

フレキシブル基板を用いた静電容量型屈曲センサの開発

西嶋 隆 山本晃生* 樋口俊郎* 稲葉昭夫

A Capacitance type Bending Sensor using Flexible Printed Circuit Film

Takashi NISHIJIMA Akio YAMAMOTO Toshiro HIGUCHI Akio INABA

あらまし FPC (Flexible Printed Circuit) フィルムを用いた薄型・軽量の静電容量型の屈曲センサを開発した。屈曲センサは厚さ約100 μm の一对のFPCフィルムで構成し、FPCフィルム内部には電極幅60 μm の三相結線した平行電極が160 μm ピッチで埋め込んである。本センサはこの一对のFPCフィルムからなる6端子間の静電容量が屈曲によって変化し、それを検出することでセンサ全体の屈曲を計測する。本報では、開発した屈曲センサの動作原理、製作方法及び、性能評価実験について述べる。今回試作した屈曲センサでは、屈曲範囲 $\pm 0.66\text{rad}$ の範囲において、最大誤差0.069radの性能を得た。

キーワード 静電容量, 屈曲センサ, FPCフィルム

1. 緒言

屈曲センサは、人の関節などのように、屈曲の中心軸が機械的に取り出すことが困難な場合において有効である。例えば、人間工学における人体の腕関節や足関節などの関節角度の検出やVR分野における入力デバイス等に用いられ、商品化されているものもある^[1,2]。

これらの従来の屈曲センサに用いられる基本原理は、歪ゲージ式による電気抵抗変化、導電性ゴムの抵抗変化、圧電フィルムの圧電効果、光ファイバの光減衰等を応用したものが知られている。

本報では、静電フィルムモータ^[3]と同様の電極構造を有するFPCフィルムを用いた、非常に軽量・薄型な特徴を有する、静電容量型の屈曲センサを開発したので、その基本原理と製作方法及びプロトタイプを用いた実験について報告する。

2. 原理

2. 1 基本構成

図1に本センサに用いるFPC(Flexible Printed Circuit) フィルムの写真を示す。基本構成はこのフィルムを2枚用い、互いに重ね合わせたものである。2枚のFPCフィルム内部には、三相結線された帯状の平行電極が配置されている。電極幅は60 μm 、電極ピッチ p は160 μm 、寸法は長さ120mm、幅20mm、厚さ約100 μm である。フィルム素材はポリイミド、電極は銅であり、薄型、柔軟である。

一对のフィルムは片方の端面で接着されており、もう一方の端面は拘束せず自由となっている。図2にセンサを平坦な状態から屈曲させた時のフィルム断面の模式図を

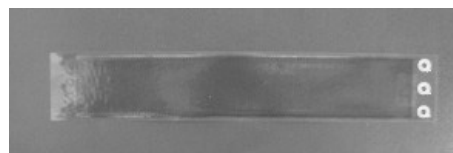


図1 屈曲センサに用いるFPCフィルム

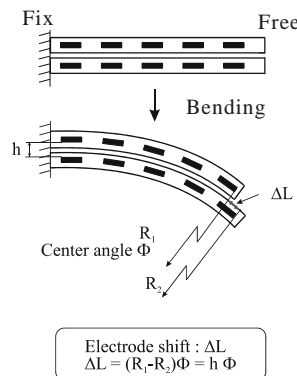


図2 センサを屈曲させた時の模式図

示す。同図のように、2枚のFPC基板の曲率半径が異なるため、端面では長さ $h\phi$ の相対的な電極のずれ（以降、電極シフトとする）が生じる。ここで、 h は電極表面間の距離、 ϕ は曲げ角度（外側のフィルムの中心角）である。本センサは、このように曲げに応じてフィルム全体にわたる電極シフトが生じ、その結果生じる2対のFPCフィルムで構成される6端子間の容量係数の変動から、センサの中心角を検出する。

