アモルファスワイヤ MI 素子と C-MOS IC による磁界ベクトルセンサ

正員 八木孝臣 (名古屋大学)、正員 毛利佳年雄 (名古屋大学)

非会員 中林宗治 (名古屋大学)

Vector field sensor using amorphous wire and C-MOS MI circuit

Member Takaomi Yagi, Member Kaneo Mohri
Non-Member Muneharu Nakabayashi (Nagoya University)

New sensitive and quick response magnetic vector sensor is constituted using an amorphous-wire MI microsensor. A small sized three axial head is composed with three 2-mm long amorphous wires for detection of a small magnet position assuming a magnetic dipole.

The sensor circuit is constructed using five inverters in a C-MOS IC chip; two inverters are for a multivibrator and three are for pulse current amplification. Some two-dimensional movements of a small magnet were precisely detected comparing with the theoretical characteristics.

キーワード: 磁気インピーダンス効果、アモルファスワイヤ、C-MOS マルチバイブレータ、ベクトルセンサ

1. まえがき

運動物体の3次元動的動きを非接触で計測する方法の1つに対象物体に微小磁石を固定してその磁力線を磁界センサで検知する方法がある。この場合、磁界センサは磁界をベクトルとして検出する3次元センサであることが必要であり、微小磁石を磁気双極子と見なせるよう、3次元磁界センサのヘッドは小型であることが望ましい。また、運動物体にセンサを搭載する場合にはセンサの消費電力は微小であることが要求される。ところで、磁気抵抗効果(MR)素子、巨大磁気抵抗効果(GMR)素子は強磁性体の磁化と直流電流の伝導電子との相互作用による電気抵抗が外部磁界により変化(減少)する現象を利用したものであり、電気抵抗の変化率はそれぞれ約0.1%/Oe, 1%/Oeであるのに対して、アモルファスワイヤMI素子は、高透磁率磁性体であるアモルファスワイヤに高周波電流を通電し、外部磁界によって表皮効果によるインピーダンスが敏感に変化する電磁気現象を利用したものであり、零磁歪ワイヤを用いるとその長さに関係なく10~100%/Oeの非常に高い磁気インピーダンス(MI)効果を示す。⁽¹⁾⁻⁽⁷⁾このようなことを考慮して先に述べた3次元センサのヘッドとしてアモルファスワイヤを用いX, Y, Zの3直交軸に配置したC-MOS IC型⁽⁸⁾磁界ベクトルセンサを構成した。零磁歪アモルファスワイヤ(30 μm径、1~3mm長)をヘッドに用いた場合、磁界検出の分解能は交流磁界に対して、約10⁻⁶(±1 Oeフルスケール)、応答周波数は0~1MHzの高感度、高速応答性を示す。

2. アモルファスワイヤのMI効果

MI効果は、高透磁率磁性体に高周波電流やパルス電流を通電したときに、外部磁界Hexによって、表皮効果によるインピーダンスが変化する現象を言う。本実験に使用した高透磁率磁性体は、Fe_{41.35}Co_{48.15}Si_{12.5}B₁₅組成のわずかに負磁歪(飽和磁歪定数λ=-10⁻⁷)のas-castワイヤを30 μm径にダイス線引きし、張力熱処理(475℃, 2kgf/mm², 15s)を施したアモルファスワイヤである。高周波電流(角周波数ω)をアモルファスワイヤに通電したときワイヤの両端間電圧は次の式で表される。 $Z=Rk \alpha J_0(k \alpha) / 2 J_1(k \alpha)$, $k=(1+j) / \delta$, $\delta=(2 \rho / \omega \mu_0)^{1/2}$ (R:直流抵抗, α:ワイヤ半径, ρ:抵抗率, δ:表皮深さ, μ₀:ワイヤ円周方向透磁率, J:ベッセル関数)⁽⁹⁾。ここで角周波数ωが十分大きく表皮効果が顕著な場合、δ≪αとみなすことができるので先の式は次のようになる。 $Z=(\alpha/2)R(1+j)(\omega \mu_0 / 2 \rho)^{1/2}$ ここでμ₀は外部磁界Hexによって変化する。従ってZも外部磁界により変化することとなり高周波電流通電によるMI効果を生じさせることができる。さらに高周波電流をその成分に含んでいるパルス電流を通電してもMI効果が得られるので⁽⁸⁾、これを基礎にC-MOS ICを利用した3次元磁界ベクトルセンサを構成した。このパルス電流の立ち上がり時間をtrとすると、このパルス電流はMI効果に関しては、平均値を直流成分とする $f_w \approx 0.3 / tr$ [Hz]の周波数帯域幅の高周波電流に対応すると考えられる。

