaki*

RIEC Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577

Faculty of Engineering, Gifu University, 1-1 Yanagido, Gifu 501-1193

We propose a new system for sensing the position of wireless magnetic marker. It consists of a resonating wireless magnetic marker, driving coils, and pickup coils. The marker does not have a battery or electric wires. The system has an accuracy of around 2 mm, and it can be used for highly accurate position sensing without magnetic shielding, because it is free from earth field noise.

Key words: wireless LC resonating magnetic marker, position sensing, driving coil, pickup coil.

1. はじめに

生体内部や生体表面の部位の位置を磁気的な方法で精密に計測する場合には、計測部位に貼付するマーカは電気的引き出し線やバッテリーをもたないことが望ましい。光学的に遮蔽された空間の位置検出に適した方法として、古くから永久磁石や着磁された磁性体等のワイヤレス磁気マーカを用いた位置検出方法が開発されてきた^{1)~8)}。

筆者らはこれまで複数の永久磁石をマーカとした位置検出システムとして顎運動計測システムを試作し、磁気シールドルームにおいて成人男子の最大顎変位である50mm以内であれば0.1mm程度の位置精度が得られることを示した⁹⁾。この位置検出はワイヤレスでマーカの位置を計測できる特長を有しているものの、直流磁界を計測対象としているため、磁気シールドルームの外ではなんらかの方法で外来ノイズを抑制する必要がある。

筆者らは磁気マーカへの電気的引き出し線が不要であること(ワイヤレスマーカであること)と外来ノイズに影響を受けにくいことを両立することを目指して、LC共振回路によるマーカを用いた位置検出システムを提案した。LC共振回路によるマーカの位置検出システムとしてはマサチューセッツ工科大学から報告がされている¹⁰⁾。しかしこれは1個のコイルを用いて磁気マーカの位置を大まかに計測するものであり、位置精度は議論できておらず、mmオーダーの

精密な位置検出システムではない。またマーカの位置および方向の5自由度を計測することは困難である。またバッテリーを内蔵したアクティブICタグによる位置検出方法も提案されている¹¹⁾が、バッテリーを内蔵することによる寸法や動作時間の制約等の問題がある。

本論文ではコイルとコンデンサからなるLC共振型磁気マーカを用いて位置精度が2mm程度の位置検出が原理的に可能であることを示すことを目的とした。まずマーカ内部にバッテリーを持たず、電気的引き出し線を有さないワイヤレス磁気マーカによる位置検出の方法を提案した。次にコイルとコンデンサからなるワイヤレス磁気マーカの基本的な設計指針を明らかにし、これに基づいてマーカを試作した。実際に磁気マーカ、検出コイル、励磁コイルからなる検出システムを試作し、2mm以内の位置精度でマーカの位置が検出可能であることを示した。さらに位置精度の決定要因としてマーカの指向性と位置精度の関係、およびSN比と位置精度との関係、さらに永久磁石による位置検出法とのSN比の比較について定量的に検討した。

Fig. 1 Schematic diagram of the position-sensing system.

(a) Total flow chart

(b) Optimization process

Fig. 2 Flow charts.

2. ワイヤレス磁気マーカーによる位置検出システム

2.1 位置検出の方法

Fig. 1は提案する位置検出方法を概念的に示したものである。このシステムはLC直列共振回路から構成されるマーカー、励磁コイルおよび検出コイルから構成される。励磁コイルからマーカーのLC共振周波数付近の交流磁界を発生して、検出コイルにおける誘起電圧からマーカーの位置および方向を求める。

Fig. 2は位置検出のフローチャートを示したものである。Fig. 2(a)は全体のフローチャートであり、Fig. 2(b)はマーカーの位置および方向の最適化処理のフローチャートである。まずマーカーを取り去った状態で、配置した励磁コイルと検出コイル間の電磁結合を測定し、バックグラウンド電圧とする。次

Fig. 3 Photograph of LC resonating wireless marker.

