

薄型な高精度フレキシブル静電リニアエンコーダの研究 (第2報)

田中 泰斗、今井 智彦、田中 等幸

Study on high precision angle measuring system using thin and flexible electrostatic linear encoder (II)

Taito Tanaka, Tomohiko Imai and Tomoyuki Tanaka

静電リニアエンコーダはセンサ素子としてフレキシブルプリント基板を使用しており、一般的に使用されている光学式や磁気式のリニアエンコーダと異なり、薄型・柔軟という特徴を有している。本研究では、静電リニアエンコーダを利用した円弧状摺動面の回転角計測システムの開発を目的としており、これまでに静電リニアエンコーダを動作させるための基本回路を試作し、試作回路による回転角の測定精度について評価を行った。本年度は、実利用の観点から静電リニアエンコーダシステムを構築するため、昨年度までの研究で得られた知見を元に3相交流発生回路、矩形波変換回路及び位相差計測回路からなる汎用的なシステムを新たに試作し、試作システムにおいても同等の測定精度が得られることを確認した。

1. はじめに

機械部品の高精度化や生産システムの自動化の流れのなか、各種位置決めセンサの市場規模は増加する傾向にあり、今後も産業上の重要度は増していくと予想される。

本研究で試作する静電リニアエンコーダは、移動子と固定子からなる一対のフレキシブルプリント基板フィルム (FPC フィルム) 間に生じる静電容量の変化を検出することにより、フィルムの相対的な位置関係を計測するものである。また、センサとして使用する FPC フィルムは、薄型・柔軟であるため、平面における位置計測のみならず、これまで各種位置決めセンサの設置が困難であった曲面や円弧状の摺動面などでの利用が期待できる¹⁾。

これまで筆者らは、円弧状の摺動面を模した実験装置を試作し、静電リニアエンコーダを安定動作させるために必要な移動子と固定子の接触圧や回転角の測定精度など、基本的な動作について評価を行ってきた²⁾³⁾。

本年度は、静電リニアエンコーダシステムの実利用に向け、これまでに得た知見をもとに新たに周辺回路の試作を行い、動作を確認した。なお、静電リニアエンコーダの動作原理や角度計測への適用性等に関する詳細については、参考文献を参照願いたい。

2. 静電リニアエンコーダシステム

2.1 全体構成

昨年度までに試作した静電リニアエンコーダシステムでは、任意波形発生装置やマルチファンクションフィルタ、安定化電源など比較的高価な機器を利用し、各種動作の確認や円弧状摺動面における回転角測定精度の評価などを実施してきた。本研究の最終目的は、静電リニアエンコーダを製造現場や加工機械、各種計測・制御システム等で利用可能な汎用機器とすることにあるため、実利用の観点から安価なシステムを構成する必要がある。そこで、これまでの知見を元に汎用電子デバイスとマイコンを用いた3相交流発生回路、矩形波変換回路及び位相差計測回路を試作した。

図1に試作した静電リニアエンコーダシステムの全体構成を示す。本研究では、静電リニアエンコーダを円弧状摺動面に適用することを目的としているが、これまでの研究において、平面や円弧など FPC フィルムの設置条件にかかわらず静電リニアエンコーダが動作することを確認しており、図では簡略化のため静電リニアエンコーダを平面に設置している。

