多トラックスケールを用いた 絶対値リニアエンコーダの開発*

松 添 雄 二**

小 泉 和 裕***

Development of high parlance absolute linear encoder using the multi-track scale

Yuji MATSUZOE and Kazuhiro KOIZUMI

Recent requirements for semiconductor equipment and robots that can proceed in their tasks without returning to a starting point have increased the demand for absolute encoders, including higher resolution and longer scale. This paper deals with the development of a high-resolution, long-range absolute linear encoder. To obtain the absolute position this encoder combines three signals: 1) the M-code signal, based on the 9-bit M-code; 2) the Gray-code signal, based on the 4-bit Gray code; and 3) the interpolation of data of sinusoid waves by the grating. This absolute linear encoder achieves an accuracy of $0.16 \mu\text{m}$ and 1m detection range.

Key words: Absolute encoder, linear encoder, long scale and resolution

1. 緒 言

工作機械、ロボット、半導体検査装置などの水平搬送機構として、1) ロータリモータとボールねじによって水平力に変換する機構を設けたロータリサーボシステム、2) リニアモータにより直接水平力を発生させるリニアサーボシステムがある。リニアサーボシステムはボールネジ等の機械的な機構が不要なため、高速・高精度な位置決めが容易である^{1)~2)}。このようなリニアサーボシステムに用いられる絶対値リニアエンコーダは特殊な用途で用いられる場合が多く、その市場は限られていた。近年、半導体製造装置やロボットで原点復帰作業が困難なシステムに対する要求が高まり、原点復帰作業が不要な絶対値リニアエンコーダが要求されつつある^{3)~5)}。

一般に、絶対値リニアエンコーダの位置検出手法として、グレーコード方式^{6)~8)}、バーニア方式^{7) 9) 10)}、M 系列方式^{6) 11)}などが報告されている。グレーコード方式やバーニア方式は長尺化には適しているが、高分解能を実現するためにはコードパターンを増やすためスケールの幅を広げる必要があり、高分解能化には適さない。一方、M 系列方式は高分解能化には適しているが、長尺化を実現するためには受光セルを増やす必要があり、長尺化に適さない。そのため、高分解能と長尺化の両立が困難であった。

本論文では、M 系列方式とグレーコード方式を組み合わせ、高分解能と長尺化を両立する絶対値リニアエンコーダを開発し、スケール長 1 m、分解能 $0.16 \mu\text{m}$ を達成した。

2. 絶対値検出原理

2. 1 構成

図 1 に絶対値リニアエンコーダの全体構成を示す。これは照明用の LED、位置情報がパターンニングされたスケール、受光素子から構成される。LED から照明された光線は位置情報がパターンニ

ングされたスケール上のパターンを反射し、受光素子にて検出する。

図 2 にスケールの全体構成を示す。このスケールは格子トラック、M 系列トラック、グレーコードトラックの 3 つのトラックから構成される。図 3 に図 2 の α 部を拡大したものを示す。格子トラックは光を透過及び反射する格子を有するものであり、通常のインクリメントリニアエンコーダではこのトラックのみで機能を果たす。本絶対値リニアエンコーダではこの格子 1 ピッチを 0.16 mm に設定した。

M 系列トラックは M 系列に基づいてパターンニングされたトラックである。ここで M 系列とは Maximum Length Sequence の最初の M をとった M-Sequence の訳であって、最大長系列または最大周期列とも呼ばれる。図 4 は 9bit の M 系列を示す。図 4 に示すように M 系列は、 2^n 個の 1, 0 の組み合わせで構成され簡単な規則によって作られる確定的系列であるが外観上不規則な系列である。M 系列の特定位置から連続する n 個の 1, 0 情報(パターン)は系列内で 1 つしか存在しないため、 2^n 個の重複しない情報を持つ。本絶対値リニアエンコーダで用いる M 系列トラックは M 系列の 1 を透過部、0 を反射部とする 2^n 個の格子を有するトラックである。本絶対値リニアエンコーダでは、 $n=9$ に設定し 2^9 個 (=512) の位置情報をもった 9bit の M 系列をもつパターンである。M 系列トラックの最小格子の長さは格子トラックと同じ 0.16 mm であり、 $0.16 \times 512 = 81.92 \text{ mm}$ の位置情報を持つ。スケ

