磁気インダクタンス素子による眼瞼運動検出用磁石変位センサ

Magnet-Displacement Sensor Using Magneto-Inductive Elements for Sensing Both Eyelid Movement

高木 充・毛利佳年雄・吉野誠司*・加藤正人

名古屋大学工学部, 名古屋市千種区不老町 (☎464-01)

*鈴鹿医療科学技術大学, 鈴鹿市岸岡町 1001-1 (☎510-02)

M. Takagi, K. Mohri, S. Yoshino* and M. Katoh

Faculty of Engng., Nagoya Univ., Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-01

*Suzuka Medical Science and Technology University, Kishioka-cho, Suzuka 510-02

We previously constructed an accurate magnet-displacement sensor for detection of eyelid movement, using an amorphous magnetic core multivibrator. However, some improvements in the eyelid movement sensor are necessary in order to achieve independence of the magnetization direction of the cores and a wider sight space. We therefore constructed another accurate magnet-displacement sensor for detection of eyelid movement, this time, using amorphous wire magnetoinductive (or MI) elements. The elements were formed by using tension annealed zeromagnetostrictive amorphous wires. The MI effect and the symmetrical MI characteristics of the elements are used to form thinner sensor heads having no coils and to change their inductances independent of the magnetization directions.

Key words: magnet-displacement sensor, magneto inductive element, bio-mechanical vibration, eyelid movement, non-contact sensing

1. はじめに

近年, 交通事故の多発や, コンピュータ端末および VDT 作業従事者の眼精疲労症が大きな社会問題となってきた¹⁾, 居眠り運転検知・防止装置や, 眼精疲労度測定装置の開発が望まれている。これらはいずれも視覚疲労が関連していると考えられている。網膜は脳の分化発達したものであり, 視細胞層から視神経繊維となって眼球から脳へ結合するまでには, 数種の層があり, この段階でかなりの視覚情報処理が行われる。したがって, このように複雑な機能に関係して行われる眼球運動は, 他の筋肉運動とは異なり, 視覚情報の獲得過程を反映している²⁾。また, 視機能の出力部分である眼球運動を支配する神経系は, 睡眠中枢が存在する視床下部をはじめ脳のあらゆる部分を通過するので, 眼球運動の時系列

は脳疾患や眠気および視覚疲労などを反映する有益な情報である³⁾。眼球運動の計測法には, 眼球運動図, 網膜電位図, 筋電図などがある⁴⁾。しかし, これらは, 眼球の機械運動そのものの計測ではなく, 表面電極やコンタクトレンズタイプの電極を用いた眼球運動を起こさせる誘発電位の計測であり測定には熟練と電氣的シールドを必要とする。また被験者は安静ないし静止状態が要求されるので, 日常行動中の計測は困難である。一方, 眼球運動に伴う眼瞼の運動は, その時々体調や感情に敏感に反映する。したがって眼球運動や眼瞼振動を計測することができれば, 眠気度や眼精疲労度を計測できる可能性がある。このうち, VDT 作業等の日常行動中でも検出できるのは眼瞼の振動である。そこでこの観点から, これまでアモルファス放射状磁心マルチバイブレータブリッジ型磁石変位センサ⁵⁾を用いて両眼瞼の機械的微振動の非接触検出を行ってきた⁶⁾。この場合微小磁石 (3 mm 径, 1 mm 厚) を眼瞼上に両面テープで貼りつけ磁界センサヘッドは眼鏡枠に固定するが, 磁心にコイルを巻回しているため, 接着剤による磁心設置が容易ではなく, また被験者の視野も十分ではなかった。さらに, 磁石の着磁の極性によってセンサの出力電圧が逆転するため, 磁石の貼りつけ方に注意を払う必要があった。そこで本論文では, アモルファス磁性細線の磁気インダクタンス効果⁷⁾を利用したコイルレス磁界センサヘッドを構成し, 広視野でかつ磁石の極性によらない操作性の優れた両眼瞼振動センサを構成したので動作解析および両眼瞼振動の検出例を報告する。

2. 磁気インダクタンス効果

アモルファス磁性ワイヤに高周波電流を通電して発生するワイヤ両端間の誘導電圧 e_L の振幅 $|e_L|$ が, ワイヤ長さ方向の外部磁界によって敏感に減少する効果を「磁

Fig. 1 Domain model for amorphous magnetic wire.

