電磁誘導式および光電式アブソリュート リニアエンコーダの最新技術*

New Technology of Electromagnetic and Optical Absolute Linear Encoder

森 洋篤** 小野林季*** 夜久 亨***

Hiroatsu MORI, Kimitoshi ONO and Toru YAKU

Key words

linear encoder, absolute linear encoder, electromagnetic linear encoder, optical linear encoder, computer numerical control, linear motor, full closed feedback

1. はじめに

リニアエンコーダは、一定ピッチの目盛りをもつ直線状の「スケール」に対して、相対移動した「センサ」の変位量をデジタル量として検出するシステムである。例えば磁気式のリニアエンコーダでは、金属のスケール基材上に磁石あるいは磁極が所定のピッチで配置されており、センサが磁束という物理量の変動を検出することで移動量を検出できる。センサが検出しようとする物理量によってスケール基材上に配置される「目盛り」が異なり、静電容量式では平面電極が、電磁誘導式では平面コイルが、また、光電式では光学格子がそれぞれ配置されている。これら検出方式には各々特徴があるが、一般的には磁気式や電磁誘導式など磁界を用いるものは汚れに強く、電極やコイルなど平面的な構造の組み合わせでは安価に、また、光学格子を用いることで高精度・高分解能な特性が得られる¹⁾²⁾。

これらのリニアエンコーダは、精密工作機械、半導体や液晶分野などの各種製造装置、三次元/画像測定機といった計測装置などにおいて、ステージなど可動部の位置検出に広く利用されている。近年では、装置の高速化や高剛性を狙って、回転モータとボールねじの組み合わせに代えてリニアモータを採用する事例が増加しており、フルクローズドループ制御系における位置/速度の検出要素としてリニアエンコーダが欠かせないものになっている³⁾。

また、リニアエンコーダにはインクリメンタル (INC) リニアエンコーダとアブソリュート (ABS) リニアエンコーダの2種類がある。INC リニアエンコーダは、単位時間当たりの変位量をカウンタで積算して位置を求めている (相対位置計測)。このため、ある位置で電源を切断した後に電源を再投入すると、カウンタはゼロから計数を再開するために電源切断時の相対位置を見失ってしまう。これに対しては、電源投入時に装置の原点復帰を行う (例え

ば装置の移動リミットセンサまでセンサを移動させ、この位置を基準としてカウンタにプリセットする) などして装置の位置を確定する必要がある。このことから、スケール上の絶対位置を常時検出することが可能な ABS リニアエンコーダが必要とされている。

ABS リニアエンコーダは、1993 年に光電式と静電容量式を複合させたタイプが世界で初めて市場に投入され⁴⁾、2004 年には電磁誘導式の ABS リニアエンコーダ⁵⁾が発売されている。近年では各社からさまざまなタイプの ABS リニアエンコーダが販売されてきており活況を呈している^{6)~11)}。

本稿では、ABS リニアエンコーダのうち、筆者らの開発した電磁誘導式および光電式の2タイプについて検出原理とその性能について述べる。

2. 電磁誘導式 ABS リニアエンコーダの原理

リニアエンコーダが使用されている工作機械や製造装置では、切削油や潤滑油、または結露による水滴がスケールやセンサに汚れとして付着してしまうことがある。静電容量式や光電式のリニアエンコーダでは、その検出すべき物理量の性質から汚れに対して原理的に強いとはいえないため、汚れの侵入を防ぐ構造的な対策や、後述の撮像光学系による光電式リニアエンコーダの開発を進めてきた。

一方で、原理的に汚れに強い検出方式であれば、汚れに対する特別な配慮が不要となり、使用者の安心感も大きくなる。そこで筆者らは、電磁誘導の原理を用いた ABS リニアエンコーダを開発した。図1は、開発した電磁誘導式 ABS リニアエンコーダであり、ABS 検出長は最大 6 m

図1 電磁誘導式 ABS リニアエンコーダ

*原稿受付 平成 28 年 7 月 4 日

** (株) ミットヨウ研究開発本部商品開発部 (川崎市高津区坂戸 1-20-1)

*** (株) ミットヨウ研究開発本部デバイス技術開発部 (川崎市高津区坂戸 1-20-1)

図2 電磁誘導式リニアエンコーダの原理

表1 電磁誘導式 ABS リニアエンコーダの主な仕様

有効測定長	100～6000 (mm)
分解能	0.1 (μm)
指示精度 (20℃)	(5+5L/1000) (μm) L: 有効測定長 (mm)
最大応答速度	5 (m/s)