Fig. 1 Basic configuration of the optical encoder

* 原稿受付 平成 16 年 03 月 31 日

** 正 会 員 富士電機アドバンステクノロジー(株) (東京都日野市富士町 1 番)

*** 富士電機アドバンステクノロジー(株)

Fig. 2 Configuration of the scale

Fig. 3 Expanded the scale

ール上には 81.92 mm 毎に繰り返し同じ M 系列パターンがパターンニングされている。ここで、M 系列の格子の長さを 0.16 mm, $n=9$ に設定した理由は、1) 照明用 LED の照明領域が $\phi 3$ mm であり十分に 9 個の M 系列による格子が照明できること、2) LED の照明光量と受光セルの大きさ、3) 回路系のカットオフ周波数からである。

グレーコードトラックはクレーコードに基づいてパターンニングされたトラックである。ここでグレーコードとは純 2 進バイナリコードと異なり、符号が同時に 2 つ以上変化しないコードである。図 5 に 4bit のグレーコードを示す。グレーコードトラックはグレーコードの 1 を透過部, 0 を反射部とするトラックであり、本絶対値リニアエンコーダでは G1~G4 の 4 本のトラック、すなわち 2^4 個 (=16) の位置情報を有する。本絶対値リニアエンコーダでは M 系列からの信号が $0 \sim 2^9$ (=512) まで信号が変化する間、すなわち、81.92 mm の位置変化に対してグレーコードからの信号が 1 ステップ変化するようにパターンニングされており、 $81.92 \times 16 = 1310.7$ mm の位置情報を持つ。なお、今回開発したスケールはスケールの製造装置の制約からスケールの長さは 1.0 mm とした。

図 6 に受光素子上の受光セルのパターン、図 7 に受光素子の回路構成を示す。図中の斜線で示した領域は光を感じる感帯部を示し、その他の領域はアルミにて遮光された不感帯領域である。格子トラックの対向した位置に配置された PD1A, PD1B, PD1C 及び PD1D の 4 つの受光セルアレイは、それぞれ複数の受光セルから構成される。これらの受光セルのピッチは格子トラック上の格子とほぼ同じ周期で配置されている^{12) 13)}。また各受光セル間の周期を位相差 360° と定義すると、PD1A の受光セルアレイの受光セルと PD1B の受光セルアレイの受光セルとの位相差は

Fig. 4 M-Code

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
G1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
G2	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
G3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
G4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 5 Gray-Code

90° 、同様に PD1A と PD1C との位相差は 180° 、PD1A と PD1D との位相差は 270° となるように配置されている。各受光セルに到達する受光量は非常に少ないため、受光セルアレイ毎に 10 個の受光セルは並列接続され電流を増やしている。更に、受光セルアレイのカソード側は逆バイアスになるように接続されており、受光した光子に対して増幅した電流を得ている。

M 系列トラックの対向した位置に配置された PD2A 及び PD2B 受光セルアレイはそれぞれ M 系列の bit 数と同じ 9 個、合計 18 個の受光セルから構成される。受光セルアレイ PD2A の左側から受光セル PD2A1, PD2A2, ... PD2A9 と称し、受光セルアレイ PD2B の左側から受光セル PD2B1, PD2B2, ... PD2B9 と称す。これらの受光セルの周期は格子トラックの周期と同じであり、それぞれの受光セルは独立した合計 18 個の信号を出力する。この受光セルは格子トラックのように複数の受光セルを並列接続して用いていないため受光セル当たりの発生する電流が非常に小さい。そのため、本絶対値リニアエンコーダでは受光素子上に配置されたトランジスタアレイのベースと各受光セルのアノードとを接続し、各受光セルから得られた電流を増幅できる構成とした。また、PD2A と PD2B とから構成される受光セルアレイは、格子トラックの格子周期を位相差 360° と定義したとき、 180° 位相差になるようにそれぞれ配置されている。

グレーコードトラックの対向した位置に配置された受光セル

Fig. 6 Enlarged photo detector

Fig. 7 Photo detectors circuit diagram.

