

Development of a Position-Sensing System for an LC resonating Slim Marker Using Phase Detection

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

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

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

We propose a new system for sensing the position of a wireless magnetic marker using phase detection. It consists of a resonating wireless magnetic marker, a driving coil, and pickup coils. A slim LC resonating marker (1.2 mm in diameter and 10 mm long) was fabricated and a detector was formed by connecting high-speed AD converters. The system has a position accuracy of around 1 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.

位相計測による微細な LC 共振型磁気マーカの位置・方向検出システム

薮上 信・加藤智紀・栢修一郎*・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)

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氣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、永久磁石や着磁された磁性体の位置検出方法が開発されてきた^{1)~5)}。しかしこれらは直流磁界を計測対象としているため、地磁気や低周波雑音の影響を受けやすい欠点がある。一方 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⁶⁾。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⁷⁾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や計測の時間的安定性等の問題がある。

筆者らはこれまで磁気マーカへの電氣的引き出し線が不要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。マーカの誘導電圧の振幅を計測することにより、直径 5mm、長さ 10mm の磁気マーカを用いて、2mm 程度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⁸⁾。

提案する位置検出システムで、マーカ直径を 1mm 程度に小型化し、かつ 1mm 程度の位置精度で計測できれば、マー

カを注射針やカテーテル等により生体内へ挿入し、高精度に位置が計測できるため、医療応用の可能性が現時的課題になると考えられる。

そこで本論文では振幅だけでなく位相も計測対象として位置精度を向上させることを目指した。既報⁸⁾においては、マーカの電氣的特性やマーカと各コイルの配置によっては振幅のみからマーカの寄与電圧を求めるだけでは不十分な場合があった。さらに振幅のみを計測対象とする場合には 1 個のマーカあたり 2 つの周波数の信号の計測が必要であり、多数個のマーカの位置を検出する場合などに測定装置が煩雑になることが考えられる。

さらに本稿では個々の検出コイルを同数の高速 AD コンバータへ並列に接続し、高速化および SN 比を高めることを意図した。これにより生体内部や生体表面へマーカを挿入あるいは貼付するための現実的な寸法である、直径 1mm 程度のマーカの位置および方向を計測することを目指とした。

上記の目標に基づく位置検出システムを開発し、マーカ用コイルとして直径 1.2mm、長さ 10mm の大きさを有する微細なマーカを 3 次元的な 100mm 程度の移動で 1mm 程度の絶対位置精度で計測可能であることを示した。またリアルタイムにマーカの位置を表示可能とした。

2. 位相情報を用いた位置・方向の検出方法

2.1 全体の測定手順

Fig. 1 は提案する位置検出システムを概念的に示したものであり、励磁コイル、検出コイルおよび磁気マーカから

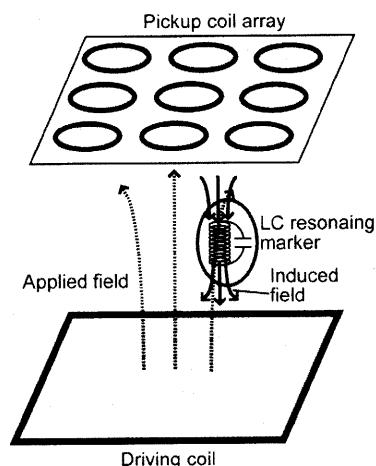


Fig. 1 Schematic diagram of the position-sensing system.

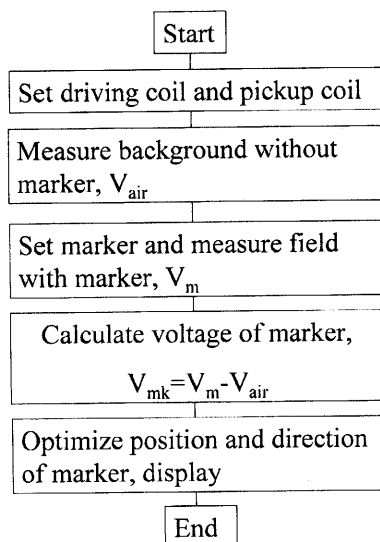
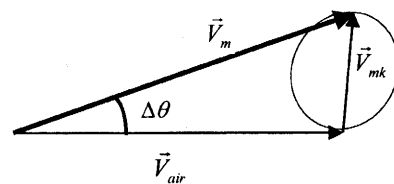


