回転形磁気スケールの補正転写記録法（続報）*

—記録電流の制御による再生出力振幅の一定化—

益 田 正** 梶 谷 誠**

Error Correction Recording Method for Rotary Magnetic Scales
—Regularization of Reproduced Amplitude
by the Recording Current Control—

Tadashi MASUDA and Makoto KAJITANI

This paper describes the recording method for rotary magnetic scales to regularize the reproduced amplitude. It is the method to control the recording current in proportion to the characteristic of electro-magnetic-conversion on the recording surface. The scale with the regular amplitude has been recorded by the method. By the method, combined this method to the error correction recording method described in the first paper, the scale has been transcripted of which the angle position error is an accuracy of about $0.3''$ and the regulation of the reproduced amplitude is about 4%. It is confirmed that the angle position error of the scale is independent on the fluctuation of the trigger level and the gain in the detector.

Key words: magnetic scale, rotary encoder, recording method, angular measurement

1. 結 言

メカトロニクス技術の進展とともに、角度検出器の高精度化が要求されている。筆者らは、すでに角度検出器の校正を精密に自動的に行うシステムを開発した¹⁾。さらに前報²⁾では、回転形磁気スケールの高精度化を目的として、新しい補正転写記録法について述べた。その方法は上述の自動校正システムによる校正値を用いて記録パルスの位置を制御するもので、角位置誤差 $0.5''$ 程度の高精度回転形磁気スケールを記録することができた。この記録法を位置補正記録法と呼ぶことにする。

ところで、磁気スケールは、再生ヘッドの出力（以後、再生波形と呼ぶ）を検出回路で処理して、角位置信号パルスを得ている。再生波形は、一定波長の正弦波であることが理想で、はずんでいたり、振幅や直流レベルの変動があると、検出回路の方式（内挿方式）に応じて、角位置信号パルスに誤差が生じる³⁾。言うまでもなく、再生波形はスケールに記録されている磁化パターンに依存するので、磁化パターンも正確な正弦波に記録されることが望まれる。さて最も基本的な

内挿方式である零点基準法⁴⁾、すなわち、再生波形の零点を検出してパルスを作る方式では、検出回路のゲインや零点抽出トリガレベルの変動によって誤差が発生する。本論文は、このような誤差の発生を防ぐために、正確な正弦波を記録する方法について述べたものである。

磁気スケールの記録は、一定ピッチ間隔で正負の一定電流パルスを交互に記録ヘッドに流すパルス形記録（以後標準記録という）³⁾が基本である。パルス形記録法では、記録波長と記録パルス電流の大きさとの関係が記録波形に大きな影響を及ぼし、正確な正弦波磁化パターンを記録するための最適記録条件が存在し、記録電流値も最適範囲の中で選ばねばならない⁵⁾。しかし、記録電流値が一定の場合、記録ヘッドと磁性面との空隙変動や磁性体の厚みむらなどを含めた磁気特性むらがあると、記録された残留磁化パターンが一樣でなくなり、前述したような誤差発生の要因となる。また、このような場合の再生波形を、波形のひずみ、振幅の変動及び直流レベルの変動に分けて観測すると、振幅の変動が最も顕著に現れる。そこで本論文では、標準記録による再生波形の振幅変動を検出し、それに応じて記録電流値を制御する再記録によって、再生出力振幅を一定にする方法（以降振幅補正記録法という）を提案する。さらにこの方法を前報で述べた位置補正記録法に付加することによって、再生出力振

* 原稿受付 昭和62年2月12日。昭和60年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和60年10月14日）にて発表

** 正 会 員 電気通信大学電気通信学部（調布市調布ヶ丘1-5-1）

Fig. 1 Principle of the amplitude correction recording

幅が一定でかつ角位置誤差の小さい高精度なスケールを記録できることを示す。また、このスケールが検出回路のゲインやトリガレベルの変化に対しても高精度を維持できることを述べる。

