Fundamental Study on Developing Eddy Current Linear Encoders

S. Igarashi, T. Nonaka, F. Sato*, T. Sato**, and H. Matsuki**

Hachinohe National College of Technology, 16-1 Tamonoki Uwanotai, Hachinohe, Aomori 039-1192, Japan

*Graduate School of Engineering, Tohoku Univ., 6-6-05 Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

** Graduate School of Biomedical Engineering, Tohoku Univ., 6-6-05 Aramaki Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

This paper presents the results obtained from a fundamental study on eddy-current linear encoders. We propose eddy current linear encoders as a replacement for optical and magnetic encoders. Eddy current linear encoders are linear displacement and position sensors that are used in eddy-current tests. Linear displacement and position are detected by counting cracks on a scale from the change in the induced voltage of the detecting coil. They are expected to have unique advantages in reducing costs and enabling shields and gaps to be used between the detector and scale. We report experimental results on the output characteristics of an eddy current linear encoder and the characteristics of the gap between the coil and scale. The effects of the ferrite core, the effects of ferrite size, and the output characteristic of a 1-mm pitch scale obtained by simulation are also reported.

Key words: Liner encoder, eddy current, clacks on scale, detecting coil, excitation coil, magnetic ferrite

渦電流式リニアエンコーダの開発のための基礎的検討

五十嵐崇人・野中崇・佐藤文博*・佐藤忠邦**・松木英敏**

八戸工業高等専門学校, 青森県八戸市大字田面木字上野平 16-1 (〒039-1192)

*東北大学大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 (〒980-8579)

**東北大学大学院医工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 (〒980-8579)

1. はじめに

位置・変位検出センサの一つとしてリニアエンコーダが知られている。リニアエンコーダは、スケールと検出ヘッドにより物体の直線的な変位を読み取り、電気信号で出力し、移動距離に変換して変位や位置を検出するものである^{1) 2)}。既存のリニアエンコーダは主に光学式と磁気式に分類される。光学式は高分解能・高精度であるが、高価であり、粉塵や水滴などの遮蔽物により使用できなくなる。従来の磁気式はスケールの磁化パターンを磁気センサで読み取るため遮蔽物の影響を受けず、光学式に比べれば頑丈で廉価だが、分解能と精度では光学式に劣り、スケールと検出ヘッドを接近させなければならない。

リニアエンコーダの低価格化はあらゆる機械のコスト低下に繋がる。高性能なものよりもミリメートル程度の分解能のものが多用されるため、このタイプのリニアエンコーダが性能を維持しつつより廉価になることが望まれる。また、遮蔽物による影響を受けにくく、検出ヘッド・スケール間にギャップがあっても使用可能なリニアエンコーダがあれば、用途の拡大や、機械設計の自由度を高めることができると考えられる。

そこで本研究では、磁気式の新しい方式として、導体の非破壊探傷法である渦電流試験^{3)~5)}を応用した渦電流式リニアエンコーダを提案した。光学式に比べ遮蔽物の影響を受けにくく、従来の磁気式に比べ検出ヘッド・スケール間にギャップをもてるリニアエンコーダを期待できる。また、交流電源とコイル、検出回路、導体のスケールで構成できるので、低価格化も見込める。

本研究は、100 μm 程度の分解能を持ち、10 mm 程度のスケール・検出ヘッド間ギャップでも使用可能な渦電流式リニアエンコーダの開発を最終目標とする。本論文では基礎検討として、渦電流式リニアエンコーダを実現できる可能性を確認し、ギャップに対する特性、フェライトコアによる効果の検討を行った実験結果

