正弦波出力の磁気エンコーダの検討

正 員 宮 下 邦 夫 (日 立)

正 員 高 橋 正 (日 立)

正 員 川 又 昭 一 (日 立)

1. ま え が き

近年、情報機器および工場自動化機器の発展に伴って、これらに使用される小形モータの性能としては、高精度で高応答な位置制御性能あるいは速度制御性能が要求されてきている。このため、直流モータなどの専用モータに位置および速度を検出するセンサ⁽¹⁾を搭載し、この信号を基にフィードバック制御を行うサーボモータが盛んに使用されている⁽²⁾⁽³⁾。このサーボモータの回転センサとしては、構成が簡単なロータリエンコーダがマイクロコンピュータを使ったデジタル制御に適応するため広く使われている。

エンコーダには光式と磁気式がある。後者のほうが、構成が簡単でかつ耐水、耐油性などの耐環境性の点で有利なために急速に伸びてきている。この磁気エンコーダの出力は、一般に方形波状のパルス出力である⁽⁴⁾⁽⁵⁾。従って、分解能向上にはパルス出力数の増加が必要である。しかしながら、パルス数の増加には記録磁極数の増加が必要であるが、それに伴い製作精度の向上が必要となり、実用的でない。そのため、より高分解能化して広い分野で使うエンコーダとして、正弦波状の出力を生成し、それを基に回路処理により分解能向上を図る方法が提案されている⁽⁶⁾。

ところが、磁気エンコーダの磁気センサは磁気飽和などの影響を受けるため、その波形は高調波成分を含んだひずみ波形となる。一般の磁気エンコーダはこのひずみ波形を IC 回路により、波形整形して方形波状のパルス出力を得ている⁽⁴⁾。初めに、正弦波出力を得るために磁気センサの出力波形の高調波成分につき解析し、その成分が三端子電圧で奇数調波成分のみであ

ることを明らかにする。奇数調波の最大の成分が第三調波成分であることに着目し、その成分を除去できる方法を提案する。この方法は、磁気センサを構成する複数の磁気抵抗効果素子の位相関係を第三調波を除去できるように配置し、それらをブリッジ接続することにより成立する。

この方法に基づく磁気エンコーダを試作し、第三調波を著しく低減できることを確認し、正弦波出力の磁気エンコーダを実用的なレベルで製作できる見とおしを得た。

2. 磁気エンコーダの構成と出力波形

本章では、磁気エンコーダの構成と磁気センサの出力波形を表す基本式を導出する。

〈2.1〉 磁気エンコーダの構成 磁気エンコーダは図1に示すように、磁気ドラムと磁気センサの二つの主要素により構成できる。磁気ドラムと磁気センサは、スペーシング l だけ離れて対向している。磁気ドラムはアルミニウムなどの非磁性ドラムに磁性塗料を塗布し、記録ビット λ の多数の磁極が着磁されている。磁気センサは、ガラスなどの非磁性基板上に複数の磁気抵抗効果素子 (Magnetoresistive Effect Element, 以下 MR 素子と呼ぶ) が蒸着されている。MR 素子はパーマロイなどの薄膜で作られる。磁気ド

図 1 磁気エンコーダの構成

Fig. 1. Construction of magnetic encoder.

Magnetic Rotary Encoder with Sinusoidal Output. By Kunio Miyashita, Member, Tadashi Takahashi, Member & Shoichi Kawamata, Member (Hitachi Res. Lab., Hitachi Ltd.).

宮下邦夫: 正員, (株)日立製作所日立研究所

高橋 正: 正員, (株)日立製作所日立研究所

川又昭一: 正員, (株)日立製作所日立研究所

図 2 印加磁界と抵抗変化の関係

Fig. 2. Magnetic field and variation of resistance.