である。表1に主な仕様を示す。

図2に電磁誘導式の原理図を示す。図2(a)に示す例では、スケール部の二つのコイルは閉回路として結合し、センサ部の励磁/検出コイルと相互誘導で結合するような位置で対向させている。ここで図2(b)に示すように、励磁コイルに時間的に変化する電流 I_1 を流すと、対向するスケールコイルには発生した磁束を打ち消すように起電流 $I_2=I_3$ が流れる。この電流 I_3 によって生じた磁束 Φ は、対向する検出コイルに式(1)で表されるような誘導起電力 V_{out} を発生させる。

$$V_{out} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (\Phi \propto \mu \cdot I_2 \quad N=1) \quad (1)$$

(μ : センサとスケールに挟まれた空間の透磁率, N : コイルの巻数)

ここで、図2(c)のようにスケールの長手方向に等間隔 λ でスケールコイルが形成されていて、スケールとセンサのコイルが結合係数 k で誘導結合されている場合、センサ部がスケール長手方向に変位すると、式(2)で表されるような変位量 x で変化する誘導起電力 V_{out} が生じる。

$$V_{out}(x) = k \cdot V_{in} \cdot \sqrt{\frac{L_3}{L_1}} \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (2)$$

(V_{in} : 励磁電圧, L_1, L_3 : 自己インダクタンス)

このように、スケールとセンサの相対的な変位に応じて電磁結合が変わり、得られる電圧が正弦波状に変化することを利用して変位量を検出している。また、式(1)の透磁率 μ は空気と水、油などでは大きな差異がないことから、電磁誘導式は、原理的に水や油、磁性粉等の付着に対

図3 電磁誘導式検出部構成例

してロバストな変位検出方式となっている。

3. 電磁誘導式 ABS リニアエンコーダの変位検出

3.1 変位検出の高精度化

変位検出を高精度に行うためには、外部磁界の変動の影響を受けにくく、ひずみの小さい正弦波信号を得ることが重要である。図3は検出部のコイル構成例であるが、コイル構成の主なポイントは以下の3点である。

- ① センサ部の検出コイルを挟んだ両側に2本の励磁コイルと、それに対向する位置にスケールコイルを配置する。それぞれの励磁コイルに流す電流の向きを反転させることで、+側/−側に対称で、より正弦波に近い交番磁界がスケールコイルで生成される。
- ② 検出コイルを+/-のツイストペア化することで検出信号を差動化する。これにより、外部磁界の変化やギャップ変動などの外乱要因にロバストになる。
- ③ ツイストペアの検出コイルを複数並べてアレイ化することで平均化効果が得られ、パターンの部分的な欠陥や寸法変動に対する影響を低減する。

以上の検出コイルを、 $\lambda/4$ ずらした位置にもう1組形成すると、 X 方向の変位に伴い 90° 度位相の異なる二相正弦波信号 V_A, V_B が得られ、変位量 x は式(4)によって求められる。

$$V_A = A \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} x, \quad V_B = A \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \quad (A: \text{振幅}) \quad (3)$$

$$x = \frac{\lambda}{2\pi} \tan^{-1} \frac{V_B}{V_A} \quad (4)$$

得られた信号 V_A, V_B は、一般的に A/D コンバータで内挿することで変位検出の高分解能化が図られているが、分解能を向上させるためには、それに見合った内挿誤差に抑える必要がある。内挿回路では、理想的な二相正弦波が得られるとして処理を行っているが、実際の信号には振幅／中心電圧／位相誤差や 3 次以降の高調波ひずみ誤差が含まれ、内挿数が増えるにしたがってこの誤差は無視できなくなる¹²⁾。ここで、信号の補正を行うことが困難な 3 次の高調波成分をキャンセルするために、筆者らは検出コイルを $\lambda/3$ ずつシフトした 3 セット構成とし、 120° 度位相がずれた三相信号 S_a, S_b, S_c を得ている。この信号に振幅 B の 3 次高調波成分が含まれていたとすると、 S_a, S_b, S_c は式 (5) のように表される。

$$\begin{aligned} S_A &= A \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left(x + \frac{\lambda}{3} \right) + B \sin \frac{2\pi \cdot 3}{\lambda} \left(x + \frac{\lambda}{3} \right) \\ S_B &= A \sin \frac{2\pi}{\lambda} x + B \sin \frac{2\pi \cdot 3}{\lambda} x \\ S_C &= A \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left(x - \frac{\lambda}{3} \right) + B \sin \frac{2\pi \cdot 3}{\lambda} \left(x - \frac{\lambda}{3} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

この三相信号を使って式 (6) のように変換すると 3 次高調波の影響をキャンセルでき、式 (3)、式 (4) と同様に 90° 二相正弦波信号から変位量が求められる。

$$\begin{aligned} \frac{S_A - S_C}{\sqrt{3}} &= A \cdot \cos \frac{2\pi}{\lambda} x = V_A \\ \frac{2S_B - S_A - S_C}{3} &= A \cdot \sin \frac{2\pi}{\lambda} x = V_B \end{aligned} \quad (6)$$