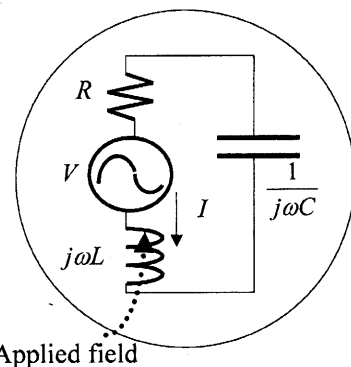
Fig. 2 Flow chart.

構成される。本システムでは励磁コイルによりマーカの共振周波数における交流磁界を発生させ、マーカからの誘導磁界を検出コイルアレイを用いて計測し、マーカからの誘導磁界をダイポール磁界と仮定してマーカの位置および方向を最適化する。

Fig. 2 はマーカの位置および方向を求めるフローチャートを示したものである。まずマーカを取り去った状態で、配置した検出コイルの誘起電圧を測定し、バックグラウンド電圧とする。次にマーカを配置して検出コイルの誘起電圧を測定する。マーカの有無による誘起電圧のベクトル的な差分を求めることで、マーカの寄与分が測定される。つぎにマーカの位置および方向はマーカ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⁹⁾により最適化処理する。



(a) Vector chart using the phase of the induced voltage



(b) Equivalent circuit of the LC resonating marker

Fig. 3 Measurement of the induced voltage using phase.

$$S(\vec{p}) = \sum_{i=0}^n (B_m^{(i)} - B_c^{(i)}(\vec{p}))^2 \quad (1)$$

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

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

ただし S は評価値であり、 $\vec{p}$ はパラメータベクトルである。 i は検出コイルの番号 (1 ~ n)、 $\vec{B}_c^{(i)}(\vec{p})$ 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、 $\vec{r}_i$ はマーカから検出コイル i への位置ベクトル、 $\vec{M}$ はマーカの磁気モーメント、 (x, y, z) はマーカ 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。

2.2 位相情報を用いた計測方法

Fig. 3 はマーカの共振周波数におけるマーカの寄与電圧 $\vec{V}_{mk}$ 、バックグラウンド電圧 $\vec{V}_{air}$ 、マーカを挿入した状態でのコイルの誘起電圧 $\vec{V}_m$ のベクトル図として表記したものである。また Fig. 3(b) はマーカの等価回路を模式的に示したものである。Fig. 3(b) 中の L はコイルのインダクタンス、 C はコンデンサのキャパシタンス、 R は内部抵抗、 V は外部から与えられた交流磁界による誘起電圧を等価的な電圧源として表記したもの、 I は電圧源により回路中を流れる誘導電流を示した。マーカの共振周波数では Fig. 3(b) の誘導電流 I が最大となるため、 $\vec{V}_m$ が最大となる。共振周波数で計測することで最も SN 比の高い計測が可能になるとともに、1 マーカあたり 1 個の周波数でマーカの寄与電圧

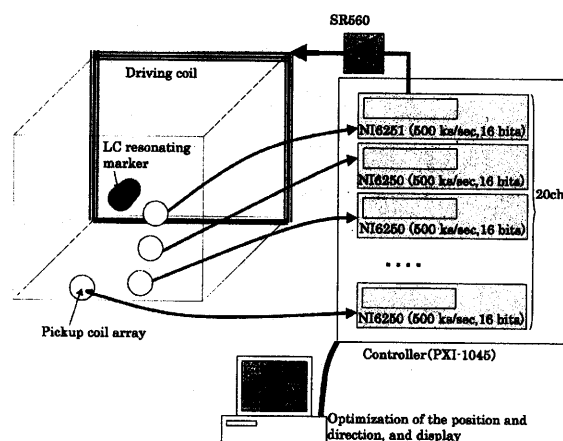


Fig. 4 Schematic diagram of the position sensing system.

