

# マイクロフォース・モーメントセンサ埋め込み型 柔軟指先の製作と圧縮実験による評価\*

井上貴浩\*1, 藤井郁夫\*2, 平井慎一\*3 Qiang Wang\*4, Dzung Viet Dao\*4, 杉山進\*4

## Development of a Micro-Force/Moment Sensor Embedded Soft Fingertip and Its Experimental Verification by Compression Test

Takahiro Inoue\*1, Ikuo Fujii\*2, Shinichi Hirai\*1, Qiang Wang\*3, Dzung Viet Dao\*3, and Susumu Sugiyama\*3

\*1 Department of Systems Engineering for Sports, Okayama Prefectural Univ., 111 Kuboki, Soja, Okayama, Japan, 719-1197

\*2 RICOH Japan, 8-13-1 Ginza, Chuo, Tokyo, Japan, 104-8222

\*3,4 Dpt. Robotics, Ritsumeikan University, 1-1-1 Noji-higashi, Kusatsu, Shiga, Japan, 525-8577

This paper introduces a high-performance tactile sensor capable of simultaneously measuring 1-axis force and 2-axes moments, which is produced by MEMS technology. We create a Tactile sensor *Embedded Soft fingertip* (TES) for the future application to robotic manipulation problems. We give the intimate explanation of the sensor during the fabrication process and the basic configuration of the total electric circuit. Finally, we demonstrate the effectiveness of the TES by performing its compression test, and verify that this sensor is applicable to the robotic handling and its feedback system.

**Key Words :** Robot, Elasticity, Sensor, Soft fingertip, Tactile, Mechatronics, Haptic device, Sensor Fusion, Robot hand

### 1. はじめに

一般家庭に広く普及しているデジタルカメラを代表とするデジタル機器はますます小型化の一途をたどっている。急速な小型化を支えたのが機器内部の個々の要素の小型化であるが、信号線の微細化・軽量化も小型化に大きく貢献している。特に、フレキシブルケーブルの導入により、小型化・高機能化が実現できたと言える。しかしながら、それらのケーブルが柔軟に変形するが故に、機器の製造過程においてはそのほとんどを人手によって捌いているのが現状である。これらの作業を自動化することが、多方面に渡る企業の要求になってきている。

そこで本プロジェクトでは、薄く自由に変形し得るフレキシブルケーブルを操作することを目的とした、ロボットハンドの開発と動作計画を最終目標とする。本稿ではまず、そのロボットハンドに搭載可能で、以下の簡単な要求仕様を満たす柔軟指先の製作とその評

価実験を行う。

1. 0.1 mm 程度の薄いケーブルを傷つけないような柔らかい面接触を実現できるハンド。
  2. 大きな摩擦力を発生させ安定把持できるハンド。
- 一方で、中実の半球形状をした柔軟指先における力学的特徴として、指先変位量に対して線形的に指先剛性が増加するという報告がある<sup>(5)</sup>。つまり、変形の増大に伴って把持の安定度が増すことになる。これは、接触面が大きくなれば把持がより安定になるのと等価であり、上記要求1に適していることが分かる。

加えて、接触面が大きくなると指先弾性力の増大により、静止摩擦力が増加し滑りに頑強な把持を実現できる。これにより上記要求2も高いレベルで満たすことができる。

よって、本稿では中実で半球形状の柔軟指先の底辺中央に、新開発のマイクロフォース・モーメントセンサを埋め込み、処理回路を含めたロボットハンドに取り付ける柔軟指の構造を記述する。また、柔軟指の接触実験を行うことで、本デバイスの有効性を実証する。

### 2. センサ埋め込み型柔軟指先の構造

まずはじめに、本研究で製作するマイクロフォース・モーメントセンサ埋め込み型柔軟指先を TES(Tactile

\* 原稿受付 2007 年 5 月 10 日

\*1 正員、岡山県立大学情報工学部スポーツシステム工学科  
(〒719-1197 岡山県総社市窪木 111 番地)