ラムが回転すると、MR 素子に印加する磁界が変化し、MR 素子の抵抗が変化するので、この変化を計数することにより回転角を検出できる。MR 素子への印加磁界の大きさは磁性塗料の磁気特性、記録ピッチ λ およびスペーシング l などに依存する。特に、同一仕様のエンコーダで製作・組立上の重要な因子はスペーシングである。

印加磁界と抵抗変化の関係を図 2 に示す。MR 素子の抵抗は正負の磁界に対して対称な値をもち、磁界がある値 H_s 以上になると一定値 R_0 となる。印加磁界が零のときの抵抗値を R_0 とすると、抵抗変化率 α は次式で表される。

$$\alpha = \frac{R_0 - R_s}{R_0} = \frac{\Delta R}{R_0} \quad (1)$$

(2.2) 出力波形 いま、印加磁界を記録ピッチごとの繰返し波形とし、回転角 $\theta_m = 0$ に対して対称であるとする、磁界は次式で表される。

$$H(\theta_m) = \sum_{n=1}^{\infty} H_n \sin n\theta_m \quad (2)$$

この印加磁界により、MR 素子の抵抗が変化するとき、図 2 に示すように磁界変化の 2 倍の変化をもち、かつ電気角 $\theta = 0$ の面に対称となることから、抵抗は次式で表される。

$$R(\theta) = R_0 \left(b_0 + \sum_{n=1}^i b_n \cos n\theta \right) \quad (3)$$

磁界が大きくなると抵抗の飽和が著しくなり、抵抗変化の高調波成分として偶数調波が大きくなることが推定できる。この偶数調波は、MR 素子を三端子回路に接続することにより除去できる。図 3 に通常の磁気エンコーダの MR 素子の配置および結線図を示す。MR 素子 R_1 および R_2 でブリッジの左側の三端子回路を

図 3 通常の磁気エンコーダの配置と結線

Fig. 3. Arrangement and connection of conventional magnetic encoder.

形成し、 R_3 および R_4 で右側の三端子回路を形成している。 R_1 および R_2 は配置図の位置関係より以下の式で表される。

$$R_1 = R(\theta) = R_0 \left(b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n\theta \right) \quad (4)$$

$$R_2 = R(\theta + \pi) = R_0 \left(b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n(\theta + \pi) \right) \quad (5)$$

従って、左側の三端子電圧 e_1 は次式で表せる。

$$e_1(\theta) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E = \frac{b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n(\theta + \pi)}{2b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \{ \cos n\theta + \cos n(\theta + \pi) \}} E \quad (6)$$

ここで、 E はブリッジ回路に印加される電源電圧である。(6) 式を偶数項 $2n$ と奇数項 $2n-1$ に分けて整理すると次式となる。

$$e_1(\theta) = \left\{ \frac{1}{2} - \frac{\sum_{n=1}^{\infty} b_{2n-1} \cos(2n-1)\theta}{2 \times \left(b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} b_{2n} \cos 2n\theta \right)} \right\} E = \left\{ \frac{1}{2} - \varepsilon_1(\theta) \right\} E \quad (7)$$

ここで、 $\varepsilon_1(\theta) = -\varepsilon_1(\theta + \pi)$ の関係があることから、 $\varepsilon_1(\theta)$ は奇数調波成分だけで表現できるので、(7) 式は次式のように表せる。

$$e_1(\theta) = \left\{ \frac{1}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n-1} \cos(2n-1)\theta \right\} E \quad (8)$$

右側の三端子電圧 e_2 も同様に次式で求める。

$$e_2(\theta) = e_1(\theta + \pi) = \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n-1} \cos(2n-1)\theta \right\} E \quad (9)$$

従って、エンコーダの出力 e_0 は次式で表せる。

表 1 磁気エンコーダの仕様
Table 1. Specifications of magnetic encoder.

