

静電リニアエンコーダを用いた回転角計測システムの開発

田中 泰斗、西嶋 隆、小川 大介

Development of angle measuring system using electrostatic linear encoder

Taito Tanaka, Takashi Nishijima and Daisuke Ogawa

静電リニアエンコーダはセンサ素子にフレキシブルプリント基板を使用していることから、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、容易に屈曲させることが可能である。本研究では、薄型・柔軟という静電リニアエンコーダの特徴を利用し、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いる。本年度は、円弧状の摺動面を模した実験装置により、静電リニアエンコーダが安定して動作するために必要な接触圧について検討するとともに、回転角計測システムを試作しエンコーダとしての基本動作を確認した。

1. はじめに

メカトロニクス、ロボットなどの FA 機器においては、様々なセンサやアクチュエータが使用されており、機器の性能向上のため、センサやアクチュエータの小型化や高精度化などが図られている。

これまで我々は、帯状電極を有す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) に 3 相交流電圧を印加することによって発生する静電気力を利用したリニアアクチュエータ (静電リニアモータ) の開発に取り組むとともに、静電リニアモータと同様の構造を有する FPC フィルムを使用した静電容量型位置センサ (静電リニアエンコーダ) の開発に取り組んでいる¹⁾。

静電リニアモータは、広く利用されている電磁リニアモータと比べ、軽量・薄型であることや、駆動に使用する FPC フィルムの大量生産が容易であることなど優れた特徴を有しているが、駆動に高電圧を要することや静電リニアモータ特有の駆動装置が必要になることなどの課題がある。

一方、静電リニアエンコーダは、一対の FPC フィルム間に生じる静電容量の変化を電気信号として検出することにより動作し、各種 FA 用センサと同様の電源で動作させることが可能である。また、従来から使用されているリニアエンコーダと異なり、静電リニアエンコーダは柔軟・薄型であることから、これらの特徴を生かした新たな用途が期待できる。

本研究では、円弧状摺動面の回転角計測への静電リニアエンコーダの利用を検討するための回転角検出回路を試作するとともにエンコーダとしての基礎的動作を確認したので報告する。

2. 静電リニアエンコーダの概要

2.1 動作原理

静電リニアエンコーダの動作原理は、従来研究において明らかにされており²⁾、基本的な動作原理は以下のとおりである。

3 相結線された帯状の電極を有する FPC フィルムを移動子および固定子とし、重ねあわせて使用する。これにより、FPC フィルム間にコンデンサが構成され、移動子と固定子の相対位置関係に応じ静電容量が変化する。固定子の各電極に 3 相交流電圧を印加することにより、固定子から移動子に電流が流れ、印加電圧と電流の間には相対位置関係に応じた位相差が生じる。印加電圧と電流の位相差を検出回路で計測・処理することによってリニアエンコーダとして利用することができる。

2.2 基本動作

図 1 に静電リニアエンコーダを平面に設置した状態における、移動子の移動量と印加電圧に対する移動子電流の位相差 ϕ の関係を例示する。FPC フィルムの構造から固定子電極と移動子電極の相対位置関係は電極 3 ピッチ毎に繰り返されることとなり、 ϕ も同様に 3 ピッチ分の相対移動量が生じるたびに繰り返されることとなる。なお、図では、FPC フィルム電極 3 ピッチ分の移動量を電気角 θ_x で表している。

図に示したように、1 周期の間における θ_x と ϕ の関係は非線形であるが、概ね比例関係にあり、 θ_x が 1 周期分移動する度に同様の関係が繰り返される。従って、 ϕ の不連続な変化を検出することによって、電極 3 ピッチに

