

静電フィルムエンコーダの開発

Development of an Electrostatic Capacitive Film Encoder

木村 文陽 (東京大学) 権藤 雅彦 (東京大学)
山本 晃生 (東京大学) 樋口 俊郎 (東京大学)

Fumitaka KIMURA
Masahiko GONDO
Akio YAMAMOTO (Member)
Toshiro HIGUCHI (Member)

This paper describes an electrostatic capacitive film encoder operated by two-phase ac voltage and electrostatic induction. The encoder consists of a slider film and a stator film, in each of which induction electrodes and detecting electrodes are included. A slider film contains two-phase electrode with a pitch of 400 μm and a stator film contains a four-phase electrode with a pitch of 200 μm . The slider's two-phase electrode is connected via condensers which consists of induction electrodes situated on the slider and stator films. The two-phase ac voltage is applied to the induction electrode to induce two-phase voltage on the slider electrodes. This paper analyzes induced voltage on the stator by using capacitance coefficient matrices. A prototype encoder is fabricated to measure capacitance and to verify the basic behavior.

Key Words: Electrostatic Capacitive Encoder, Film Encoder, Electrostatic Induction

1 緒言

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 [1]。エンコーダはこれまでに、光学式 [3]、磁気式 [2]、そして静電容量式 [3]、[4] が実現されてきている。光学式や磁気式は高い分解能が得られる反面、一般的にはスケールを固定してセンサヘッドを移動させる為、スケールの読み取りを行う移動子側への配線が必要であり、場合により構造が複雑となる懸念がある。また、高い取り付け精度が要求されたり、磁気式の場合はモータの近くでは磁界の影響を受けて正しく動作出来ない事も懸念されている。

一方、[1] では、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方式の静電容量型エンコーダが提案されている。本方式は静電誘導を用いることで、移動子への配線無しに電圧を印加し、エンコーダとし

て動作させることが可能である。

本稿では上記方式のエンコーダに関し、[5] の手法をもとに 6 端子モデルを用いて、その性能を検討するための解析手法を示す。また、エンコーダを試作し、その性能を検証する。以下本稿では、この方式を静電誘導型エンコーダと称する。

2 原理

2.1 静電誘導給電方式の原理

図 1 に静電誘導形フィルムエンコーダの構成を示す。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 つずつ形成されており、固定子の誘導電極間に 4 相構造検出電極が配置されている。移動子側の誘導電極は 2 相の励起電極と接続されている。励起電極のピッチは検出電極ピッチの 2 倍であり、それぞれ 2 相、4 相で一組を構成し、その構造を繰り返している。固定子誘導電極には正負の反転した 1 組の交流電

連絡先: 木村文陽, 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, 東京大学工学系研究科, email: k-bunbun@aml.t.u-tokyo.ac.jp

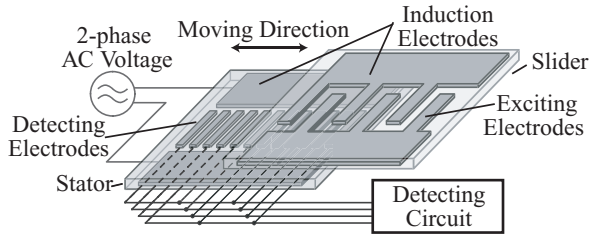


Fig. 1 Schematic of Electrostatic capacitive encoder

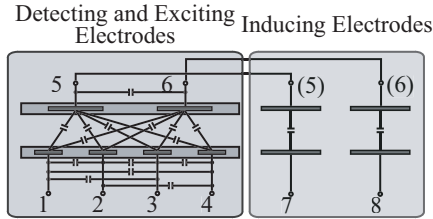


Fig. 2 Equivalent circuit model for analysis

圧が印加される。移動子電極上には固定子誘導電極を介して電圧が誘導され、励起電極上に電圧分布が発生する。検出電極がこの電圧分布を検出することでエンコーダとして動作する。

