3 600 万パルスアブソリュートエンコーダ*

大野 康** 松本 豪*** 今井基勝† 山崎雄二†

36 000 000 Pulses Absolute Encoder

Kou Oono, Tsuyoshi MATSUMOTO, Motokatsu Imai and Yuuji YAMAZAKI

This paper describes the method of detecting the absolute position by four track : the 5 625 pulses absolute track, it's the inverse track, the 5 625 pulses incremental track and 45 000 pulses incremental track, and of doing 2 bit error detection and 1 bit error correction of the 5 625 pulses absolute positions. The 5 625 pulses absolute tracks are made by the selected part of the 8 191 length M-sequences. The 11 200, 22 500 pulses signals for detecting the 45 000 absolute position, are made by interporating of the 5 625 pulses incremental signal. The 45 000 pulses absolute positions are gotten by adjusting the phase relation between the interporated signals and the 45 000 pulses incremental signal. The 36 000 000 pulses absolute positions are gotten by interporating the 45 000 pulses incremental signal. The 2 bit error detections and 1 bit error correction are done by the linear reflexive relations of a M-sequences and look-up table of the ROM (Read Only Memory).

Key words : absolute encoder, M-sequences, incremental signal, interpolation, error detection, error correction

1. は じ め に

シングルトラックアブソリュートエンコーダはM系列パターンやその他の周期系列パターンを円周方向に並んだ複数の検出素子で絶対位置を得るエンコーダである。グレイコードのアブソリュートエンコーダに比較してトラック数が少なく、径方向に小型化が可能である。しかし、1ピッチ分のパターンを1個の検出素子で検出しているので、1ピッチ10 μ m程度の高分解能になると、1個の検出素子で読み取ることは不可能である。そこで、アブソリュートパターンの最小読取単位をグレイパターンまたはバイナリーパターンで分割する方法が提案されている。しかし、この方式は精度は高いけれども分割数が倍になるごとにトラック数が1本ずつ増えていき、例えば、128パルスのシングルアブソリュートトラックパターンを8分割して1 024パルスのアブソリュートエンコーダを構成しようとする、5トラック必要となる。その結果、シングルトラックアブソリュートエンコーダの径方向の小型化の特徴が消滅してしまう。本報では従来のシング

ルトラックアブソリュートエンコーダのトラックに1本のインクリメンタルトラックを加え高分解能・高精度にする機能——中間内挿方式、信頼性を向上させるための絶対位置信号の2ビット誤り検出・1ビット誤り訂正機能を持つ3 600 万パルスのアブソリュートエンコーダの試作結果について報告する。

2. 原 理

2.1 高分解能・高精度化

今回開発した中間内挿方式の原理を128パルスを例に取って説明する。図1に従来の方式である16パルスをバイナリー分割し128パルスにしたパルス円板(a)と、中間内挿方式の128パルスのパルス円板(b)を示す。(a)は16パルスのアブソリュートトラックとインクリメンタルトラックのほかにバイナリー分割のための32パルス、64パルス、128パルスのインク

Fig. 1 Interpolated absolute pattern

* 原稿受付 平成3年8月28日

** 正 会 員 (株)ニコン (横浜市栄区長尾台町 471)

*** (株)ニコン (東京都品川区西大井 1-6-3)

† (株)ニコン (横浜市栄区長尾台町 471)

Fig. 2 The signals of binary interpolated method

Fig. 3 The signals of two step interpolated method

リメンタルトラックの計5本のトラックからなる。(b)は16パルスアブソリュートトラックとインクリメンタルトラックと128パルスのインクリメンタルトラックの計3本のトラックからなる。

16パルスのシングルトラックアブソリュートエンコーダの絶対位置は円周方向に1ピッチごとに4個並んだ検出素子から得られるパターンが異なる4ビット16パターンの二進符号により得られる。実際は、アブソリュートパターンの境界位置に生ずる不確定部分の検出を避けるために、16パルスのアブソリュートトラックに平行に16パルスのインクリメンタルトラックを配置し、1/2ピッチごとに8個並んだ検出素子のうち1ピッチごとの4個の出力をインクリメンタル信号のH/Lによって選択して絶対位置を検出する¹⁾。

