

コイル形状による非接触型ポジションセンサの直線性向上

Linearity Improvement of Non-Contact Position Sensor by Optimizing Coil Shape

丹羽 正久* ・ 西田 結希子* ・ 岡田 邦孝* ・ 太田 智浩**
Masahisa Niwa Yukiko Nishida Kunitaka Okada Tomohiro Ohta

コイルを用いた非接触ポジションセンサにおいて、直動型では検出コイル端部での追加巻線により測定範囲端部の直線性を向上させ、回転型では基板に形成したパターンコイルの内側ループをストロークの途中で折り返すことにより測定範囲中央部の直線性を向上させた。

これにより、巻線部長 30 mm の直動型では 21 mm から 26.5 mm に、開き角度 90° の扇形コイルの回転型では 25° から 60° に直線性が良好な検出範囲を拡大できる。

In a linear-type and rotary-type of non-contact position sensor using detecting coil, the linearity of impedance vs. displacement characteristics has been improved. In the linear-type sensor, the linearity of the end of the measurement range has been improved by adding winding loop to the coil end. In the rotary-type, the linearity of the center of the measurement range has been improved by folding back internal loops of the coil formed on the sensor substrate.

These improvements expand the measurement range with good linearity from 21 mm to 26.5 mm for a linear motion type with 30 mm winding length, and from 25° to 60° for a rotary type sensor with fan-shape coil opening to 90° degrees.

1. ま え が き

近年、自動車の電子制御化がますます進展してきている。電子スロットルを始めとして、操作装置から走行系装置への結合が機械的なリンクではなく、電気信号によって行われるパイワイア化があらゆる車種において普及してきている。そして、各種操作装置における入力量や走行系装置における駆動量の検出用として多数のポジションセンサが使用されている。

一方、パイワイア制御の内容が高度になるにつれ、使用される電子部品やセンサにはより高い信頼性が要求されてきている。そのため、接点や接触子を用いていた従来の接触型のポジションセンサは接触信頼性に問題があることから、非接触型へと置換えが進んでいる。

現在、非接触ポジションセンサとしてもっとも普及しているのは、ホール素子と処理回路とを一体化したホール IC と永久磁石を用いるホール IC 方式であり、ペダル踏量検出やスロットル開度検出においてすでに十分な実績を有している。ただし、角度検出性能に優れ、高温にも耐えるという長所がある一方で、表 1 に示すような短所もある。

そのため、用途によっては別の方式の非接触ポジションセンサが要望されている。とくに、直動変位を回転変位に変換することなく直接検出したいという要望は強い。

表 1 ホール IC 方式センサの短所

分類	短所	原因
性能	直動変位の検出が困難	適切な磁気回路なし
	小角度時の分解能が不足	回転型磁気回路の特性
構造	薄型化が困難	磁気回路が厚い
	質量が大	磁気部材が鉄系金属
その他	鉄粉が付着	永久磁石を使用
	外部磁界の影響大	ホール素子の特性
	レアメタルを使用	磁石材が Sm-Co

これまで筆者らは、コイルを用いた非接触ポジションセンサの開発を行ってきた。コイル方式は検出部の設計自由度が大きく、ホール IC 方式センサの短所を補うことができる。また直動型を容易に構成可能であることに加え、検出コイルさえ取り替えれば回転型も同一原理で構成でき、しかもホール IC 方式よりも薄型化が可能である。直動型

* 制御機器本部 制御技術応用研究所 Automation Controls Technology Application Development Laboratory, Automation Controls Business Unit

** パナソニック電工解析センター（株） Panasonic Electric Works Analysis Center Co., Ltd.

と回転型それぞれにおいて検出コイルのインピーダンスが変位に対して比例的に変化すれば、同一の信号処理回路を用いて多様な非接触ポジションセンサを構成することができる。

2. 直動型非接触ポジションセンサ

2.1 基本構造

当社の直動型ポジションセンサの検出部の基本構造を図1に示す。筒状に巻線された検出コイルの外側にアルミニウム金属パイプが装着されており、センサへの入力に応じて変位 x が変化する。コイルボbinは非磁性体の樹脂で、金属パイプと検出コイルの重なりが大きいほど、金属パイプに流れるうず電流によって検出コイルのインピーダンス（インダクタンス）は小さくなる。