2.2 3相交流発生回路

3相交流発生回路は、静電リニアエンコーダの固定子

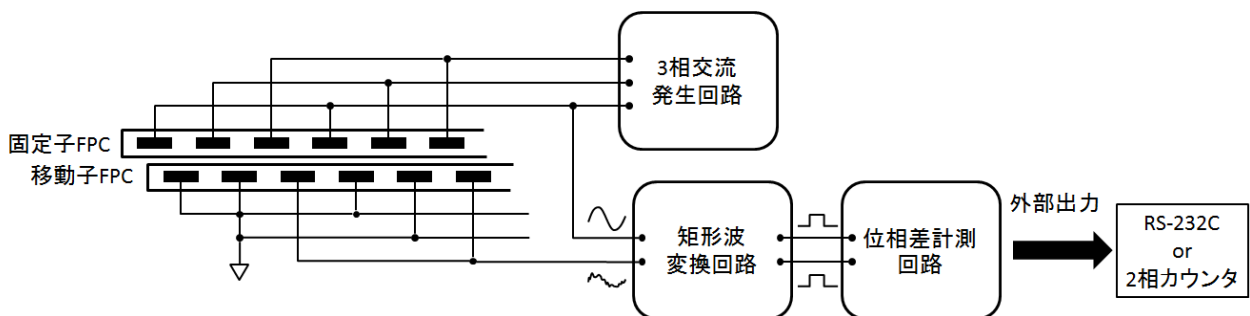


図1 静電リニアエンコーダシステムの全体構成

に信号を供給するための回路である。移動子及び固定子として使用する FPC フィルムの静電容量は電極間距離や面積の組み合わせにより異なるため、様々な条件下で静電リニアエンコーダを安定的に動作させるためには、周波数や出力電圧を自由に調整可能な 3 相交流発生回路が必要となる。そこで、ダイレクト・デジタル・シンセサイザ (ANALOG DEVICES 製 AD9834、以下、DDS) を利用した 3 相交流発生回路を試作した。図 2 及び表 1 に試作した 3 相交流発生回路の構成及び主要スペックを示す。試作回路では、パソコンなど上位システムからの命令により 3 相交流の周波数と位相を任意に変化させることを可能とするため、ARM マイコン (NXP セミコンダクターズ製 LPC1114) が上位システムからの命令を受け取り、バス接続された 3 つの DDS を SPI 通信によりコントロールする構成とした。試作回路では、ARM から各 DDS に対して信号出力命令を同時送信することにより、正確な位相差の正弦波を出力することができる。また、上位システムから指令が無い場合は、20kHz の 3 相交流を発生させることとしている。

DDS から出力される電圧は、600mV_{p-p} 程度であり、DDS の動作原理に基づくスプリアスが生じる。このため、試作回路ではローパスフィルタ (LPF) でスプリアスを除去するとともに、オペアンプを用いた 1 次アクティブ LPF により静電リニアエンコーダの駆動に不要な高周波雑音を除去した。また、3 相交流の出力電圧は、1 次アクティブ LPF の帰還回路に設置したボリュームにより調整可能である。

2. 3 矩形波変換回路

静電リニアエンコーダシステムは、移動子電流と固定子電圧の位相差を検出することにより、移動子と固定子の相対位置関係を計測する。移動子と固定子から得られる正弦波と同期した矩形波を得るため、図 3 に示す矩形波変換回路を試作した。矩形波変換回路の基本構成は

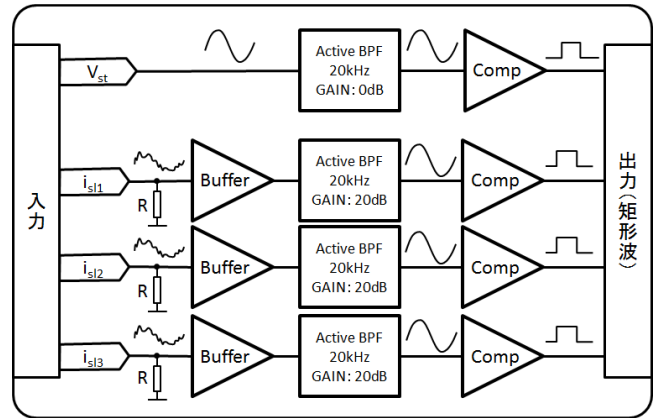


図 3 矩形波変換回路の構成

これまでの研究で試作した位相差変換回路と同様であり、オペアンプを用いた 2 次アクティブ・バンドパスフィルタにより、微弱な移動子信号からノイズを除去し正弦波を得た後、コンパレータにより矩形波に変換するものである。本年度試作した回路では、複数の静電リニアエンコーダの同時動作や単一の静電リニアエンコーダから複数の移動子信号を入力することなどの拡張性を持たせるため、3 つの移動子電流 (i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}) と 1 つの固定子信号 (v_{st}) を接続可能な構成とした。バンドパスフィルタの中心周波数は 20kHz とし、コンパレータには、約 50mV のヒステリシス幅を与えることにより矩形波変換時のノイズによる発振を防止している。なお、試作した矩形波変換回路では、バンドパスフィルタの中心周波数及びゲインを調整することはできず、3 相交流の周波数を変更する場合は、矩形波変換回路を変更する必要がある。