2. 2 FPCフィルムの6端子間容量係数行列

2. 2. 1 平坦な状態の容量係数行列

2枚のFPCフィルムを対向させ重ね合わせた初期状態及び、片方の基板を電極長さ方向の垂直方向に x 移動した

* 東京大学大学院工学系研究科

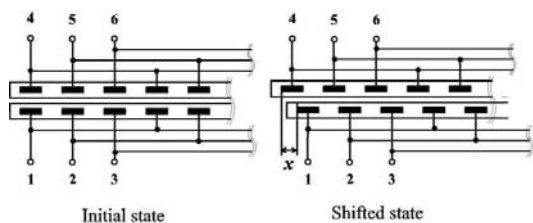


図3 センサを屈曲させた時の模式図

状態のFPCフィルムの断面模式図を図3に示す。2枚のFPC基板の6端子からなる静電容量行列は、片方のFPC基板の移動量*x*に関して次式のように表される^[4]。

$$C(\theta_e) = \begin{bmatrix} C_{st}(\theta_e) & C_t(\theta_e) & C_t(\theta_e) \\ C_t(\theta_e) & C_{st}(\theta_e) & C_t(\theta_e) \\ C_t(\theta_e) & C_t(\theta_e) & C_{st}(\theta_e) \\ C_m(\theta_e) & C_m(\theta_e - 2\pi/3) & C_m(\theta_e + 2\pi/3) \\ C_m(\theta_e + 2\pi/3) & C_m(\theta_e) & C_m(\theta_e - 2\pi/3) \\ C_m(\theta_e - 2\pi/3) & C_m(\theta_e + 2\pi/3) & C_m(\theta_e) \\ C_m(\theta_e) & C_m(\theta_e + 2\pi/3) & C_m(\theta_e - 2\pi/3) \\ C_m(\theta_e - 2\pi/3) & C_m(\theta_e) & C_m(\theta_e + 2\pi/3) \\ C_m(\theta_e + 2\pi/3) & C_m(\theta_e - 2\pi/3) & C_m(\theta_e) \\ C_{sl}(\theta_e) & C_l(\theta_e) & C_l(\theta_e) \\ C_l(\theta_e) & C_{sl}(\theta_e) & C_l(\theta_e) \\ C_l(\theta_e) & C_l(\theta_e) & C_{sl}(\theta_e) \end{bmatrix} \quad (1)$$

容量係数は電極配置の対象性から、*x*が3ピッチ移動する毎に同じ相対位置となる。このことから、式(1)では*x*の電極3ピッチ分の移動を1周期とする電気角 θ_e を用いて表記している。すなわち*x*と θ_e の関係は、

$$\theta_e = \frac{2\pi}{3p} x \quad (2)$$

である。なお、 C_{st} 、 C_{sl} 、 C_t 、 C_l は、電極の構造上 θ_e の1次、2次の周期性を除外できると考えられ、各成分を次のように記述する。

$$\begin{aligned} C_{st}(\theta_e) &= C_{st0} + C_{st3} \cos(3\theta_e) \\ C_{sl}(\theta_e) &= C_{sl0} + C_{sl3} \cos(3\theta_e) \\ C_t(\theta_e) &= -C_{t0} - C_{t3} \cos(3\theta_e) \\ C_l(\theta_e) &= -C_{l0} - C_{l3} \cos(3\theta_e) \\ C_m(\theta_e) &= -C_{m0} - C_{m1} \cos(\theta_e) - C_{m2} \cos(2\theta_e) - C_{m3} \cos(3\theta_e) \end{aligned} \quad (3)$$

2. 2. 2 一定曲率で曲がった状態の容量係数行列

センサ両端を被測定物に固定して曲げ角を計測する場合、センサは複雑な形状に曲げられることはなく、おおよそ一定の曲率で曲げられると仮定し、ここでは一定曲率で曲げられた状態の容量係数行列を求める。

図4に曲げたセンサの電極シフトを示す模式図を示す。ここで、センサを曲げたときにセンサ端面に生じる電極シフトを電気角で表した量を θ_ϕ と定義する。すなわち、

$$\theta_e = \frac{2\pi}{3p} h\Phi \quad (4)$$

である。いま図4のように、曲げたセンサを*N*分割して考えると、一定曲率で曲げられているため電極シフトは1次関数的に増加し、第*j*番目の位置での電極シフト θ_j は、

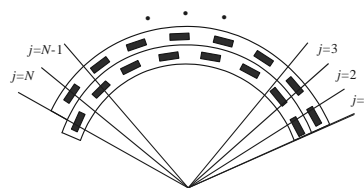


図4 曲げたセンサの電極シフトを示す模式図

$$\theta_j = \frac{j}{N} \theta_\phi \quad (5)$$

となる。*N*を十分に大きくすれば、微小部分の各要素の形状は平坦であると仮定でき、微小部分の静電容量モデル $C_j(\theta_e)$ は平坦な状態の静電容量モデル $C(\theta_e)$ を用いて、次式となる。

$$C_j(\theta_e, \theta_\phi) = \frac{1}{N} C(\theta_e + \frac{j}{N} \theta_\phi) \quad (6)$$

