小形交流磁性マーカの作製

Production of Small Magnetic ac marker

佐藤慎悟 鈴木和彦 菊池弘昭* 山崎彩* 網代紀行* 薮上信* 山口正洋* 荒井賢一* 菊地新喜

東北学院大学工学部, 多賀城市中央区 1-13-1 (〒985-8537)

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

S. Sato, K. Suzuki, H. Kikuchi*, A. Yamazaki*, N. Ajiro*,
S. Yabukami*, M. Yamaguchi*, K. I. Arai*, and S. Kikuchi

Dept. of Electrical Engineering, Tohoku Gakuin University

*Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

We designed and fabricated cylindrical magnetic ac markers for magnetic motion capture system. The ac marker is 12 mm long and 7 mm in diameter. The inductance of the coil was calculated using Dwight's formula. A magnetic field of 2.4×10^{-7} Oe was measured using a high-frequency carrier type thin-film magnetic field sensor combined with a carrier-suppressing circuit. The distance detected between sensors and marker was 1250 mm.

Key words: magnetic ac marker, LC resonance circuit, magnetic field, high-frequency carrier type magnetic field sensor

1. はじめに

医療福祉分野や情報入力機器において人体や物体の位置・方向を検出するシステムが求められており、磁気式¹⁾、光学式²⁾をはじめ様々なシステムが提案されている。磁気を用いたモーションキャプチャシステムは、光学的に遮蔽された空間で計測できること、磁界が磁界発生源からの距離の3乗に反比例するため原理的に高い空間分解能が期待できる等の特長がある。しかし現在最も普及している磁気式モーションキャプチャシステム¹⁾は、マーカの電力供給は有線であること、マーカ寸法が20mm以上あること等により、マーカの配置に制約がある。

筆者らはバッテリー、処理回路および磁界発生コイルを同一パッケージに内蔵し、外部からの給電線を不要にする交流磁性マーカ³⁾を提案し、これを磁気式モーションキャプチャシステムへ応用することを想定している。筆者らが想定するシステムは多数個の交流磁性マーカを異なる周波数で駆動し、各周波数毎の測定磁界から各マーカの位置を求めるもの

である。この周波数毎の演算処理により多マーカの位置検出問題を1個のマーカの位置検出問題にすることができる。

また本交流磁性マーカでは、バッテリーを搭載することに伴い、磁界発生コイルを一定電圧で駆動させなるべく大きな磁界を発生させるように設計することが重要である。一定電圧駆動時の磁界発生コイルから最大磁界を発生するための基本的な設計指針は、並列共振時のインピーダンスをバッテリーの内部インピーダンスと整合すること、巻線の抵抗をなるべく小さくしてコイルに大きな電流を流すことであることを報告した³⁾。

上記を考慮すると、本論文で議論する交流磁性マーカは低インピーダンスのコイルから構成されることが了解される。この低インピーダンスのコイルを用いて所望の周波数で共振する共振回路を作成するためには共振回路内に存在する導体の抵抗や漂遊容量等を正確に把握しつつ、各素子、回路配線を精密に設計および作成することが必要である。

この観点から本論文では多層空心コイルのインダクタンスを高精度に計算する近似式の導入、リッツ線や巻線の占積率の再現性および均一性を詳細に検討した。

上記の検討に基づき、コイルのインダクタンスを数%以内の誤差で作成可能であることを示すとともに、ほぼ所望の共振周波数で共振回路を作成した。また作成した交流磁性マーカと高周波キャリア型薄膜磁界センサを1250mmの距離において磁界検出が可能であることを示した。さらにモーションキャプチャシステムへ応用した場合の計測範囲と位置精度を見積もった。

2. 交流磁性マーカ

Fig.1は、交流磁性マーカの模式図を表したもので

あり直方体ユニット内部に磁界発生コイル、電池、及び発振回路を搭載するものである。交流磁性マーカには、マーカの位置検出距離を広く確保する為に、これらの寸法及び供給電力条件でより大きい磁界を発生する事が要求される。マーカの駆動周波数はラジオのAM帯を避けるために535kHz以下とする。磁界発生コイルの寸法は直径7mm、長さ12mmの円柱状とした。マーカのサイズは30mmとする。