にマーカーを配置して各コイル間の電磁結合を測定する。マーカーの有無による誘起電圧のベクトルの差分を求めることで、マーカーの寄与分が測定される。つぎにマーカーの位置および方向はマーカーから発生する誘導磁界がダイポール磁界に近似できることを仮定して、(1)~(3)式により位置および方向をGauss-Newton法¹²⁾により最適化処理する。

$$S(\vec{p}) = \sum_{i=0}^n (\vec{B}_m^{(i)} - \vec{B}_c^{(i)}(\vec{p}))^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\vec{B}_c^{(i)}(\vec{p}) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \left\{ -\frac{\vec{M}}{r_i^3} + \frac{3(\vec{M} \cdot \vec{r}_i) \cdot \vec{r}_i}{r_i^5} \right\} \quad (2)$$

$$\vec{p} = (x, y, z, \theta, \phi, M) \quad (3)$$

ただし $S(\vec{p})$ は評価関数、 n は検出コイルの要素数、 i は検出コイルの番号(1 ~ n)、 $B_m^{(i)}$ は検出コイル i における磁束密度、 $\vec{B}_c^{(i)}$ は双極子磁界を考慮した検出コイル i における磁束密度の理論値、 $\vec{r}_i$ はマーカーから検出コイル i への位置ベクトル、 $\vec{M}$ はマーカーの磁気モーメント、 (x, y, z) はマーカー i の座標、 θ はxy平面へ射影したモーメントの方向ベクトルとx軸とのなす角、 ϕ はモーメントの方向ベクトルとz軸とのなす角、 $\vec{p}$ はマーカーのパラメータにより構成されるベクトル、 α は縮小因子である。Fig. 2(b)のGauss-Newton法最適化処理はこれまで筆者らが検討してきた永久磁石による位置検出システム⁹⁾とは磁気モーメントを変数にする以外は基本的に同じである。

2.2 LC共振回路による磁気マーカー

Fig. 3は試作したマーカーの写真を示したものである。マーカーはインダクタ、コンデンサを直列接続した。インダクタは1辺1.0mmの正方形断面、長さ10mmの高透磁率フェライト(NECトーキン製)の周囲に直径0.1mmの銅線を600ターン巻いて外形寸法が長さ10mm、直径約4mmとした。

Fig. 4 Schematic diagram of a position-sensing system.

Fig. 5 Photograph of the position-sensing system.

インダクタンスは180kHzで約560 μ Hであった。コンデンサは1500pFのチップコンデンサを使用した。共振周波数は約180kHzとした。性能指数は約39であった。

2.3 位置検出システムの構成

Fig. 4は位置検出システムの構成を模式的に示したものである。励磁コイルへの交流電流の通電はシグナルジェネレータ (HP33120) を用い、検出コイルの切り替えおよび誘起電圧の計測はマルチメータ (Keithley2000) を用いた。GPIB 制御により共振周波数付近で周波数スイープさせて誘起電圧を計測し、平滑化処理を行った。位置および方向の最適化処理は誘起電圧をすべて計測した後で行った。平滑化処理により計測システムのノイズレベルをマルチメータのノイズレベルである約5 μ Vから約 $2 \times 10^{-1} \mu$ Vへ低減した。

Fig. 5はシステムの写真を示したものである。励磁コイルおよび検出コイルはアクリルで作成した一辺200mmの正方形板に配置し、励磁コイルと検出コイルの面は150mmの距離で対向させた。励磁コイルは1個、検出コイルは9個設けた。励磁コイルは1面の中心に配置した。9個の

Fig. 6 Setup consisting of a water tank and the sensing system.

(b) Output voltage

Fig. 7 Error rate with and without physiological water.

