

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1報)

田中 泰斗、西嶋 隆、西村 太志

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

Taito Tanaka, Takashi Nishijima and Futoshi Nishimura

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いる。本年度は、従来研究で得た知見を元に円弧状摺動面に静電リニアエンコーダを適用した際の回転角の測定精度について評価を行った。実験の結果、円盤の回転角と静電リニアエンコーダの回転角の関係には高いリニアリティが認められ、試作したシステムにより再現性のある回転角の計測が可能であると予想された。

1. はじめに

機械部品の高精度化、電気製品の小型化・高性能化、生産システムの自動化の流れのなか、ロータリーエンコーダやリニアエンコーダをはじめとする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・開発する静電リニアエンコーダの基本的動作原理は、従来研究において明らかにされており、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、静電リニアエンコーダの利用方法としては、平面上に配置する基本的な方法のほか、一定曲率を持った曲面に設置し、位置及び屈曲の検出に利用できることが報告されており、これまで各種位置決めセンサの設置が困難な箇所での利用や新たな用途が期待できる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となる移動子と固定子の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、静電リニアエンコーダの基本動作を確認している²⁾。本報では、従来研究で得た知見を元に円弧状摺動面における回転角計測に静電リニアエンコーダを適用した際の測定精度について評価を行ったので報告する。

2. 静電リニアエンコーダの動作原理

静電リニアエンコーダは、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て利用し、同一の電極構造を有したこれら一対の FPC フィルムを重ね合わせることで生じる各電極間の静電容量から固定子と移動子の相対位置関係を検出するものである。本研究においては、固定子の各電極に 3 相交流電圧を印加し、固定子から移動子に流れる電流の位相差を検

出回路で計測・処理することによって、固定子と移動子の相対位置関係を求めている。

固定子と移動子にはそれぞれ 3 種類の電極があり、これら 6 端子の間に生じる静電容量は、6 行 6 列の静電容量行列で表すことができる。FPC フィルムの緒元や平面、曲面など配置面の状況により特性は異なるが、相対移動量と印加電圧に対する移動子電流の位相差 ϕ は、図 1 に示す関係となる。なお、図では電極 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、 θ_x の変化に伴い、 ϕ は不連続に変化し、 θ_x が 1 周期移動する度に同様の関係が繰り返される。このことから、 ϕ の不連続な変化を検出することによって、電極 3 ピッチに相当する距離を単位とする移動量の計測が可能である。また、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、 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。

本研究では、円弧状の摺動面における角度計測に静電リニアエンコーダを利用することを目的としているため、固定子と移動子の相対位置関係と摺動面の円弧半径から回転角を求めている。

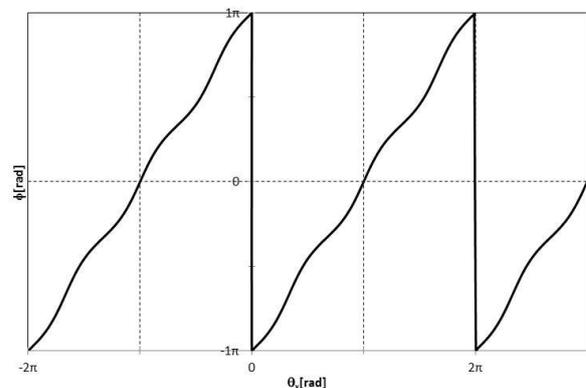


図 1 移動子移動量と位相差の関係

3. 実験

3. 1 実験装置の構成

実験装置の全体構成を図2に示す。また、実験に使用したFPCフィルムの外観を図3に示す。

円弧状の摺動面としては、直径300mmのアルミ製の円盤と、直径301.2mmの円弧面を有するアルミ製の治具（円弧治具）を使用し、円盤及び円弧治具それぞれに移動子、固定子となるFPCフィルムを貼り付けた。円盤と円弧治具の直径差は、FPCフィルムの厚さと接着層の厚さから予想される値を設定している。また、使用したFPCフィルムの電極ピッチは約160 μm 、厚さ100 μm である。擬似的な円弧状摺動面は、円盤を回転ステージに取り付け、自由に回転できる構成とするとともに、円弧治具を直動ステージに取り付け、回転ステージの回転軸方向に押しつけることにより構成した。