2. 振幅補正記録法

2.1 補正原理

本方法の基本原理を図1に示す。

図1(a)のように、正負の一定電流値 I_0 のパルスで一定間隔 $\lambda/2$ (λ は1波長) で交互に与える通常のパルス型記録を行うと、記録面の磁気特性が均一であれば、スケールの磁性体上には、一定振幅、一定波長の残留磁化分布が記録される。したがって、再生ヘッドからは図1(b)の点線のような一定振幅 V_0 の再生出力波形が得られる。しかしながら、実際には記録面に磁気特性むらなどがあるため、再生出力振幅が記録位置によって異なり、図1(b)の実線のような再生出力波形が得られる。ところで、記録パルスの電流値 I とその再生出力波形の振幅 V とは図2に示すような関係があり、最適記録電流値 I_0 近傍では電流値 I に対して再生出力振幅 V は単調増加となっている。したがって、記録電流値を増減することによって再生出力振幅を増減することが可能である。そこで、記録面の電磁変換特性に合わせて適切な電流値を選んで記録すれば(図1(c))、振幅 V_0 一定の再生出力波形(図1(b)の点線)が得られることが期待される。これが、本方法の基本原理である。

2.2 記録の手順

本方法による記録は次のような手順で行う。

- (1) スレーブスケールの電磁変換特性(記録電流値と再生出力振幅の関係)を測定する。

Fig. 2 Illustration of the relation between current I of the recording pulses and amplitude V of the reproduced waveform at the recording position θ_i

- (2) (1)の結果から最適記録電流値の範囲で目標に近い再生出力振幅が得られる電流値を選んで、マスタスケールを基準にスレーブスケールに標準記録を行う。
- (3) スレーブスケールの再生出力振幅を測定する。
- (4) 2.3項で述べる方法で補正電流値を算出する。
- (5) いったんスレーブスケールを消磁する。
- (6) (4)で求めた補正電流値に従って電流パルスを制御しつつスレーブスケールに再記録を行う。
- (7) 最後に再生出力振幅を測定して、再生出力振幅が目的の範囲にあれば終了する。

2.3 補正電流値の求め方

スレーブスケールの記録位置 θ_i における記録電流 I と再生出力振幅 $V_i(I)$ との関係を実測すると、図2の実線のような関係となる。そこで、目標の再生出力振幅近辺での電磁変換特性を式(1)のように直線近似する。

$$V_i(I) = A_i \cdot I + B_i \quad (1)$$

$$(i=0, 1, 2, \dots, N-1)$$

A_i, B_i : 直線の傾きおよび切片

N : スレーブスケールの1回転当たりのパルス数
ここで、 A_i, B_i は記録位置 θ_i における電磁変換特性を表すパラメータであり、記録位置 θ_0 のパラメータ A_0, B_0 を基準として式(2)のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} A_i &= A_0 + \Delta A_i \\ B_i &= B_0 + \Delta B_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$\Delta A_i, \Delta B_i$ は記録位置 θ_0 を基準とした θ_i での電磁変換特性のパラメータの違いを表す。

一定電流値 I_0 の標準記録で得られる記録位置 θ_i の再生出力振幅 $V_i(I_0)$ は次式のように表せる。

$$V_i(I_0) = (A_0 + \Delta A_i) \cdot I_0 + B_0 + \Delta B_i \quad (3)$$

再生出力振幅を目標の V_0 とするための θ_i の位置での記録電流を I_i^c とすると、次式の関係がある。

Fig. 3 Block diagram of the recording system

$$V_0 = (A_0 + \Delta A_i) \cdot I_i^c + B_0 + \Delta B_i \quad (4)$$

式(3), (4) から ΔA_i を消去して I_i^c を求めると次式となる。

$$I_i^c = I_0 \cdot \frac{V_0 - B_0 - \Delta B_i}{V_i(I_0) - B_0 - \Delta B_i} \quad (5)$$

ここで図2の特性から $|\Delta B_i / (V_0 - B_0)| \ll 1$ と見なせば, 式(5)は次式のように近似できる。

$$I_i^c = I_0 \cdot \frac{V_0 - B_0}{V_i(I_0) - B_0} \quad (6)$$

このことから, 2.1項の手順(1)により θ_0 の位置における電磁変換特性を実測して求めた B_0 と手順(3)の記録電流 I_0 の標準記録から得られる再生出力振幅 $V_i(I_0)$ を式(6)に代入すると目標の再生出力振幅 V_0 を得るための補正電流値 I_i^c が求められる。

3. 実験システムの概要

本実験システムは, 前報で述べたシステムに A/D 変換器とソフトウェアによる再生出力波形の測定機能を付加するとともに, 前報の位置補正記録用のプログラムを記録パルスごとに電流値を指定できるよう改造したものである。このシステムのブロック図を図3に示す。