\*2 株式会社リコー

\*3 正員、立命館大学理工学部ロボティクス学科(平井研究室)

\*4 立命館大学理工学部ロボティクス学科(杉山研究室)  
Email: inoue@ss.oka-pu.ac.jp

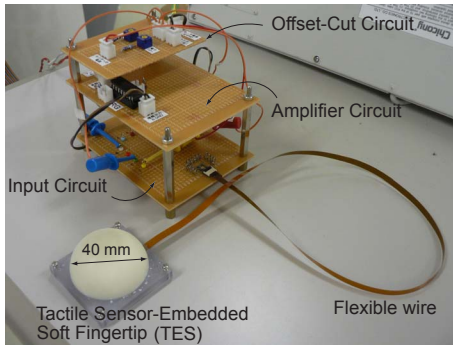


Fig. 1 TES and its measurement circuit system

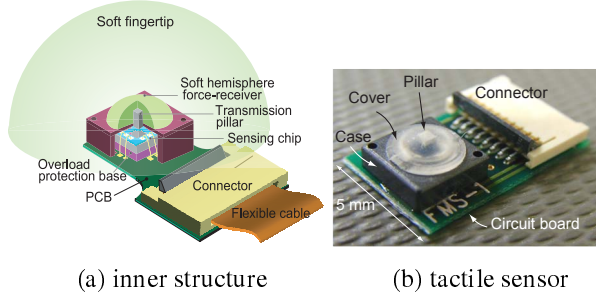


Fig. 2 A novel tactile sensor packaged for sensing slight change of force and moment.

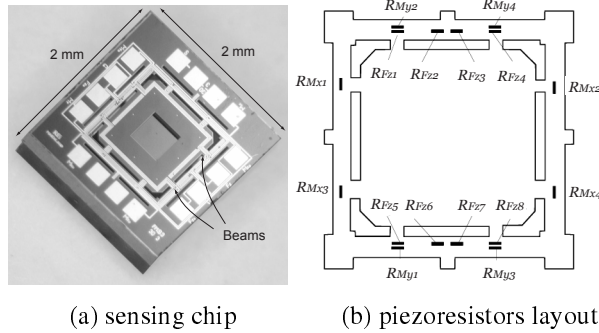


Fig. 3 An enhanced six-axes micro-force/moment sensing chip.

Sensor-Embedded Soft Fingertip) と略称し、本章では TES の構造について記述する。

図 1 が本研究で製作した TES と種々の信号処理回路を組合わせた全体図である。直径 40mm のポリウレタンゴム（商品名：人肌ゲル）に内蔵されたタクトイルセンサから伸びたフレキシブルケーブルが入力回路に接続されており、次段のオフセットカット回路、増幅回路を介して安定的な出力信号を計測できる。TES は 3 重構造となっており、環境と接触するゴム部分では中実構造になっている。TES の内部構造の模式図を図 2-(a) に、内蔵されているタクトイルセンサデバイスを図 2-(b) に示す。さらに、タクトイルセンサ内部には

Table 1 Specification of the sensor.

| Strength    | Force       | Moment             |
|-------------|-------------|--------------------|
|             | 5000 [mN]   | 800 [N·μm]         |
| Sensitivity | $S_{F_z}$   | $S_{M_x}, S_{M_y}$ |
|             | 0.2 [mV/mN] | 2.83 [mV/(N·μm)]   |

力伝達用ピラーと共に、6 軸マイクロフォース・モーメントセンサチップ（図 3-(a)）が薄い透明ゴム被膜を介して設置されている。また、チップ上のピエゾ抵抗素子の配置図を図 3-(b) に示す。なお、より詳しいセンサチップの強度設計や構造、またゴム皮膜後の接触基礎実験に関しては、Dzung らの文献<sup>(6)(7)</sup>を参照されたい。