2.2 信号解析

図2に解析に用いた6端子モデルを示す[5]。端子1,2,3,4が固定子検出電極、端子7,8が固定子誘導電極、端子5,6が移動子2相電極を表している。これにより移動子・固定子間の電極関係は 8×8 の静電容量行列で表される[5]。以下では解析を容易にするために、静電容量行列を誘導電極部分と励起検出電極部分とに分けて記述する。 C_i は誘導電極部分の関係を表し、 C_d は励起-検出電極部分の関係を表している。

$$C_i = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_4 & \mathbf{O}_4 \\ \mathbf{O}_4 & \begin{bmatrix} C_i & 0 & -C_i & 0 \\ 0 & C_i & 0 & -C_i \\ -C_i & 0 & C_i & 0 \\ 0 & -C_i & 0 & C_i \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_d = \begin{bmatrix} C_{st} & C_{ta} & C_{tb} \\ C_{ta} & C_{st} & C_{ta} \\ C_{tb} & C_{ta} & C_{st} \\ C_{ta} & C_{tb} & C_{ta} \\ C_m(\theta_x) & C_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & C_m(\theta_x - \pi) \\ C_m(\theta_x - \pi) & C_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & C_m(\theta_x) \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ C_{ta} & C_m(\theta_x) & C_m(\theta_x - \pi) & 0 & 0 \\ C_{tb} & C_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & C_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ C_{ta} & C_m(\theta_x - \pi) & C_m(\theta_x) & 0 & 0 \\ C_{st} & C_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & C_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & 0 & 0 \\ C_m(\theta_x + \frac{\pi}{2}) & C_{sl} & C_l & 0 & 0 \\ C_m(\theta_x - \frac{\pi}{2}) & C_l & C_{sl} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C_m(\theta_x) = -C_{m0} - C_{m1} \cos(\theta_x) \quad (3)$$

$$\theta_x = \frac{\pi}{2p} x \quad (4)$$

ここで $C_i, C_{st}, C_{sl}, C_{ta}, C_{tb}, C_l, C_{m0}, C_{m1}$ は全て正の定数であり、 x は移動子変位、 p は固定子検出電極ピッチである。また、 θ_x は、固定子検出電極4ピッチを1周期とする、 x の電気角表示である。

各端子の電圧を要素とする電圧ベクトル \mathbf{V} および各端子の電荷ベクトル \mathbf{q} を次のように定義する。

$$\mathbf{V} = \left\{ V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V \sin \omega t, -V \sin \omega t \right\} \quad (5)$$

$$\mathbf{q} = \{0, 0, 0, 0, 0, 0, q_7, q_8\} \quad (6)$$

ただし、 $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6$ はそれぞれ端子1,2,3,4,5,6の電圧を表す変数とし、端子7,8には交流電圧(これを本稿ではキャリアと呼ぶ)を印加するので、 ω を角周波数としてその電圧を表記する。 q_7, q_8 はそれぞれ端子7,8にチャージされた電荷を表し、 q_5, q_6 は、端子5,6が外部と接続されていないので0とする。

q_1, q_2, q_3, q_4 は、信号処理回路がハイインピーダンスで電流は流れないと仮定しているため 0 とした。

エンコーダ全体の、電荷、静電容量、電圧の関係は次のようになる。

$$\mathbf{q} = (\mathbf{C}_i + \mathbf{C}_d)\mathbf{V} \quad (7)$$

式 (7) に (1) ~ (6) を代入して解くと次の電圧解が得られる。

$$\begin{cases} V_1 = K_c V \cos(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_2 = K_c V \sin(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_3 = -K_c V \cos(\theta_x) \sin(\omega t) \\ V_4 = -K_c V \sin(\theta_x) \sin(\omega t) \end{cases} \quad (8)$$

$$K_c = \frac{2C_{\text{ind}}C_{m1}}{-4C_{m1}^2 + (C_i + C_1 + C_{sl})(C_{st} - C_{tb})} \quad (9)$$