図のように精密回転形静圧空気軸受上に 6480 等分の磁化パターンを記録した回転形磁気スケールが取り付けられている。このスケールは 2 トラックの記録面を有するので, 第一のトラックをマスタスケールとして, 第二のトラックをスレーブスケールとして使用した。空気軸受は直結の直流サーボモータにより 0.03~30 rpm の範囲で等速回転制御される。

精度測定の方法は, 校正されたマスタスケールとの比較測定により行う。

転写記録の方法は, 軸受を低速で回転させておき, マスタスケールの内挿パルスを基準に角位置を検出し, あらかじめ作成しておいた記録用データ(すべて

Table 1 Experimental condition

Master scale	Rotary magnetic scale
Slave scale	Diameter; 412.5 mm
	Number of pulses; 6480 P/R
	Wave length; 200"
	Interpolated pulse; 1"
	Magnetic medium; Ni-Fe
Recording condition	Recording head gap; 30 μ m
	Head-to-medium space; 6 μ m
	Velocity; 0.05 rpm
Measuring condition	Time-conversion-method
	Resolution; about 0.02"
	Velocity; 10 rpm

Fig. 4 Relation between current I of the recording pulses and amplitude V of the reproduced waveform

の記録パルスの記録位置, 電流値)に基づいて所定の角位置で記録パルスの電流値データを出力する。このデータは D/A 変換器, 電流増幅器を通して記録ヘッドに電流を流し, 自動的に全周記録を行う。

再生出力波形の測定は, 5 V, 12 ビットの A/D 変換器を通して再生波形がいったん計算機に入力され, 波形の振幅その他が算出される。

4. 実験結果

まず, 振幅補正記録についての基礎実験の結果を示し, 位置補正の外に振幅補正の機能を持つように改良した補正転写記録の効果について述べる。

この実験においては, マスタスケールを基準とする比較測定によってスレーブスケールの角位置誤差を求めている。実験条件は表1に示す。

4.1 電磁変換特性

記録面上の 5 点について記録パルスの電流値 I と再生出力振幅電圧 V との関係を測定した。その特性カーブ群の上限と下限のカーブを図4に示す。ただし, 記録ヘッドと磁性面との空隙は 6 μ m の非接触記録である。記録位置によって電磁変換特性は多少異なっ

Fig. 5 Amplitude voltage of the reproduced waveform by the standard recording
(a) Noncontact recording (head-to-medium space is $6\mu\text{m}$)
(b) Contact recording

Fig. 6 Amplitude voltage of the reproduced waveform by the amplitude correction recording

いるが、目標の再生出力振幅の電圧 $V=2\text{V}$ 付近では各特性とも直線に近似できる。各直線の傾き A 、切片 B を求めると、 $A=24.4\pm 2.2\text{ (V/A)}$ 、 $B=-2.85\pm 0.15\text{ (V)}$ であり、 $|\Delta B_i/(V_0-B_0)|$ は約 0.03 で 1 より小さく、2.3 項の式 (5) が式 (6) に近似できることがわかる。切片 B_0 の値は図 4 より -2.85 と求められる。

4.2 振幅補正記録

記録パルスの電流値 0.20 A の標準記録における再生出力振幅の例を図 5 (a) に示す。図 5 には参考のため接触記録時の再生出力振幅 (b) も 0.5 V ずらして載せてある。

再生出力振幅が非接触記録時 17%、接触記録時 10% 程度変動している。この図から非接触記録時の大きな周期のうねりは磁性面と記録ヘッドとの空隙変動が原因と考えられ、また、非接触記録時と接触記録時にある類似の細かな振幅変動は磁性面の磁気特性むらと考えられる。図 5 の非接触記録時の振幅データを式 (6) の $V_i(I_0)$ に代入し、記録位置 θ_i における補正電流値 I_i^c を求め、振幅補正記録を行った。その結果を図 6 に示す。この振幅補正記録により空隙変動や磁性面の磁気特性むらから生じていた再生出力振幅の変動が

4% 程度に押さえられ、ほぼ一定の再生出力振幅のスケールが得られた。

4.3 振幅補正を伴う補正転写記録

前報で述べた位置補正記録法に振幅補正の機能を持たせ、一定再生出力振幅で高精度なスケールを記録する方法について述べる。基本となる、位置補正記録と振幅補正記録について、次のことが実験的に確かめられた。