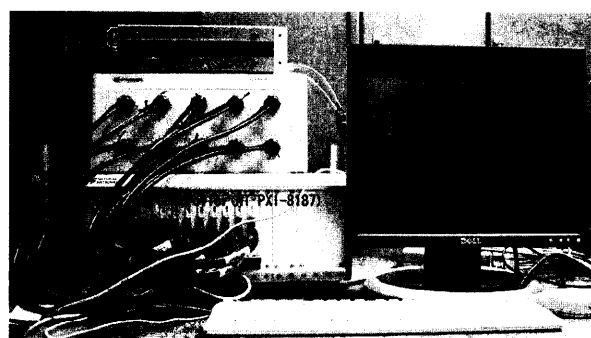


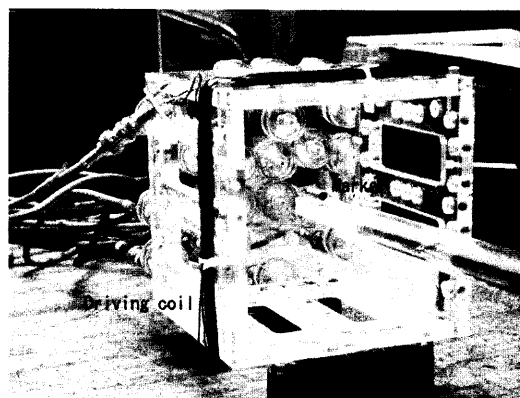
Fig. 5 Photograph of the electrical equipment.

が計測可能になると考えられる。既報³⁾では誘導電圧の振幅を計測対象とし、誘起電圧の極大値および極小値の2つの周波数成分を計測する必要があった。本稿では各検出コイルにおいてマーカがない状態での誘起電圧の振幅、マーカをおいた状態での振幅、および両者の電圧の位相差を測定し、(4)式を用いてベクトルの等価的なマーカ寄与電圧を求めた。

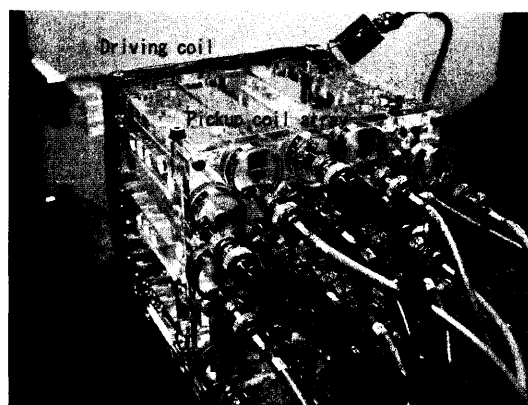
$$\vec{V}_{mk} = \vec{V}_m - \vec{V}_{air} \quad (4)$$

3. 位置検出システム

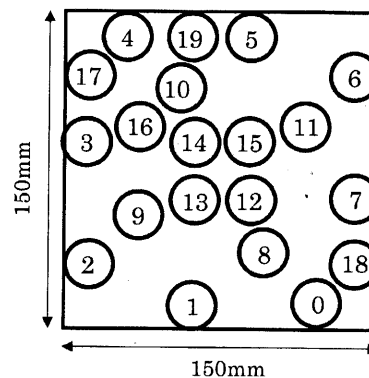
Fig. 4は試作した位置検出システムの構成を示したものである。計測システムは励磁コイル、検出コイルアレイ(20チャンネル)、LC共振型磁気マーカ、ADコンバータおよびDAコンバータ(NI PXI-6251:1台)、ADコンバータ(NI PXI-6250:9台)、制御ユニット(NI PXI-8187)、プリアンプ(SR560)から構成される。制御用プログラムはLab VIEW ver.7.1、位置および方向の最適化処理プログラムはVisual C++を用いて作成した。ADコンバータであるPXI-6251およびPXI-6250は500ksample/secのサンプリ



(a) Driving coil and marker



(b) Pickup coil array



(c) Arrangement of pickup coil

Fig. 6 Arrangement of coils and marker.