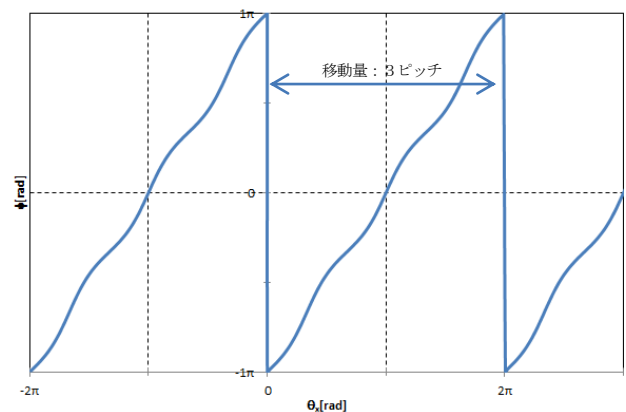


図 1 移動子移動量と位相差の関係

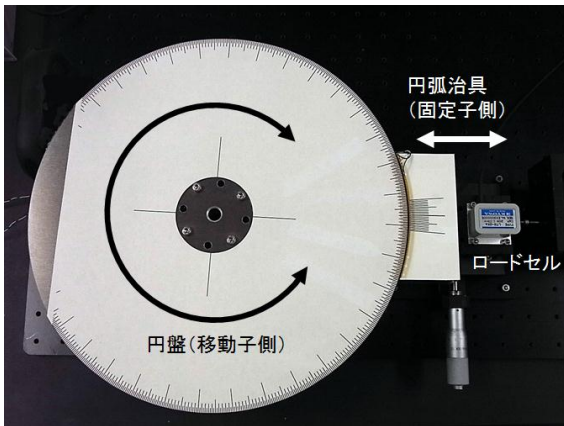


図2 実験装置

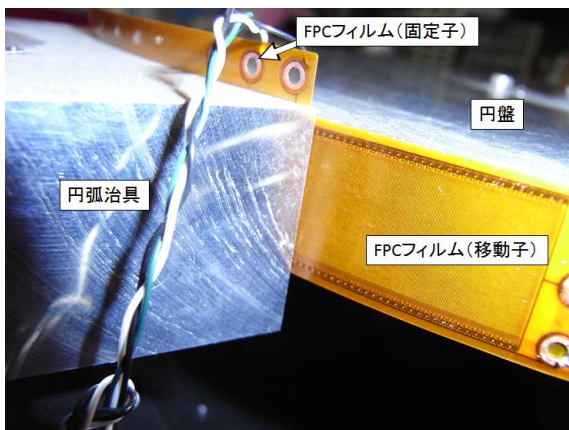


図3 固定子及び移動子を設置した様子

相当する距離を1単位とする移動量の計測が可能である。また、 ϕ の連続的な変化を計測することによって、電極3ピッチに満たない微細な移動量の計測が可能である。ここでは、静電リニアエンコーダを平面に設置した際の動作について例示したが、円弧状摺動面においてもほぼ同様の方法で回転角を計測できる。

3. 実験

3.1 実験装置の構成

図2に示す実験装置を使用し、円弧状摺動面における静電リニアエンコーダの動作確認を行った。

円弧状の摺動面としては、アルミ製の円盤及びその対となる円弧面を有する治具(円弧治具)を使用した。円盤及び円弧治具それぞれにFPCフィルムを貼り付け、移動子、固定子とした。円盤は汎用の回転ステージに固定し、自由に回転することができる構成とした。また、静電リニアエンコーダが動作するために必要な接触圧を測定するため、リニアガイド上にロードセル(株)共和電業製 LTS-2KA)と円弧治具を設置し、円盤の回転軸方向に押し当てること可能な構成とした。なお、使用したFPCフィルムの電極ピッチは $160\mu\text{m}$ 、厚さ $100\mu\text{m}$ であり、円盤の回転角は、円盤及び円弧治具に貼り付けた目盛によって目視で測定する。

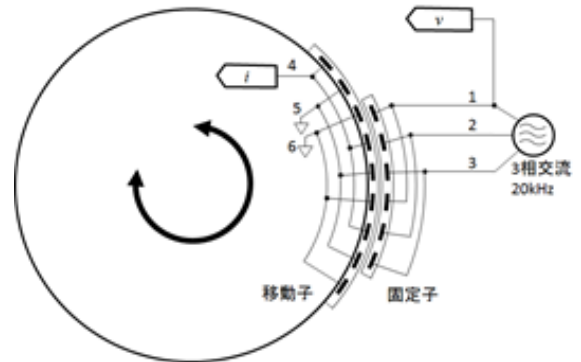


図4 FPCフィルムの結線

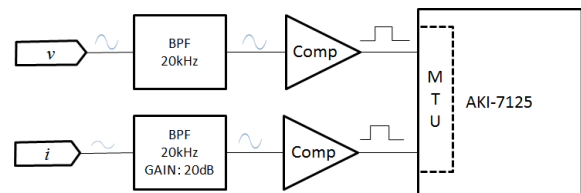


図5 位相差検出回路の構成

図3に円盤及び円弧状治具にFPCフィルムを貼り付けた様子を示す。

3.2 FPCフィルムの結線と位相差検出回路

FPCフィルムの電気的結線を図4に示す。固定子電極には、 $f=20\text{kHz}$ 、 5Vp-p の3相交流電圧を印加した。センサ電流の検出には移動子フィルム電極の1つを使用し、他の電極は接地した。

位相差検出回路の構成を図5に示す。印加電圧とセンサ出力電流の位相差の取得には、マイコンを用いた。FPCフィルムから得られるセンサ信号にはノイズが含まれるため、汎用オペアンプを使用した2次アクティブ・バンドパスフィルタによりノイズを除去し正弦波を得るとともに、マイコンでの処理を容易にするためコンパレータにより矩形波に変換した。

マイコンのプログラムでは、センサ信号の位相差検出用のカウンタ(位相検出カウンタ)と電極3ピッチ相当の移動回数を記憶するカウンタ(ピッチ数カウンタ)を持たせ、上位パソコン等への出力を可能とした。

位相検出カウンタ C_p の取得には、マイコンのインプットキャプチャタイマ機能を使用し、印加電圧に対するセンサ信号の遅れを矩形波信号の立ち上がりエッジによってカウントした。実験では、インプットキャプチャタイマの動作周波数 f_i を 25MHz としており、印加電圧の波長の $1/1250$ の分解能で位相差を検出できる。

ピッチ数カウンタ C_n は、直前の位相検出カウンタ値と最新の位相検出カウンタ値を比較し、差が閾値を超えた場合、電極3ピッチ以上の移動が発生したものととして、アップ・ダウンカウントすることとした。