3. 磁界発生コイルの設計と作製

3.1 巻線の占積率

Table1 は交流磁性マーカに使用したリッツ線および巻線の占積率を示したものである。表の左の列から順にリッツ線に対する素線の占積率、コイル断面に対する素線の面積比、リッツ線を非磁性棒に巻く際のコイル断面に対するリッツ線の面積比をそれぞれ表している。上段の数値は占積率を一定にすることを考慮せずにコイルを作成した場合の占積率であり、リッツ線の占積率は29～38%の範囲でばらつきがあり、またリッツ線を非磁性棒に巻く際の占積率は69～82%のばらつきがあった。下段の数値はリッツ線作成時およびリッツ線を非磁性棒に巻く際に、占積率のばらつきを頻繁に計測し、かつ非磁性棒を变形が無視できる樹脂に代える処置を行った後の占積率を示したものである。この結果下段に示すようにリッツ線の占積率はほぼ40%、リッツ線を巻く場合の占積率は約5%以内にばらつきを抑えることができた。

3.2 インダクタンスの計算方法

Fig.2 はコイル形状を表している。r は内半径、A は外半径、l は長さ、D は半径方向巻線の占める長さ、 d_a は平均直径、 a は平均半径、R は平均直径に対して規格化した半径方向巻線の占める長さ、H は平均直径に対して規格化したコイルの長さをそれぞれ表す。

コイルのインダクタンス L は巻線厚みと巻線層間に生じる相互インダクタンスを考慮し、(1)～(3)式により計算した。

$$L = KL_1 + \Delta L \quad (1)$$

$$L_1 = 4\pi^2 a^2 n^2 / l \quad (2)$$

$$\Delta L = \frac{\pi^2 n^2 d_a^2}{l} \left[-\frac{2D}{3d_a} + \frac{D^2}{3d_a^2} + \frac{4d_a}{3\pi l} \left\{ \frac{D^2}{4d_a^2} \right. \right. \\ \left. \times \left(\log \frac{4d_a}{D} - \frac{23}{12} \right) - \frac{D^4}{80d_a^4} \left(\log \frac{4d_a}{D} - \frac{1}{20} \right) \right. \\ \left. \left. + \frac{D^6 d_a}{896d_a^6} \left\{ \frac{m}{6} - \frac{5m^3}{24} + \frac{m^5}{3} - \frac{95m^7}{128} + \frac{217m^9}{128} \right. \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{2135m^{11}}{512} + \frac{21571m^{13}}{2048} - \frac{895895m^{15}}{32768} + \dots \right\} \right. \\ \left. + \frac{D^4 d_a}{d_a^4 l} \left\{ \frac{m}{36} - \frac{17m^3}{180} + \frac{53m^5}{96} - \frac{1265m^7}{576} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{38857m^9}{4608} - \frac{3913m^{11}}{128} + \frac{220681m^{13}}{20480} - \frac{1519375m^{15}}{4096} + \dots \right\} \right. \\ \left. \left. + \frac{D^6 d_a}{d_a^6 l} \left\{ -\frac{m^3}{120} + \frac{15m^5}{112} - \frac{1117m^7}{672} \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. \right\} \right] \right]$$

Fig. 1 Schematic diagram of ac marker.

Table1 Packing factor of conductor.

Note	Packing factor of conductor	Packing factor of coil [%]	Conductor /Coil [%]
Previous values	31.1	23.3	74.8
	29.6	24.3	82.2
	38.3	26.5	69.0
Present values	40.2	28.5	71.0
	40.3	27.0	67.0
	40.3	26.7	66.3

Fig. 2 Structure of ac marker and calculation model.

(a) 305 kHz

(b) 335 kHz

(c) 365 kHz

Fig. 3 AC marker arrangement.

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1183m^9}{96} - \frac{76461m^{11}}{1024} + \frac{4043831m^{13}}{10240} \\
 & - \frac{15637479m^{15}}{8192} + \dots \left. \right\} + \dots \quad (3)
 \end{aligned}$$

ただし、 $m = d_a^2 \sqrt{d_a^2 + 4l^2}$ であり、 L は巻線厚みと巻線層間に生じる相互インダクタンスについて考慮したインダクタンスの式、 K は長岡係数、 L_1 は細長いソレノイドコイルの自己インダクタンスの式、 ΔL は巻線厚みと巻線層間に生じる相互インダクタンスの式、 n は巻線数である。この解析式はインダクタンスの計算式をコイルの内半径、外半径、長さ、半径方向巻線の占める長さを基に、平均直径に対する半径方向の巻線の占める長さを求め、巻線の層間に生じる相互インダクタンスについても考慮されたものである⁴⁾。本式を用いたことが、既報³⁾

(a) 305 kHz

(b) 335 kHz

(c) 365 kHz

Fig. 4 Frequency dependence on inductance of coil.