ング速度で、1台あたり2チャンネルの16ビット信号を計測するモードで使用し、20チャンネルの検出コイルの誘起電圧を並列に取得できるように構成した。励磁コイルへの電圧はPXI-6251からの出力信号をアンプを介して励磁コイルへ接続した。すべてのADコンバータおよびDAコンバータはPXIシステムのため相互に同期が取れており、基準信号に対する位相差を計測可能である。LC共振型磁気マーカは励磁コイルと検出コイルから構成されるユニット内部に配置した。マーカの位置および方向の最適化処理はイーサネット接続した別のパソコン(Pentium(R)D、

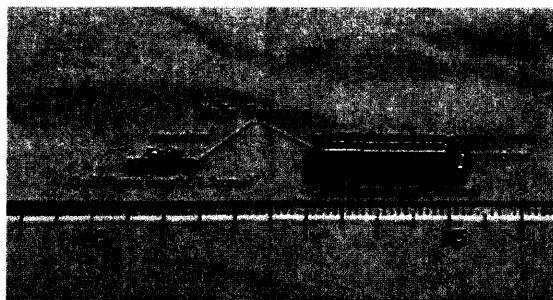


Fig. 7 Photograph of the LC resonating marker.

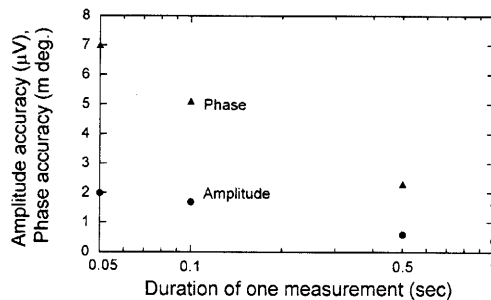
Table 1 Size of the marker coil.

	Diameter of coil (mm)	Length of coil (mm)	Numbers of turns
Marker 1	6	20	500
Marker 2	1.2	10	77

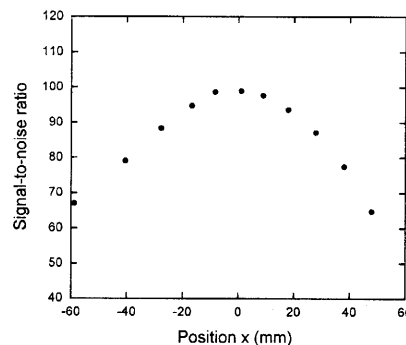
3. 20GHz) で演算し、マーカー位置を画面上に表示させた。

Fig. 5 は計測システムに用いた PXI 制御コントローラ (AD コンバータと DA コンバータを内蔵)、プリアンプおよびディスプレイの写真である。Fig. 6 は励磁コイル、検出コイル、マーカーの写真である。Fig. 6(a) は励磁コイルとマーカー配置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 150mm の立方体に配置し、励磁コイルと検出コイルの面は 150mm の距離で対向させた。励磁コイルは一辺約 150mm の正方形であり、直径 1.0mm の銅線を 20 ターン施した。Fig. 6(b) は検出コイルアレイの写真を示し、Fig. 6(c) は検出コイルの配置を示したものである。検出コイルは線径 0.2mm の銅線を直径 23mm, 125 ターンのコイルに施し、同一平面状に 20 個配置した。丸枠は実際の検出コイルの寸法を示しており、丸枠内の数値は検出コイルの番号を示している。検出コイルの配置位置は一辺 150mm の立方体内部において局所解による影響が十分小さくなることを意図して設計した。