円盤は、直径30mmのウレタンローラを介してステッピングモータ（オリエンタルモータ（株）製PK545AW-PS10）によって回転させることとし、外部PCにより回転量を制御した。円盤とウレタンローラの間には生じる滑りや変形、ステッピングモータのバックラッシュなどの影響から、モータの制御量と実際の円盤の回転角にはある程度の誤差が生じるが、実験装置では、約0.000144deg毎に円盤の回転角を制御できるように設定しており、後述の位相差検出回路により検出可能な円盤

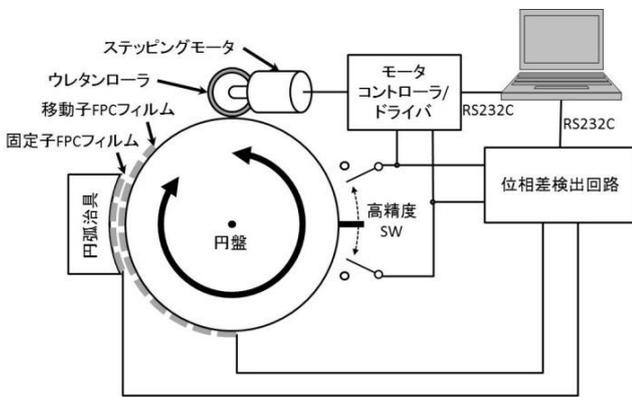


図2 実験装置の全体構成

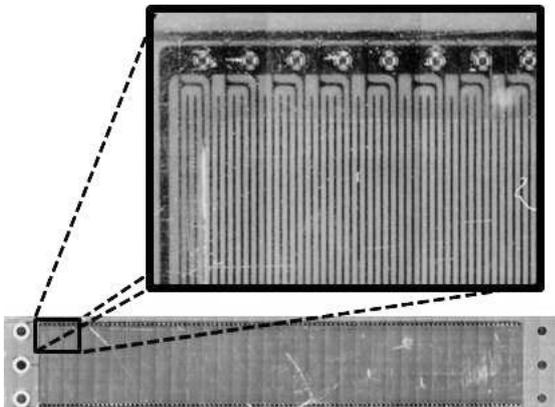


図3 FPCフィルムの外観

回転角の分解能とほぼ一致するように設定している。

また、静電リニアエンコーダの繰り返し精度を評価するため、円盤の回転軸から約165mm離れた位置に、繰り返し精度1 μm の高精度タッチスイッチ((株)メトロール製PT5S1CB)を設置した。なお、1 μm の繰り返し精度は、円盤の回転角で約0.000347degに相当する。

3. 2 位相差検出回路

位相差検出回路は、従来研究と同様の回路を利用し、高精度タッチスイッチの開閉をトリガとして円盤の回転角を取得する機能をマイコンに付与した。固定子には $f=20\text{kHz}$ 、6Vp-pの3相交流電圧を印加し、移動子フィルム電極の1つのみを位相差検出に使用した。また、位相差計測に利用するタイマ周波数は25MHzとした。これらの設定から、印加電圧の波長の1/1250の分解能で位相差を測定することが可能であり、相対移動量と位相差が比例関係にあると仮定すれば、試作した実験装置及び位相差検出回路では、約0.000146degの分解能で円盤の回転角を検出が可能となる。

4. 結果及び考察

4. 1 回転角の測定

円盤の回転角計測結果を図4、図5に示す。図の横軸は、ステッピングモータへ指令した制御量を円盤の回転角に換算した値であり、ローラと円盤の滑りやローラ自体の変形、モータの回転誤差などが含まれる。また、極力ステッピングモータの減速機によるバックラッシュの影響を排除するため、円盤は1方向に回転させ測定した。

図4に示した巨視的な実験結果から、円盤と静電リニアエンコーダの回転角の関係には高いリニアリティが認められた。約18degの間における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、 $\pm 0.17\%$ F.S.の精度が得られた。また、全ての測定範囲において、ほぼ一定振幅の誤差が周期的に発生しており、図1に示した動作原理に基づく非線形性が誤差として表れているものと考えられる。

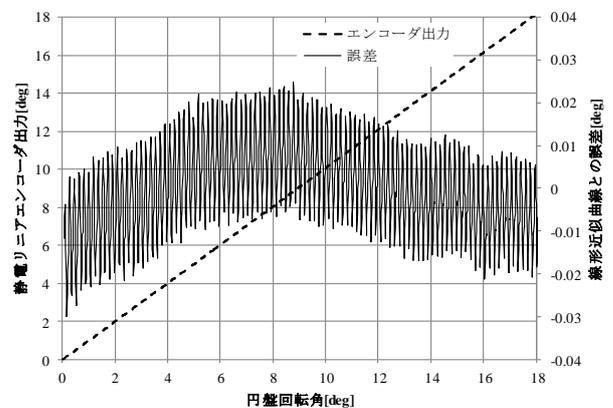


図4 円盤回転角と静電リニアエンコーダ出力(巨視的)