本センサは、最大 3 軸の力と 3 軸のモーメントを計測可能であるが、本稿では 3 軸 ( $F_z, M_x, M_y$ ) のみを計測対象としている。よって、3 軸それぞれの感度を強度と共に表 1 に示す。

### 3. TES の製作工程

第 1 章で述べたように、本触覚デバイスは薄い柔軟変形物に対する操りスキルの獲得を目指し、ロボットハンドに取り付けた上での運用を想定している。フレキシブルケーブルを滑らずに安定把持するための必要把持力やモータスペック等のロボットハンドに関する機械的制約、ならびに、センサ感度等を総合的に考慮すると、図 1 のような直径 40mm の指先である必要はなく直径 20mm で十分対応可能である。したがって、本論文では直径 20mm の TES に関する製作工程を以下に示す。これらの力学的観察は、柔軟指先の弾性モデルと圧縮実験結果との比較により得られた知見に基づいている<sup>(5)(8)</sup>。

#### 3.1 指先材料と製作方法

本デバイスの指先材料には、フィギア製作等に多用される「人肌ゲル」（エクシールコーポレーション）を用いる。同材料の線形ヤング率は、力学パラメータ同定試験により約 0.20MPa ~ 0.24MPa を得ている<sup>(5)(8)</sup>。本商品の特徴として、同程度のヤング率の指先を製作する限り同梱されている定量の樹脂溶剤と硬化剤を混合するだけでよく、混合割合を求め調合する必要がないため製作が容易である。また、内部の気泡の発生がほとんどなく、アクリル系材料の型枠との剥離が容易なため、センサの埋め込み作業を含んだ製作工程に適している。

図 4 は TES の製作手順でありその完成図を図 5 に示す。図 4-(a) にアクリル材料で加工したセンサ用ベースとカバーを示す。それぞれの寸法は、ベースが 26mm 四方で厚み 5mm、カバーが厚み 0.4mm になっている。

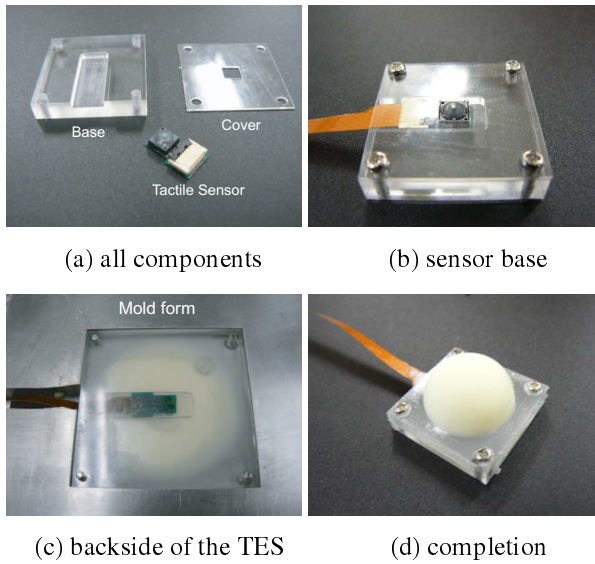


Fig. 4 Fabrication process of the TES.

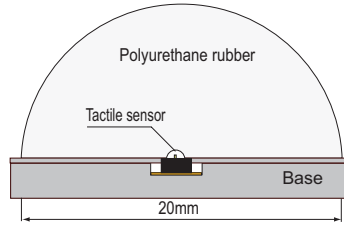


Fig. 5 Illustration of the TES

ベースにはタクトイルセンサとフレキシケーブルが通る溝が加工されている。それらを組み合わせてセンサベースとし(図4-(b)), タクトイルセンサを中央に配置する。次に、あらかじめ混合した「人肌ゲル」を直径20mmの半球形状型枠に注入し、センサベースを逆向きに挿入する(図4-(c))。硬化後、センサベースを剥離するとTESが完成する(図4-(d))。