Fig. 7 は試作した LC 共振型マーカーの写真を示したものである。マーカーはコイル、コンデンサを半田で直列に接続して作成した。マーカーは 2 種類作成し寸法は Table 1 に示す。マーカー 1 は直径 5mm, 長さ 20mm の MnZn フェライト (TDK 株式会社製 EE シリーズ) の周囲に直径 0.1mm の銅線を 500 ターン巻いて外形寸法が長さ 20mm, 直径約 6mm とした。90kHz におけるインダクタンスは約 5.6mH であった。90kHz における性能指数は約 60 であった。コンデンサは 1nF のチップコンデンサ (ROHM 社製 MCH シリーズ) を使用した。マーカー 2 は直径 1mm, 長さ 10mm の MnZn フェライトの周囲に直径 0.1mm の銅線を 1 層 (77 ターン) 施したものである。それぞれマーカーの共振周波数は約 90kHz に設定した。共振周波数における性能指数は約 10 であった。今回は使用したチップコンデンサの寸法が大きく、マーカー全体として直径 1mm 程度にはなっていないが、市販品の微細なチップコンデンサを適用することでマーカー全体の微細化は可能と考えている。マーカーは非導体による 3 軸スキャナにより移動させた。

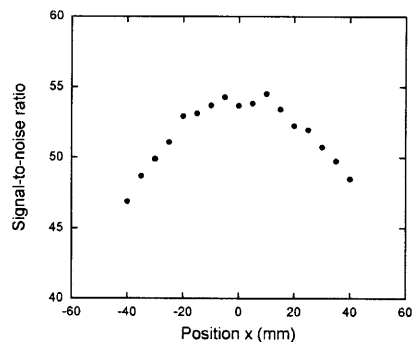


(a) Obtained accuracy

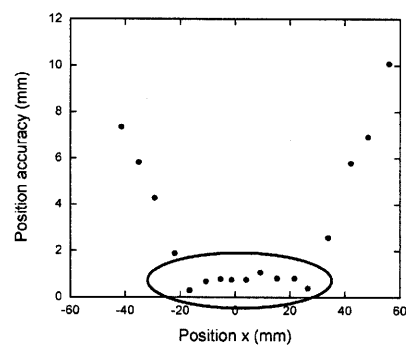


(b) Obtained signal-to-noise ratio

Fig. 8 Measured basic characteristics.



(a) Signal-to-noise ratio



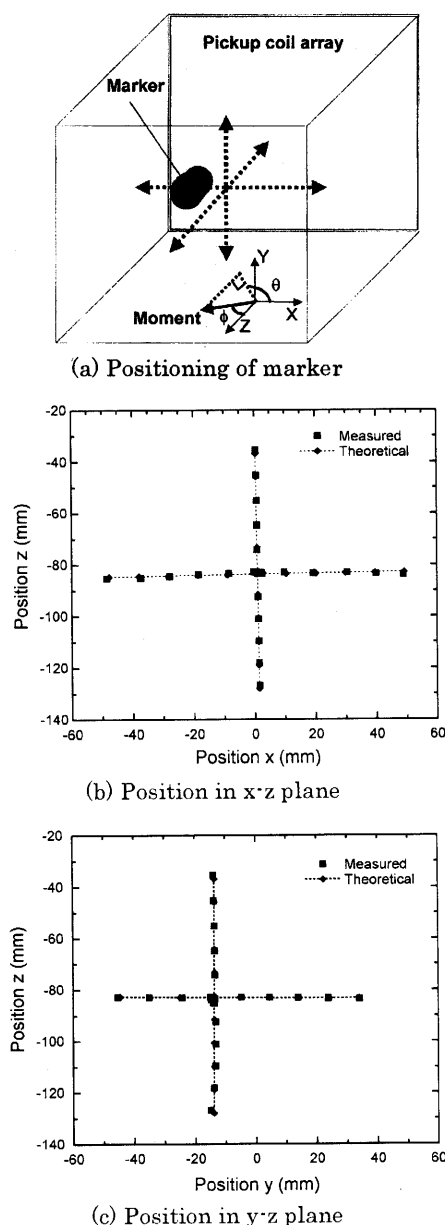
(b) Position accuracy

Fig. 9 Relation between the SN ratio and the position accuracy obtained by using the network analyzer.