(ア) 振幅補正記録を行うと角位置誤差が変化する。

(イ) 位置補正記録を行っても再生振幅の変化は特に見られない。

この原因は、前者は補正電流値が標準電流値の $\pm 10\%$ 程度と比較的大きく変化させるのに対して、後者は標準の記録パルス間隔 $100''$ に対して $\pm 1''$ 以内と極めて補正量が小さいためである。したがって、上述の二つの補正記録を組み合わせる場合、互いの補正効果が干渉して悪影響を及ぼさないためには、次の手順によればよいことがわかる。

(a) 標準記録を行う。

(b) 2.2 項に述べた手順に従って補正電流値を求め、振幅補正記録を行う。

(c-1) (b) で振幅一定となったスケールの角位置誤差を測定し、記録パルスの位置補正データを求め、これと (b) で求めた補正電流値データを用いて、記録パルスの位置と電流値とを同時に制御しつつ再記録する。このとき、記録パルスの位置の制御は、マスタスケールの内挿パルス ($1''$) を用いる内挿パルス係数方式とする。

(c-2) さらに、(c-1) の記録によって振幅一定で角位置誤差 $1\sim 2''$ 程度のスケールについて再度角位置誤差を測定し、位置の補正データを求め、これと (b) の補正電流値データを用いて、位置と振幅を同時に制御する 2 回目の補正記録を行う。このときは、記録パルスの位置は、等速回転を利用した時間変換方式²⁾で $0.1''$ 単位で制御する。

なお、上記手順 (c-1)、(c-2) のように 2 段階に分けて補正記録する方法を前報では 2 ステップ補正転写記録法と呼んでいる。

上述の手順において補正記録した場合の角位置誤差の変化の過程の実験例を図 7 に示す。なお、再生出力の振幅変動は標準記録、補正記録とも図 5、図 6 とほぼ同程度である。標準記録時のスケールは再生出力振幅変動 17% 程度、角位置誤差 $2''$ 程度 (図 7 (a)) である。これに前述 (b) の振幅補正記録を行うと、振幅変動は 4% 程度に押さえられるが、角位置誤差は再生出

Fig. 7 Angle position error in the correction recording process

- (a) Standard recording
- (b) Amplitude correction recording
- (c) 2 step error correction recording
- (c-1) The first step
- (c-2) The second step

Fig. 8 Angle position error of the scale (its amplitude regulation is about 17%) recorded by only the error correction recording

- (a) The initial angle position error after the correction recording
- (b) The angle position error increased the triggerlevel of the detector by 0.3 V from the initial condition (a)

力波形の変化に伴って変化し、2.5"程度(図7(b))に増加している。この角位置誤差をもとに、前述(c-1)の1回目の補正記録を行った結果、角位置誤差は1"程度(図7(c-1))となった。さらに、(c-2)の2回目の補正記録によって角位置誤差0.3"程度(図7(c-2))となった。本実験は、他のスケールについても同様な結果が得られた。この結果、上記の方法及び手順によって再生出力振幅がほぼ一定でかつ高精度の転写記録ができることを確認した。

4.4 振幅補正記録の効果

再生出力一定の高精度スケールは検出回路のゲイン

やトリガレベルの変化に対して、高精度が維持できることを次の実験から確かめた。位置補正記録法のみ適用したスケール(再生出力振幅変動17%)は、補正直後の角位置誤差(図8(a))0.3"程度と小さいが、検出回路のトリガレベルを0.3 V だけずらしただけで図8(b)のように約2"の誤差が発生した。一方、新しい補正転写記録法によるスケール(再生出力振幅変動4%)では、図9に示すように、検出回路のトリガレベルの変化に対しても誤差はほとんど変化しない。

次に、検出回路のゲインの変化に対する角位置誤差の変化を図10に示す。位置補正記録法のみを適用したスケール(図8と同じスケール)と振幅補正記録法と位置補正記録法と同時に適用したスケール(図9と同じスケール)に対して、検出回路のゲインを1/10にした時の角位置誤差をそれぞれ図10の(a),(b)に示す。両スケールともゲインが極端に低いため雑音による誤差成分が多くなっているが、図10(a)では再生出力振幅の変動に起因する誤差が1.5"程度生じているのに対し、図10(b)は特に誤差の変化は見られない。

緒言で述べたように、一般に再生波形に波形ひずみ、振幅変動、直流レベルの変動があれば、検出回路のゲインやトリガレベルの変化に対して誤差が発生する。本論文では再生波形の振幅変動に着目し、振幅が一定となるように記録した結果、上述の誤差の影響は非常に小さくなった。もし、振幅が一定であっても再生波形の波形ひずみや直流レベルの変動が存在すれば、前述の図9、図10に示したような効果が得られないはずである。このことは、磁気スケールの場合、元来波形ひずみや直流レベルの変動が小さいこともあって、振幅を一定にする補正記録によって十分効果が得られることを示している。