2. 4 位相差計測回路

2. 4. 1 基本動作

位相差計測には、これまでの研究と同様にマイコン (ルネサスエレクトロニクス製 SH7125) を利用し矩形波変換回路で変換された固定子矩形波信号 (V_{st}) と移動子矩形波信号 (V_{sl}) の位相差をマイコンのタイマ機能で計測することとした。図 4 に位相差計測の動作チャートを示す。

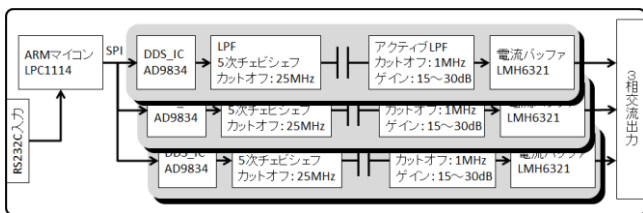


図 2 3 相交流発生回路の構成

表 1 3 相交流発生回路の主要スペック

出力波形	サイン波
周波数範囲	50Hz~300kHz 程度
出力電圧	±10V (最大値)
出力電流	±300mA (最大値)
電源	+3.3V (マイコン、DDS) ±12V (アナログ部)

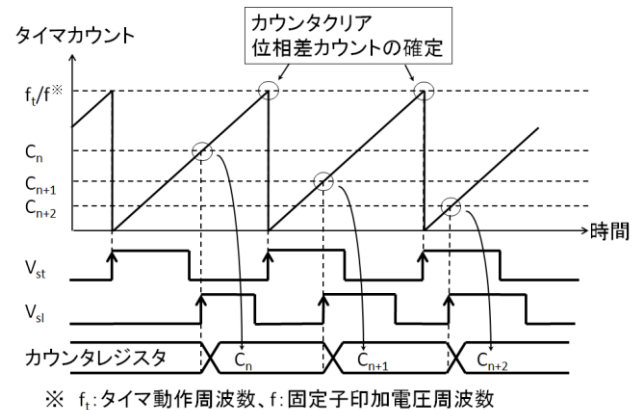


図 4 位相差計測の動作チャート

固定子と移動子の相対位置関係と連動し V_{st} と V_{sl} の位相差は変化するため、 V_{sl} の立ち上がりエッジでタイマカウントを取得する設定とした。また、タイマカウントは V_{st} と同期してクリアする設定とし、カウンタクリアのタイミングで割り込みを発生させ、位相差を確定することとした。このように動作させることにより、固定子印加電圧周波数 f で、位相差を計測することが可能になる。また、計測される位相差は、固定子と移動子の間に FPC フィルム電極 3 ピッチ分の相対的な移動が生じる度に不連続となることから、位相差カウンタの他にフィルム電極 3 ピッチ相当の移動量をカウントし、初期位置からの移動量の計測を可能としている。位相差回路の動作原理から、マイコンのタイマの動作周波数 f_i を大きくすることにより位相差計測の分解能は高くなるが、移動子電流は外来ノイズの影響を受けやすく静的な状態でも若干の変動が生じる。このため、安定した計測のためには、静電リニアエンコーダの動作環境や所望の測定精度に応じた適切なタイマ周波数を設定することが重要となる。なお、試作システムでは f_i を約 390kHz、1.562MHz、6.25MHz、25MHz の 4 段階で変更することが可能である。