**3.2 オフセット電圧調整回路と増幅回路** 本センサ単体での出力電圧は、数mV～数十mVのオーダーであるため、ロボットハンドの触覚デバイスとしての用途を考慮すると、増幅回路を組み込む必要がある。また、各3軸出力値( $F_z, M_x, M_y$ )には無負荷状態で最大出力に対して10%程度のオフセット電圧が発生するため、増幅前段においてオフセットカット回路を組み込む必要がある。さらに、柔軟材料で覆われたセンサの繰り返し使用によってオフセット電圧値が常に変動するため、センサ電源投入後、毎回手動で調整する必要がある。したがって、センサ内部に形成されているピエゾ抵抗素子によるホイートストンブリッジを利用して並列に可変抵抗器を取り付け、オフセット電圧を調整する。図6-(a)がオフセット電圧調整回路であり、図6-(b)に( $F_z, M_x, M_y$ )それぞれの実際の電子回路

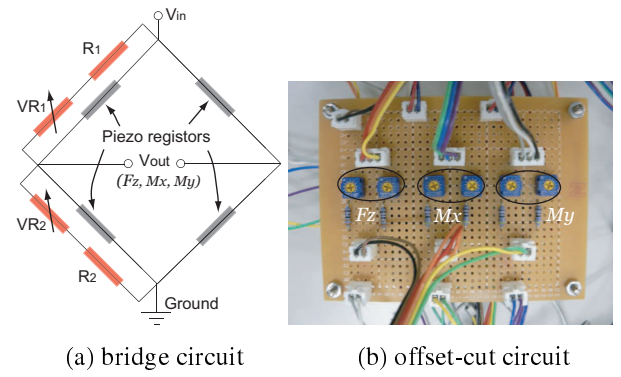


Fig. 6 An offset-cut bridge circuit and its electronic circuit board.

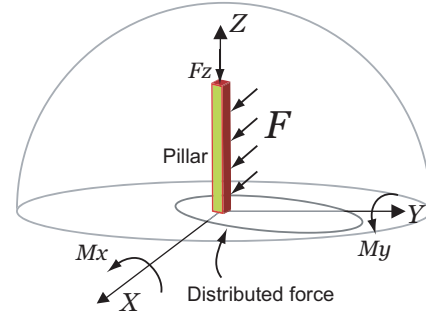


Fig. 7 Mechanics of applied forces and moments.

を示す。また、出力電圧に対する増幅率を $F_z$ で2000倍、 $M_x, M_y$ で500倍としている。差を与えた理由は、表1に示したように、 $F_z$ に比べて $M_x, M_y$ の方が、感度が大きいためである。

#### 4. 力・モーメント検出のための力学と操り戦略

本触覚デバイスには、指先が柔軟な故に様々な方向から外力や外モーメントが加わる。例えば、指先下部に図7のような分布力(圧力)が加わり、ゴム弾性による $F$ という外力がピラーに生じるとする。このとき、図3-(b)のように配置されたピエゾ抵抗素子に歪みが生じ、その結果、独立に組まれたブリッジ回路によって3軸出力( $F_z, M_x, M_y$ )がそれぞれ独立に検出される。

一方、本稿では焦点としていないが、フレキシケーブルを掴むような単なる把持動作ではなく対象物の操り動作まで取り扱う場合、触覚情報をハンドの制御に利用しようとする、触覚情報から対象物情報を知る必要がある。つまり、対象物重心の位置と姿勢をリアルタイムで取得しなければならない。本稿での3軸出力センサ値と対象物情報をまとめると以下の通りである。