Fig. 8 Block diagram of the absolute linear encoder

アレイ PD3A 及び PD3B は、それぞれグレーコードの bit 数と同じ 4 個で、合計 8 個の受光セルから構成される。受光セルアレイ PD3A の上側から受光セル PD3A1, PD3A2, ... PD3A4 と称し、同様に受光セルアレイ PD3B の上側から PD3B1, PD3B2, ... PD3B4 と称する。これらの受光セルはそれぞれグレーコードの各トラックの対向した位置に配置される。また、PD3A 受光セルと PD3B 受光セルとの間距離は格子トラックの格子ピッチと同じである。受光セルアレイ PD2A 及び PD2B からなる受光セルと同様に、PD3A1~PD3B1 の受光セルは其々トランジスタアレイに接続され電流増幅できる構成とした。

図 8 に、回路ブロック図を示す。格子トラックの対向した位置に配置された PD1A~PD1D 受光セルアレイは I/V 変換回路、A/D 変換回路を介してマイクロコンピュータに接続されている。一方、PD2A1~PD2B9 の 18 個の受光セルからの出力信号及び、PD3A1~PD3B4 の 8 個の受光セルからの出力信号は、受光セルに内蔵されたトランジスタ、I/V 変換回路、比較回路を介した後、マイクロコンピュータに接続されている。

2. 2 動作

次に本絶対値リニアエンコーダの動作について説明する。スケールの移動に伴い受光素子からは図 9 に示すような信号を出力する。ここで、図 9 は図 2 のスケール上 T の領域を矢印の方向に移動した時の信号である、横軸は時間、縦軸は I/V 変換後の信号振幅電圧である。図 9 において、PD1C, PD1D 及び PD2A2~9, PD2B2~9 の信号は図示されている信号と同様であるため表記を省略した。図 9 のタイミング T_1 にて位置検出を行う場合、PD1A, PD1B 及び図示されていない PD1C と PD1D からの 4 つの正弦波電

Fig. 9 Block diagram

流信号は、I/V 変換回路に入力される。そして、I/V 変換回路にて電流信号から電圧信号に変換し、式 (1)~(4) に示す信号を出力する。

$$V_A(\theta) = X + Y \sin(\theta), \quad (1)$$

$$V_B(\theta) = X + Y \cos(\theta), \quad (2)$$

$$V_C(\theta) = X - Y \sin(\theta), \quad (3)$$

$$V_D(\theta) = X - Y \cos(\theta). \quad (4)$$

ここで V_A, V_B, V_C, V_D は I/V 変換回路後の PD1A~PD1D の電圧信号である。上式の X はオフセット、 Y は振幅である。次に、I/V 変換回路からの出力信号は差動回路に入力され、各信号の位相差が 180° 、すなわち逆相の関係にある V_A と V_C 及び V_B と V_D 信号間で差動演算を行い、式 (5) 及び (6) に示すような信号を得る。

$$V_{AC}(\theta) = 2Y \sin(\theta), \quad (5)$$

$$V_{BD}(\theta) = 2Y \cos(\theta). \quad (6)$$

差動回路の出力信号 V_{AC}, V_{BD} は、A/D 変換回路を介してマイクロコンピュータに取込まれ、これらの信号を電氣的に分割することによって得られる内挿データを得る。内挿データは式 (8) で与えられる。

$$\text{内挿データ} = \tan^{-1}(V_{AC}(\theta) \div V_{BD}(\theta)). \quad (8)$$

例えば、格子トラックの 1 周期が 0.16 mm なので 0.16 mm の格子トラックの範囲すなわち、図 9 の β の範囲において位置情報を得ることができる。本絶対値リニアエンコーダではマイクロコンピュータで 1000 分割しているため、最小分解能 $0.16 \mu\text{m}$ を得る。

次に、M 系列トラックから得られる M 系列信号から絶対値を得る方法について説明する。前述と同様にタイミング T_1 において、受光セル PD2A1~PD2B9 の 18 個の出力信号は I/V 変換回路にて電圧信号に変換され、比較回路にて High-Low の 2 値信号に変換され、マイクロコンピュータに取り込まれる。ここで PD2A1~PD2A9 の受光セルに注目する。PD2A1~PD2A9 で得られた連続する 1 と 0 の 9bit の情報は図 10 に示すようなマイクロコンピュ

Fig. 10 M_Code to Position table

ータ内に予め用意された M 系列—位置変換テーブルと照合し位置情報を得る。例えば、PD2A1～PD2A9 からの信号の全てが High であれば、マイクロコンピュータ内では“11111111”の M 系列データとして処理される。そして、M 系列—位置変換テーブルより 364 の位置情報を得る。今、0～511 の 512 個の位置情報で 0～81.92 mm の範囲の位置情報が成り立っているので、364 番目の位置情報は 0～81.92 mm の範囲内の 57.42～57.58 mm の位置情報を検出していることになる。次に、図 9 に示すような PD2A1～PD2A9 からの信号が 0(Low)から 1(High)に切り替わるタイミング T_1 では、閾値レベルが安定しないため比較回路にて High 又は Low 信号を正しく判断することができない。そのため、M 系列による位置誤りが発生する可能性がある。そこで、本絶対値リニアエンコーダでは、内挿データが 0～80 μm までの範囲であれば PD2A アレイの PD2A1～PD2A9、逆に 80～160 μm までの範囲であれば PD2B アレイの PD2B1～PD2B9 までの信号を採用することにより、閾値レベルを間違えることなく安定して位置情報を得ることが可能となるようなアルゴリズムを考案した。