図2に従来の分割方法のバイナリー分割による出力信号である16パルスのアブソリュートトラックとインクリメンタル信号、バイナリー分割のための32パルス、64パルス、128パルスのインクリメンタル信号を示す。一方、中間内挿方式は図3に示すように16パルスのアブソリュート・インクリメンタル、128パルスのインクリメンタル信号からなり、16パルスのインクリメンタル信号を電氣的に分割して作った32、64パルスのインクリメンタル信号(図示せず)によって、128パルスのインクリメンタル信号と同等な精度である128パルスアブソリュート信号を得ている。

2.2 M 系列パターンの1ビット誤り検出²⁾

一般的なM系列の誤り検出・訂正の原理を示す。 k 次のM系列を生成する原始規約多項式が

$$h(x) = a_k x^k + \dots + a_1 x + a_0 \quad (1)$$

で与えられているとする。このとき、M系列の位置 i

$-k$ から位置 i までの連続する $k+1$ 個のパターン $m_{i-k}, \dots, m_{i-1}, m_i$ (0 または 1) は常に、

$$a_k m_{i-k} + \dots + a_2 m_{i-2} + a_1 m_{i-1} + a_0 m_i = 0 \quad (2)$$

なる線形再帰関係がある。ここで、読み取ったM系列のパターンが $M_{i-k}, \dots, M_{i-1}, M_i$ であったとする。

この読み取ったパターンを式(3)に代入した結果を s とする。すなわち、

$$s = a_k M_{i-k} + \dots + a_2 M_{i-2} + a_1 M_{i-1} + a_0 M_i \quad (3)$$

s はパターンの読誤りがなければ0、1ビットの読誤りがあれば1の値を持つ。パターンを読み取る幅が d ($d > k$) の場合、読取りパターンから s を

$$\begin{aligned} s_1 &= a_k M_{i-k} + \dots + a_1 M_{i-1} + a_0 M_i \\ s_2 &= a_k M_{i-k-1} + \dots + a_1 M_i + a_0 M_{i+1} \\ &\vdots \\ s_{d-k} &= a_k M_{i-d-k+1} + \dots + a_1 M_{i+d-k-2} + a_0 M_{i+d-k-1} \end{aligned} \quad (4)$$

の $d-k$ 個作ることができる。ここで、読み取ったパターンを

$$R = (M_{i-k}, M_{i-k+1}, \dots, M_{i+d-k-1}) \quad (5)$$

で表す。また、 s の組を

$$S = (s_1, s_2, \dots, s_{d-k}) \quad (6)$$

のようにベクトルで表し、式(4)より $(d-k) \times d$ の行列

$$H = \begin{bmatrix} a_k & \dots & a_2 & a_1 & a_0 & & \\ & a_k & \dots & a_2 & a_1 & a_0 & 0 \\ & & a_k & \dots & a_2 & a_1 & a_0 \\ 0 & & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ & & & & a_k & \dots & a_2 & a_1 & a_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

を用いて、

$$S = RH^T \quad (8)$$

と書ける。この行列 H を検査行列と呼ぶ。 n ビット訂正の場合、行列 H の列の中より選択可能な n 個以下のすべての組合せについて演算した排他的論理和がそれぞれ異なれば、 n ビット誤り訂正が可能である。また、行列 H の列の中より選択可能な n 個以下のすべての組合せについて演算した排他的論理和が同じく選択可能な $n+1$ 個について演算した排他的論理和と等しくなれば、 $n+1$ ビットの誤り検出が可能である。(s の値を調べその値が1になっているところの組合せによりエラーを起こしている検出素子を特定する。) 誤り検出・訂正例を以下にまとめると

・1ビット誤り検出

検査行列 H において、全0の列が存在しなければ1ビット誤りは検出できる。

・1ビット誤り訂正

検査行列 H において、全 0 の列が存在せず、かつ同じ列が存在しなければ 1 ビット誤りは訂正できる。

・1 ビット誤り訂正・2 ビット誤り検出

検査行列 H において、全 0 の列及び同じ列が存在せず、かつどの 2 つの列の論理和もある 1 つの列と同じでなければ 1 ビット誤りが訂正でき、2 ビット誤りが検出できる。