1. センサ出力値( $F_z, M_x, M_y$ )。

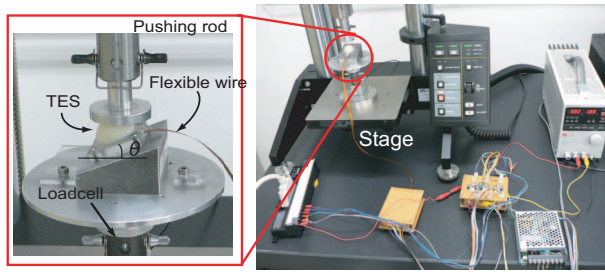
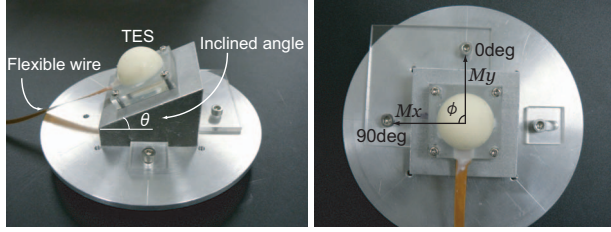


Fig. 8 Apparatus for compression test.



(a) relation of  $\theta$

(b) relation of  $\phi$

Fig. 9 Compression test and setting of the TES.

2. 対象物情報: 指先最大変位量  $d$ , 対象物姿勢  $\theta_{obj}$ , 接触方向  $\theta_c$ .  
 $(d, \theta_{obj}, \theta_c)$  を様々に変え TES の接触基礎実験を行い  $(F_z, M_x, M_y)$  との関係近似し定式化する必要がある. 以上のように, センサ出力値から対象物情報を求める逆問題を実験データから求め両関係をマッピングすることで,  $d(F_z, M_x, M_y), \theta_{obj}(F_z, M_x, M_y), \theta_c(F_z, M_x, M_y)$  を導くことが今後の研究課題として期待される.

## 5. TES の圧縮実験とその評価

本章では, 完成したタクトイルセンサ埋め込み型柔軟指に対して静的な圧縮試験を行うことで, 本触覚デバイスの有効性を検証する.

**5.1 実験装置と方法** TES に所望の荷重を加えるために, INSTRON 社製マイクロテスター (5848 型) を使用する. 実験装置の構成図を図 8 に示す. マイクロテスターは垂直降下するロッド部, 対象物体に加えた荷重を計測するロードセル部, ロッドが対象物体に加える力や移動速度などを制御するコントロール部から構成されている. 出力電圧の計測には, CONTEC 社製のアナログ入力ボード (AD12-16(PCI)EV) を使用する.

実験方法としては, 3 軸力成分  $(F_z, M_x, M_y)$  の出力電圧を計測するために, まず図 9-(a), (b) に示すように,  $\theta$  の傾斜を持つ治具の上に TES を設置し, 次に, 接触方位角  $\phi$  を持つ方向に治具を固定する. この配置により任意の方向からの圧縮実験を可能にする. 本

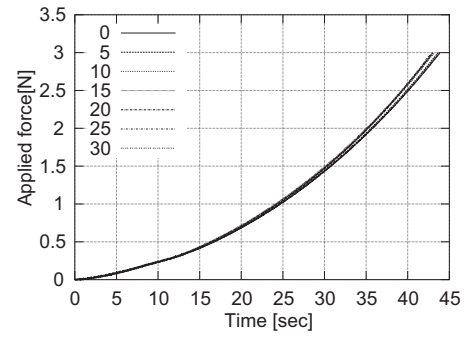
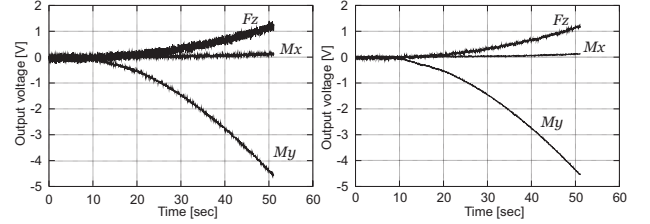


Fig. 10 Input pattern of the applied force which is measured by the loadcell in a basic experiment.



