スリット形状 LED 光源による 干渉縞検出方式リニアエンコーダの開発*

松 添 雄 二** 小 泉 和 裕*** 藤 田 光 悦†

Development of Interference fringe-type Linear Encoder using a Point Source LED with Slits

Yuji MATSUZOE, Kazuhiro KOIZUMI and Koetsu FUJITA

This paper deals with the interference fringe-type linear encoder using a point source LED with a slit, able to achieve high resolution, a range temperature range, and high reliability. In order to realize the linear encoder, it is designed by using a simulator of the Fresnel-Kirchhoff diffraction formula. The sensor head of the linear encoder is adapted the light emit-detection device which uses a combination of a LED which has a slit on the luminous surface and a photo detector. The low cost diffraction scale is archived the processing expense by combining a single etching process with a double thin-film process without involving glass etching. This linear encoder achieved a lower than 10nm resolution.

Key words: linear encoder, high resolution, scale, LED.

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) 回転モータとボールねじによって回転力を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や、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⁾。リニアサーボシステムの位置や速度を検出する安価なセンサとして光学式リニアエンコーダが用いられている。近年、これらの装置の高性能化に伴い、リニアエンコーダの高分解能、高精度化の要求が高まりつつある。

比較的分解能の低い、例えば分解能 0.1 μm 以上の格子検出リニアエンコーダは、図 1(a) に示すように LED(light emitting diode) と、光を透過及び反射するスリットを持ったスケール、スケールからの反射光を検出する受光素子から構成される³⁾。このようなリニアエンコーダが高分解能化を実現する場合、スリットのピッチを小さくしなければならなかった。しかしながら、LED は 1) 発光素子は点光源ではなく所定の面積を持つ、2) 発光素子とコリメートレンズ間の距離誤差を有する、3) コリメートレンズの収差を有する、等の影響により斜め方向の成分を含んだ光線となる。そのため、スリットピッチを小さくすると S/N 比が低減し、位置検出誤差が大きくなる。

このような問題を解決するために、図 1(b) に示すように、コヒーレント光をスケール上の回折格子に照明することによって得られる干渉縞を検出する干渉縞検出エンコーダがいろいろの研究によって提案されている⁴⁾。干渉縞検出リニアエンコーダは、格子検出リニアエンコーダに比べて、高分解能、小型化、調整が容易であるが、LD (Laser diode) のようなコヒーレント光源を扱うため、使用可能な温度限界、短寿命などの問題があ

る。一方、インコヒーレント光源である LED は、広い温度範囲、長寿命等のメリットがある。

本論文では、面発光 LED の発光面に幅の狭いスリットを設けた線状アレイ光源と、この LED 内蔵した受光素子からなる受発光デバイスを搭載したセンサヘッドと、2 度の成膜プロセスと 1 度のエッチング工程のみで作られる安価な回折格子スケールとを組み合わせた干渉縞検出リニアエンコーダについて述べる。

2. 原 理

2.1 干渉縞発生原理と透過型と反射型の違い

図 2 に干渉縞検出方式の光学系モデル(透過型)を示す。左側に光源 S、中央に回折格子 G、右側に検出面 D がある。光源 S と回折格子 G との距離を L_s 、回折格子 G と検出面 D との距離を L_d とする。2 つの距離 L_s と L_d が等しい場合には、反射型の光学モデルとなる。点光源 S より照射された光は、スケール上の回折格子 G により透過・回折し、検出面 D で合成され干渉縞を生じる。検出面 D の点 x_d の光強度 I_d は次式で与えられる。

$$I_d(x_d) = I_s / U(x_s, x_d)^2 \quad (1)$$

ここで、 I_s は光源 S の光強度、 $U(x_s, x_d)$ は x_d 点における複素振幅、光源は拡散光である。 $U(x_s, x_d)$ は伝達関数 $G(x)$ とフレネルキルヒホッフ回折積分公式の組合せによって求められ、式(2)で与えられる。

Fig. 1 Basic configuration of linear encoders

* 原稿受付 平成 16 年 9 月 27 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)

† 富士電機機器制御(株)