2.3 ロータリエンコーダパターンによる誤り検出・訂正

2.2 項で述べた誤り検出・訂正は M 系列パターンに限られ、パルス数は $2^n - 1$ である。そのため実用のエンコーダのパルス数の場合である $2^n - 1$ パルス以外の k パルスにおいて、上記の誤り訂正・検出方法は使用できない。そこで、パターンの大部分において M 系列の線形再帰関係が維持されるように

$$2^n - 1 > k > 2^{n-1} - 1 \quad (9)$$

を満足する n 次の M 系列パターンの $2^n - 1$ パルスの内 k パルス分を取り出す方法について述べる³⁾。

$2^n - 1$ パルスの M 系列には $n - 1$ 個の 0 が並んだ部分以外の $2^n - 2$ 個の n ビットのデータが出現する。 $n - 1$ ビットデータを $2^n - 1$ パルスの M 系列パターンから読み出すと、0 が $n - 1$ 個並んだ部分以外は必ず 2 組あり、 $2^{n-1} - 1$ 個の組合せが存在する。組になっている 2 個の相互距離は 1 から $2^{n-1} - 1$ までのすべての整数によって表され、重複はない。一方の $n - 1$ ビットから他方の $n - 1$ ビットの前までを削除すれば k パルスのパターンが作れる。4 次の M 系列 (Y_r)

$$Y_r = 0001001110101111 \quad (10)$$

の 15 パルスのパターンから 10 パルスのパターンを作るとする。15 パルスのうち 5 パルス ($15 - 10 = 5$) 飛び越せば 10 パルスのパターンになる。 Y_r と Y_{r+5} (5 パルス分ずれたパターン) を並べて書き、縦に EXOR (排他的論理和) をとると、

$$\begin{array}{r} Y_r = 0001001110101111 \\ Y_{r+5} = 011010111100010 \\ \hline \text{EXOR} \quad 011110001001101 \end{array} \quad (11)$$

EXOR を取った値が 0001 の部分の Y_r と Y_{r+5} では右の 1 ビットが異なるだけであるから Y_r の 0011 から Y_{r+5} の 0111 に変わることには矛盾は生じない。 Y_r の 0011 から Y_r の 0111 に飛ばば 5 パルス飛び越し 10 パルスのパターン (12) となる。

$$0001001111 \quad (12)$$

以上のような方法をとれば、00111 の継ぎ目の部分以外において線形再帰関係が維持できるのでロータリエンコーダの誤り検出・訂正が 2.2 項で述べた原理で可能である。この継ぎ目部分において誤り検出・訂正を

Table 1 Hamming distance of error correction and detection

Correction	Detection	Hamming distance
0	1	2
1	0	3
0	2	3
1	2	4
2	0	5

Fig. 4 The 36 000 000 pulses absolute encoder

行うには、継ぎ目部分に生じる誤りを含んだすべてのパターンの対照表を ROM によって作れば良い。この継ぎ目部分の存在のために 2.2 項で述べた方法で求めた誤り検出・訂正に必要な付加すべき検出素子の数 d を加えた $k + d$ 個の検出素子で読み取った場合の表 1 に示すハミング距離 (任意の 2 か所のパターンを比較したとき異なるビットの数の最小値) が所定の数以上になるまで読み取る検出素子の数を増加させないと、所望の誤り検出・訂正はできない。

3. 3600 万パルスエンコーダの構成

3.1 構成

図 4 に示す試作したアブソリュートエンコーダは外径 200 mm、高さ 60 mm、カップリング内蔵の中空軸の内径は 40 mm である。この本体部分にはインクリメンタル信号の増幅部とアブソリュート信号の矩形波変換回路が入っている。スケールは図 6 に示すように 45 000 パルスインクリメンタル 1 本 (10 μ m ピッチ) と 5 625 パルスのインクリメンタル 1 本 (80 μ m ピッチ) とアブソリュート 2 本 (最小読取り単位 80 μ m) の計 4 本からなり (図 5)、45 000 インクリメンタルは 4 か所、5 625 インクリメンタルは 2 か所、5 625 アブソリュートは 1 か所にて検出している。光学系は図 7 に示すように、インクリメンタル部は従来と同様、光源に LED を使用し、インデックススケールを用いる検出方式を取った。45 000 パルスは信号精度を向上