上式は、平坦な状態の静電容量行列における電極位置 θ_e に、曲げることで生じる移動子の移動量 θ を加算したものである。全体の静電容量モデル $C_b(\theta_e, \theta_\phi)$ は、*j*=1から*N*までの総和で表すことができ、積分形式で示すと

$$C_b(\theta_e, \theta_\phi) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N C(\theta_e + \frac{j}{N} \theta_\phi) = \frac{1}{\theta_\phi} \int_0^{\theta_\phi} C(\theta_e + \eta) d\eta \quad (7)$$

となる。上式が一定曲率で曲げた状態の容量係数行列である。

2. 3 センサ信号の検出方法

片方のFPCフィルムの端子1~3に振幅 v_s 、各周波数 ω_s の三相正弦波のセンサ信号を入力し、もう一方の端子4~5はすべて接地しているとする、センサ入力信号の印加電圧ベクトル v_s は次式となる。

$$v_s = v[\cos(\omega_s t), \cos(\omega_s t - 2\pi/3), \cos(\omega_s t + 2\pi/3), 0, 0, 0]^T \quad (8)$$

各端子に流れる電流を電流ベクトル i_s とすると、 i_s 、 v_s 、 C_b の関係より

$$i_s = \frac{d}{dt} (C_b v_s) \quad (9)$$

が成立する。これを解くと各端子に流れる電流 $i_s = [i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}, i_{s4}, i_{s5}, i_{s6}]^T$ を得ることができる。

i_{s4} 、 i_{s5} 、 i_{s6} を求めると三相对称($i_{s4} + i_{s5} + i_{s6} = 0$)となり、2枚のフィルムは端面で固定されているため、移動量 $\theta_e = 0$ を代入し、 i_{s4} について示すと

$$i_{s4} = -\frac{3v_s \omega_s}{\theta_\phi} \sin\left(\frac{\theta_\phi}{2}\right) \left(C_{m1} \cos(\omega_s t - \frac{\theta_\phi}{2}) + C_{m2} \cos\left(\frac{\theta_\phi}{2}\right) \cos(\omega_s t - \theta_\phi) \right) \quad (10)$$

となる。また、電流 i_{s4} の位相とセンサ入力信号 v_{s1} の位相差 ϕ は、

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{C_{m1} \sin(-\frac{\theta_\phi}{2}) + C_{m2} \cos(\frac{\theta_\phi}{2}) \sin(-\theta_\phi)}{C_{m1} \cos(-\frac{\theta_\phi}{2}) + C_{m2} \cos(\frac{\theta_\phi}{2}) \cos(-\theta_\phi)} \right) \quad (11)$$

となる。

上式の位相差 ϕ はセンサ曲げ角度 Φ に依存しており、この位相差から曲げ角度 Φ を求めることができる。

2. 4 容量係数の同定

式11を評価するため、式3の容量係数を同定した。計測方法は2枚のFPCフィルムの相対位置を16μm毎に移動させ、その時の容量係数を測定した。結果を以下に示す。単位はpFである。

$$\begin{cases} C_{st0} = 326.4 \\ C_{st3} = 1.2 \\ C_{sl0} = 407.3 \\ C_{sl3} = 1.2 \\ C_{t0} = 102.7 \\ C_{t3} = 2.1 \end{cases} \begin{cases} C_{l0} = 144.0 \\ C_{l3} = 2.0 \\ C_{m0} = 36.4 \\ C_{m1} = 29.2 \\ C_{m2} = 4.0 \\ C_{m3} = 2.3 \end{cases} \quad (12)$$

3. 原理に基づくセンサの精度

式11をもとに、センサの曲げによる電極シフト θ_ϕ とセンサ出力 ϕ (位相差) を計算した結果を図5に示す。

下横軸はセンサの曲げによる電極シフト θ_ϕ を電気角で示している。縦軸はセンサ出力電流 i_{s4} の位相とセンサ入力信号 v_{s1} の位相差 ϕ を示す。グラフ上横軸は、電極ピッチ $p=160\mu\text{m}$ 、電極表面間距離 $h=100\mu\text{m}$ とした場合における、センサの曲げ角度 Φ を示している。解析によればセンサ出力 (位相差 ϕ) は曲げ角 Φ に対し若干の非線形性をもつことがわかる。