2. 4. 2 移動量の外部出力

各種アクチュエータや計測制御機器と本システムを接続し利用するためには、エンコーダカウント出力に要する時間遅れを可能な限り小さくするとともに、一定の実時間性を保証することは非常に重要である。昨年度までに試作したシステムでは、RS-232C 通信によりエンコーダカウント値を外部に出力したが、送信に要する時間遅れが大きいことや独自の通信フォーマットを使用していることから、用途は移動量の外部表示やロギングなどに限られた。そこで、より高速にエンコーダ値を出力するため、2 相カウンタ出力機能を実装した (図 5)。実装した 2 相カウンタ出力は、位相差カウンタの確定と同時に発生する割り込み処理で、直前の位相差カウンタ値と

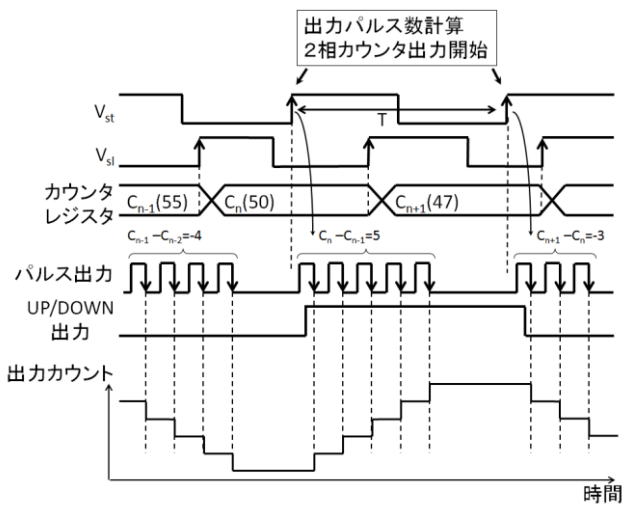


図 5 2 相カウンタ出力動作

の差を求め、差の符号に応じた UP/DOWN 信号と必要数のパルスを出力するものである。

既に述べたとおり、本研究で提案する静電リニアエンコーダシステムでは、固定子電圧と同じ周期 T で位相差が更新されるため、実際に生じた移動子の移動に対して、最大 T の時間遅れが生じる。2 相カウンタ出力パルスの周波数を f_c 、直前の位相差カウンタ値との差を C_{diff} すると、カウンタ出力に要する時間 T_c は C_{diff}/f_c となり、 $T_c < T$ であれば、位相差の確定に要する時間遅れと合わせて最大 $2T$ の時間内で移動量を外部に出力することが可能になる。一方、 $T_c > T$ の場合は、パルス出力の遅延が累積し位置情報の実時間性を担保できないこととなる。このため、2 相カウンタ出力より移動量を外部出力する場合、想定される移動子の最大移動速度、固定子電圧の周波数、位相差計測タイマの動作周波数、2 相カウンタ出力パルスの周波数等のバランスを考慮しパラメータを設定する必要がある。

3. 静電リニアエンコーダシステムの動作例

試作した静電リニアエンコーダシステムを用いた、回転角の計測例を示す。実験では電極間ピッチ 160 μ m の FPC フィルムを使用し、固定子に 20kHz、20V_{pp} の 3 相交流を印加した。また、円盤の駆動には、昨年度同様、図 6 に示す実験装置を利用した。

静的状態における動作の安定性を確認するため、円盤を停止させた状態で位相差カウンタの偏差を測定した結果を表 2 に示す。なお、標準偏差は 0.1sec 毎に 100 回の移動量を測定した結果から求めた。表から分かるように、実験環境では 1.562MHz 程度のタイマ周波数で移動量を計測すれば標準偏差は約 1 カウントとなり、外来ノイズの影響をほぼ無視することができる。1.562MHz の