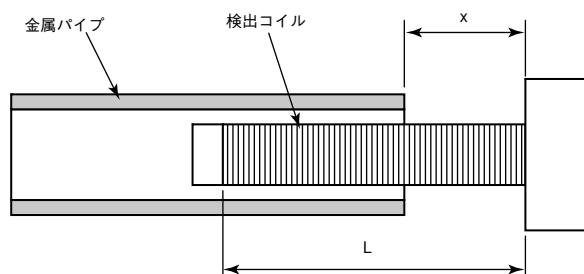


図1 直動型ポジションセンサの基本構造

2.2 従来型検出コイルの課題

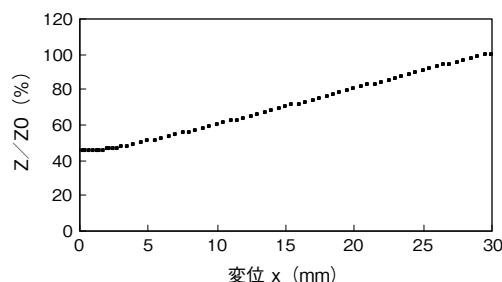
図2(a)に図1のような従来型検出コイルのインピーダンス変位特性を示す。検出コイルの巻線部長さ L は30 mmのサンプルを用いている。グラフの縦軸は $x = 30$ mmのインピーダンス Z_0 で正規化したインピーダンスの相対値である。図2(b)は図2(a)のインピーダンス変位特性の微分値であり、特性がフラットなほど直線性が良い。 $x = 7 \sim 28$ mmの範囲ではフラットな特性となっているので、この範囲にストロークを設定すれば直線性の良好な非接触ポジションセンサを実現できる。

しかし、 $x = 0 \sim 7$ mmの範囲では微分値の勾配が大きい。すなわち、端部効果により直線性が悪化するため、ストローク範囲に含めるには適していない。つまり、巻線部長 L は30 mmであるが、実際に使用可能な範囲は20 mm程度しかないということになる。たとえばストローク25 mmの非接触ポジションセンサを実現するためには、 L をさらに5 mm延長すれば可能であるが、センサの全長も大きくなるため望ましくない。したがって、 L に対して直線性の良好な範囲を相対的に大きくすることが課題となる。

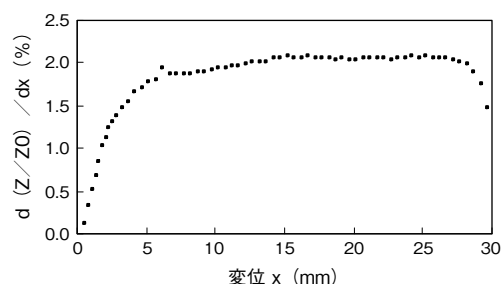
2.3 追加巻線型コイルによる直線性改善

図3に端部効果改善の方策を示す。従来型検出コイルの端部（ $x = 0$ mm側）に追加巻線することによって、巻線密度を増加させるものである。

筆者らは、コイル方式のポジションセンサの検出部の検討に電磁気解析法を開発してきており^{1), 2)}、解析結果と実測結果の差は数%程度であることがわかっている。また直線性などの相対的な解析では、さらに高精度となる。電磁気解析法は理論的根拠を与えるとともに、ばらつき解析などにも効果的であることから、この方法を用いて端部巻線密度増加による直線性の改善効果を検証する。



(a) インピーダンス変位特性



(b) インピーダンス微分値

図2 従来型検出コイルの特性

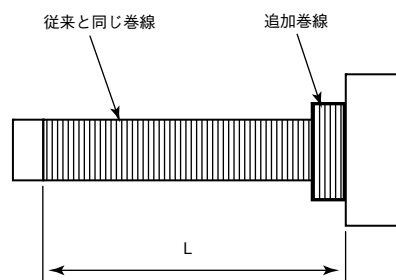


図3 追加巻線型検出コイル

図4(a)に従来型検出コイルの解析モデル、図4(b)に追加巻線型検出コイルの解析モデルを示す。解析のメッシュは、表皮深さに比べて十分細かくしている。

図5(a)は電磁気解析により得られたインピーダンスの変位特性、図5(b)はその微分値を、それぞれ追加巻線数をパラメータとして示している。解析モデルの検出コイルでは12ターンの追加巻線が最適であり、ポジションセンサとして使用可能な範囲は直線性が良好な $x = 1.5 \sim 28$ mmであることがわかる。なお、最適な追加巻線数は検出コイルや金属パイプの形状と寸法によって変るが、端部への追加巻線によってポジションセンサの電氣的ストローク区間として設定可能な範囲が L に対して相対的に拡大す