と、フェライト長の影響、目盛間隔に対する検出コイルサイズの依存性についてシミュレーションにより予測した結果を報告する。

2. 原理

Fig. 1 に渦電流式リニアエンコーダの原理図を示す。スケールとして、位置が予め分かっている傷を複数つけた導体を用意する。このスケールに励磁コイルにより交番磁界を加えると渦電流が発生し、同時に渦電流による磁界が生じる。コイルを固定して導体を一次元で移動、あるいは導体を固定してコイルを移動させると、移動に伴いコイルの前を傷が通過し、それにより渦電流分布が変化し、同時に渦電流による磁界も変化する。この磁界変化を検出コイルの誘起電圧変化として読み取る。検出コイルには差動コイルを用いる。差動コイルには励磁磁界をキャンセルして渦電流による磁界変化のみを検出できるという利点がある。検出コイルの電圧変化から、コイルの前を通過した傷の数とわかる。傷の位置は予め分かっているため、通過した傷の数をカウントすることで導体の変位が分かり、リニアエンコーダへの応用ができる。

Fig. 1 Principle underlying eddy current linear encoder.

3. 実験による検討

3.1 実験方法

基礎検討として、渦電流式リニアエンコーダの実現可能性を実験により確認した。Fig. 2に実験概要図を示す。励磁コイルの中心軸上に検出コイルを挿入し、目盛表面に対し垂直方向の励磁磁界が大きくなるように目盛の上方にコイルを配置する。 d_{e-s} は励磁コイル-スケール間ギャップ、 d_{d-s} は検出コイル-スケール間ギャップである。交流電源から励磁コイルに100 mA, 100 kHzの励磁電流を流して励磁し、目盛上に渦電流を発生させる。目盛を X 方向に移動させ、傷により変化する渦電流磁界を検出コイルの誘起電圧変化としてロックインアンプで測定する。1つ目の傷が検出コイルの中心を通過するときの目盛の位置を $X=0$ mmとし、目盛の移動距離に対する検出コイルの誘起電圧変化を測定する。

3.2 出力特性

励磁コイルは、内径10 mm、長さ12 mm、50 turn、素線径0.2 mmのソレノイドコイルとした。検出コイルは内径2 mm、長さ3 mm、巻数20 turn、素線径0.1 mmのソレノイドコイルを2つ差動接続した。スケールは、縦10 mm、横70 mmのプリント基板を加工し、目盛の間隔が10, 5, 2 mmの3種類を作製した。目盛となる傷はプリント基板の銅を完全に分離するようにつけられ、傷の幅は0.5 mmである。 d_{e-s} , d_{d-s} は共に1 mmとして、それぞれのスケールで実験を行った。

Fig. 3に目盛間隔10 mm, 5 mmの場合の出力特性を示す。いずれのスケールでも目盛の通過に伴い誘起電圧が規則的に変化していることがわかる。よって、電圧変化から移動距離がわかるため、渦電流試験をリニアエンコーダに応用できる可能性が十分にあることを確認できた。また、目盛間隔に応じて分解能が向上するが誘起電圧が低下することがわかる。しかしながら、目盛間隔2 mmの場合はFig. 4のように、規則的な波形が得られなかった。

3.3 コイル-スケール間ギャップに対する出力特性

コイル-スケール間にギャップを持たせられることが渦電流式の特長の一つになると考えられ、ギャップに対する出力特性の変化を確認する。 d_{e-s} を変化させて d_{d-s} は0 mmで固定させた場合、 d_{e-s} は0 mmで固定し d_{d-s} を変化させた場合で測定した。目盛は10 mm間隔のものをを用い、その他の条件は3.2節と同様とした。

測定した結果、 d_{e-s} は26 mmまで、 d_{d-s} は10 mmまで規則性が保たれた。ギャップによる出力の減衰をFig. 5に示す。縦軸はギャップ0 mmにおける出力電圧ピークを1で規格化した。励磁コイルとのギャップによる電圧減衰の原因は、ギャップによる励磁磁界の減衰で渦電流が小さくなるためである。検出コイルとのギャップによる減衰の方が激しいのは、渦電流磁界が減衰することに加え、差動コイル間の鎖交磁束差が小さくなることが原因であると考えられる。

従来の磁気式ではギャップは数百 μ mであったため、10 mm以上のギャップでも検出できたことは渦電流式の特長を示している。出力特性の規則性が保たれるギャップが大きく、かつギャップによる誘起電圧の減衰が小さいエンコーダが望まれる。

3.4 フェライトコアによる効果の検討

目盛間隔による出力電圧の低下を補うために、検出コイルへのフェライトコアの挿入を検討した。隣接して接続された差動コイルにおいて、フェライトの磁束集中の振る舞いによっては鎖交磁束密度に差が生じにくくなる可能性も考えられる。したがって、フェライトコアによる効果を確認する必要がある。

Fig. 2 Setup for experiment.

