

## 静電容量式フィルムエンコーダにおける最適電極ピッチの検証

木村 文陽\*, 権藤 雅彦\*\*, 山本 晃生\*, 樋口 俊郎\*

Verification of the optimum electrode pitch in electrostatic capacitive type film encoder

Fumitaka KIMURA, Masahiko GONDO, Akio YAMAMOTO and Toshiro HIGUCHI

This paper describes an optimization of a sensing-electrode-area ratio of an electrostatic capacitive type film encoder. The encoder consists of a slider film and a stator film, in each of which inducing electrodes and sensing electrodes are included. Output signals are generated by capacitors consisted between slider electrodes and stator electrodes. To obtain high accuracy, a sensing-electrode-area ratio to the electrode pitch should be optimized. In this paper, the optimum electrode ratio calculated by simulation employing the finite element method.

### 1. 諸 言

フィルム電極をセンサとして用いたエンコーダが提案されている<sup>1)</sup>。本エンコーダは静電容量式のリニアエンコーダで、移動子が配線を持たない特徴がある。従来のエンコーダはスケールを固定してセンサヘッドを移動させる方式の為、センサヘッド側への配線が必要である<sup>3)</sup>。この配線はセンサヘッドと共に絶えず動き続けるため、動作途中で断線を起こしてしまう懸念がある。そこで、この様な懸念に対し本エンコーダが開発された。本エンコーダの概要は次の通りである。

**変位検出部の構造** 移動子に2相帯状電極を、固定子に4相帯状電極を有する (Fig.1)。これらの電極は移動子を固定子に重ねることで各電極が重なり、移動子-固定子間に多数のコンデンサが形成される構造になっている。

**変位検出原理** 移動子電極に電圧を印加し、固定子電極を検出部とする。移動子側に電圧を印加した状態で移動子を変位させると、対極する固定子電極は正弦波波形の信号を生成する。生成された正弦波波形信号の位相を求めることにより移動子の変位を検出する。

**静電誘導による電圧印加原理** 移動子及び固定子には同一サイズの誘導電極がそれぞれ2つつ形成されている。固定子誘導電極に正負の反転した一組の交流電圧を印加すると、静電誘導現象により移動子誘導電極に電圧を印加することが可能となる。本方式はこの現象を用いることで、移動子への配線無しに電圧を印加し、エンコーダとして動作させている。

以上が移動子へ配線を必要としない静電容量式エンコーダの概要である。

変位検出原理で述べたとおり、本エンコーダの測定精度は固定子受信電極にて受信する正弦波波形信号に大きく依存する。すなわち、受信する信号が理想的な正弦波波形に近いほどエンコーダの測定精度は向上すると考えられる。そこで本稿では、エンコーダの測定精度を最も高められる電極ピッチ (移動子及び固定子にそれぞれ形成されている多相電極の同相電極間距離: Fig.2 の  $1p$ ) に対する電極幅を求めることを目的とする。

本研究は汎用の有限要素法ソフトウェアである ANSYS を用いてシミュレーションにより行う。1ピッチに占める電極の割合を変化させ、それによる出力波形への影響を解析し、その結果から1ピッチにおける最適な電極の割合を求める。

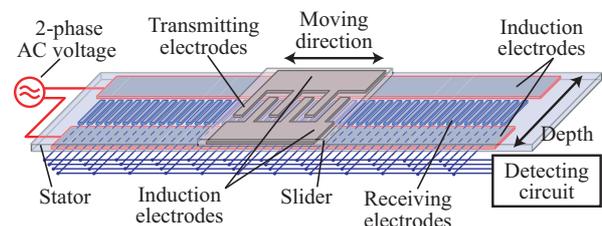


Fig. 1 Schematic diagram of electrostatic capacitive type film encoder

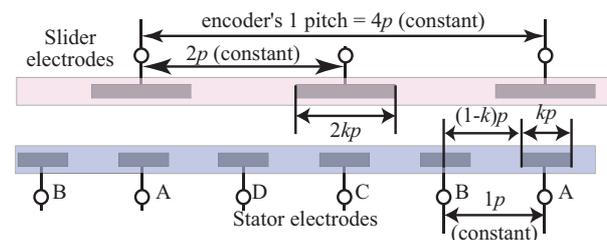


Fig. 2 Schematic diagram of the encoder 2D model using in simulation

### 2. 有限要素法によるシミュレーション

#### 2.1 モデル化

有限要素法によるシミュレーションを行うためエンコーダのモデル化を行った。モデル化にあたり、エンコーダの奥行き方向 (Fig.1 の "Depth") は、評価に直接影響しないことから省略し、移動子の移動方向を断面とする2次元モデルにて解析を行った。Fig.2 にその概略図を示す。上部に移動子電極、及び下部に固定子電極が示されている。実際のシミュレーションでは Fig.2 の様にして移動子電極を  $2 \times 3$  ペア = 6 個、固定子電極を  $4 \times 6$  ペア = 24 個設定した。