Fig. 2 Arrangement of MI elements on a glass frame.

気インダクタンス効果 (Magneto-Inductive effect: MI effect)』呼ぶ⁷⁾。この MI 効果は円周磁束の時間変化による電圧分の振幅の変化であるので、Fig. 1 に示すように外殻部で円周方向に磁化容易方向を有している FeCoSiB ($\lambda_s = -10^{-7}$) や、CoSiB ($\lambda_s = -5 \times 10^{-6}$) ワイヤを用いると数 μm 径、1~2 mm 長の微小寸法の試料でも容易に顕著に現れる。しかも、励磁や検出用のコイルは全く不要であるので、非常に細いセンサヘッドとなる。これらのワイヤを「MI 素子」と呼んでいる⁸⁾。

3. 磁石変位センサの構成原理

Fig. 2 に示すように、人の左右両上瞼に両面テープにより微小な SmCo 磁石 (直径 3 mm, 厚さ 1 mm) を貼り付ける。着磁は厚さ方向である。そして眼瞼振動での磁石変位による磁界変化を、非磁性の眼鏡枠に取り付けた磁界センサヘッドで、10 mm 程度離れた距離から非接触で検出する。本センサは、Fig. 3 に示すように放射状に配置した MI 素子をふくむ簡単なブリッジ回路により構成される。 R_1 , R_2 は固定抵抗、VR はワイヤの電気抵抗によるオーミック電圧を相殺する可変抵抗である。MI 素子は、それぞれ 50 μm 径、14 mm 長のアモルファスワイヤを折り返して 7 mm 長にした状態で直列に接続してある。素子を折り返すことによって端子を 1 か所に集めることができ視界を妨げない素子の設置が容易になる。さらに、これらの MI 素子を折り返した部分が中心を向くように放射状に配置することにより、任意の方向からの外乱磁界による影響を低減し、また磁石の変位を検出する指向性を、センサヘッドに垂直な方向のみに

Fig. 3 Magnet field sensor using MI elements.

Fig. 4 Model combining an MI element and a magnet.

設定することができる。MI 素子センサ部に、交流発振器により高周波正弦波電流を通電すると、端子間の電圧には MI 効果を示す電圧 e_L のほか、ワイヤの電気抵抗による電圧成分も含まれているので、これをブリッジ回路によって相殺する。センサヘッドに磁石磁界が加わると円周磁束変化による電圧成分 e_L の振幅 $|e_L|$ が減少するので、ブリッジ回路の出力端では、外部磁界の絶対値で振幅変調された電圧として出力される。したがって、この電圧を復調回路に通しローパスフィルタにより搬送波成分を取り除くことにより、外部磁界の絶対値に比例した電圧を検出することができる。また、ここでのセンサの出力は、MI 効果によるため、磁石がセンサに近づく方向に変位する場合に電圧が減少するので、反転減算回路により電圧を正負反転し、さらに $x=10$ mm で零になるようバイアス電圧を印加したものをセンサ出力とした。なお、磁界センサヘッドに Hall 素子や磁気抵抗素子を用いることも考えられるが、眼鏡枠位置での磁石磁界は 2 Oe (160 A/m) 程度以下であるので、これらの素子では安定な検出は困難である。

4. センサの出力特性

磁石の変位による磁界センサヘッドへの印加磁界の変化特性を磁気双極子による磁界変化で近似し、磁石変位に対するセンサの出力特性の解析を行ったので次に示す。

実験に用いた磁石は直径 3 mm, 厚さ 1 mm であり、磁石は放射状磁心に対し微小であると考え、磁気双極子として近似する。またワイヤの直径も長さに対して非常

Fig. 5 Theoretical result of $\bar{H}$ vs. x characteristics.

Fig. 6 MI characteristics of a tension-annealed wire.