Fig. 3 Output characteristics on 5 and 10-mm scales.

Fig. 4 Output characteristic on 2-mm scale.

Fig. 5 Characteristics of gap between coil and scale.

検出コイルはFig. 6のように、 $0.5 \times 0.5 \times 10 \text{ mm}^3$ のMn-Zn フェライト(比透磁率2300)の端に、長さ3 mm, 巻数20 turn, 素線径0.1 mmのコイルを巻いたものを並べて差動接続する。比較のため、同形状の空心の検出コイルも作製した。励磁側の条件は3.2節と同様とし、目盛の間隔10 mmのスケールを用い、 d_{es} , d_{ds} は共に1 mmとして、作製した検出コイルで出力特性を調べた。

Fig. 7に実験結果を示す。フェライトコアの挿入により、電圧変化の規則性は変わらずに電圧が約33倍に向上した。よって、検出差動コイルへのフェライトコア挿入は、目盛が細くなり分解能を向上させたときの誘起電圧の低下を抑えるのに有効である。

また、Fig. 3とFig. 7から、検出コイルが細くなることで出力電圧が大幅に低下することがわかる。原因として、検出コイルが細くなることによるコイル断面積の低下と、差動コイル軸間距離が近くなったことが考えられる。差動コイル軸間距離が極端に狭まると差動コイル間の磁束差が小さくなり、出力電圧が低下することが知られている。検出コイルが細くなることで差動コイル軸間距離が狭まるので、これによる影響も受けることで断面積比以上に出力電圧が低下したと考えることができる。

4. シミュレーションによる予測

4.1 シミュレーションの検討手法

3章で示したように、スケールとコイルの設計で出力特性が決まる。しかしながら、考え得る全てのスケールとコイルを作製し、実験を行うのは困難である。そこで、電磁界シミュレータMaxwell-3Dによりスケールとコイルの依存性を予測することにした。シミュレーションで得られる磁束密度分布を元に、検出コイルに鎖交する磁束差から誘起電圧を計算することで出力特性を得る。

Fig. 6 Detecting coil using ferrite core.

Fig. 7 Comparison of output characteristics for ferrite and air cores.

3.4節の実験結果(Fig. 7)と同様のモデルをシミュレーションした結果の比較をFig. 8とFig. 9に示す。完全に一致はしないものの規則的な電圧変化を確認でき、特に傷付近での電圧変化はほとんど一致している。また、実験ではフェライト挿入により電圧が約33倍になったのに対し、シミュレーションでは約28倍となった。したがって、シミュレーションによりスケールやコイルなどのパラメータ変更による傾向の予測には利用できると考えられる。

4.2 フェライト長による影響

コイルの巻数一定におけるフェライト長に対する出力特性の変化をシミュレーションにより予測した。目盛の間隔を10 mmとした実験と同じモデルを作成し、検出コイルはFig. 6と同様のものでフェライト長を3~30 mmで変化させて、出力特性を調べた。フェライトの比透磁率は2300とした。

フェライト長と出力ピークの間関係をFig. 10に示す。フェライト長0 mmではフェライトに検出コイルを巻くことができないとして、誘起電圧を0 Vとしてシミュレーションによる予測値と破線で結んでいる。フェライトが長いほど実効透磁率が大きくなるため出力電圧は大きくなるが、必要以上に長くしても効果は得られない。最適なフェライトのサイズが何によって決まるのか、今後更に検討する必要がある。

Fig. 8 Comparison of output characteristics on ferrite core for experiment and simulation.