Fig. 2 Principle of the interference fringe type encoder

$$U(x_s, x_d) = -\frac{Ai \cos \delta}{\lambda r_0 r_0'} \int G(x) \exp[i k (r + r')] dx \quad (2)$$

ここで A は光源によって定まる光の振幅, k は $2\pi/\lambda$, r_0 , r_0' , r , 及び r' は距離, δ は入射角である. S は Z 軸上に配置された点光源である. ここで δ が 0 に近ければ, 式 (2) は式 (3) で与えられる.

$$U(x_d) = -\frac{Ai}{\lambda L_s L_d} \int G(x) \exp[i k f(x)] dx \quad (3)$$

ここで,

$$\begin{aligned} f(x) &= r + r' \\ &= (L_s^2 + L_d^2)^{1/2} + \{L_s^2 + (x_d - x)^2\}^{1/2} \\ &= L_s + L_d + \frac{(L_s + L_d)x^2}{2L_s L_d} - \frac{xx_d}{L_d} \end{aligned} \quad (4)$$

$G(x)$ を振幅 “ a ” の方形波としてフーリエ展開し, $x = \pm\infty$ の範囲で積分すると, $I_d(x_d)$ が求められる.

$$\begin{aligned} I_d(x_d) &= I_s [3a^2/2 + 2a^2 \cos \alpha \{C_1 \cos 2\pi \beta x_d - C_2 \cos 6\pi x_d \cdot \cdot \cdot \\ &\quad \} + a^2/2 \{C_3 \cos 2\pi \beta x_d - C_4 \cos 6\pi \beta x_d \cdot \cdot \cdot \}] \end{aligned} \quad (5)$$

ただし, “ a ” はスケール上の回折格子 G による定数, C_1 , C_2 , C_3 , C_4 は係数であり, α 及び β は式 (6) で与えられる.

$$\begin{aligned} \alpha &= \pi \lambda L_s L_d / \{p^2 (L_s + L_d)\} \\ \beta &= L_s / p (L_s + L_d) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, P は格子ピッチである. 式 (5) は一般式であり $\cos 2\pi \beta x_d$ の主周期となる光の明暗 (縞) である.

スケールの移動方向に対して垂直にスケールの位置が変動した場合 (スケールの垂直変動と呼ぶ), すなわち距離 L_s と L_d の値が変化した場合を考える. 透過型の場合は, スケールの垂直変動によって L_s が変化し, それにより β が変化するため干渉縞の周期が変化する. これにより, スケールの垂直変動がスケールの移動量に誤差として現れる. 一方, 反射型の場合は受光光

Fig. 3 Composition of photo detector

Fig. 4 Circuit diagram of photo detector

部とスケールの距離は透過型光学系モデルの L_s と L_d が等しい場合に相当するので, $L_s = L_d = d$ とすると β は式 (7) で表される.

$$\beta = 1/2p \quad (7)$$

つまり, β は d に依存しないため, 干渉縞の周期はスケールの垂直変動に関係なく一定であり, スケールの移動量にスケールの垂直変動による誤差は生じない. 一方, 距離 d が変化する場合には, 検出信号振幅は変化するが周期変動による誤差に比べて非常に小さい.

以上の理由によりスケールを反射した光からできる干渉縞を検出するリニアエンコーダを開発することにした.

2.2 位置検出原理

干渉縞はスケールの対向した位置に配置された受光素子 (図 3 参照) によって検出される. 受光素子は, 図 3 のように干渉縞の周期の間隔で並べられた複数の受光窓 (遮光線部分) からなる 4 つの受光セル No. 1~No. 4 から構成される. それ以外の領域はアルミ蒸着により遮光された不感帯領域である. また, 干渉縞の周期を 360° (2π) とすると, No. 1 受光セルに対して, No. 2 受光セルは位相差 90° , No. 3 受光セルは位相差 180° , No. 4 受光セルは位相差 270° となるように配置されている. 図 4 に受光素子の回路構成を示す. 各受光セルのカソード側端子は逆バイアスになるように接続されており, 受光した光量に対して比例した電流を得ている. 一方, 各アノード側端子は後段の I/V 変換回路に接続されている.