検出コイルは同一平面状に3 $\times$ 3の格子状に配置した。隣接する検出コイルの中心間距離は60mmとした。励磁コイルおよび検出コイルは直径50mmのアクリル製ボビンに直径0.26mmの銅線を20ターン施した。このコイルの共振周波数は約12MHzであった。180kHzにおける励磁コイルおよび検出コイルのインダクタンスは約40 μ Hであった。コイルへの投入電圧は25V、周波数はマーカの共振周波数である180kHz付近をスイープさせた。マーカは非導体による3軸スキャナにより移動させた。

2.4 動作周波数の設定

提案するマーカは人体内あるいは人体表面に挿入あるいは貼付して使用することを想定するため、人体の水分等により誘導磁界の変化が小さい動作周波数で動作させる必要がある。Fig. 6は励磁コイル、検出コイル、水槽および生理食塩水の配置を側面からみた状態を示しており、これはFig. 5の励磁コイルと検出コイルアレイの間に水槽を配置し、その中へ生理食塩水を満たしたものである。Fig. 7は生理食塩水の有無による励磁コイルおよび検出コイル間の電磁結合の比率を表したものである。実験には

Fig. 8 Equivalent circuit of a marker.

Fig. 4およびFig. 5の計測システムの構成を用いて、その中に市販の生理食塩水（大塚製薬製「生理食塩液 大塚生食注」）の有無で誘起電圧を比較した。Fig. 7は生理食塩水を除いた場合の誘起電圧と生理食塩水があった場合の変化を誤差率として（4）式を用いて表したものである。

$$\text{Error rate} = \frac{V_{\text{water}} - V_{\text{air}}}{V_{\text{air}}} \quad (4)$$

ただし、 V_{water} は生理食塩水がある場合の誘起電圧、 V_{air} は生理食塩水がない場合の誘起電圧である。実線は測定値であり、破線は目安として1%のレベルを示した。誤差率は高周波ほど大きくなった。これは主として生理食塩水中の渦電流損失に起因するものと考えられる。位置検出精度を悪化させないための誤差率の目安として1%以内と設定すると、周波数は200kHz以下になる。本論文の範囲では生体の損失の影響をなるべく低下させる趣旨で200kHz以下に動作周波数を設定した。

3. 磁気マーカおよびコイルの基本的な設計指針

3.1 磁気マーカ用コイル

Fig. 8はマーカの等価回路を示したものである。マーカはインダクタ、コンデンサ、抵抗および誘導電圧源から構成される。誘導電圧源は励磁コイルからの交流磁界がマーカのコイルに鎖交して発生するものである。この誘導電圧源によりLC共振回路中に電流が流れる。LC共振周波数において誘導電流は最大となるため動作周波数はマーカの共振周波数が最適と考えられる。

位置検出システムとして高いSN比を得るためには磁気マーカの等価的な磁気モーメントが大きいたが必要である。磁気マーカの等価的な磁気モーメントMはFig. 8の等価回路から(5)式のように導くことができる。

$$M \propto NIS = N \frac{V}{R} S = N \frac{\omega \Phi N}{R} S \propto H \frac{\omega L}{R} S = HQS \quad (5)$$

Fig. 9 Quality factor as a function of coil diameter and conductor thickness.

ただしNはコイルのターン数、Vは誘起電圧、Rは抵抗、 ω は角周波数、 Φ は励磁コイルからマーカへの鎖交磁束、Qはコイルの性能指数、Sはコイルの断面積である。(5)式の磁気モーメントはコイルのターン数とコイルを流れる誘導電流とコイルの断面積の積に比例する。一方コイルがソレノイドコイルであることを仮定すれば、等価的な磁気モーメントはコイルの性能指数と励磁コイルによる磁界とコイル断面積の積に比例する。したがって寸法の制約の範囲でなるべく断面積を大きくしつつ、コイルの性能指数を高めることがマーカの設計の要点である。

Fig. 9はマーカ用コイルの設計の一例を示したものである。マーカの長さは10mm、非磁性体心棒の直径は2mmと固定し、巻線直径および銅線のしめる厚みに対するコイルの性能指数を示した。コイルのインダクタンスは長岡係数を用いたソレノイドコイルのインダクタンスの解析式¹³⁾より求めた。抵抗はリッツ線を用いることを想定して直流抵抗値とした。