センサ出力はここで求められた曲線をもとに校正すればよいが、この非線形性はセンサの寸法や形状等に依存するため実装上問題であり、センサ出力はセンサの曲げ角度 Φ に線形であるとして信号処理を行うことが便利である。このように線形な信号処理を行った場合では図6に示すような直線をもとに、センサ出力の位相差 ϕ からセンサの曲げ角度 Φ を計算することになる。この場合、例えば図6のように、センサのフルスケールを中心角 $-2.4[\text{rad}]$ から $+2.4[\text{rad}]$ の範囲とすれば、最大で約 $0.117[\text{rad}]$ の位相差出力の誤差が生じる。この誤差は電極ピッチ $p=160\mu\text{m}$ 、電極表面間距離 $h=100\mu\text{m}$ としたセンサの場合では、中心角として約 10.5 度になると計算できる。しかし、例えば図7のように曲げ角度 Φ のフルスケールを中心角 Φ を $\pm 0.8[\text{rad}]$ とすれば、線形にフィッティングしても位相差出力の誤差は約 $0.023[\text{rad}]$ 、中心角にして約 2.05 度となる。

4. センサシステムの製作

4. 1 センサの製作

図8にセンサの組み立て方法を示す。各FPC基板の一端は接着固定し、もう一端は自由とする。この2枚のフィルムをその外側から潤滑用のテフロンテープを挟み、外部からラミネートフィルムで密着させる。図9に試作した、センサの外観を示す。

4. 2 センサ信号検出回路

図10に検出回路のブロック図を示す。三相正弦波 (基

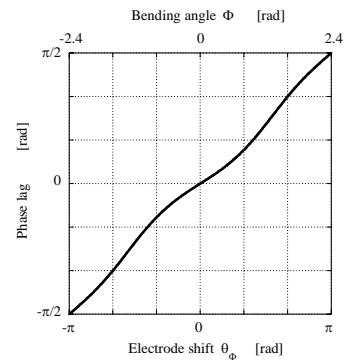


図5 曲げたセンサの電極シフトを示す模式図

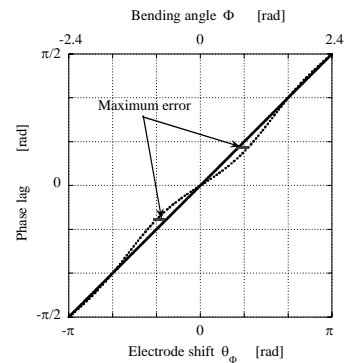


図6 センサ出力の線形化に伴う誤差 (フルスケールをセンサ中心角 $\pm 2.4[\text{rad}]$ とした時)

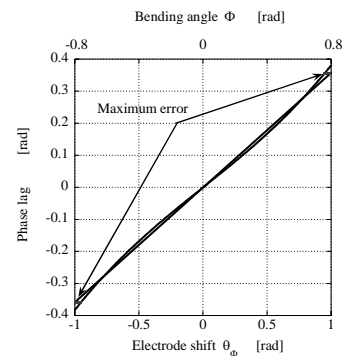


図7 センサ出力の線形化に伴う誤差 (フルスケールをセンサ中心角 $\pm 1[\text{rad}]$ とした時)

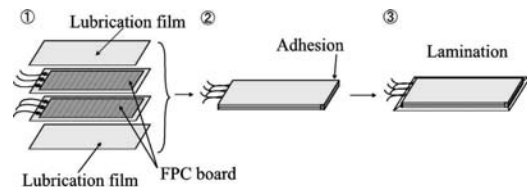


図8 センサの組み立て方法

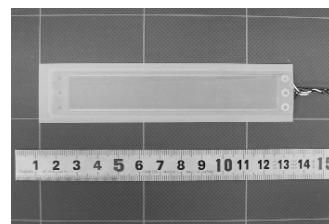


図9 試作したセンサの写真

準信号)の電圧振幅は $5V_{p-p}$ 、周波数は320kHzとした。センサ信号として端子4の電流を電圧信号に変換し検出した。基準信号とセンサ信号は位相比較器に入力し、その出力をマイコン(H83664F)へ送る。位相比較器の出力は2つあり、一つは基準信号とセンサ信号の位相 4π を周期とする0~5Vの三角波のアナログ電圧であり、もう一方は、三角波の傾きの正、負を判別する0or5Vのデジタル信号である。この二つの繰り返し信号をマイコンで処理することで、連続的な位相変化情報を得る。