図 5 に, 本リニアエンコーダの回路ブロック図を示す. 受光素子は I/V 変換回路, 差動回路を介しマイクロコンピュータに接続される. スケールが移動すると干渉縞が移動し, No. 1~No. 4 の受光セルは位相差 90° の正弦波状の電流信号 $I_1 \sim I_4$ を出力し, それぞれ I/V 変換回路に入力される. I/V 変換回路では電流信号を電圧信号に変換し, 式 (8)~(11) に示す信号 $V_1 \sim V_4$ を得る.

Fig. 5 Block diagram of the principle of angle detection

$$V_1(\theta) = X + Y \sin(\theta) \quad (8)$$

$$V_2(\theta) = X + Y \cos(\theta) \quad (9)$$

$$V_3(\theta) = X - Y \sin(\theta) \quad (10)$$

$$V_4(\theta) = X - Y \cos(\theta). \quad (11)$$

ここで 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, 逆相の関係にある V_1 と V_3 及び V_2 と V_4 信号間で差動演算を行い, 式 (12) 及び (13) に示すような信号を得る.

$$V_{13}(\theta) = 2Y \sin(\theta) \quad (12)$$

$$V_{24}(\theta) = 2Y \cos(\theta). \quad (13)$$

マイクロコンピュータでは, 差動回路の出力信号 V_{13} , V_{24} を A/D コンバータに取り込み, 1) 初期位置からの正弦波のカウント値 CD と, 2) 正弦波の内挿値 ID を計算する. そして, 得られた 2 つの数値から式 (14) に示すようにスケールの移動量 MD を計算する.

$$MD = CD + MD \quad (14)$$

次に, 正弦波を分割して内挿値 ID を求める方法について説明する. マイクロコンピュータに取り込んだ 2 つの信号 V_{13} , V_{24} は, 位相差 90° の正弦波信号である. これらの信号を用いて式 (15) に示す逆正接演算を行うと, 正弦波信号 1 周期に対する比率として内挿値 ID を求めることができる.

$$ID = \tan^{-1}(V_{13}(\theta) \div V_{24}(\theta)). \quad (15)$$

本論文におけるリニアエンコーダの分解能は, リニアエンコーダが静止しているとき, 位置を安定的に検出できる限界と定義した^{3) 6)}.

3. 試作リニアエンコーダ

図 6 に試作リニアエンコーダの取付け例を示す. 本リニアエンコーダはセンサヘッドとスケールから構成され, センサヘッドは移動・速度制御対象となるアクチュエータに取付けられており, その対向する位置にスケールが設けられている. 以下, センサヘッド及びスケールについて説明する.

3.1 センサヘッド

図 7 にセンサヘッドを示す. センサヘッドは寸法 $78 \times 25 \times 15\text{mm}$ の筐体の中に基板 1 及び基板 2 の 2 枚の基板が収められている. 図 7(a) はスケール側からセンサヘッドを眺めた基板 1 を示す. スケールの対向した位置に受発光デバイスが搭載されており, I/V 変換回路及び差動回路が搭載されている. 図 7(b) は基板 1 を挟んで対向する面に搭載された基板 2 を示す. 基板 2 はマイクロコンピュータ及び, パソコンからマイクロコンピュータ用のプログラムのダウンロードに用いるコネクタ 1 と, アクチュエータに位置情報を送信するためのコネクタ 2 との 2 つ

Fig.7 Prototype sensor head (Size:78×25×15mm)

のコネクタから構成される.

次に図 8 に示す受発光デバイスについて説明する. 光源から照明した光によって発生した干渉縞を効率よく得るために, 受発光デバイスの中心部に面発光 LED を, その周りに受光セル 1 ~ 4 を配置している. 具体的には, 厚さ 0.2mm のシリコン基板上に形成された受光素子の中心に, 等方性エッチングにより $3.1 \times 1.2\text{mm}$ の貫通穴を開け, そこに面発光 LED を配置した.