に細いので、ワイヤの太さも無視する。磁界の計算において Fig. 4 の様に磁気双極子の磁気モーメントを M 、放射状磁心の内径を a 、MI 素子の折り返し長を b 、磁石の放射状磁心面からの距離を x とする。なお、MI 素子は磁石の変位する軸に対して対角線状に向かい合っていて、各素子に印加される磁界の総和を検出していると考えられるので、ここでは、1 本の素子についてのみ計算する。

MI 素子の長さ方向に加わる磁界は次式となる。

$$H = H_r \sin \theta - H_\theta \cos \theta \quad (1.1)$$

$$H_r = \frac{2M \cos \theta}{4\pi\mu_0 r^3} \quad (1.2)$$

$$H_\theta = -\frac{M \sin \theta}{4\pi\mu_0 r^3} \quad (1.3)$$

H のワイヤ長にわたる平均値 $\bar{H}$ は次式となる。

$$\bar{H} = \frac{1}{\theta_2 - \theta_1} \int_{\theta_1}^{\theta_2} H d\theta \quad (2.1)$$

$$= \frac{3M}{20\pi\mu_0 x^3} \frac{\cos^5 \theta_1 - \cos^5 \theta_2}{\theta_2 - \theta_1} \quad (2.2)$$

$$\left[\text{ただし } \theta_1 = \tan^{-1} \frac{a}{x}, \theta_2 = \tan^{-1} \frac{a+b}{x} \right]$$

MI 素子では、コイルを施さなくても、MI 素子全体の磁束変化およびインダクタンスは $\bar{H}$ による磁化によって決定される。すなわち、MI 素子の BH 特性の磁界は $\bar{H}$ である。(2.2) 式において、 $a=7.5$ mm、 $b=7$ mm とし、 x を 0 mm から 20 mm まで変化させたときの $\bar{H}$ の値を数値計算した結果を Fig. 5 に示す。この計算結果から、

Fig. 7 Magnet-displacement detection E_{out} vs. x characteristics.

Fig. 8 Magnet-displacement detection characteristics: (a) E_{out} vs. y ; (b) E_{out} vs. z .

MI 素子の外部磁界と出力電圧との関係がすべての範囲にわたり線形性を示す場合は Fig. 5 に示す特性がそのままセンサの x 対出力電圧の関係になるが、実際には、MI 素子では外部磁界対出力電圧特性 (MI 特性) は Fig. 6 に示すように、線形性を示さない。また、磁界が 0 の軸に対して対称な特性を示す。したがって磁石の極性に関わらずセンサの x 対出力電圧特性は Fig. 7 の破線となる。これより、磁石を眼鏡に貼る際に、極性を確認する必要がない。用いた MI 素子は FeCoSiB の線引き後張力下アニールを施した $50 \mu\text{m}$ 径のワイヤで、通電電流は 30 mA_{p-p} 、周波数は 50 kHz である。実際の測定においては、磁界センサ部 (眼鏡のフレーム) と磁石 (眼鏡) との距離は 10 mm 程度と考えられるので、 $x=10 \text{ mm}$ 付近において線形性が必要であるが、Fig. 7 の破線で示すように 10 mm の前後 2 mm で良好な線形性を示している。したがって、この素子を用いて、 a, b を前記の値にすれば、眼鏡振動検出用に適した特性のセンサが構成できると考えられる。そこで、実際に $a=7.5 \text{ mm}$ 、 $b=7 \text{ mm}$ としてセンサを構成し、磁石を直線変位型マイクロモータで移動させて出力電圧を測定した結果が Fig. 7 の実線である。磁気双極子モーメントの仮定が成立しにくい $x < 4 \text{ mm}$ では理論値が高くなるが、それ以外の範囲ではほぼ一致して $x=10 \text{ mm}$ 付近 $\pm 2 \text{ mm}$ では良好な線形性が得られている。この範囲における感度は、およそ $2.64 \mu\text{V}/\text{mV}$ である。次に磁石の他の方向への変

Fig. 9 Measured movements of both eyelids for a horizontally oscillating target: (a) 0.6-Hz sinusoidal form; (b) 0.6-Hz rectangular form.