3. C-MOS マルチバイブレータ型 MI リニア磁界センサ

< 3. 1 > リニアセンサの回路構成 図1にC-MOS ICを用いた磁界センサを示す。C-MOS ICは市販のICを使用し、ICチップ内の6個のインバータの内2個(Q1, Q2)と、発振の周期を決定するC、Rにより周波数、数kHzから数MHzの範囲で安定に方形波を発生する無安定マルチバイブレータを構成している。発生した方形波はR_D, C_Dによる回路で微分される。この微分波形の電圧は微分回路で減衰しMI効果を生じさせるほど十分ではないためにインバータ(Q3)による反転増幅を行い、そのパルスをアモルファスワイヤに通電している。通電パルス波形は、三角波状でtr=5.8ns高さは38mAである。従って、fw≒0.3/tr=51.7MHzである。ヘッドの直流抵抗はR=3.7Ωであり、パルス通電時のインピーダンスの大きさは|Z|=23.9Ωである。またショットキーバリアダイオード(SBD)とC_H, R_Hからなるピークホールド回路を構成し、直流出力を得ている。更にHex=0における検出電圧を差動増幅回路(増幅率10倍)で相殺し、Hex=0のセンサ出力E-outを0とした。更にもう1段増幅(10倍)を行っている。またバイアス磁界がない場合には図3のように磁界に対して対称な出力となるので、バイアス磁界印加用コイルに直流電流を通電し、約10e程度のバイアス磁界を印加し、MI特性の比較的線形な部分を利用している。更にセンサ出力の直線性を向上させるために、センサ出力に比例した電流をVR2を通して負帰還磁界印加用コイルに通電している。

図1 リニア磁界センサの回路図

Fig.1 C-MOS multivibrator type
MI linear sensor circuit.

図2 ヘッド形状

Fig.2. Illustration of the a-wire sensor head.

< 3. 2 > センサヘッド 図2にアモルファスワイヤによるセンサヘッド部の形状を示す。アモルファスワイヤに

は約0.5mm径のチューブを通し、チューブ上にバイアス磁界印加用コイルと負帰還磁界印加用コイルをそれぞれ20回ずつ巻いた。これらのコイル電流と励磁電流は直交するため、MI特性に影響を与えない。

< 3. 3 > 磁界検出特性 図3は電源電圧4VのときのHex対Eout(増幅前)特性である。ヒステリシスが少なく非対称性の少ない磁界検出特性である。磁界の線形検出、正負磁界の判別、負帰還回路動作を安定に行わせるために、点Aを動作点とするように直流バイアス磁界を印加した。

< 3. 4 > リニア特性 図4に10eの直流バイアス磁界及び、負帰還磁界を与えた場合の交流磁界(±10e, 1kHz)検出特性を示す。負帰還をかけることにより線形でヒステリシスのない検出特性を得ることができる。

図3 C-MOSマルチバイブレータ型
MIセンサの磁界検出特性

Fig.3.Hex vs. E-out characteristics.

図4 交流磁界検出特性

Fig.4.Hex vs. E-out characteristics.

4. 磁界ベクトルセンサの構成

< 4. 1 > センサ回路 図5に磁界ベクトルセンサの回路図を示す。先に述べた単ヘッド型磁界センサのアモルファスワイヤをX, Y, Zの3直交軸と平行になるように配置し、3本のワイヤにそれぞれパルスを通電する。この微分-バッファ型の回路では、微分波形をインバータによって波形整形しているが、インバータの入力インピーダンスが高いため、1つの微分波形を3つのインバータでそれぞれ波形整形しても互いに干渉することはない。したがってベクトルセンサを構成する際にICチップは1つで済ませることができ安定

で高精度のベクトルセンサが構成された。図6はベクトルセンサのヘッド部分の図である。3本のワイヤを互いに独立させて配置したのは磁氣的直交性を実現するための個々のワイヤの微調整を行えるようにしたためである。個々のワイヤの形状は<3.2>で述べたものと同一である。感度指向性は図6に示すように磁界検出特性は $\text{Hex} \cos \theta$ の特性に一致しており、ほぼ完全な一方向性である。

図5 磁界ベクトルセンサの回路図

Fig.5. Magnetic vector field sensor circuit.

図6 磁界ベクトルセンサのヘッド部分の図

Fig.6. Illustration of the vector sensor head.

<4.2> ヘッドの磁氣的直交性 磁界の3成分を正確に得るために、ヘッド部分の3本のワイヤの個々の磁界検出特性が同一であることが必要である。個々のワイヤに巻かれているバイアス磁界印加用コイル、及び負帰還磁界印加用コイルに通電する電流を調節することにより図7に示した3枚の写真のように3本の磁界検出特性をそろえることができた。この場合の線形範囲は $\pm 10e$ である。

図7 3本のワイヤの磁界検出特性
(印加磁界 $\pm 10e$, 500Hz 正弦波)

Fig.7. Hex vs. E-out characteristics
of the 3-axis heads.