Fig. 9によれば巻線の占有厚を大きくすることにより性能指数は大きくなり、等価的な磁気モーメントは大きくなる。一方巻線厚を一定（マーカの外形寸法を一定）にすると、なるべく銅線の直径を太くしたほうが若干性能指数が向上するものの、大まかには性能指数はほぼ一定である。Fig. 9には試作したマーカの性能指数を●で併記した。試作したマーカの寸法は導体厚みが約2mm、巻き線の直径は0.1mmであり、性能指数の実測値は約39であった。Fig. 9の計算値と桁は一致したが約40%のずれがある。2mm以内の位置精度を再現性よく実現するためには更に検討を要する事項と考えている。

3.2 励磁コイルおよび検出コイル

磁気マーカの実効的な磁気モーメントを大きくするために

(a) Output voltage as a function of coil radius

(b) Error rate as a function of coil radius

Fig. 10 Error caused by the size of the pickup coil.

Fig. 11 Arrangement of the marker and pickup coil.

は、(5)式に基づき励磁コイルからなるべく大きな磁界を発生させることが必要である。検出コイルでは寸法およびターン数をなるべく大きくして誘起電圧を大きくしてSN比を高くすることが必要である。一方ダイポール発生源からの磁界を正確に計測するためには点で磁界を計測することが

Fig. 12 Output voltage of the marker around the LC resonance frequency.

望ましく、この観点からコイルの寸法は小さい方が望ましい。

Fig. 10はダイポール磁界をコイルで計測する際のコイルの寸法に起因する誤差を見積もったものである。Fig. 11はマーカコイルおよび検出コイルの配置を模式的に示したものである。マーカと検出コイルの距離はFig. 5と同様に75mmとした。マーカコイルと検出コイルのコイル面は対向し、かつコイル法線ベクトルの中心軸が一致するようにし、電磁結合が最も高い状態を想定した。誤差電圧は点における磁界強度と検出ループ内に鎖交する磁束の平均値から求めた磁界強度との差により(6)式を用いて求めた。

$$Error = \left| \frac{1}{S} \int_{loop} H dS - H_{point} \right| \quad (6)$$

ただしHはコイルのループ内における磁界強度、 H_{point} はコイルの中心点における磁束密度、Sは検出コイルの面積をあらわしている。第1項は検出コイルのループにおける面積分の平均値を示している。

Fig. 10(a)はマーカの誘起電圧と検出コイルの寸法による誤差分を電圧として直接表したものである。実線はマーカの寄与電圧を表し、破線は寸法による誤差分を示している。また $2 \times 10^{-1} \mu V$ 付近の実線は測定系のノイズレベルを表している。コイルのループ径が大きいほど誘起電圧が大きくなるものの、ループ寸法に起因する誤差も増大する。

Fig. 10(b)はFig. 10(a)においてマーカからの誘起電圧と寸法効果に起因する誤差の比を示したものである。●は後述する実験で得られた寸法効果による誤差率を併記した。本実験で用いた検出コイルのループである半径25mmでは誤差が約7%程度であった。これは計算値と近い値になった。実際の実験ではマーカの位置を求めるために、9個の検出コイルを用い、またマーカ自身の寸法効果による誤差も含まれるため、一致した条件で実測値と計算値は比較できないものの、おおむね検出コイルの寸法に起因す

Fig. 13 Arrangement of marker, driving coil, and pickup coils.

(a) x-y plane

(b) x-z plane

(c) Angle, ϕ

Fig. 14 Position and direction of the marker when the angle was 0 degrees.

(a) x-y plane

(b) x-z plane

(c) Angle, ϕ

Fig. 15 Position and direction of the marker when the angle was 45 degrees.