5. 結 言

磁性面の電磁変換特性に応じて記録電流値を制御する振幅補正記録法を提案した。この方法を前報で述べた位置補正記録法に付加することによって再生出力振幅が一定でかつ角位置誤差の小さいスケールを記録できた。そして次の結果を得た。

- (1) 標準記録時には17%程度の再生出力振幅の変動があるスケールに振幅補正記録法を適用した結果、4%程度の変動に押さえられた。

Fig. 9 Angle position error of the scale (its amplitude regulation is about 4%) recorded by both the amplitude correction recording and the error correction recording

- (a) The initial angle position error after the correction recording
(b) The angle position error increased the trigger level of the detector by 0.3 V from the initial condition (a)

Fig. 10 Variation of the angle position error Fig. 8 (a) and Fig. 9 (a) by going detector gain down in 1/10

- (a) The scale recorded by the error correction recording
(b) The scale recorded by both the amplitude correction recording and the error correction recording

(2) 振幅補正機能を付加した補正転写記録法によって振幅変動 4%, 角位置誤差 0.3" 程度のスケールが記録できた。

(3) 検出回路のトリガレベルやゲインが変化しても、このスケールの角位置誤差はほとんど変化せず、振幅補正記録の有効性を確認した。

謝 辞

本研究は昭和 59 年度文部省科学研究費補助金（奨励研究）の交付を受けて進められたことを付記するとともに、実験に協力してくれた電気通信大学学生水島冬樹、河本聡紀の両君に深く謝意を表します。

文 献

- 1) 益田 正, 梶谷 誠: 角度検出器の自動校正システムの開発, 精密工学会誌, **52**, 10 (1986) 1732.
- 2) 益田 正, 梶谷 誠: 回転形磁気スケールの補正転写記録法, 精密工学会誌, **53**, 9 (1987) 1389.
- 3) 梶谷 誠: 磁気スケール, 高精度, **7**, 2 (1977) 5.
- 4) 梶谷 誠: デジタル式角度トランスデューサーの進歩, 精密機械, **44**, 5 (1978) 550.
- 5) 梶谷 誠: 磁気スケールに関する基礎的研究 (第 4 報), 昭和 46 年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1971) 185.

情 報

NC 化率 11.3 %

わが国の工作機械の NC 化率は 11.3% に達し、新規分では約 1/3 が NC 機になっていることが分かった。これは通産省が、このほど発表した 62 年工作機械設備統計調査速報の結果で、前回調査の 56 年と比較すると、① NC 化率は 3 倍強、② FMS の設置台数が 254 台、③ 電気機械を中心に自動組立装置、産業用ロボットの導入が増えた、④ クリーンルームなど極限環境装置の設置が停滞したなどとなっている。

この調査は 4~6 年に一度、従業員 50 人以上の機械器具製造業の事業所を対象に行われており、今回は 62 年 9 月時点である。

回答は約 8000 事業所で、項目で注目されるのは FMS, クリーンルーム, 真空装置などハイテクノロジー関係の設備状況が対象になっている点である。

内容では、全体にレーザ加工機、自動組立装置、産業用ロボットなどの新しい機械・装置が増えている半面、溶接機などで古いものが増えている。

また、景気の低迷を反映し、機械設備の更新に遅れがみられる。

特徴としては、金属工作機械の NC 化が進み、台数ベースで前回調査に比べ 3 倍強の 11.3%、設置後 3 年以内のものは 33.2% となった。

また、プレス機などの第二次金属加工機は今回 2.2% で、前回の 0.8% と比べ大幅な伸びである。

FMS では全体で 254 台、このうち 60 年以後のものが 119 台と急激に増えていることが裏付けられた。また、設備内容では切削加工システムが 186 台、自動組立装置は 4 万 7 966 台、産業用ロボットは 4 万 5 994 台である。1 事業所当たりの保有台数は 7.0 台、6.5 台で、前回に比べそれぞれ 2.5 倍、3.8 倍になっている。

極限環境装置はクリーンルームが 5 120 室、このうち 3 年以内のものが 36.5%、クリーンベンチが 2 万 1 600 台で同 26.3%、真空装置が 2 万 7 512 台で同 27.8% と、いずれも伸び悩み気味である。 (服部 敏夫)