また3本のワイヤの磁界検出特性が同一であると同時に3本のワイヤが互いに磁氣的に直交していることが必要である。この設定方法として以下の方法を用いた。すなわち外部磁界（正弦波）をX軸方向に印加したときY及びZ軸方向のワイヤからの出力が0となるように微調整を行えば図8に示した3枚の写真のうちの一番上の写真のようになる。同様な作業をY軸方向、Z軸方向に関しても行い、ベクトルセンサのヘッドの3本のワイヤの磁氣的直交性を実現した。

X軸方向に印加したとき

Y 軸方向に印加したとき

Z 軸方向に印加したとき

図 8 3本のワイヤの磁氣的直交性
(印加磁界±0.50e, 500Hz 正弦波)

Fig. 8. Magnetic orthogonality in the three axis head.

5. 磁界のベクトル成分の理論式

図 9 のように原点に微小磁石がある場合の距離 r 離れた点での磁界の成分の式は磁気双極子を仮定すると次のようになる。

$$\begin{aligned}\vec{H} &= \frac{1}{4\pi\mu_0} \left(-\frac{\vec{M}}{r^3} + \frac{3(\vec{M} \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} \right) \\ &= \frac{1}{4\pi\mu_0} \left\{ \begin{aligned} -\frac{M_x}{r^3} + \frac{3M \cos \theta}{r^4} r_x \\ -\frac{M_y}{r^3} + \frac{3M \cos \theta}{r^4} r_y \\ -\frac{M_z}{r^3} + \frac{3M \cos \theta}{r^4} r_z \end{aligned} \right\} \\ &= \frac{M}{4\pi\mu_0 r^3} \left\{ \begin{aligned} 3 \cos \theta \cos \varphi_r \cos \theta_r - \cos \varphi_m \cos \theta_m \\ 3 \cos \theta \cos \varphi_r \sin \theta_r - \cos \varphi_m \sin \theta_m \\ 3 \cos \theta \sin \varphi_r - \sin \varphi_m \end{aligned} \right\} \dots (1)\end{aligned}$$

この式中で未知数は $(r, \theta, \varphi_r, \theta_r, \varphi_m, \theta_m)$ の 6 個でありこれらの値を決定することによりベクトルセンサの測定値からの磁石の位置の算出ができる。今回構成したベクトルセンサの動作確認の実験は簡単のために平面内で行ったので先の式から図 10 のように平面内に磁石が存在する場合の同一平面内の磁界の式を与えると次のようになる。

式(1)中で $\varphi_r = 0, \varphi_m = 0$ とおくと(1)式は

$$\vec{H} = \frac{M}{4\pi\mu_0 r^3} \left\{ \begin{aligned} 3 \cos \theta \cos \theta_r - \cos \theta_m \\ 3 \cos \theta \sin \theta_r - \sin \theta_m \\ 0 \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

となり、更に簡単のために磁石が X 軸と平行であるとするとな次のような式となる。

$$\vec{H} = \frac{M}{4\pi\mu_0 r^3} \left\{ \begin{aligned} 3 \cos^2 \theta - 1 \\ 3 \cos \theta \sin \theta \\ 0 \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

(3) 式から次の 2 式が得られる。

$$\cos^2 \theta = \frac{3H_x^2 + 2H_y^2 \pm \sqrt{9H_x^4 + 8H_x^2 H_y^2}}{6(H_x^2 + H_y^2)} \dots (4)$$

$$r = \left\{ \frac{M}{4\pi\mu_0} \frac{H_x \pm \sqrt{9H_x^2 + 8H_y^2}}{2(H_x^2 + H_y^2)} \right\}^{\frac{1}{3}} \dots (5)$$

この 2 式の H_x, H_y にベクトルセンサの測定値を代入することにより磁石の位置を決定することができる。

図 9 空間内にある磁石とセンサヘッドとの位置
Fig. 9. Position of the magnet and sensor head.

図 10 平面内にある磁石と
センサヘッドとの位置関係

Fig. 10. Position of the magnet and sensor head.

6. 測定結果

構成したベクトルセンサの動作確認として、厚さ約 1 mm、3 mm 径の厚さ方向に着磁されたフェライト磁石 (磁気モーメント $M=5 \times 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{m}^2$) を平面内で動かして得られた測定結果と式(3)を用いて得られる理論値との比較を行った。図 11 のグラフは図 12 のように磁石を移動させた場合の測定結果である。式(4), (5)を用いず、このグラフを用いてベクトルセンサにより測定された磁界の成分の値から、磁石のおよその位置を知ろうとする場合、個々のヘッドの出力に対して取りうる磁石の位置はそれぞれ 2 ヶ所考えられるため、X 軸

方向のみ、或いはY軸方向のみの1次元センサでは磁石の位置を決定することはできない。例えば、X軸方向のみの1次元センサによる測定値が0.05 Oeだった場合グラフから得られる磁石の距離の値は±1.5 cmと2ヶ所考えられる。しかし、ベクトルセンサの場合磁石の位置を出力に対して1対1に決定できる。図13のグラフは式(3)を用いて理論値を描いたグラフであり測定結果は理論値に沿った形で得られていることが分かる。

図11. 測定結果

Fig. 11. Sensing results.