る誤差が支配的であることが示唆されることが考えられる。

4. 実験結果

Fig. 12 はマーカーからの寄与分の誘起電圧の振幅を一例として示したものである。この電圧は9個の検出コイルの中心に位置するコイルにおいてマーカーを置いた状態とバックグラウンドにおける電圧とのベクトル的差分を求めたものである。マーカーの共振周波数は約180kHzであり、共振周波数付近において誘起電圧は大きく変動した。最適化処理の際の誘起電圧としてはFig. 12における最大変位幅を用いた。

Fig. 13 は本実験におけるマーカーとセンサの配置を模式的に示したものである。マーカーのコイルを円筒形として模式的に示したものであり、円筒の軸方向がコイル面に垂直

Fig. 16 Position and direction of the marker when the angle was 90 degrees.

な方向を表している。マーカは励磁コイルと検出コイルアレイのほぼ中間に配置し、X軸方向へ移動させた。その際マーカコイルの法線成分は図中のZ軸に対して0度、45度、90度の角度を有する状態にし、姿勢角を一定にしたままX軸方向へ移動させた。以下の2つの要因により磁気マーカの位置検出において誤差を決定する要因が考えられ、それらを明らかにすることが必要である。

(1)励磁コイルから発生する磁界により十分な信号レベルを有するダイポール磁界が形成されること。励磁コイルによる磁界がマーカコイルに鎖交しやすければダイポール源の実効的磁気モーメントが大きくなる。

(2)ダイポール磁界を検出コイルで計測する場合におけるSN比。

Fig. 17 Position accuracy.

Fig. 18 Mechanism of the angle effect.

Fig. 14はFig. 13の座標系において、マーカコイルの法線方向とZ軸の角度がほぼ0度の時のマーカの位置および姿勢角のプロファイルを示したものである。(a)はXY平面、(b)はXZ平面、(c)はX座標に対する姿勢角を表している。●は実測値であり、実線は理論値を示している。実測値と理論値はほぼ対応しており、解がほぼ正しく求められていることが了解される。

Fig. 15はFig. 13の座標系において、マーカコイルの法線方向とZ軸の角度がほぼ45度の時のマーカの位置および姿勢角のプロファイルを示したものである。(a)はXY平面、(b)はXZ平面、(c)はX座標に対する姿勢角を表している。●は実測値であり、実線は理論値を示している。x座標が小さい場合には実測値と理論値はほぼ対応しており、解がおおむね正しく求められた。一方X座標の値が40mm以上に大きい場合にはY座標やZ座標が2～5mm程度の誤差となった。これは励磁コイルから発生した磁界とコイルの法線方向のなす角が大きくなって、コイルに十分な量の磁束が鎖交せず実効的な磁気モーメントが低下したためと考えられる。

Fig. 16はFig. 13の座標系において、マーカコイル法線方向とZ軸の角度がほぼ90度の時のマーカの位置および姿勢角のプロファイルを示したものである。(a)はXY平面、(b)はXZ平面、(c)はX座標に対する姿勢角を表している。●は実測値であり、実線は理論値を示している。x座標が小さい場合には解が一意に定まらず、かつ誤差が大きい。

Fig. 17はFig. 14, Fig. 15およびFig. 16の位置精度をマーカ付近の磁界の方向とマーカコイルの法線ベクトルと

Fig. 19 Evaluation value and concentration process.