3.2 絶対位置の検出

実際のコイルの構成は、絶対位置の検出を行うために、信号周期（波長）の異なる複数のコイルを備えている。図 1 で示したエンコーダでは、 λ_1 から λ_3 までわずかに波長が異なる FINE, MEDIUM, COARSE の 3 トラックのコイルで構成されている。この 3 トラックの周期信号から、さらに式 (7) で示す 3 種類の波長 $\lambda_{\text{FIN}}, \lambda_{\text{MED}}, \lambda_{\text{COA}}$ をもつ信号を生成する。ここで、各波長の波長比 $\lambda_{\text{FIN}} : \lambda_{\text{MED}} : \lambda_{\text{COA}}$ は $1 : K_M : K_C$ である。

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{FIN}} &= \lambda_1, \quad \lambda_{\text{MED}} = \frac{\lambda_2 \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = K_M \cdot \lambda_{\text{FIN}} \\ \lambda_{\text{COA}} &= \frac{\lambda_3 \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} = K_C \cdot K_M \cdot \lambda_{\text{FIN}} \end{aligned} \quad (7)$$

図 4 に絶対位置検出時の各トラックの位相関係を示す。

図中の〈検出位置〉での各トラックの位相を $\phi_{\text{FIN}}, \phi_{\text{MED}}, \phi_{\text{COA}}$ とし、FINE, MEDIUM トラックでの波数を nF, nM とすると、各々の波数は式 (8) で表される。

$$\begin{aligned} nF &= \text{Round}(K_M \cdot \phi_{\text{MED}} - \phi_{\text{FIN}}) \\ nM &= \text{Round}(K_C \cdot \phi_{\text{COA}} - \phi_{\text{MED}}) \end{aligned} \quad (8)$$

(Round は小数点以下を四捨五入した整数の意)

図 4 各トラックの位相関係

図 5 光電式 ABS リニアエンコーダ

表 2 光電式 ABS リニアエンコーダの主な仕様

有効測定長	100～12000 (mm)
分解能	1 (nm)
指示精度 (20℃)	10 (μm/m)
最大応答速度	8 (m/s)
スケールタイプ	メタルテープ (厚さ: 0.3 (mm)) (両面テープ仕様/両端固定仕様)

最終的に、この〈検出位置〉での絶対位置は式 (9) にて求められる。

$$\text{絶対位置} = (K_M \cdot nM + nF + \phi_{\text{FIN}}) \cdot \lambda_{\text{FIN}} \quad (9)$$

図 1 のエンコーダでは、 $\lambda_{\text{FIN}} = \lambda_1 = 3 \text{ mm}$, $K_M = 32$, $K_C = 64$ として最長で 6 m を超える範囲の ABS 検出を可能としている。

近年では、電磁誘導式においても分解能や内挿精度の向上が求められている。これに対しては、スケール素材のガラス化や信号補正方法の改良などで光電式に近いレベルにまで向上しており、今後の発展が期待できる。

4. 光電式 ABS リニアエンコーダの原理

前述の電磁誘導式 ABS リニアエンコーダは、本質的に汚れに強いエンコーダであるが、精密工作機械などから求められている分解能 1 nm には現時点では届いていない。

そこで筆者らは、撮像光学系を用いることで光電式としては高い汚れ耐性をもたせた ABS リニアエンコーダを開発した。図 5 は、開発した光電式 ABS リニアエンコーダ

図6 光学系構成図（斜視図）

図7 光学系構成図（X軸方向から見た断面図）

である。ABS検出長は最大12mであり、スケールは薄いテープ状としている。表2に主な仕様を示す。

開発した撮像光学系には、両側テレセントリック光学系を採用した。本光学系の構成図を図6および図7に示す。

光源（LED）から出た光は、下側のレンズを通してトラック面を照明する。トラックで反射した光は下側と上側のレンズで構成される両側テレセントリック光学系によって受光素子上にトラックパターンを結像している。スケールにはINCトラックとABSトラックが並列に配置されているので、この光学系を2系統配置している。

本光学系は、テレセントリック光学系であるので焦点深度が深く、スケールのうねりや受光素子のZ方向の取り付け位置の影響を大きく受けずにパターンを検出できる。このことは、機械へ取り付けときの姿勢許容拡大というメリットがある。

また、スケールを正反射する光のみを検出するので、スケール上に付着している油滴などによって曲がってしまう光を検出することがなく、その結果油滴などの影響を受けにくい。さらには、検出測長方向の検出視野を拡げることによってスケール面上の汚れの影響をさらに少なくしている。