図12. 測定方法

Fig. 12. The experimental set up.

図13. 理論値

Fig. 13. Simulation results.

図14のグラフは図15のように磁石を向けて動かしたときの測定結果である。この測定結果からも先と同様なことが言え、ベクトルセンサを用いることによって磁石の位置を測定値に対して1対1に決定することができる。図16はその理論値を描いたグラフであり測定結果は理論値に沿っていると言える。

図14. 測定結果

Fig. 14. Sensing results.

図15. 測定方法

Fig. 15. The experimental set up.

図16. 理論値

Fig. 16. Simulation results.

図17は図18のように磁石を回転させたときの測定結果であり2相正弦波特性が得られた。式(3)は直角座標で表示されているが極座標表示すると次のようになる。

$$\vec{H} = \frac{M}{4\pi\mu_0 r^3} \{2 \cos \theta, \sin \theta, 0\} \dots (6)$$

X軸方向の測定値はY軸方向の測定値の2倍になっているが式(6)からそのことが説明できる。

図17. 測定結果

Fig. 17. Sensing results.

図18. 測定方法

Fig.18. The experimental set up.

7. むすび

アモルファスワイヤを用いた C-MOS IC 型MI 磁界ベクトルセンサを構成し以下の結果を得た。

(1) 微分-バッファ型とすることで回路中に用いる IC チップを1つで済ますことができ安定な磁界ベクトルセンサを構成した。

(2) バイアス電流、負帰還電流を調節することにより3本のアモルファスワイヤヘッドの磁界検出特性を同一にそろえた。

(3) ヘッドの磁氣的直交性を実現でき理論値に沿った結果が得られた。

今後は周囲の雑音磁界や温度変化の影響の少ない回路を考え、また3次元空間内での磁石の位置を決定するシステムを構成する予定である。

なお、本研究の一部は文部省の、民間等との共同研制度に依っている。

(平成9年11月7日受付、平成10年1月7日再受付)

参考文献

1. K. Mohri: Mat. Sci. Engn. A185, pp. 141-146 (1994)
2. 武士田健一、野田充宏、パニナリサ、吉田史、内山剛、毛利佳年雄: 日本応用磁気学会誌、18、No. 2, pp. 493-498 (1994)
3. Y. Yosida, T. Uchiyama, K. Mohri, & S. Ohga: IEEE Trans. Magnetics., 29, no. 6, pp. 3177-3179 (1993)
4. L. V. Panina, K. Mohri, K. Bushida, and Noda: J. Appl. Phys., 76, No. 10, Pt. 2, pp. 6198-6203 (1994)
5. L. V. Panina and K. Mohri: Appl. Phys. Lett., 65 (9), pp. 1189-1191 (1994)
6. 毛利佳年雄、L. V. Panina、内山剛、武士田健一: 日本学術振興会アモルファス・ナノ材料第147委員会、第45回研資、pp. 33-36 (1994)
7. 毛利佳年雄、内山剛・L. V. Panina、武士田健一: 日本学術振興会薄膜第131委員会、第175回研資、pp. 1-9 (1995)
8. 菅野崇樹、毛利佳年雄、武士田健一: Trans. IEE of Japan, Vol. 116-E, No. 10, Dec., (1996)
9. 毛利佳年雄: Trans. IEE of Japan, Vol. 116-E, No. 1 Feb./Mar., (1996)

八木孝臣

(学生員) 1974年3月14日生。1995

年3月名古屋大学工学部電気工学科卒業。現在名古屋大学院工学研究科修士課程在学中。主として、磁気センサの研究に従事。現在に至る。

毛利佳年雄

(正員) 1940年11月16日生。1968年3

月九州大学大学院工学研究科博士課程修了。

1982年4月九州工業大学電気工学科教授。

1987年10月名古屋大学工学部電気学科教授

(知能システム講座)、現在に至る。工学博

士。主として、アモルファス磁性体とマイク

ロ磁気センサ、誘導電動機のビルトインセン

サによる計測制御、生体微動振動情報、高温

超伝導磁気応用などの研究に従事。1981年市村賞、1989年日本応

用磁気学会論文賞、1993年永井科学技術賞受賞、IEEE Fellow。

中林 宗治

(非正員) 1974年4月22日生。

1996年3月名古屋大学工学部電気工学

科卒業。現在名古屋大学大学院工学研

究科修士課程在学中。主として磁気セ

ンサの研究に従事。現在に至る。