Fig. 5 The 36 000 000 pulses scale

Fig. 6 The detecting position of encoder scale

Fig. 7 The optical system of the 36 000 000 pulses absolute encoder

させるために4か所検出、5625パルスは2か所で検出している(図6)。アブソリュート部はインクリメンタルパターンを読み取るためのインデックススケールの厚さ約5mm分のアブソリュートパターンとアブソリュートセンサとの距離を取らざるを得ない。光源にLEDを使用すると、光源に大きさが存在するためにアブソリュートセンサ上のアブソリュートパターンに半影が生じてしまうので、アブソリュートパターンを正確に検出できない。光源の大きさを0にすれば半影を除去することができるので、大きさ0の光源とし

Fig. 8 The 5625 pulses absolute sensor

Fig. 9 The block diagram of 36 000 000 pulses absolute encoder

てLDを採用することにした。しかしながら、LDを使用すると寿命が短い問題がある。この問題点を回避するために試作品においては電源投入時、絶対位置要求信号入力時のアブソリュートトラック検出時のみLDを点灯させることにより、LDの動作時間を減少させている。インクリメンタル信号の検出素子であるPDはインデックススケールのパターンの下に配置しており、アブソリュート信号は図8に示すように48個の検出素子(PD)が2列計96個円周方向に並んでいる受光部分とPDの光電流を外部にシリアル転送する回路部分(図示せず)とから成り立っている。

3.2 動作

試作したアブソリュートエンコーダは図9に示す回路構成を取っている。絶対位置検出の手順は以下のとおりである。

- (1) 外部から絶対位置要求信号をエンコーダが受け、アブソリュートセンサの24個の検出素子のPDを順に走査し外部の信号処理部にあるシフトレジスタにデータをセットする。
- (2) (1)で得たアブソリュートデータに対して2ビット誤り検出・1ビット誤り訂正の処理を行った後、ROMのアドレスバスに入力する。この時、誤り検出・訂正を行った場合はそれぞれ警告を外部の信号処理部で表示する。

- (3) 5625パルスインクリメンタル信号を電氣的に16分割して得られる45000パルスインクリメンタル信号と45000パルスインクリメンタルトラックからの信号との位相を調整することにより、5625パルス内の絶対位置が3ビット確定でき、カウンタAの下位3ビットにセットする。
- (4) ROMのデータベースから出力される0~5624の絶対位置をカウンタAの下位4ビット目から13ビット分セットする。
- (5) 以上で45000単位の絶対位置がカウンタAにセットされることになる。この絶対位置を外部の表示回路に二相矩形波で出力するために、二相矩形波発振器からの信号をカウンタBにて計数しながらカウンタAとカウンタBとの値が等しくなるまで二相矩形波信号を外部表示回路に送る。
- (6) カウンタAとカウンタBが一致した後は45000パルスのインクリメンタル信号を外部表示回路に送ることで常に絶対位置が検出できる。
- (7) 45000パルスのインクリメンタル信号の周期を測定することで800分割回路が応答できない回転速度以上の高速時とそれ以下の低速時を切替Bにおいて切り替えている。高速時は800分割信号は出力せず、外部表示回路に45000パルスのインクリメンタル信号を送る。低速時は800分割信号をパラレルで外部表示回路に送ると共に、800分割した信号から作られる45000パルスのインクリメンタル信号を外部表示回路に送ることで800分割した3600万パルスの絶対位置が検出できる。