センサ信号の非線形性を無視し、移動子の移動量と位相差が線形であると仮定すれば、円盤の回転角 Φ は次式から算出できる。

$$\Phi = \frac{2p}{r} \left(C_n + C_p \frac{f}{f_c} \right) \quad (1)$$

ここで、 p は FPC フィルムの電極ピッチであり、 r は円盤の半径である。

4. 結果及び考察

4. 1 円盤と円弧治具の接触圧とセンサ信号

静電リニアエンコーダを安定に動作させるためには、移動子と固定子を適切な圧力で接触させる必要がある。図6に円盤と円弧治具の接触圧と信号電圧の関係を示す。なお、ここではバンドパスフィルタで電圧に変換、増幅されたセンサ電流を信号電圧としている。円盤と円弧治具の接触圧が約 100 Pa になるまでは信号電圧が急激に増加し、その後、増加が緩やかになる。オシロスコープによる波形観測から 100Pa 以上の接触圧では良好なセンサ信号が得られることを確認した。

接触圧を増大させることによりセンサ信号の安定性が向上する一方、FPC フィルム間の摩擦が増大し、回転時の負荷の増加や FPC フィルムの摩耗、破壊につながる可能性がある。円盤と円弧治具の位置関係やがたつきにより、センサ信号は大きく変動するため適正な接触圧を決定するためには、更なる検討が必要であるが、今回の実験からは、100Pa 程度の接触圧で移動子と固定子を接触させれば、安定動作が期待できた。

4. 2 回転角の測定

センサ信号から得た回転角度の測定結果を図7示す。実験では、任意の位置から 0.5deg 刻みで円盤を回転させたときの回転角の設定値とし、マイコンで得られたカウンタ値を式(1)により回転角に変換した結果である。なお、円盤と円弧治具の接触圧は約 130Pa としている。

回転角の設定は目視で行っているため正確とはいえないが、設定値とセンサ出力角度の最大誤差は 0.15deg であり、本研究で試作した回路およびプログラムにより、円弧状摺動面の回転角を計測できることが確認できた。本来は、他のセンサにより正確な回転角を計測し位相差 ϕ の非線形性を含めた最大誤差の評価を行う必要がある。このことについては、来年度以降も評価を行う予定である。

5. まとめと今後の課題

静電リニアエンコーダを用いた回転角計測システムの開発を目的として、基礎的動作試験を行った。実験の結果、100Pa 以上の接触圧で良好なセンサ信号が得られた。また、試作した回路およびプログラムにより、円弧状摺動面における回転角計測が可能であることを確認した。

本年度の研究では、実験装置の関係上、繰り返し位置決め精度や最大誤差をはじめとする角度センサとして利用するための諸特性の評価が十分に行えていない。また、試作した回路では3相交流電圧の生成回路が含まれておらず、実用化に向け回路の改良・追加が必要である。今

後は、これらの課題に取り組む予定である。

【参考文献】

- 1) 西嶋ら, 岐阜県機械材料研究所研究報告, No.3 (2010), p43
- 2) T.Nishijima, A.Yamamoto and T.Higuchi, Meas. Sci. Technol., 20 (2009), 045205

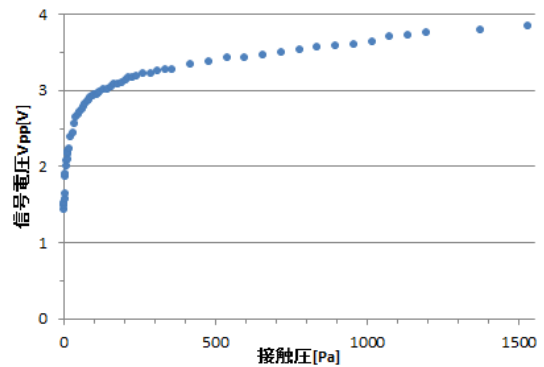


図6 接触圧とセンサ信号

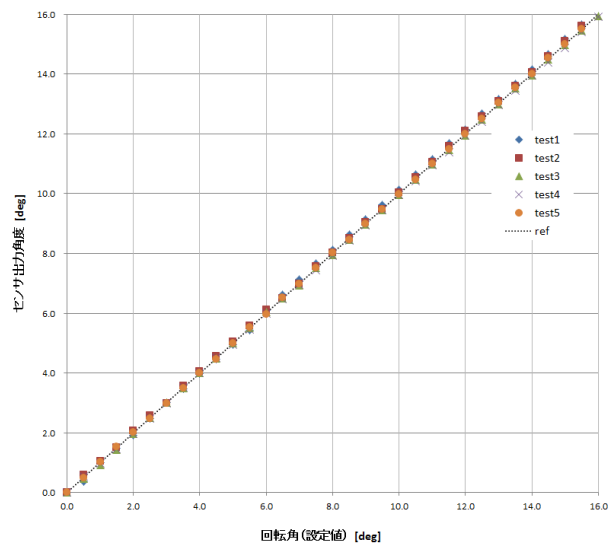


図7 回転角 (設定値) とセンサ出力角度の関係