と比べて改良された点である。

3.3 磁界発生コイルの作成

上記のインダクタンスの計算方法と巻線の占積率を踏まえて磁界発生コイルを作成した。Fig.3 は作製した 3 種類のコイルの断面を模式的に表したものである。マーカはそれぞれ (a)305kHz, (b)335kHz, (c)365kHz において共振するように作成したものである。(a), (b), (c) のコイルはそれぞれ素線直径 0.1mm, 並列数 50 のリッツ線を 20 ターン施した。

Fig. 5 Tank circuit.

コイルの外形寸法は直径約 7mm 長さ約 12mm の円筒形になるように作製した。

Fig.4 は、それぞれのコイルのインダクタンスを励磁周波数に対して示したものである。○は実測値、実線は(1)~(3)式より求めた計算値である。コイルのインダクタンスはネットワークアナライザ HP8752A を用いて反射法⁵⁾により計測した。実測値と計算値の誤差は(a)のコイルでは約 5%，(b)のコイルでは約 3%，(c)のコイルでは約 3%であった。既報³⁾の誤差約 3 倍に比べ、計算精度は著しく向上した。なおコイルの交流抵抗の直流抵抗に対しての増分は 300kHz において約 0.5mΩ であり、表皮効果による交流抵抗の増分は十分小さい。

4. 共振回路

交流磁性マーカーは一定電圧の電池で駆動することを想定しているため、電源電流以上の電流をコイルへ流すように LC 並列共振回路を構成した。Fig.5 は共振回路の写真である。共振回路は作成した磁界発生用コイルと積層型セラミックチップコンデンサを組み合わせて所望のコンデンサ容量のものを並列接続して作成した。コイル、コンデンサはセミリジッドケーブル上に半田で固定した。この共振回路にファンクションジェネレータ (8116A) から 2V の交流電圧を印加した。使用を想定している SR44 電池は 150mA の電流を 30 分以上安定に取り出し得ることを実験的に確認しており、作成した共振回路のインピーダンスは、電池の内部抵抗 (13.3Ω) に近い値に調整した。

Fig.6 は作製した並列共振回路のインピーダンスを示したものである。共振回路のインピーダンスはネットワークアナライザを用いた反射法により測定した。それぞれの共振回路で並列接続したコンデンサ容量は(a)は 564nF, (b)は 498nF, (c)は 418nF であった。それぞれの共振回路の共振周波数は設計した共振周波数に対して ±3kHz 以内であった。この精度は本論

(a) 305 kHz

(b) 335 kHz

(c) 365 kHz

Fig. 6 Frequency dependence of tank circuit impedance.

文で想定する 30 kHz 間隔で動作する複数の交流磁性マーカーを用いたモーションキャプチャシステムに適用可能であると考えられる。測定共振回路のインピーダンスは 12.1~14.7Ω であり、設計した 13.3Ω とほぼ一致した。

5. 発生磁界計測と検出距離

5.1 実測値

Fig. 7 は磁界計測実験において共振回路と磁界センサの配置を表した写真である。共振回路からの発生磁界は搬送波抑制回路を組み合わせた高周波キャリア型薄膜磁界センサ⁶⁾により測定した。センサ素子はコイルの中心軸上に配置し、中心軸に平行な方向の磁界を測定した。

Fig. 8 は磁界発生コイルを中心軸に沿って移動させた場合の磁界強度を示したものである。この磁界強度は別に用意したサーチコイルにより校正した。センサとマーカ間の距離は 10mm~1250mm の範囲で変化させた。○は 305kHz で駆動したコイル、△は 335kHz で駆動したコイル、□は 365kHz で駆動したコイルの実験値である。測定磁界は概ね距離の 3 乗に反比例しており、双極子磁界が計測されていることが分かる。マーカとセンサの距離が 1250mm の位置において、 2.4×10^{-7} Oe の微弱磁界を検出でき、測定距離は既に報告した実験結果³⁾に比較して約 12 倍まで長くすることができた。