る現象は同じである。

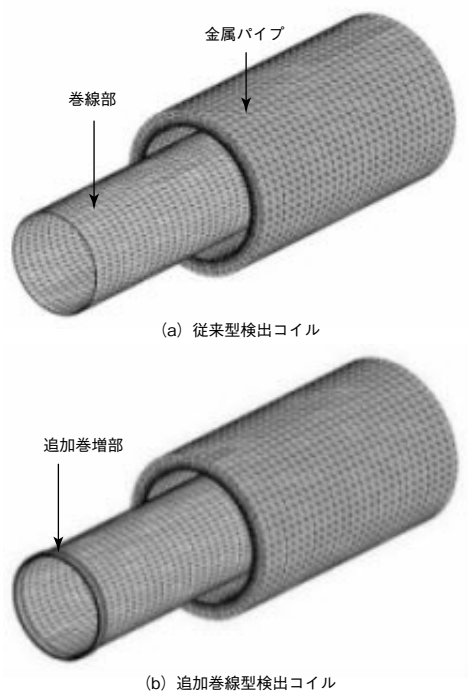


図4 直動型コイルの解析モデル

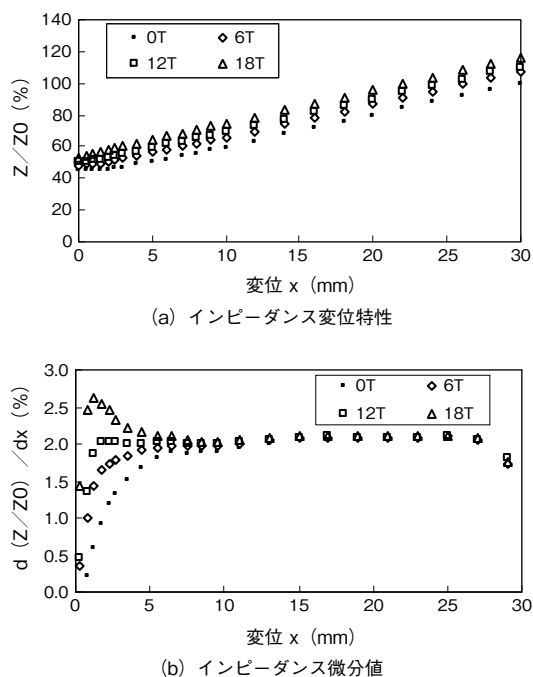


図5 追加巻線型コイルの特性(解析値)

2.4 試作品による検証

2.3節における電磁気解析結果を試作品の実測により検証する。サンプルは従来型検出コイルの端部に12ターン追加巻線したコイルを用いる。

図6に従来型および追加巻線型の検出コイルにおけるインピーダンス微分値の解析値と実測値を示す。解析値と実測値とは良く一致し、端部への追加巻線によって直線性が

向上することが確認できる。

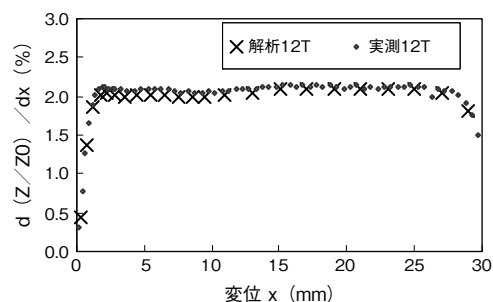


図6 インピーダンス微分値の解析値と実測値の比較

3. 回転型非接触ポジションセンサ

3.1 基本構造

回転型非接触ポジションセンサの検出部の概要を図7(a)に示す。

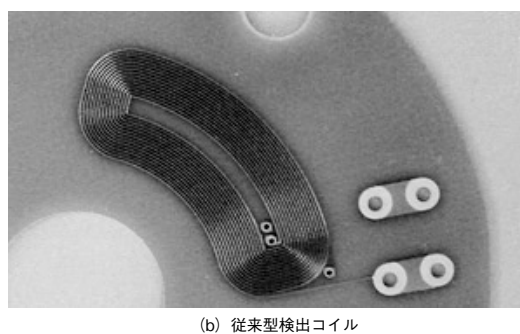
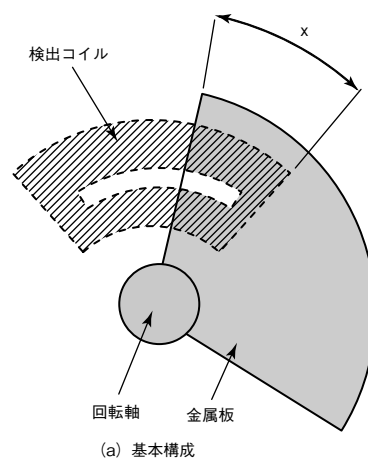
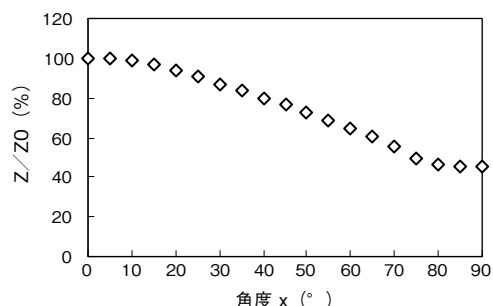