のなす角度で整理したものである。Fig. 18はこの角度について模式的にあらわしたものである。位置精度は相対位置精度とした。Fig. 14の実験結果を0 degreesとし、Fig. 15の実験結果を45 degreesとし、Fig. 16の実験結果を90 degreesとそれぞれ表記した。マーカの法線ベクトルとマーカ付近の磁界の方向とのなす角度がおおむね60度以下であれば、位置精度は2mm以内であり、かつ最適化問題における解の一意収束性はほぼ得られた。上記の角度が60度を超えると誤差が増大するとともに、解の一意収束性が得られにくくなった。Fig. 17における誤差が増大する60度付近の角度は試作したマーカの寸法（マーカの長さ（10mm）とコイル直径（4mm））で決まっていると考えられるが定量的な検討は本稿では行わない。角度が大きくなることにより実効的な磁気モーメントが低下し、SN比が低下するためと考えられる。このマーカの法線ベクトルとマーカ付近の磁界との方向のなす角度が60度を境に位置精度が悪化する問題は、アプリケーションの制約の範囲で検出コイルと励磁コイルをマーカの任意の角度に対して死角が小さくなるように配置して対応可能と考えられる。

Fig. 19はFig. 17で定義した角度が約90度付近の条件について、最適化処理の繰り返し計算過程におけるマーカの位置と評価関数の評価値を一例として示したものである。評価関数は(1)式におけるSを使用した。ここでは図示したように3点の初期値を与えた。赤色は評価関数値が高い。青色は評価関数値が小さく、より最適解であることを示している。正しい解が得られる場合には初期値の値にかかわらず一箇所に収束する。Fig. 19によれば3個の初期値を与えた場合それぞれは1点に収束するものの、収束解が一点に定まらなかった。このためこの条件では局所的に解の一意性が得られていないことがわかった。

Fig. 20は検出コイルで計測されたマーカの寄与分の誘

Fig. 20 Position accuracy as a function of the signal-to-noise ratio.

Fig. 21 Output voltage as a function of coil radius when the distance between coil and marker is 150mm.

起電圧についてその平均的な信号レベルとノイズレベルとの比率に対して位置精度を整理したものである。平均的な信号レベルは(7)式で求め、マーカからの寄与電圧について9個のコイルにおける2乗和の平均値Vを求めた。

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N V_i^2} \quad (7)$$

ただし V_i はコイルiにおける誘起電圧、Nは検出コイルの個数である。Fig. 20によれば平均誘起電圧として約70μV以上であれば位置精度はおおむね2mm以内となることがわかる。検出コイルの寸法に起因する誤差率は約7%、位置検出におけるノイズに対するSN比は約375であった。以上から提案するシステムにより1~2mm程度の位置精度で位置検出が可能であることが示された。

さらにFig. 21は人間の胴体の寸法を想定して、Fig. 11における検出コイルと励磁コイルの距離を300mmとした場合のマーカからの出力電圧およびノイズレベルを示したものである。マーカを位置検出システムの中心においた場

合、最もマーカからの信号レベルが小さくなると考えられるため、マーカと検出コイルの距離を150mmとした。計算方法はFig.10(a)と同一であった。Fig. 21によればコイルの半径が25mmの場合、SN比は約600となり、Fig. 10の場合に比較して約1/7に低下すると見積もられる。Fig.20の実測結果より、位置精度として2mm以内を確保するためのSN比の目安は375以上であることから、この場合2mm以内の位置精度は確保できると考えられる。しかし位置精度の低下を防ぐためには、マーカコイルの法線方向が検出コイルの法線方向から傾くことによる出力電圧の減少を防ぐために、本論文の検出コイルの配置よりもより多くのコイルをより狭い間隔で配置することが必要になる。

5. 永久磁石を用いた位置検出システムとの比較

永久磁石をマーカとして用いた位置検出システムとのSN比を比較した。本システムではFig. 11の配置において中心の検出コイルで計測される誘起電圧は約850 μ Vであり、ノイズレベルは0.2 μ Vであることから信号/雑音は約4250となった。一方同寸法(直径4mm; 長さ10mm)のNdFeB磁石の磁気モーメントは 1.26×10^{-7} Wbmとした。永久磁石の着磁方向は磁石からセンサを向く方向であり、センサにおける計測成分は着磁方向と同一とし、磁界強度が最大となるようにした。磁界強度は約580mGと計算され、一方直流磁界のノイズレベルは地磁気の時間的揺らぎとされる1mGとした¹⁴⁾。永久磁石を用いた場合の信号レベル/ノイズレベルは約580と見積もられた。これより提案するシステムのSN比は永久磁石を用いた位置検出システムに比べて高いことが了解される。