最後に、グレーコードトラックに対向する位置に配置された受光セルアレイ PD3A に注目する。PD3A から得られた 4bit 信号を CPU 内に予め用意された図 5 に示すようなグレーコード—位置変換テーブルと照合し位置情報を得る。例えば、図 9 に示すタイミング T_1 場合には、マイクロコンピュータ内で“1000”のグレーコードデータとして処理される。そして、図 5 に示すグレーコード—位置変換テーブルより“1”の位置情報を得る。今、0～15 の 16 個の位置情報で 0～1317mm の範囲の位置情報が成り立っているので、1 番目の位置情報は 0～1317mm 内の 81.92～163.83mm の位置情報を検出していることになる。次に、図 9 のタイミング T_2 にて位置検出を行う場合、PD3A1 からの信号は High

から Low に信号が変化するときであり、M 系列信号と同様に比較回路にて High 又は Low 信号を正しく判断することができない。そのため、M 系列による位置誤りが発生する可能性がある。しかし、図 9 に示すように M 系列の位置情報が 511～255 までの範囲であれば、受光セルアレイ PD3A からの信号は比較回路にて High 又は Low の信号の誤りが発生する可能性はあるが、PD3B は安定的な信号が必ず得られるので比較回路にて High 又は Low を誤ることはない。逆に M 系列の位置情報が 0～254 までの範囲であれば受光セルアレイ PD3A からの信号は、比較回路にて Low と High の判断を誤ることはない。よって、M 系列信号の位置情報が 0～254 であれば PD3A を選択し、255～511 までの範囲であれば PD3B を選択することにより、閾値レベルを間違えることなく安定して位置情報を得ることが可能となる。

これら格子トラックから得られた 0～0.16 mm までの位置情報、M 系列トラックから得られた 0～81.92 mm までの位置情報及びグレーコードトラックから得られた 0～1310.7 mm までの位置情報をマイクロコンピュータで組み合わせて、エンコーダの絶対位置を導出し、RS232C ドライバでシリアルデータに変換して出力する。

3. 試作エンコーダ

図 11(a)にスケール端部の拡大写真を示す。スケール幅 15 mm、スケール長 1m、厚さ 3mm である。写真の下部の黒い領域はスケールをホルダに固定するための目印である。図 11(b)にスケールのパターン部を拡大したものを示す。図 3 ではスケール上側から格子トラック、M 系列トラックとグレーコードトラックと配置したが、実際に試作したスケールのパターンは中心に格子トラック、格子トラックの上下方向に M 系列トラック、M 系列トラックの上下方向に図示されていないグレーコードトラックをそれぞれ配置した。

スケール照明用の LED はレンズ、レンズの焦点位置に配置された発光素子及び筐体から構成され、レンズからはフラットな光強度分布の平行光が出力されるように設計されている。しかし実際の LED は 1) レンズの収差、2) レンズの取り付け精度、3) 発光素子に所定の面積を有する、などの理由からレンズの中心部から照射される光は比較的安定した光強度分布を得ることができるが、レンズの外周部から照射された光は光強度分布にむらが発生する。そこで、本絶対値リニアエンコーダでは、内挿処理により高分解能を実現するための信号を得る格子トラ

Fig. 11 Picture of the slit disk with an expanded view.

Fig. 12 Silicon photo detector

Fig. 13 Photograph of the experimental setup

ックを光強度分布が安定している LED の照明領域の中心部に配置し、High と Low の 2 値の位置情報で十分である M 系列及びグレーコードトラックは照明領域の外周部に配置した。図 12 に受光素子の拡大図を示す。受光素子は図 11 に示したスケールと対向した位置に受光セルが其々配置されており、図左側に PD2A1～PD2B9 及び PD3A1～PD3B4 に接続されているトランジスタアレイが配置されている。但し、トランジスタのベース側とのワイヤ配線を保護するために樹脂にてモールドしているため確認することはできない。