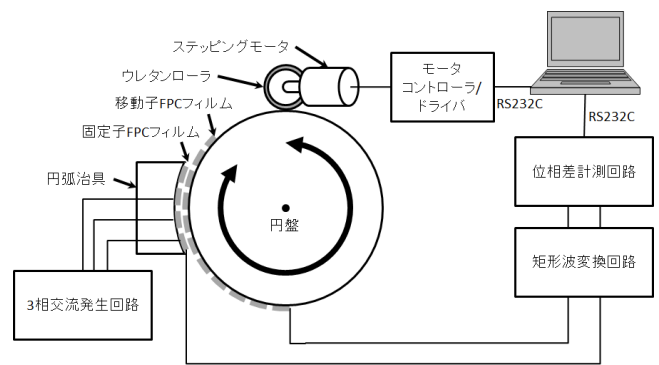


図 6 動作実験装置

タイマ周波数 [MHz]	標準偏差 [カウント]
25	17.91
6.25	3.97
1.562	0.83

タイマ周波数では、固定子電圧の1周期 T に相当する相対移動量を約 78 カウントで測定することができる。また、2 相カウンタ出力のパルス周波数を 200kHz とすると、 $T=1/20\text{kHz}$ の間に出力可能なパルスは 10 パルスとなり、移動子と固定子の相対速度が約 1.2m/sec となるまでは遅延なく移動量を出力することが可能となる。なお、位相差カウンタの感度は、タイマ周期に比例して減少することから、予め高いタイマ周波数で静的状態における位相差カウンタの変動を計測すれば、最適な動作周波数を容易に類推することができる。

位相差検出回路のタイマ周波数は 1.562MHz とし、円盤の回転角を計測した結果を図 7 に示す。図の横軸は、円盤の駆動に使用したステッピングモータへの制御量を回転角に換算した値である。実験装置の制約からローラと円盤の滑りやローラ自体の変形など誤差などが含まれるが、動作原理に基づく非線形性の誤差が観察されるとともに、巨視的に見て円盤と静電リニアエンコーダの回転角の関係には高い線形性が認められた。また、測定結果から求めた線形近似直線との誤差は、最大で約 0.03deg であり、従来研究と同等の精度で回転角が計測可能であることを確認した。

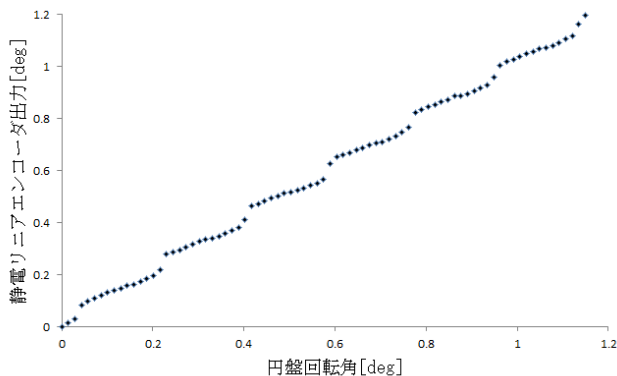


図 7 円盤回転角と静電リニアエンコーダ出力

4. まとめ

静電リニアエンコーダの実利用に向け、汎用電子デバイスとマイコンを用いた 3 相交流発生回路、矩形波変換回路及び位相差計測回路からなる静電リニアエンコーダシステムを試作した。また、FA 機器等の周辺機器に静電リニアエンコーダシステムで計測した移動量を高速に出力するため、位相差計測回路に 2 相カウンタ出力機能を実装した。動作試験の結果、試作したシステムにおいても、任意波形発生装置やマルチファンクションフィルタ等の高価な機器を使用し構成したシステムと同様の回転角測定精度が得られており、本システムにより静電リニアエンコーダが動作することを確認した。

本研究で提案する静電リニアエンコーダでは、移動量等の測定周期が固定子印加電圧の周波数に依存することから、実時間で位置計測を行うことはできない。また、試作システムでは、高速な移動量の出力方法として 2 相カウンタ出力機能を実装したが、カウンタパルスの出力周波数は接続する周辺機器に合わせる必要があり、極端に高速化することは難しい。2 相カウンタ出力のパルス周波数を低くするためには、固定子印加電圧の周波数を低くし測定周期を長くするか、位相差計測の分解能を低くすることが必要であり、静電リニアエンコーダシステムの実利用に際しては、個々の利用場面に応じたパラメータ調整が必要である。

【参考文献】

- 1) Nishijima T. *et al.*, 2009 Meas. Sci. Technol. 20, 045205,2009
- 2) 田中ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No.4,pp22-24, 2011
- 3) 田中ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告 No.5,pp29-31, 2012