5. 光電式ABSリニアエンコーダの変位検出

5.1 変位検出の高精度化

一般的に、レンズ光学系を通した結像パターンには高調波成分が含まれていて、それをそのまま内挿処理を行うと大きな誤差が生じてしまう。そこで、光学系のMTF（Modulation Transfer Function）を、図8に示すように、INCトラック上の光学格子（20μmピッチ）の高調波成分

図8 本テレセントリック光学系のMTF

図9 ABS検出アルゴリズム

を遮断する設計とした。

しかしながら、この設計はアパーチャの開口数を減らし、受光素子の検出光量を減らしてしまう。そこで、X軸方向から見たときの光路をレンズ光軸から外す非共軸構成とした。

前掲の図7に示すように、照明系と結像系の光路との間にわずかに角度がついているため、反射光学系でよく使用されるビームスプリッターを用いずに照明系と結像系の光路を分離できており、これによって受光光量の確保を図っている。

5.2 絶対位置の検出

筆者らは過去に、光電式と静電容量式を複合したABS検出長3mのABSリニアエンコーダを開発し⁴⁾、部品構成の簡単さもあって長年使用されている。しかしながら、ABS検出長に対する近年の要求は10mを超えてきているため、今回スケール上に配置されたランダムパターンを使う方法を開発した。

ABS検出アルゴリズムについて、処理フローを図9に示す。ABSトラック上のパターンは、テレセントリック

図 10 汚れ耐性の評価

光学系によって ABS 画像として検出され、設計値との相関演算をした結果得られる相関ピーク位置から ABS 検出を行っている。このとき、相関ピーク位置と 2 番目のピークの差（相関ピーク差）がゼロになると ABS 位置の誤検出をもたらす。

光電式リニアエンコーダの場合、汚れなどによって遮光されてしまうとスケールの情報を取得することができない。そこで、図 10 に示すようにスケール上に紙片を置くことで汚れ耐性を評価した。その結果、1.5 mm 幅の紙片が置かれた状態であっても十分な相関ピーク差があり、ABS 検出が可能であることを確認した。実際の使用にあたっては、設置環境下でのほこり、毛髪、または動作時の油飛沫などに対して十分な耐性をもっている。

6. お わ り に

絶対位置の検出機能をもつアブソリュート（ABS）リニアエンコーダのうち、電磁誘導式および光電式の 2 タイプについて紹介した。

リニアエンコーダを ABS 化することで、リニアモータの磁極検知システムや可動部の原点復帰動作が不要になるため、多数の可動軸をもつ装置やスケール 1 軸に対して複数のセンサを必要とする装置などでは、特に ABS リニアエンコーダの導入効果は高い。現在 ABS リニアエンコーダを活用されている各位、さらには今後採用を予定しておられる各位にとって本稿が参考になれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 梶谷誠：高分解能リニアスケール，精密工学会誌，**57**, 11 (1991) 1943.
- 2) 坂上征司，寺口幹也，富谷雅樹：リニアエンコーダにおける高性能化技術，精密工学会誌，**61**, 3 (1995) 355.
- 3) 堀内宰：リニアモータ，次世代精密位置決め技術，フジ・テクノシステム，(2000) 377.
- 4) 桐山哲郎，下村俊隆，I. Andermo，山口庸夫：アブソリュートリニアエンコーダの開発，精密工学会誌，**61**, 10 (1995) 1405.
- 5) 株式会社ミットヨ：誘導型位置検出装置，特許第 3366855 号ほか
- 6) <http://www.heidenhain.com/>
- 7) <http://www.magnescale.com/>
- 8) <http://www.nikon.co.jp/>
- 9) <http://www.numerikjena.de/>
- 10) <http://www.renishaw.com/>
- 11) <http://www.mitutoyo.co.jp/>
- 12) 坂上征司，桐山哲郎，荻原元徳：リニアエンコーダの高分解能化技術，計測と制御，**44**, 10 (2005) 662.

森 洋篤

1998 年東京農工大学大学院工学研究科機械システム工学専攻博士前期課程修了。現在、(株)ミットヨ研究開発本部商品開発部にてリニアエンコーダの商品開発に従事。

小野林季

2008 年東北大学大学院理学研究科化学専攻博士前期課程修了。現在、(株)ミットヨ研究開発本部デバイス技術開発部にてリニアエンコーダの要素技術開発に従事。

夜久 亨

1986 年電気通信大学電気通信学部電波通信学科卒業。現在、(株)ミットヨ研究開発本部デバイス技術開発部にてリニアエンコーダの要素技術開発に従事。