5. 実験

5. 1 精度試験

試作した屈曲センサの曲げ角度に対するセンサ出力を測定した。測定では、曲げ角度を正負の両方に振ることが可能な実験装置を用意し、曲げ角度 ϕ が約 $\pm 0.66[\text{rad}]$ の範囲において実際の曲げ角度とセンサ出力を比較した。図11は曲げ角度の設定方法の模式図であり、曲げ角 ϕ はセンサが一定曲率であるとすれば次式で計算できる。

$$\phi = 2 \tan^{-1} \left(\frac{L}{R-h} \right) \quad (13)$$

測定結果を図12に示す。実験は、まずセンサを一方方向(+方向)に撓ませ(プロット1)、次に逆方向(-方向)に撓ませ(プロット2)、初期状態へ戻した(プロット3)。

出力の直線性は認められるが、本試作機では、最大 $0.069[\text{rad}]$ の誤差が確認された。特にセンサを一旦屈曲させ、平坦な形状に戻すときに大きな誤差が認められる。これらは、平坦な形状に戻すときに2枚のFPCフィルム間の摩擦により、FPCフィルムがスムーズに動かず、部分的に生じるフィルム間の隙間や撓みが原因であると考えられる。センサの直線性を向上させるためには、フィルム間の潤滑を向上させるための組み立て方法の更なる検討が必要であると考えられる。

6. まとめ

FPCフィルムを用いた新しい静電容量型屈曲センサを開発し、その原理を明らかにした。センサシステム(屈曲センサと信号検出回路)を試作し、実験を行った結果、精度は曲げ角 $\phi \pm 0.66[\text{rad}]$ の範囲において、最大誤差は約 $0.069[\text{rad}] (=3.9^\circ)$ であり、直線性の向上にはセンサの組み立て方法、FPC基板の潤滑方法が必要であるという知見を得た。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、機械設備購入のために補助金を頂いた日本自転車振興会に深く感謝いたします。

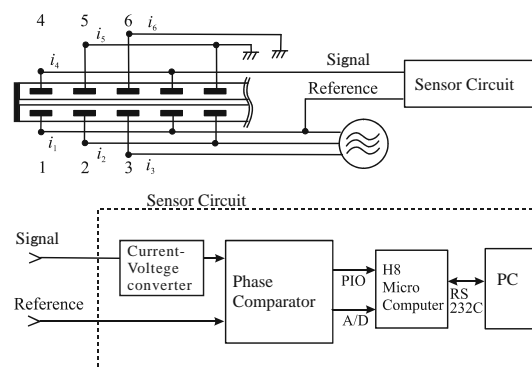


図10 検出回路のブロック図

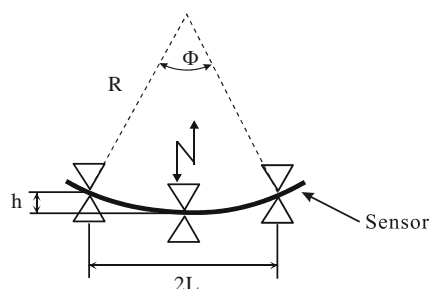


図11 計測方法

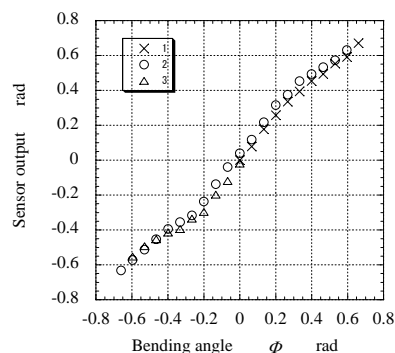


図12 精度試験結果

文 献

- [1] Flexible Goniometer System 製品カタログ : Biometrics Ltd [Http://www.biometricsltd.com/bonio.htm](http://www.biometricsltd.com/bonio.htm)
- [2] CyberGloveThe Virtual Technology Inc. [Http://www.Vrealities.com/dg5glove.html](http://www.Vrealities.com/dg5glove.html)
- [3] 新野俊樹, 樋口俊郎, 柄川素: 交流駆動両電極形静電モータ, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, pp.97-102, (1997)
- [4] 西嶋隆, 山本晃生, 樋口俊郎, 稲葉昭夫: 柔軟な構造を有する静電フィルムアクチュエータの開発 - 推力特性評価 -, 精密工学会誌, Vol.69, No.3, pp.443-447 (2003)