6. まとめ

1. LC共振回路から構成されるワイヤレス磁気マーカによる位置検出方法を提案するとともに、磁気マーカおよび励磁コイル、検出コイルの基本的な設計指針を示した。
2. 一辺150mmの立法体内部で長さ10mm、直径約4mmのマーカを用いて位置精度は約2mm以内であった。この位置精度はコイル・マーカの寸法効果に起因することを示した。
3. 位置精度として2mm以内および解の一意収束性を得るためには、マーカへの鎖交磁束とコイルの法線ベクトルとの角度を60度以内とすること、寸法誤差に対する誤差/平均電圧を約7%以内とすること、SN比を約375以上確保することが必要であることを示した。
4. 試作したマーカとほぼ同寸法のNdFeB永久磁石を用いた位置検出方法とのSN比を比較し、提案するシス

テムのSN比が数倍程度高いことを示した。

謝辞

本研究の一部は総務省の「戦略的情報通信研究開発推進制度」(5E5番126号)の助成により行った。また本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構の「産業技術研究助成事業」(プロジェクトID:03A47063a)により行った。

References

- 1) F. Grant, G. West, *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. New York: McGraw-Hill, 1965, pp. 306-381.
- 2) S.V. Marshall, "Vehicle Detection Using a Magnetic Field Sensor," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. VT-27, pp. 65-68, (1978).
- 3) W.M. Wynn, C.P. Frahm, P.J. Carroll, R.H. Clark, J. Wellhoner, M.J. Wynn, "Advanced Superconducting Gradiometer/Magnetometer Arrays and A Novel Signal Processing Technique," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-11, pp. 701-707, (1974).
- 4) J.E. Mcfee, Y. Das, "Determination of the Parameters of a Dipole by Measurement of its Magnetic Field," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-29, pp. 282-287 (1981).
- 5) F. Grant, G. West, *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. New York: McGraw-Hill, pp. 306-381 (1965).
- 6) S.V. Marshall, "Vehicle Detection Using a Magnetic Field Sensor," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. VT-27, pp. 65-68 (1978).
- 7) W.M. Wynn, C.P. Frahm, P.J. Carroll, R.H. Clark, J. Wellhoner, M.J. Wynn, "Advanced Superconducting Gradiometer/Magnetometer Arrays and A Novel Signal Processing Technique," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-11, pp. 701-707 (1975).
- 8) J.E. Mcfee, Y. Das, "Determination of the Parameters of a Dipole by Measurement of its Magnetic Field," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-29, pp. 282-287 (1981).
- 9) S. Yabukami, K. Arai, H. Kanetaka, S. Tsuji, and K.I. Arai, *Journal of the Magnetism Society of Japan*, vol. 28, pp. 711-717 (2004).
- 10) J.A. Paradiso, K. Hsiao, J. Stricken, J. Lifton, A. Adler, *IBM Systems Journal*, vol. 39, No. 3&4, pp. 892-914 (2000).
- 11) S. Watanabe, S. Nishiyama, N. Koshizuka, and K. Sakamura, MWE 2003 Microwave Workshop, pp.245-250 (2003).
- 12) Nakagawa, Y. Koyanagi, "Experimental Data Analysis by the least square method," p.95-99, The University of Tokyo Press (1982).
- 13) K. Goto, S. Yamazaki, "Denjigigaku Enshu", p. 282 (Kyoritsu Publishing Co., Ltd. 1992).
- 14) M. Kotani, Y. Uchikawa, Y. Nakaya, H. Mori, S. Kuriki, "Measurements of Biomagnetism," p. 2, (Corona Publishing Co., Ltd. 1995).

2004年2月19日受理, 2004年5月18日採録