図 9 に面発光 LED を示す. この面発光 LED の寸法 $1.5 \times 0.4\text{mm}$, 発光領域は $1 \times 0.2\text{mm}$ である. このような広い発光領域からの光を回折格子に照射してもコヒーレンシーが弱まり干渉縞を得ることができない. 干渉縞を効率良く得るためには, 発光領域 (幅) を非常に狭くしなければならない. 例えば, LD 光源の場合, 光源の発光幅は数 μm 以下で非常に狭く, 且つ, 非常に強いエネルギーの光を照射することができるので, 干渉縞を発生させるためには有利である. 一方, LED の場合, 単位面積あたりの発光エネルギーは LD 光源に比べて小さいので, LD 光源のように 1 本の光源では所定の光エネルギーを有する干渉縞が得られない. そこで, 自作シミュレータにより, 発光幅を狭くすることにより干渉縞が発生する効率をもっとも高くなる領域と, 逆に幅を広くすることにより発光量をもっとも多くなる最適条件を計算し, これをアレイ状に並べる方法を提案した⁷⁾. 図 10 に示すように, 発光面に周期 $20\mu\text{m}$, 遮光領域 $10\mu\text{m}$ のアルミマスクを設けることで, 50 本の線状アレイ光源を構築した. これによって, 単位面積あたりの発光量は小さいが, 回折格子スケールを照射する光エネルギーは大きくなる⁷⁾. また, この面発光 LED の波長は 880nm ,

Fig.6 Installation example of linear encoder

Fig.8 LED and photo detector

Fig. 9 Configuration of LED

Fig. 10 Expanded view of LED

光出力は 2.9mW（順電流 100mA 印加時）である。

受光素子は No. 1～No. 4 の 4 つの受光セルから構成され、各受光セルは周期 $20\mu\text{m}$ で、幅 $10\mu\text{m}$ のアルミマスクでマスクングされている。

3.2 スケール

一般に高分解能エンコーダで用いられる回折格子スケールは、エッチング法によって製作される。エッチング法とは、ガラス表面をエッチングして凹凸形状を形成しクロムを蒸着する方法である。エッチング法による回折格子スケールの製造コストは、エッチング工程のコストに加えてエッチングに適した不純物の少ない高価な熔融石英ガラスを使用するため、かなり高価となる。一方、安価な回折格子スケールの製作方法として 2 層膜法がある。2 層膜法は、安価なソーダライムガラスに 2 層のクロム層を形成する方法である。この方法は、エッチング工程が不要であるため非常に低コストである。本論文では、これら 2 つの方法により回折格子スケールを製作し、これらスケールの回折格子の段差を評価した⁵⁾。

今回製作したスケールの外形寸法は、長さ 400mm、幅 7mm、厚さ 3mm であり、形成した回折格子部分の幅は 3.5mm である。図

Fig. 12 Configuration of scale

11 は、スケールの端部を拡大したものを示す。また、図 12 (a) は、エッチング法によって作られた回折格子の断面図を示す。このスケールは、不純物が非常に少ない熔融石英ガラスを拡散光源の $\lambda/4$ (λ : 光源波長) で、 $20\mu\text{m}$ 周期の格子になるように直接ガラス表面をエッチング処理し、そのガラス表面上に反射膜を蒸着したものである。図 12 (b) に 2 層膜法によって製作されたスケールの断面図を示す。このスケールは、ソーダライムガラス板の表面上に第 1 層膜を蒸着し、この第 1 層膜の凹部幅に相当する領域をエッチングした後、第 2 層膜をスケール全面に亘って蒸着することによって作られる回折格子を製作した。このとき、第 1 層目の塗布面の膜厚は拡散光源の $\lambda/4$ になるように制御されている。これらの表面形状を光学式表面形状評価装置（メーカー：WYKO、型式：HD-2000）にて評価した。図 13 に、回折格子の断面プロファイルの評価結果を示す。このプロファイルにて段差部（図 13 の A 部）に突起のようなものが確認できる。この表面形状評価装置は光学式であるため、このエッジ部の影響で誤差が発生したものと考えられる。そのため、上面と底面の中央部平均値の差を求めた。その結果、これら 2 つの方法で作られた回折格子の表面段差は、 $190\sim 210\text{nm}$ の範囲で一致した。以上の結果から、このような方法でスケールを製造することにより非常に安価なスケールを提供することができる。