#### 2.2 電極ピッチ及び電極幅の定義

電極ピッチは同相の電極間距離を  $1p$  (Fig.2)、電極幅は固定子電極の電極幅を  $1w$  とそれぞれ定義した。シミュレーションは、電極ピッチと電極幅の比  $= p : w$  が  $1 : 0.1$  から  $1 : 0.9$  まで比率を  $0.1$  ずつ変化させていき、計9通り行った。

#### 2.3 信号の測定方法

信号の測定は、各々の比率において移動子の2相電極に  $\pm 1V$  の電圧を印加した状態で1ピッチ ( $1p$ ) 分移動させた。その際移動の間隔は1ピッチを40等分するように設定し、各ステップにて固定子電極 (Fig.2 の電極 A から D) に発生する電圧を記録した。

\* 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)  
The University of Tokyo.

\*\* 株式会社青電舎 (神奈川県相模原市西橋本 5-4-30)  
SEIDENSHA Corporation.

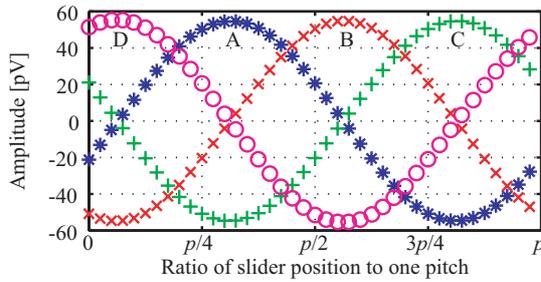


Fig. 3 Output results from electrode A through D when  $p : w = 1 : 0.5$

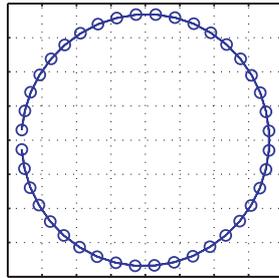


Fig. 4 Lissajous figure when  $p : w = 1 : 0.5$

#### 2.4 誘導電極との相互作用

本シミュレーションでは誘導電極の存在が加味されていない為、記録された信号には誘導電極との相互作用が含まれていない。そこで、記録された信号を<sup>2)</sup>で提案されている本エンコーダの静電容量行列に代入するためFFTによる式化を行い、同行列に代入した。ここで述べた静電容量行列とは、本エンコーダの性能を検討するために<sup>4)</sup>の手法をもとに8端子モデルを用いて提案された $8 \times 8$ の正方行列である。本行列に代入することで、誘導電極との相互作用を含めたエンコーダの出力信号を求めることが出来る。

以上の解析により得られた結果を次章にて示す。

### 3. 結果

シミュレーション結果の中で $p : w = 1 : 0.5$ における出力結果をFig.3に示す。固定子4相受信電極から出力された信号は、それぞれ位相が $\frac{\pi}{2}$ ずれた正弦波波形を示しており<sup>2)</sup>の実験結果と一致することから、シミュレーションは正しく行われたと言える。他8通りのシミュレーション結果も同様な結果を示すことが確認できた。

#### 3.1 リサージュ図形

続いて、出力結果を静電容量行列に代入し誘導電極との相互作用を含めた値に変換した。変換結果はスペースの都合上掲載を省略する。最後に変換結果を<sup>2)</sup>に基づく差動増幅計算を行い、A相(=A-C)及びB相(=B-D)のエンコーダ出力信号を得た。これらA相、B相信号は互いに位相が $\frac{\pi}{2}$ ずれた正弦波波形であり、横軸にA相、縦軸にB相としてプロットするとリサージュ図形(Fig.4)を描く。Fig.4は $p : w = 1 : 0.5$ の時のリサージュ図形である。一般的には理想的な出力信号は真円となり、真円に対する位置偏差がエンコーダの精度に直接影響を及ぼす。