図7 回転型ポジションセンサ検出部の基本構造

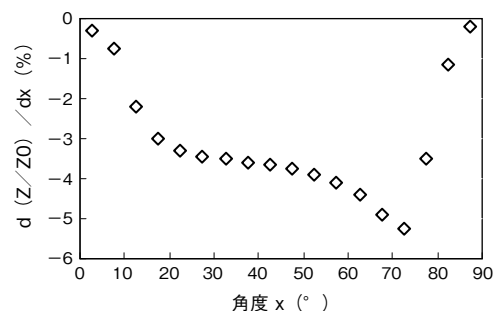
これは、プリント基板上にパターン形成された検出コイルと、それに対向して相対回転する金属板で構成されており、センサ全体としては薄型化できることが特徴である。検出コイルは扇形状をしている。金属板は回転軸に連結されており、センサへの入力に応じて角度 x が変化する。金属板と検出コイルの重なりが大きいほど、金属板に流れるうず電流によって検出コイルのインピーダンスは小さくなる。図7(b)は従来型検出コイルの写真である。

3.2 従来型検出コイルの課題

図8 (a) に、従来型検出コイルのインピーダンス角度特性を示す。グラフの縦軸は $x = 0^\circ$ のインピーダンス Z_0 で正規化したインピーダンスの相対値である。図8 (b) はその微分値である。直動型と異なり、電氣的ストローク区間中央部においても微分値にフラットな範囲が少ない ($x = 25 \sim 50^\circ$) ことがわかる。



(a) インピーダンス変位特性



(b) インピーダンス微分値

図8 従来型検出コイルの特性

この理由として、直動タイプではうず電流経路が金属パイプ断面そのもので変位 x の値にかかわらず不変であるのに対し、回転型ではうず電流経路が検出コイルと金属板の重なり部分の周縁部であるため角度 x に依存して変ることが挙げられる。さらに、最外径と最内径の差である検出コイルの幅が電氣的ストローク区間に対して大きく、端部効果が出やすいことも一因と考えられる。以上のことから、図7 (b) の検出コイルを使用した回転型非接触ポジションセンサでは高精度を実現するのは困難であり、インピーダンスの微分値にフラット部分を作り出すことが課題である。

3.3 ループ途中折返し型検出コイルによる直線性改良

インピーダンスの微分値がフラットな範囲を作るためには、単位角度当りのインピーダンスの増分を従来のパターン形状での増分から意図的に変更する必要がある。たとえば、検出コイルや金属板の幅を角度方向に変化させるように外形を変える方法が考えられる。しかし、従来の形状と同程度のインピーダンスの変化量を確保するためにはセンサ外形の増大を伴うので、この方法は好ましくない。

そこで、検出コイルの外形は従来のままで電氣的ストローク区間中央部の直線性を改善するパターンコイルを提案する (図9)。検出コイルの外形寸法は従来型と同じであるが、内側のループを途中で折り返してループを閉じている。折返し角度ピッチは一定としており、ピッチが小さいほど折り返すループの本数は多くなる。

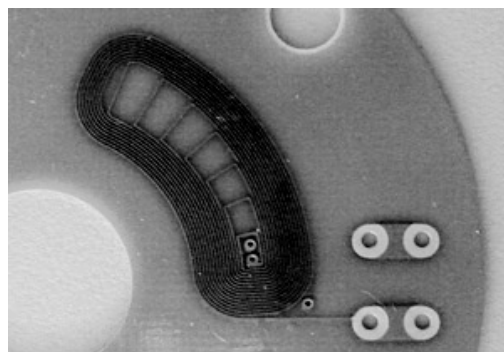
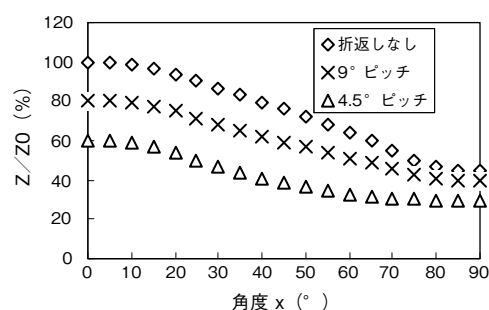