磁気 センサ	パルス数 (P/R)	1,024
	素子幅 (μm)	30
	素子長 (μm)	2,800
	素子厚み (μm)	0.04
	抵抗変化率 (%)	2.5
磁気 ドラム	材質	パーマロイ
	ドラム直径 (mm)	φ 50
	記録ピッチ (μm)	153
	磁性塗料 厚み (μm)	100
	保磁力 (AT/m)	9.5×10^4
	残留磁束密度 (T)	0.13
材質		磁性粉+樹脂
電源電圧 (V)		5

図 4 スペースと出力電圧

Fig. 4. Spacing and output voltage.

$$e_0 = e_1 - e_2 = - \left\{ 2 \times \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n-1} \cos(2n-1)\theta \right\} E$$

.....(10)

すなわち、三端子電圧の変化分電圧の2倍で、奇数調波成分のみが存在する。

次に、表1に示す磁気エンコーダの出力電圧を測定し、その波形分析をした。図4にスペースに対する出力電圧、図5に波形写真を示す。図4には磁気センサの原波形の波高値と、周波数分析した第三次高調波、第五次高調波の波高値およびひずみ率を示す。図4より、センサ出力として通常使われている原波形はスペース 120 μm 付近で最大の値を示すが、基本波はスペース 150 μm 付近で最大値をもつ。これはスペースの小さい領域で高調波の割合が大きいことによる。

また、スペースが 120 μm 以下で原波形が減少する原因は、次のように考えられる。スペースが小になるに従い磁界が増大し、かつその波形も台形状

図 5 出力電圧波形

Fig. 5. Waveforms of output voltage.

図 6 正弦波出力の磁気エンコーダの配置と結線

Fig. 6. Arrangement and connection of sinusoidal magnetic encoder.

に近くなる。ここで、MR 素子を幅方向に複数の微小な部分に分割して考えると、大多数の部分が大きな磁界を常に受けているため、等価的に抵抗の変化が小さくなるためである。

3. 正弦波出力の磁気エンコーダの原理

正弦波出力の磁気エンコーダは、磁気センサの出力電圧に含まれる高調波成分を取除くことにより得られる。図4より明らかなように、高調波成分として大きいのは第三次高調波と第五次高調波であり、基本波成分が最大となるスペース 150 μm 近辺では、特に第三次高調波成分が大きい。この点に着目し、第三次高調波成分を取除くことができる新方法を提案する。

図6に、この方法による4個のMR素子の配置と

図 7 試作エンコーダの配置と結線

Fig. 7. Arrangement and connection of trial magnetic encoder.

結線を示す。MR 素子をブリッジ回路に構成するとき、左右の三端子回路の電圧の位相差が $4/3\pi$ になるように配置する。このときの三端子回路電圧 e_1 は (8) 式で表せ、もう一つの三端子回路電圧 e_2 は次式で表すことができる。

$$e_2 = e_1 \left(\theta + \frac{4}{3}\pi \right) = \left\{ \frac{1}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n-1} \cos(2n-1) \left(\theta + \frac{4}{3}\pi \right) \right\} \dots\dots\dots (11)$$

従って、エンコーダの出力は次式で示される。

$$e_0 = - \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n-1} \left\{ \cos(2n-1)\theta - \cos(2n-1) \left(\theta + \frac{4}{3}\pi \right) \right\} \dots\dots\dots (12)$$

上式で、基本波 $n=1$ に対する出力 e_{01} は次式で示される。

$$e_{01} = -1.73 C_1 \cos \left(\theta + \frac{\pi}{6} \right) \dots\dots\dots (13)$$

これは、(10) 式と比較すると、その大きさが 86% になる。第三次高調波の電圧 e_{03} は (12) 式で $n=2$ の項で零となる。すなわち、高調波成分で一番大きな第三次高調波成分が除去でき、かつ基本波成分については従来比 86% が期待できる。

図 7 にこの方法に基づき試作したエンコーダの配置およびその結線を示す。MR 素子 $R_{11} \sim R_{14}$ で A 相のブリッジ出力 E_A を作る。ほかの素子 $R_{21} \sim R_{24}$ で A 相と 90 度位相の異なる B 相出力 E_B を生成する。図 8 に試作した磁気センサの外観写真を示す。磁気エンコーダの仕様は表 1 と同じである。図 7 からわかるように、正端子側の素子 $R_{11}, R_{21}, R_{12}, R_{22}$ を左側に、負端子側の素子 $R_{14}, R_{13}, R_{24}, R_{23}$ を右側に集めて結線が簡単になるようにしてある。

4. 実験結果および検討

試作した磁気エンコーダの原波形の波高値と、周波数分析した第三次高調波、第五次高調波の波高値およ

図 8 磁気センサの外観写真

Fig. 8. Photograph of magnetic sensor.