4. 実測結果

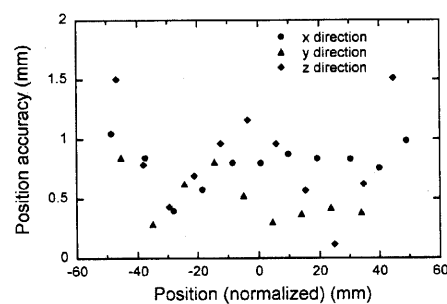
4.1 振幅および位相の測定精度

Fig. 8 は本計測システムにおける振幅および位相の計測精度を測定時間に対して示したものである。それぞれは

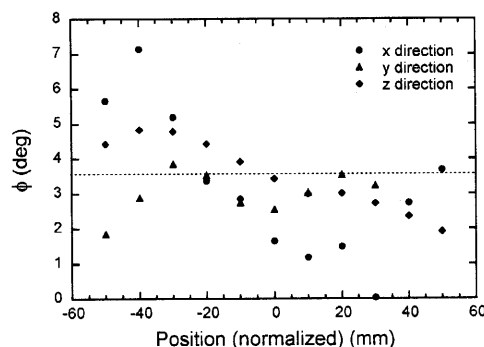


1000回の測定における標準偏差から求めた。計測時間が長いほど振幅および位相の計測精度は高感度化し、ほぼ平均化回数の1/2乗に反比例した。例えば測定時間が0.1秒(10Hz)であれば、振幅精度は約 $1.7 \mu\text{V}$ 、位相精度は5.1m度となった。Fig. 8(b)はこの測定装置を用いて、検出コイルからの距離が80mmの地点に微細なマーカー2を配置した時の各検出コイルの平均的な信号レベルとFig. 8の振幅角度とのSN比を求めたものである。SN比は最大で100程度得られた。

Fig. 9(a)は市販のネットワークアナライザ (MS4630B)を本論文で使用したADコンバータの代わりに用い、マーカー2を用いて、上記と同一構成でのSN比を比較したものである。Fig. 9(b)はその際のマーカーの絶対位置精度を示している。ネットワークアナライザのRBW(レゾリューションバンド幅)は100Hz、平均化回数は10回とした。Fig. 9(b)の中心付近である約40mmの範囲において1mm以内の



(d) Position accuracy



(e) Accuracy of direction

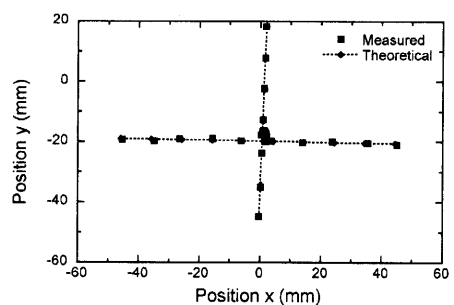
Fig. 10 Profile of marker 1 (coil diameter=6 mm, length=20 mm).

絶対位置精度が得られており、それに対するSN比は約50以上であった。このSN比は本稿の検出器を用いた場合のSN比を下回った。

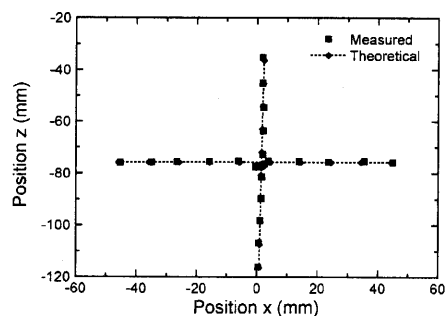
以上から本論文で試作した計測部を用いて、1mm程度の絶対位置精度を得る際に必要な計測精度が得られたと考えられる。