4. リニアエンコーダの分解能評価

4.1 分解能評価システム

図 14 (a) に今回試作したリニアエンコーダの評価装置の構成を示す。この装置は、石定盤を介して配置されたエアースライド、エアースライドの裏面に配置され図示されていないリニアモータ、エアースライドの移動部にセットされた試作エンコーダ及び試作エンコーダの対向する位置に配置された試作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、基準リニアエンコーダからの速度と位置指令に基づき制御されている。ここで、基準エンコーダは、レーザスケール（型式 BS75A、旧ソニープレジジョンテクノロジー製）を用い、評価時の分解能は約 0.3nm で実施した。今回、試作リニアエンコーダの目標分解能を 10nm としているため、分解能 0.3nm は十分に小さい値である。

4.2 分解能評価結果

試作したリニアエンコーダは、スケールに対しセンサヘッドが $20\mu\text{m}$ 移動すると干渉縞が 1 周期変化する。その時センサへ

Fig. 13 Evaluation of scale surface profile

Fig.14 Evaluation system

ッドでは、 90° 位相差の 2 つの正弦波信号が A/D コンバータを介してマイクロコンピュータに取り込まれる。一般に、汎用マイクロコンピュータにて式 (15) の逆正接演算を行う場合、三角関数を伴うため非常に長い処理時間を要する。そこで、予めマイクロコンピュータのメモリ内に逆正接の計算結果を予めテーブルとして準備した。そして式 (15) のカッコ内の " $V_{13}(\theta) \div V_{24}(\theta)$ " の演算結果をポインタとし、このテーブルを参照することにより演算処理時間を短縮した。このテーブル内の逆正接演算結果は 16bit のデータ長で処理しているため、試作エンコーダの計算上の分解能は $0.3\text{nm} (=20\mu\text{m}/2^{16})$ となる。但し、電気的、機械的なノイズの影響などにより実際に得られる位置の分解能は 16bit と定義することができない。

図 15 に試作エンコーダをサーボオン状態で静止させたときの位置検出値を示す。この結果から、位置検出値は $\pm 6.5\text{nm}$ の範囲でばらついている。これは、1) 電源に印加されるノイズ、2) コンデンサ、抵抗による熱雑音、3) 信号振幅の低下、4) 評価装置のサーボ振動や建物のゆれ等の影響によりばらついていると考えられる。以上の結果から、本評価系で評価できるリニアエンコーダの位置検出分解能は 6.5nm と言える。

5. 結 論

スリット形状 LED 光源を内蔵した受発光デバイスと安価な 2 層膜法による回折格子スケールからなる反射型干渉縞検出方式リニアエンコーダを開発した。試作・評価により下記の結果を得た。

(1) 面発光 LED の発光面に幅の狭いスリットを設けたスリット

Fig.15 Evaluation result of position detection error

形状 LED 光源と、受光素子を組み合わせた受発光デバイスを開発した。

- (2) 2 回のスパッタ処理と、1 回のエッチング処理で製作した回折格子は、従来のエッチングによって作成したスケールと同等な形状を得ることが可能となり、回折格子スケールの低コスト化を実現した。
- (3) 受発光デバイスを搭載したセンサヘッドと、2 層膜法による低コストスケールで構成されるリニアエンコーダを試作し位置検出分解能を評価した結果、分解能 6.5nm を達成した。

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) John G. Webster: THE MEASUREMENT, INSTRUMENTATION, AND SENSORS HANDBOOK, CRC Press, (1998).
- 4) Bruce Horwitz, Diffractive techniques improve encoder performance, Laser Focus World, Oct (1996).
- 5) Y. Matsuzoe, T. Nakayama, N. Tsuji, K. Fujita, T. Yoshizawa: High performance absolute optical encoder using M-Code, Proc. SPIE, 4564, (2001) 280.
- 6) Yuji Matsuzoe, Nobuhiko Tsuji, Tomoharu Nakayama, Koetsu Fujita, Toru Yoshizawa: High-performance absolute rotary encoder using multitrack and M-code, Optical Engineering, 42, 1 (2003) 124.
- 7) Y. Matsuzoe, T. Saitoh: Optimization in optics design of encoder using interference fringe, Proc. SPIE 4902, (2002) 553.
- 8) 松添雄二, 小泉和裕, 斉藤哲也: スケール用回折格子の製作方法と評価, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2002) 212.