図 9 スペーシングと出力電圧

Fig. 9. Spacing and output voltage.

びひずみ率を図 9 に示す。また、その出力波形の波形写真を図 10 に示す。これらの図より、第三次高調波成分が大幅に低減できたことがわかる。これにより、正弦波出力の磁気エンコーダを得る見とおしを得た。

例えば、正弦波出力のエンコーダの使用条件を、(i) 出力電圧の波高値の変化が $\pm 3\%$ 以下、(ii) 波形ひずみ率が 3% 以下と仮に決めると、図 9 の原波形の特性からスペーシングが $130 \sim 160 \mu\text{m}$ の範囲で使用できることになる。これは、スペーシングの中心値を $145 \mu\text{m}$ として $\pm 15 \mu\text{m}$ の裕度があり、製作上十分に許容なレベルと言える。これに対し、従来のセンサは上記 (i)、(ii) 項の条件を満足するためには、図 4

図 10 出力電圧波形

Fig. 10. Waveforms of output voltage.

からスペーシングを160~164 μm の極めて狭い領域に設定しなければならず、実用的ではない。なお、本論文では使用条件を(i), (ii)項のように設定したが、実際には使用される機器の精度によって決定すべきものである。また、スペーシングのみを変動要因として扱ったが、このほかに温度変化が重要要因としてある。これは、磁気センサの出力を増幅する IC 回路により補償する技術なので、本稿では触れない。

5. ま と め

正弦波出力の磁気エンコーダを検討した。初めに、

磁気エンコーダの磁気センサの出力波形の高調波成分につき解析し、その成分が三端子回路の電圧で奇数調波成分のみであることを明らかにした。次いで、奇数調波の最大の成分である第三次高調波成分を除去できる方法を提案した。この方法は、ブリッジを構成する4個の MR 素子を、左右の三端子回路の位相差が $4/3\pi$ になるように配置することである。

この方法に基づき、1,024 パルス/回転の磁気エンコーダを試作した。その結果、所期の目標どおり第三次高調波成分を著しく低減できることを確認した。正弦波出力のエンコーダとしての使用条件を、(i)出力電圧の変化が $\pm 3\%$ 以下、(ii)波形ひずみ率が 3% 以下と設定したとき、試作エンコーダはスペーシングが $145 \pm 15 \mu\text{m}$ の範囲で上記条件を満足できる。これは製作の面から考えて、十分に実用的なレベルと言える。

最後に本研究の推進にあたり、日立金属 鈴木技師長に磁気センサの製作に協力をいただいた。また当社 多賀工場 山中部長に製品化技術につき御指導いただいた。ここに厚くお礼申し上げます。

(昭和 61 年 10 月 31 日受付)

文 献

- (1) 宮下, 他: 「小形電動機用センサ技術」, 電学誌, 105, 311 (昭 61-4)
- (2) 宮下, 他: 「エンコーダ付小形モータのデジタルサーボ」, システムと制御, 26, 695 (昭 58-11)
- (3) 菅井, 他: 「ロボット用 AC サーボモータ」, 日立評論, 66, 31 (昭 59-10)
- (4) T. Takahashi: "Two Function Magnetic Sensor System", Proc. of 3rd Sensor Symposium, p. 37 (1983)
- (5) S. Kawamata: "Magnetic Rotary Encoder with High Resolution", Proc. of 4th Sensor Symposium, 277 (1984)
- (6) 杉浦, 他: 「高分解能デジタル速度検出法」, 電気学会産業電力応用研究, IA-85-11 (昭 60)