4. 実 験

4. 1 評価装置

図 13(a)に今回試作した絶対値リニアエンコーダの評価装置の構成を示す。この装置は、石定盤上に配置されたリニアモータ、図 13(b)に示すリニアモータの移動部にセットされたセンサヘッド、及びセンサヘッドの対向する位置に配置されたスケールから構成される。ここで、リニアモータは、図示されていない制御用パソコンからの速度と位置指令、リニアモータ付属のインクリメントリニアエンコーダからの位置情報に基づき制御される。また、センサヘッドは受光素子、マイクロコンピュータ及びその周辺回路をプリント基板上に実装したものを筐体に搭載したものである。センサヘッドからの位置情報は、位置情報としてパソコンに送られる。スケールは長さ 1 m に亘ってスケールホルダ内に収納されており、スケールとリニアモータの平行度は 10 μm 以下に抑えている。

4. 2 実験結果

図 14 にリニアモータを速度 20 mm/s で 1 m 移動させたときのリニアエンコーダの位置検出結果を示す。図下部の三角形の繰返し信号は PD1A, PD1B と PD2A と PD2B, すなわち格子トラックと M 系列トラックからの位置情報に基づき位置検出値を演算した結果である。PD1A と PD1B の内挿処理により分解能 0.16 μm を得ることは可能であるが、これでは 0～81.92 mm までの絶対値位置情報しか得ることができず、それ以上の絶対値位置情報は得られないことが分かる。そこで、図中階段状の位置検出を行っているグレーコードによる位置情報と、先ほど述べた M 系列信号及び内挿信号を組み合わせ、業界トップクラスのスケール

Fig. 14 Detection position of linear encoder

長 1 m の位置検出を実現した。また、分解能は図 14 に示す位置検出値の幅に相当し、一般産業用や半導体製造装置などで比較的高精度な位置検出制御が可能な分解能 0.16 μm を実現することができた。

5. 結 言

M 系列とグレーコードの絶対位置情報と、格子トラックを内挿倍した位置情報を組み合わせた高分解能と長尺化を両立する絶対値リニアエンコーダの絶対値検出手法を提案し、下記の結果を得た。

- 1) M 系列信号の位置情報に基づき、PD3A と PD3B の受光セルアレイを切り替えて使うことにより、安定的に位置情報を得るアルゴリズムを開発した。
- 2) グレーコード信号、M 系列信号及びインクリメント信号を組み合わせた位置検出アルゴリズムを開発し、分解能 0.16 μm 、絶対値位置スケール長 1 m の絶対値リニアエンコーダを実現することができた。

参 考 文 献

- 1) Seppo J. Ovaska, "Improving the Velocity Sensing Resolution of Pulse Encoders by FIR Prediction", IEEE Transactions on instrumentation and measurement, **40**, 3, (1991)657.
- 2) N. Hagiwara, Y. Suzuki, H. Murase, "A method of improving the resolution and accuracy of rotary encoder using a code compensation Technique," IEEE trans. on instrumentation and measurement, **41**, (1996)98.
- 3) 高坂始, "センサ選定・活用のポイント", 機械設計, **39**, 12, (1995)26.
- 4) 今井基勝, "光学式エンコーダの最新動向", センサ技術, **10**, 8, (1990)26.
- 5) 熊田正次, 二宮祐司, 佐藤育美, 上山顕治, 長瀬喬, "小型・高性能 AC サーボモータ シンシリーズ", 技報 安川電機, **56**, 2, (1992)144.
- 6) K. Fujita, T. Nakayama and Y. Matsuzoe, "Recent encoder technology," Fuji electric review, **46**, 2, (2000)57.
- 7) Frank Jay, "IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, (1984)999.
- 8) 高野昌三, "ロータリエンコーダ", 機械設計, **28**, 8, (1984)114.
- 9) Sybil P. Parker, "DICTIONARY OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL TERMS", McGRAW-HILL BOOK COMPANY, New York, 828.
- 10) 盛植昭彦, "変位を検出するセンサ", センサ/計測モジュール活用技術百科第 3 編, 170.
- 11) 柏木潤, "M 系列再発見", 計測と制御, **20**, 2, (1981)42.
- 12) 松添雄二, 小泉和裕, 齊藤哲哉, "エンコーダ光学系の最適設計-変則受光セル周期による信号特性の改善", 精密工学会誌春季大会学術講演界講演論文集, (2003)85.
- 13) 小泉和裕, 松添雄二, 齊藤哲哉, "光線追跡シミュレーションによるエンコーダ光学系の最適設計", 精密工学会誌秋季大会学術講演界講演論文集, (2002)213.