5.2 位置検出システムに適用した場合の検出範囲

上記からセンサとマーカ間の距離が 1250mm であった場合に、 2.4×10^{-7} Oe の検出分解能を得た点を考慮して、位置検出システムを構成した場合の検出範囲、位置精度、収束性を見積もった。Fig. 9 は計算で仮定した交流磁性マーカと 3 軸磁界センサとの配置を表したものである。交流磁性マーカは微小ダイポールと近似し、3 個の 3 軸磁界センサは互いに約 100mm 離して配置した。xyz 直交座標系と磁気モーメントの向く方向は球座標系における θ , ϕ を Fig. 9 のように定義した。 θ , ϕ はそれぞれ $0 \sim 90\text{deg}$ の範囲で変化させ、マーカが任意の方向を向いた場合に対応させた。マーカの位置および方向はマーカ周囲の磁界強度が双極子磁界を形成することを仮定し、最小二乗法⁷⁾により求めた。Fig. 8 より磁界センサの磁界検出分解能は 2.4×10^{-7} Oe であるため、3 軸磁界センサで得られる磁界強度は 2.4×10^{-7} Oe で量子化したものを用いた。マーカの磁気モーメントは Fig. 8 の実測値から 5.7×10^{-10} Wbm とした。

磁界センサと磁性マーカとの距離が 1250mm の場合、解は収束せず、この距離ではマーカの位置検出は困難である。Fig. 10 はセンサとマーカの距離を 400mm とした時のマーカ方向角に対する位置精度を表したものである。この位置精度は真の位置と量子化誤差を含んだ計算結果による位置との距離とした。マーカ・センサ間距離 400mm においてはマーカが任意の角度を向いている場合に誤差は 30mm 以内となった。この 30mm の誤差は交流磁性マーカの長さと同寸法であることから設定したものである。ただし ϕ

Fig. 7 Photograph of generated magnetic field dependence on distance from ac marker.

Fig. 8 Distance from ac marker dependence of generated magnetic field.

Fig. 9 Arrangement of ac marker
And three-axis magnetic field sensor.

Fig. 10 Position accuracy over the direction
angle of ac marker for 400 mm
distance.

が 0° に近づくに従って、位置精度は悪化した。これはセンサ付近の磁界強度が $\phi = 90^\circ$ の角度に比べて約 $1/2$ に減少するためであると考えられる。以上より約 30mm の位置精度を仮定すれば本論文で用いた交流磁性マーカと高周波キャリア型磁界センサにより約 400mm の範囲において位置検出が可能と考えられる。

6. まとめ

1. 巻線の占積率を一定にすること、および巻線各層間の相互インダクタンスを考慮した解析式を導入することにより、交流磁性マーカ用のコイルのインダクタンスを誤差 $3\sim 5\%$ 以内で作成できることを示した。
2. $305\sim 365\text{kHz}$ で駆動する 3 種類の共振回路を作製した。共振回路は設計周波数に対して $\pm 3\text{kHz}$ 以内で共振させることができた。
3. 共振回路によるマーカと高周波キャリア型薄膜磁界センサを用いて、マーカとセンサを 1250mm まで離して、磁界が計測できることを示した。このときの発生磁界は $2.4 \times 10^{-7}\text{Oe}$ であった。
4. 共振回路と $2.4 \times 10^{-7}\text{Oe}$ の分解能を有する 3 軸磁界センサを用いて、モーションキャプチャシステムとしての検出範囲と位置精度を見積もった。マーカの検出位置精度が約 30mm 以内であれば、マーカの検出範囲は約 400mm 以内であった。

謝辞

本研究の一部は科学技術振興事業団の宮城県地域結集型共同研究事業「生体機能再建と近未来生活支援技術—最先端リハ・福祉システムの構築と新産業の創出—」によるものである。

文献

- 1) F.R. Raab E.B. Blood, T.O Steiner, H. Jones, *IEEE Trans. Aero. Electro.*, AES-15, 709 (1979).
 - 2) 「VICON8 Catalog」 NAC Co. Ltd. 1999.
 - 3) M. Yamaguchi, N. Ajiro, S. Yabukami, K.I. Arai, A. Itagaki, S. Tsuji and N. Wako, *IEEE Trans. Magn.*, 37, 2016 (2001).
 - 4) H. Dwight; *Transact. Am. Inst. El. Eng. Bd.* 38, 1675 (1919).
 - 5) K.I. Arai, M. Yamaguchi and H. Ohzeki, *IEEE Trans. Magn.*, 28, 2175 (1992).
 - 6) S. Yabukami, T. Suzuki, N. Ajiro, H. Kikuchi, M. Yanaguchi, K. I. Arai, *IEEE Trans. Magn.*, 37, 2019 (2001).
 - 7) T. Nakagawa, Y. Koyanagi, 「Experimental data analysis by the least-squares method」 p.95-99, University of Tokyo Press (1982, Tokyo).
- 2001年10月9日受理, 2002年2月7日採録