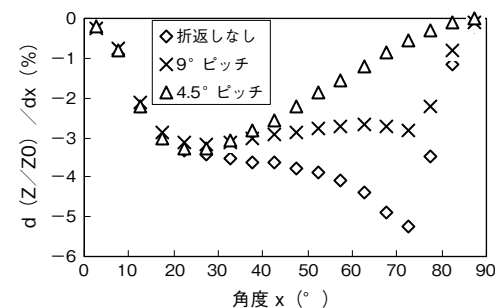
図9 ループ途中折返し型検出コイル

図9 のような検出コイルと金属板との電磁気解析は不可能ではないが、解析モデルが複雑になり、また膨大な時間を要するため、試作品の実測により効果を確認する。

図10 (a) はループ折返しをした場合のインピーダンスの角度特性、図10 (b) はその微分値を、それぞれ折返しの角度ピッチをパラメータとして示している (図10)。



(a) インピーダンス変位特性



(b) インピーダンス微分値

図10 ループ途中折返し型コイルの特性

この図では 9° ピッチの折返しが最適であり、 $x = 15 \sim 75^\circ$ の範囲においてフラットな微分特性を示している。なお、最適な角度ピッチは検出コイル形状や巻数によって変

化するが、ループ折返しによって回転型非接触ポジションセンサの電気的ストローク区間として設定可能な範囲が拡大する現象は同じである。

3.4 ループ折返し部の微視的な直線性の検証

3.3節でループ折返しによって直線性を改善できることを述べたが、ループ折返し部で微分特性に大きな段差がないことを検証する。図11は、折返し角度ピッチ 9° の検出コイルの $x = 22 \sim 47^\circ$ の範囲について、 0.5° きざみで測定した結果のインピーダンス微分値である。

実験結果から、この区間に含まれている三つの折返し部($x = 28^\circ, 37^\circ, 46^\circ$)において、微分値の変化率が大きくなっていることが認められるものの、明瞭な段差変化ではなく、そのレベルは小さいことがわかる。したがって、実用上問題になることはないと思われる。

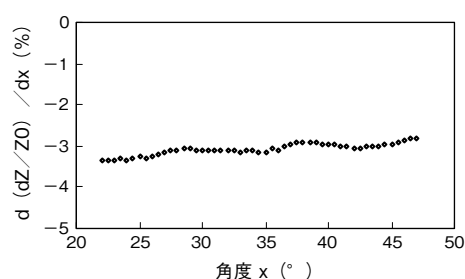


図11 ループ途中折返し型コイルのインピーダンス微分値(ファインピッチ)

4. あとがき

コイルを用いた非接触ポジションセンサにおいて、直動型では検出コイル端部での追加巻線により測定範囲端部の直線性を向上させ、回転型では基板に形成したパターンコイルの内側ループをストロークの途中で折り返すことにより測定範囲中央部の直線性を向上させた。

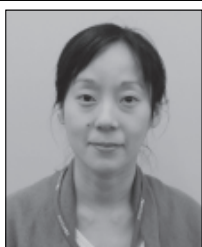
*参考文献

- 1) 太田 智浩, 平田 勝弘, 光武 義雄, 河瀬 順洋: 高周波磁気方式角度センサのインピーダンス特性解析, IEEJ Trans. IA, Vol. 125, No. 5, p. 426-431 (2005)
- 2) 梁 承浩, 平田 勝弘, 太田 智浩, 光武 義雄, 河瀬 順洋: 非接触磁気方式ポジションセンサのインピーダンス特性解析, IEEJ Trans. SM, Vol. 128, No. 11, p. 435-441 (2008)

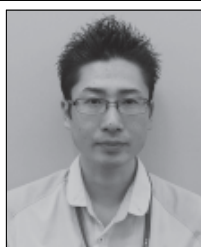
◆執筆者紹介



丹羽 正久
制御技術応用研究所



西田 結希子
制御技術応用研究所



岡田 邦孝
制御技術応用研究所



太田 智浩
パナソニック電工解析センター(株)
工学博士

これにより、巻線部長 30 mm の直動型では 21 mm から 26.5 mm に、開き角度 90° の扇形コイルの回転型では 25° から 60° に直線性が良好な検出範囲を拡大できた。

これらの改善によって、直動型、回転型のそれぞれについて同一検出原理、同一信号処理回路で高精度化された非接触ポジションセンサを提供することができる。