4. 評 価

4.1 信号波形

3600万パルスアブソリュートエンコーダの信号は5625パルスのアブソリュート・インクリメンタル、45000パルスのインクリメンタルの計3種ある。これら3種類の信号の位相関係、信号のひずみが信号の信頼度及び精度に影響する。中間内挿方式を実現するにはエンコーダの1回転のすべての部分において45000インクリメンタルと5625インクリメンタル信号がある一定の位相誤差に入らないと45000インクリメンタル信号によって、5625インクリメンタルを電気分割して作った信号に対し位相調整が不可能になる。その必要条件は図10に示す $\Delta\lambda$ が

$$|\Delta\lambda| < \frac{\lambda_{45000}}{4} \quad (13)$$

Fig. 10 The signals of absolute encoder

Fig. 11 The signals of absolute encoder

を満たすことにある。安全を見ると

$$|\Delta\lambda| < \frac{\lambda_{45000}}{8} \quad (14)$$

は必要である。試作品における実測した5625インクリメンタル信号と45000インクリメンタル信号との最大位相ずれを図10のマーカより読み取ると λ_{45000} の1ピッチの5.6%にあたり位相誤差結果は

$$|\Delta\lambda| < \frac{\lambda_{45000}}{35} \quad (15)$$

であり十分であった。前述したようにアブソリュート信号は光源にLDを用い、スケールとセンサ間のギャップは5mmと大きい状態で読み取る。アブソリュートパターンを読誤りを生じさせることなしに検出できるかが問題となる。図11にアブソリュート信号とインクリメンタル信号を示す。前者は互いに反転しているアブソリュートトラックの信号を差動増幅させたものであり、絶対位置を検出するのに十分である。

4.2 精 度

試作品の累積精度の評価を測角機により測定した結果を図12に示す。累積誤差は2"以下に入っており、カップリングの誤差を含んでいることを考え合わせれば良好な結果である。なお測定に使用した測角機は電気通信大学梶谷研究室の益田先生のご指導のもとに製

Fig. 12 The error curve of the encoder

作した光学式マルチ再生ヘッド法の原理によるもので、分解能 $0.0106''$ 、測定の再現性 $0.06''$ 以下の測定精度を有している。

5. 結 論

- (1) 3600万パルスのアブソリュートエンコーダの試作を行い、実用性を確認した。

- (2) 45000パルスのインクリメンタル信号分割することで高分割・高精度を維持した。
- (3) 中間内挿方式によりインクリメンタルトラック2本で高精度・高分割が可能となった。
- (4) 高速時には45000パルスのインクリメンタル信号をカウントすることで従来のインクリメンタルエンコーダより高速回転が可能となった。
- (5) M系列の線形再帰関係を利用して1ビット誤り訂正・2ビット誤り検出をロータリアブソリュートエンコーダで行い、信頼性が向上した。

参 考 文 献

- 1) 大野 康, 松本 豪, 今井基勝, 山崎雄二: 1トラックアブソリュートエンコーダ, 精密工学会誌, 57, 8 (1991) 1369.
- 2) 野村英司, 山口和彦, 今井秀樹: M系列を用いた, 誤り検出・訂正可能な位置検出器, 電子情報通信学会論文誌 A, J71-A, 10 (1988) 1930.
- 3) G. Hoffmann de Visme (伊理正夫・伊理由美共訳): 2値系列, 共立出版, (1977) 67.

(p. 414 より続く)

このため地球環境問題への対応が製品・素材の製造、使用、廃棄・リサイクルの各段階で製品・素材メーカーにも求められている。したがって製品、素材ともに今後

は機能・コストに加え、環境負荷性を代替・競合を決定する3要素として位置付けられる。

製品・素材のライフサイクルにおける環境負荷性の評価については、製品・素材の製造、使用、廃棄・リサイクルのライフサイクルの各工程で何らかの環境負荷を発生させる。その場合、環境負荷性が各工程ごとに異なるものとして生ずるので、ライフサイクルの一面のみでの評価は一面的な判断となる。したがってライフサイクルに応じて、総合的な評価の視点に立つ判断が必要としている。さらに総合的の視点に加え、それらの特性・耐久性・資源の希少性などの要因も考慮しなければ一面的評価となる場合もある。

以上のことから、製品・素材の環境負荷性については製品・素材のライフサイクル全段階を対象範囲として特性・耐久性・資源の希少性などの要因を考慮に入れた総合的・客観的な評価手法、マニュアルなどを整備する必要があるとしている。

(服部 敏夫)

製品・素材の環境調和性構成要因の例