キャリアが、電極位置の変化に伴う正弦波状の静電容量変化分によって振幅変調されることが分かる。

2.3 信号処理

式 (8) で導かれた電圧は、差動増幅器によって以下の様に差動増幅される。

$$V_A = K_o(V_1 - V_3) = 2K_oK_c \cos(\theta_x) \sin(\omega t) \quad (10)$$

$$V_B = K_o(V_2 - V_4) = 2K_oK_c \sin(\theta_x) \sin(\omega t) \quad (11)$$

ただし K_o はアンプの増幅率である。信号 (10),(11) は、次に同期検波を行うことでキャリア成分がカットされ、式 (8) の包絡線成分のみが以下の様に取り出される。

$$V_A = A \cos(\theta_x) \quad (12)$$

$$V_B = A \sin(\theta_x) \quad (13)$$

ただし A は定数である。 V_A と V_B から逆正接関数を用いた内挿演算によって位相角 θ_x が算出される。

3 実験

3.1 試作

図 3 に示す電極フィルムを試作した。フィルムは FPC(フレキシブルプリント回路) 基板であり、厚みは約 $200\mu\text{m}$ 、外形寸法は固定子が $30\text{mm} \times 180\text{mm}$ 、移動子が $30\text{mm} \times 34\text{mm}$ である。固定子に移動子を重ねる形で用いる。誘導電極はフィルム両端に設置した。

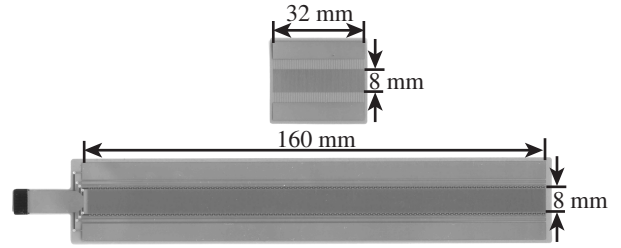


Fig. 3 Photograph of films



Fig. 4 Photograph of the trial model

固定子検出電極はピッチ $200\mu\text{m}$ (電極幅 $100\mu\text{m}$)、移動子検出電極はピッチ $400\mu\text{m}$ (電極幅 $200\mu\text{m}$) であり、電極寸法は固定子が横 160mm 、移動子が 30mm 、縦は共に 8mm である。

固定子検出電極からの信号は差動増幅、同期検波、内挿によって 1 周期につき 1024 分割され、1 パルスあたり約 $0.8\mu\text{m}$ の RS422 矩形波デジタル信号として出力される。RS422 信号を読み取って実際の数値を表示するカウンタは、FPGA を用いて製作した (図 4)。

3.2 静電容量測定実験

式 (8) における静電容量係数を測定した。エンコーダを 6 自由度を持つ精密移動ステージに固定し、移動子は厚さ $50\mu\text{m}$ のスペーサを介して固定子に押しつけた。固定子と移動子の重ね方は目視によって重なっていると確認出来る程度とした。

固定子誘導電極への印加電圧は周波数 20kHz とし、移動子を $800\mu\text{m}$ (1 周期) 移動させる間、 $20\mu\text{m}$ おきに容量を測定し、[6] の手法に基づき各係数を求めた。測定結果の一部を図 5,6 に示す。各図中の凡例は、図 2 の各端子番号に該当する。例えば”5-6”は端子 5,6 間の静電容量を表している。

実験結果から、固定子検出電極と移動子検出電極間 (図 2 の 1-5,1-6,2-5,2-6,3-5,3-6,4-5,4-6 間) 以外はほぼ定数となることが確認出来る。また、固定子検出電極と移動子検出電極間は容量が正弦波状に変化し、式