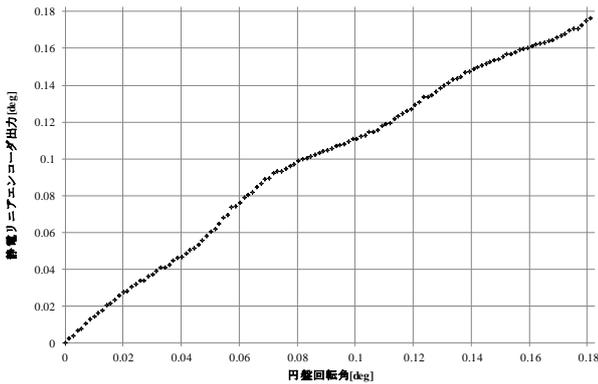


図5 円盤回転角と静電リニアエンコーダ出力(微視的)

表1 繰り返し精度の測定結果

| | 最大誤差[deg] | 標準偏差[deg] |
|-------|-----------|-----------|
| スイッチ1 | 0.001969 | 0.000807 |
| スイッチ2 | 0.000594 | 0.000263 |

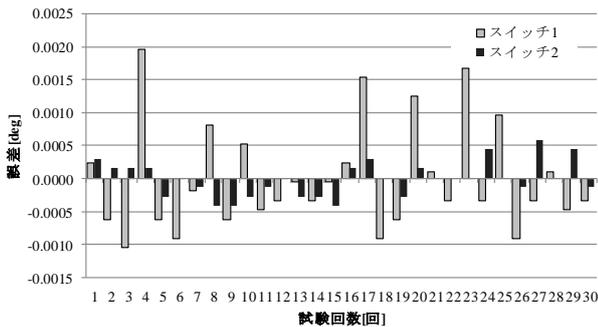


図6 繰り返し精度試験毎の誤差

図5は、微視的な回転角の測定結果である。静電リニアエンコーダの動作原理に基づく理論的波形と比較して、若干の歪みが認められるものの、非線形性分の影響と考えられる誤差が認められる。なお、測定点を線形近似した直線との誤差は最大で約0.012degであった。

4.2 繰り返し精度

高精度タッチスイッチを用いた静電リニアエンコーダの繰り返し誤差の測定結果を表1、図6に示す。

実験は、円盤円周方向の2カ所に取り付けた高精度タッチスイッチの間で円盤を連続的に往復運動させるこ

とによって行った。表中の値は、それぞれのスイッチの開閉をトリガとして得たエンコーダ値について、平均値との誤差及び標準偏差を求めた結果である。なお、円盤は、約1.44deg/secの回転速度で約18degの区間を30回往復させている。

実験結果から、エンコーダ分解能の数倍から十数倍の最大誤差が発生しているものの、回転角の測定結果から予想された最大誤差と比較して1/10程度と比較的小さい値となった。また、試験回数に比例した誤差の増加が認められないことから、一定の誤差はあるものの試作した実験装置において、再現性のある回転角の計測が可能であることが予想された。繰り返し誤差の発生要因としては複数の要因が考えられるが、主要な要因としてはFPCフィルム電極や位相差検出回路に混入した電気的な外来ノイズによる影響が考えられる。

5. まとめ

円弧状摺動面に静電リニアエンコーダを適用した際の回転角の測定精度について評価を行った。回転角測定実験の結果、円盤の回転角と静電リニアエンコーダの回転角の間には高いリニアリティが認められ、試作装置において±0.17%F.S.の精度で回転角を測定可能なことを確認した。また、繰り返し精度実験から、再現性のある位置検出が可能であると予想された。

円弧状摺動面の回転計測に静電リニアエンコーダを使用する場合、測定対象となる回転軸の心振れや、移動子と固定子を設置する摺動面の曲率の違い、回転中心の位置合わせ精度などの動作原理以外の機械的要因によって、測定精度は影響を受ける。また、FPCフィルムの撓みや傾きなど、フィルムが柔軟であることに起因する設置上のばらつきにも留意する必要がある。実利用においては、これらの誤差要因を踏まえたうえで、各種パラメータの補正を行う必要がある。

今後は、角度検出誤差の低減や安定動作のための方法について検討を行うとともに、位相差検出回路を改良し機能の拡充を図ると予定である。

【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