Fig. 9 Comparison of output characteristics on air core for experiment and simulation.

Fig. 10 Differential voltage with respect to length of ferrite.

Fig. 11 Output characteristics with respect to size of detecting coil on 1-mm scale.

Fig. 12 Output characteristics with respect to gap between coil and 1-mm scale.

4.3 目盛間隔に対する検出コイルサイズの依存性

3.2節において2 mm 間隔のスケールでは規則的な出力特性が得られなかった。そこで、目盛間隔に対してどのように検出コイルサイズが依存するのか予測した。

スケールは目盛間隔1 mm、傷の幅0.1 mmとし、Fig. 6のような検出コイルでフェライトの太さ及び検出コイルの内径を0.1, 0.4, 0.5, 1 mmとして出力特性を調べた。フェ

ライトの比透磁率は2300, d_{e-s} と d_{d-s} は0.1 mmとした。

Fig. 11に各検出コイルの出力特性を示す。太さ0.4 mm以下の検出コイルで目盛間隔に応じた規則的な出力特性が得られた。0.5 mm以上で規則的な波形が得られないのは、検出コイルが複数の傷からの影響を同時に受けるためだと考えられる。よって、目盛間隔に応じた規則的な出力特性を得るには、検出コイル全体が目盛の間隔以下のサイズである必要がある。

また、太さ0.4 mmの検出コイルの場合について、 d_{e-s} , d_{d-s} を変化させた。その結果、Fig. 12のように d_{e-s} 及び d_{d-s} が0.3 mmまでは規則的な出力特性が得られたが、ギャップ0.4 mm以上では検出コイルの磁束密度差がほとんどなくなり電圧変化が不規則になった。3.3節で、10 mmの目盛間隔ではギャップ10 mmまで規則的な出力特性が得られたことから、許容されるギャップは目盛間隔に依存すると言える。したがって、これ以上目盛を細かくするのはギャップを持たせる点、コイルやスケールに精密な加工技術を要する点から難しいと考えられる。

5. まとめ

渦電流式リニアエンコーダを提案し、実験により、実現の可能性と、10 mmの目盛間隔ではギャップが10 mmでも検出できることを確認した。また、改善のためにシミュレーションによる予測を行い、フェライト長による影響と、目盛間隔と検出コイルサイズの依存性を予測した。その結果、許容されるギャップと目盛間隔に依存性があることがわかり、目盛間隔だけでの分解能向上では、目標とする分解能とギャップの達成は難しいと言える。

したがって今後は、分解能とギャップの両立のために、目盛間隔以外のアプローチをとる。一般に、エンコーダは90°の位相差を持つ2つの検出ヘッドのデジタル信号を通信することで、目盛間隔以上に分解能を向上させている。渦電流式では2つの検出コイルの干渉などが予想されるが、渦電流式にデジタル信号の通信を適用する検討を進める。また、エンコーダの性能を向上できるような新しい形状のスケールやコイルについて検討し、設計手法を確立する。

References

- 1) The Japan Society for Precision Engineering Technical Committee of Ultra Precision Positioning: Jisedai seimitsu ichigime gijutsu (in Japanese), pp. 80-81,128,404-418, 431-438 (Fuji Techno System, Tokyo, 2000).
- 2) The Robot Society of Japan: Robotics Handbook, pp. 61-69 (Corona Publishing CO., LTD., Tokyo, 1990).
- 3) H. Itou, M. Selizawa, T. Hiroshima, H. Hoshikawa, S. Miyoshi, T. Mori, M. Yoshikawa: Karyutansyousiken (in Japanese), The Japanese Society for Non-Destructive Inspection, pp. 40-71 (1977).
- 4) T. Nonaka, H. Yoshimi, F. Sato, H. Matsuki, and T. Sato: *IEEE Trans. on Magn.*, **39**, pp. 3346-3348 (2003).
- 5) K. Nakamura, S. Yamada, M. Iwahara, and T. Taniguchi: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **27**, pp.393-396 (2003)

2010年10月20日受理, 2011年1月17日採録