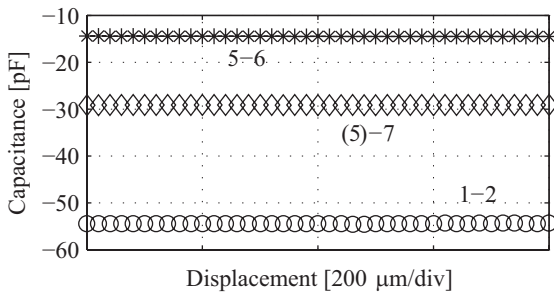


Fig. 5 Result 1

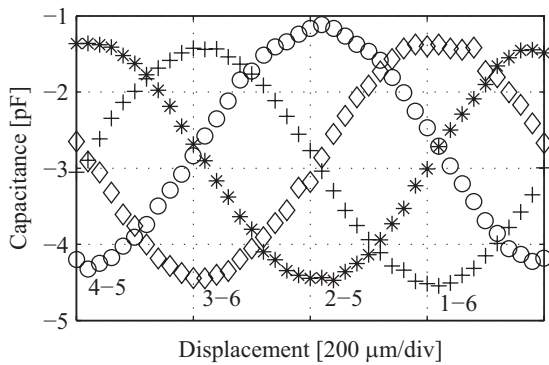


Fig. 6 Result 2

(1~4) と矛盾しないことが確認できた。

3.3 動作実験

差動増幅された出力信号の交流リサーチ図形を確認し、図7に示す。リサーチ図形はほぼ円形の形をしており、式(10),(11)で導出された信号が得られていることが確認できた。

図8に移動子位置とカウンタ出力の関係を示す。非常に良い直線性が現れていることが確認できる。

4 まとめ

静電誘導形静電容量式フィルムエンコーダについて、移動子側電圧を静電誘導により与える方式において、誘導電圧を解析的に求めるモデルを提案した。エンコーダを試作して各電極間の静電容量を測定し、モデルと矛盾が無いことを確認した。更に実際に動作を検証し、直線性が得られていることを確認した。

謝辞

本研究の一部は、JST「大学発ベンチャー創出推進」の助成を受けた。

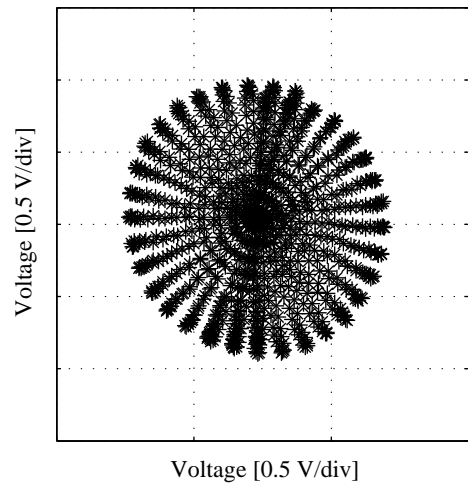


Fig. 7 AC Lissajous figure

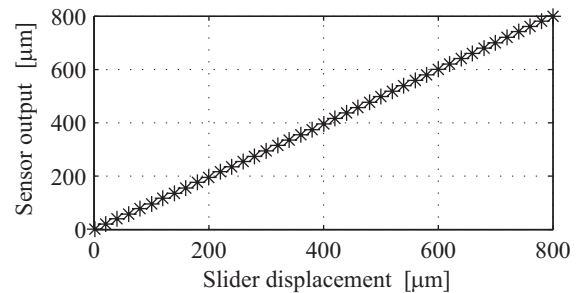


Fig. 8 Slider displacement and Sensor output

参考文献

- [1] 権藤雅彦, オリンパス株式会社, "公開特許公報(A)", 特許出願公開番号 特開 2005-221472, (2005).
- [2] 小柳栄次, "ロボットセンサ入門", 株式会社 オーム社, (2004), p59-62.
- [3] 盛植昭彦, "変位を検出するセンサ", 工業調査会, (1996), p170-174.
- [4] Larry K. Baxter, "Capacitive Sensors", IEEE Press, (1997).
- [5] Norio Yamashita, Zu GUan Zhang, Akio Yamamoto, Masahiko Gondo, Toshiro Higuchi, "Voltage-induction type electrostatic film motor driven by two- to four-phase ac voltage and electrostatic induction", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 140, No. 2, (2007), pp.239-250.
- [6] Akio Yamamoto, Toshiki Niino, and Toshiro Higuchi, "Modeling and Identification of an Electrostatic Motor", Precision Engineering, Vol. 30, No. 1, (2006), pp.104-113.