位に対する出力の変化を示す。眼鏡にセンサ部を設置した場合の上方向を z 軸、横方向を y 軸とする。ここでは、磁石の磁極面を常に磁心面に対し平行を保ちながら、磁石が磁心面に対し平行に移動した場合 (y 方向および z 方向への変位) のセンサ出力の変化を測定した。Fig. 8(a) は磁石を y 方向へ移動させた場合の、Fig. 8(b) は z 方向へ移動させた場合の出力変化を示す。磁石がセンサの中心部からいずれも、3 mm 程変位しても、出力にほとんど変化が見られないことがわかる。したがって、眼に貼った磁石の磁心面に平行な位置が数 mm 程度ずれても、実際の測定条件において、センサは x 軸方向にのみ指向性をもち、 y 、 z 軸方向のずれはほとんど影響しないといえる。なお、生体の信号時系列の計測では波形パターンが重視されるので、センサには広動作域が必要である。本センサは、眼瞼振動変位が数百 μm 以下であるのに対して線形的動作域が 10 mm 程度であるので、動作点の変動に対して波形パターンが変化する恐れはない。また応答速度は 1 kHz 程度であるので速応性は十分である。

5. 眼瞼振動の検出例

Fig. 7 の検出特性をもつセンサを用い実際に眼瞼振動の測定を行った。健康男子 24 歳の被験者に対して、両眼瞼の顔正中線寄りに微小磁石を貼り 80 cm 前方で水平方向に 20 cm 振幅 0.6 Hz の正弦波および矩形波で駆動した赤色 LED 視標を追視させたときの実験結果を示す。Fig. 9(a) は視標を正弦波で振動させた場合、Fig. 9(b) は矩形波の場合の両眼瞼の振動時系列である。Fig. 9(a) では、眼球が視標の動きにつれてほぼ正弦波状に連続かつ滑らかに運動しているようすが観察される。Fig. 9(b) では、眼球が矩形波を追いかけて跳躍的に運動した結果、両眼瞼とも跳躍的に変位していることがみられ

る。これらの検出パターンは、従来のマルチバイブレータ型磁石変位センサによる検出結果と同様であり⁶⁾、MI 素子による本センサによって、視野が広い状態で磁石の極性によらず眼瞼振動を検出できることが示されたといえる。両図で左右の波形パターンが逆位相になっており、両眼球の焦点調節時の輻輳運動を反映しているように考えられるが、磁石の位置によって同相波形が計測される場合もあり、現時点では断言できない。

6. まとめ

磁気インダクタンス素子を利用することにより、コイルレスの磁界センサヘッドを構成することが可能となり、広視野で、しかも眼に貼る磁石の極性に関係なく検出できる、両眼瞼振動センサシステムが構成できた。今後はさらに微小な MI 素子による小型のセンサヘッドを構成する予定である。

文 献

- 1) 宮尾 克: 職業性眼障害の推移, 眼科 MOOK, No. 39, pp. 1~9 (1989).
- 2) 田崎京二, 大山 正, 樋渡清二 (編): 視覚情報処理, p. 369, 朝倉書店 (1982).
- 3) 塚原 勇, 三島清一, 植村恭夫 (監修): 図説臨床眼科講座 5 神経眼科, p. 94, メジカルビュー社 (1981).
- 4) 湖崎 克, 栗屋 忍: 図解 眼科検査法, p. 156, 金原出版 (1981).
- 5) K. Mohri, T. Jinnouchi and K. Kawano: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-23**, pp. 2212~2214 (1987).
- 6) K. Mohri, S. Yoshino, M. Masuda, S. Uchiyama and Y. Miyake: *SICE '89, ES 10-1*, pp. 1029~1032 (1989).
- 7) K. Mohri *et al.*: *Intermag '92, JC-04*, St. Louis (April 1992).
- 8) 川島, 他: 電気学会マグネティックス研究会資料, **MAG-92-129**, 65 (1992).

1992 年 11 月 19 日受理, 1993 年 2 月 2 日採録