4.2 磁気マーカーの位置および方向

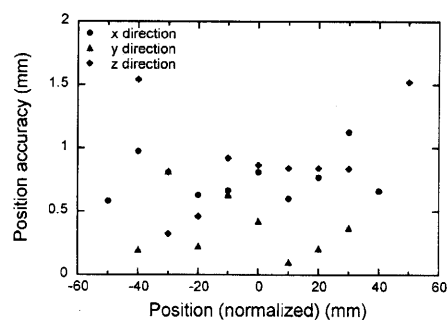
Fig. 10はマーカー1の位置および方向を示したものである。マーカーはFig. 7で示した直径6mm、長さ20mmのマーカーである。位置は検出コイルからの距離が80mmの位置を基準にして、x軸、y軸、z軸のそれぞれの方向へ10mm刻みで約100mm移動させた。ただし検出コイルの座標系とマーカー移動用マイクロメータの座標系は一致していないため、得られたマーカーの座標はわずかに傾いている。マーカー用コイルの法線方向は図中のy軸方向とほぼ平行になるように配置し、励磁コイルによる発生磁界とマーカーの法線方向がほぼ平行となる基本的な配置において位置精度を検討した。実際の用途では励磁コイルは2軸あるいは3軸成分とし、必要なSN比を得るように設計する必要がある。計測周期は1Hzとした。座標軸はFig. 10(a)中に示した。Fig. 10(a)にはマーカーの方向角を定義した。 θ はマーカーの方向ベクトル(マーカーコイルの法線方向ベクトル)をxy平面へ射影したものとx軸とのなす角であり、 ϕ はマーカーの方向ベクトルとz軸とのなす角である。Fig. 10(b)はxz平面内での位置を示したものであり、Fig. 10(c)はyz平面内での位置を示した。■は実測値であり、破線は理論値である。破線は実測値の軌跡と平行かつほぼ対応するよう



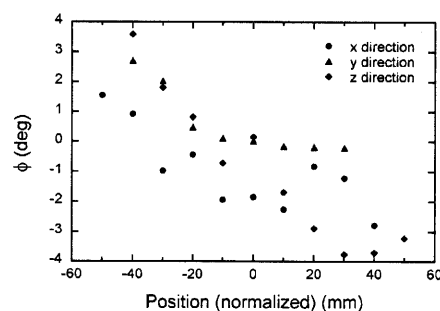
(a) Position in x-z plane



(b) Position in x-z plane



(c) Position accuracy



(d) Direction of marker

Fig. 11 Profile of slim marker (coil diameter=1.2 mm, length=10 mm).

な直線で表記した。さらに破線の中の◆は10mm刻みのマーカの位置を表し、マーカの理論的な位置を示した。Fig. 10(b)およびFig. 10(c)からマーカの位置は概ね正しく計測されていると判断される。Fig. 10(d)は絶対位置精度を

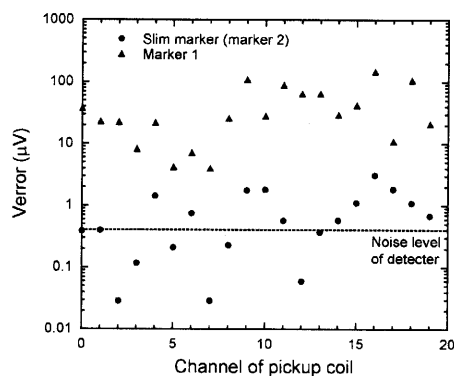


Fig. 12 Error voltage.

示した。絶対位置精度はFig. 10(a)およびFig. 10(b)における■と◆の3次元位置の距離で定義した。横軸は基準位置に対する移動距離を正規化して示した。Fig. 10(d)によれば検出コイルの面から最大で130mmの距離以内で1.5mm以内の絶対位置精度が得られた。全体の約88%の測定点で1mm以内の絶対位置精度が得られた。端部ほど位置精度が悪化している主要因はマーカから検出コイルアレイを見た立体角が小さくなっていることと、検出コイルの個数が十分に確保できなかった領域があることと考えられる。なお、マーカへ鎖交する磁束の低下等によるSN比の低下はこの実験した範囲内で最小でも約3600であり、これは位置精度に換算すると100 μm以内であるため、影響は小さいと考えられる。

Fig. 10(e)にはマーカの方向角を示した。φは方向ベクトルとz軸とのなす角である。実験した配置はコイルの法線成分がほぼy軸と平行であり、θは定義できないためφのみ記載した。横軸は基準点からの移動距離として表記した。φはおおむね0度近辺の値が得られた。絶対角度精度は±4度以内であった。