#### 3.2 リサージュ図形の偏角

本エンコーダは、リサージュ図形を描くベクトルの偏角から変位を求めているため、この偏角、すなわちA相B相信号の位相変化が特に重要である。本シミュレーションの場合、1周期を40等分して準静的に測定を行っているので、偏角は1ステップあたり $2\pi \div 40 = \frac{\pi}{20} = 9$  [degree]となるはずである。そこでFig.4に示したリサージュ図形の偏角を求め、それをFig.5(A)に示す。近似曲線が1次直線で、その傾きが約9であることから、非常によい直線性を示していることが確認出来

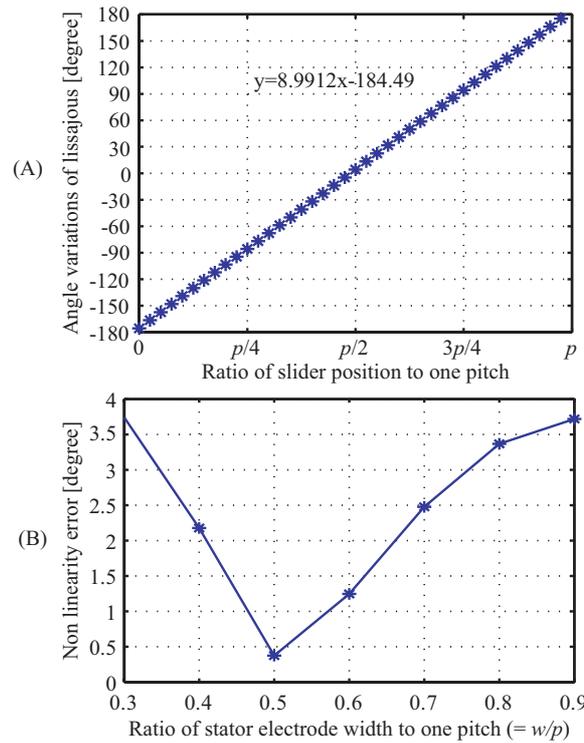


Fig. 5 (A): Linearity when  $p : w = 1 : 0.5$ , (B): Non linearity error of each stator electrode width

る。他8通りの電極幅における出力結果も同様な解析を行い、Fig.5(A)と同様な直線性を確認した。ただし、 $p : w = 1 : 0.1$ 及び $1 : 0.2$ の場合、出力信号が弱すぎてリサージュ図形を描くことが出来ず、エンコーダ信号としての役割を果たしていないため、以降の解析対象からははずした。

#### 3.3 非直線性誤差

最後に、最適な電極幅を求めるためFig.5(A)における理想直線からの最大誤差を計算し、その結果をFig.5(B)に示す。横軸に電極幅の割合、縦軸に理想直線との最大誤差を示している。この図より最適なエンコーダの電極幅はピッチに対して半分、つまり、電極幅と同じだけの空隙を用いて電極を並べれば良いことが分かった。本最適比( $p : w = 1 : 0.5$ )における非直線性誤差は $\pm 0.37$ 度である。

### 4. 結論

静電容量式フィルムエンコーダについて、非直線性誤差を最小にする電極構成の検証を行った。検証は有限要素法によるシミュレーションを用い、エンコーダを2次元モデル化して行った。シミュレーション結果から、非直線性誤差、FFTによる成分解析を行い、ピッチに対する電極幅比は0.5が最適であることが分かった。

### 参考文献

- 1) Masahiko Gondoh. Electrostatic encoder and electrostatic displacement measuring method. United States Patent: 7199727 B2, 2007.
- 2) Fumitaka KIMURA, Masahiko GONDO, Norio YAMASHITA, Akio YAMAMOTO, and Toshiro HIGUCHI. Prototyping of flexible capacitive encoder with un-tethered slider using electrostatic induction. *Proceedings of the Seventh IEEE Conference on Sensors (IEEE SENSORS 2008)*, Vol. 1, pp. 1619-1622, 2008.
- 3) J. R. Rene Mayer. *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, chapter 6, pp. 98 - 119. Springer with CRC PRESS and IEEE PRESS, 1999.
- 4) N. Yamashita, Zhang Zu Guang, Yamamoto A., Gondo M., and Higuchi T. Voltage-induction type electrostatic film motor driven by two- to four-phase ac voltage and electrostatic induction. *Sensors & Actuators: A. Physical*, Vol. 140, No. 2, pp. 239-50, November 2007.