Fig. 11は微細なマーカ2を用いて得られた位置および方向を示したものである。マーカの移動方法はFig. 10と同一とした。計測周期は1 Hzとした。Fig. 11(a)はxy平面内のマーカの位置を示したものであり、Fig. 11(b)はxz平面内でのマーカの位置を示した。マーカの位置は概ね正確に計測された。Fig. 11(c)は絶対位置精度を示した。位置精度は実験した範囲で1.6mm以内であった。全測定点の中の約91%の点で絶対位置精度は1mm以内となり、概ね目標を達成したと考えられる。Fig. 11(d)は角度のプロファイルを示したものである。角度精度は概ね±4度以内であった。

4.3 位置精度についての考察

Fig. 12は2種類のマーカを基準点（検出コイルアレイからの距離は約80mm）に配置した場合における各検出コイルに対して誤差電圧を示したものである。誤差電圧 V_{error} は(5)式によって算出した。

$$V_{error}^{(i)} = V_{mk}^{(i)} - V_c^{(i)} \quad (5)$$

ただし V_{mk} マーカ寄与電圧の実測値, V_c は最適化処理された位置および方向を (2) 式へ代入して得られた磁束密度を電圧に換算した計算値, i は検出コイルの番号である.

Fig. 12 によればマーカ 1 (コイル直径: 6mm, コイル長さ: 20mm) における誤差電圧は測定器のノイズレベルに比較して十分に大きく, このマーカを用いた位置精度はマーカおよび検出コイルの寸法効果によりダイポール磁界からの誤差が主要因と考えられる.

一方微細なマーカ 2 (コイル直径: 1.2mm, コイル長さ: 10mm) における誤差電圧は測定器のノイズレベルに比較して若干大きいものの, ほぼ同程度のオーダーであった. このためこのマーカにおける誤差要因はマーカおよび検出コイルの寸法効果と計測器のノイズがともに寄与していると考えられる.

5. まとめ

1. LC 共振型磁気マーカの位置検出システムで, 位相情報を用いたリアルタイム動作による位置検出システムを開発した.
2. 検出コイルからの最大距離 130mm, 一辺 100mm の立方体内部において直径 6mm, 長さ 20mm のマーカで絶対位置精度は 1.5mm 以内を得た. 全測定点の約 88% の点で絶対位置精度は 1mm 以内であった.
3. マーカコイルの直径が約 1.2mm, 長さが 10mm のマーカを用いて上記の範囲において絶対位置精度は 1.6mm 以内であった. 全測定点の約 91% の点で絶対位置精度は 1mm 以内であった.
4. 直径 6mm のマーカを用いた場合の位置検出時の誤差要因は主としてマーカ用コイルおよび検出コイルの寸法効果によりダイポール磁界から実際の磁界分布が誤差を持っていることが考えられる. 微細なマーカ (コイル直径: 1.2mm) においては寸法による影響と検出器のノイズに起因すると考えられる.

謝辞

PXI 計測システムの作製にご協力いただいた株式会社 CPI テクノロジーズ 高野卓雄氏, 高野卓大氏, 鎌田 勇氏に感謝いたします. 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. 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) S. Yabukami, K. Arai, H. Kanetaka, S. Tsuji, and K.I. Arai, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. **28**, pp. 711-717 (2004).
- 6) J.A. Paradiso, K. Hsiao, J. Stricken, J. Lifton, A. Adler, *IBM Systems Journal*, vol. **39**, No. 3&4, pp. 892-914 (2000).
- 7) S. Watanabe, S. Nishiyama, N. Koshizuka, and K. Sakamura, MWE 2003 Microwave Workshop, pp. 245-250 (2003).
- 8) S. Yabukami, S. Hashi, Y. Tokunaga, T. Kohno, K.I. Arai, and Y. Okazaki, *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. **28**, pp. 877-885 (2004).
- 9) Nakagawa, Y. Koyanagi, Experimental Data Analysis by the least square method, p. 95-99, The University of Tokyo Press (1982).

2005 年 10 月 19 日受理, 2005 年 12 月 16 日採録