(a) before filtering

(b) after filtering

Fig. 11 Digital filtering process of sensor measurements.

実験では, 傾斜角  $\theta$  が  $5^\circ$  から  $30^\circ$  までの  $5^\circ$  刻みの 6 種類の傾斜治具を用意し実験を行う. また, 方位角  $\phi$  に関しては,  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  と変化させて圧縮方向に荷重を加えた. 本試験ではロッドの下降速度を  $3.0\text{mm/min}$  とし, ステージ下部にあるロードセルの読みが目標の  $3\text{N}$  に到達するまで荷重を加えて, 同時にセンサ出力電圧を計測する. 図 10 にロードセルによる印加荷重-時間のグラフを示す. これは, センサ値ではないことに注意されたい. 図内の数値は, 6 種類の傾斜角における実験結果と垂直接触結果 ( $\theta = 0^\circ$ ) を示す. 図から分かるように, 傾斜角に関わらず印加荷重は時間に対してほぼ等しい曲線を描く.

## 5.2 センサノイズとデジタルフィルタ処理

TES 圧縮の本試験の前に実施した基礎実験において, センサ出力には図 11-(a) に示すように  $F_z$  で幅が最大約  $0.37\text{V}$ ,  $M_x, M_y$  で最大約  $0.1\text{V}$  のノイズが生じた. そこで, このセンサ出力のノイズを除去するためにデジタルフィルタ処理を施して平滑化しセンサ出力値を得る. フィルタには時間関数として式 (1) に示す IIR (Infinite Impulse Response) 型を用いた.

$$V(t) = rU(t) + (1-r)V(t-1) \quad (1)$$

上式において  $U(t)$  がセンサ計測値で,  $V(t-1)$  が一段前の平滑化した値である. ここで,  $r = 0.1$  として処理



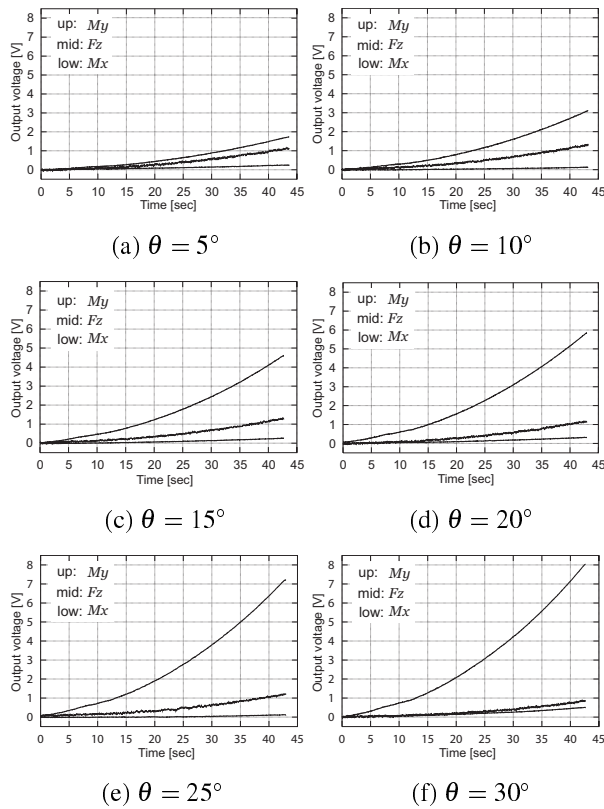


Fig. 12 Results of compression test when  $\phi = 90^\circ$ .

を行った。図 11-(b) にフィルタ処理後の計測結果を示す。フィルタ処理を行うことによってノイズが大きく軽減されていることが確認できる。以降の試験結果ではフィルタ処理を行った計測結果を示す。

**5.3 実験結果** 本圧縮実験では  $\theta$  を  $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$  で、 $\phi$  を  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  で変化させているため、最終的に 24 通りの実験データを取得している。取得データ量が膨大であるため、その特徴を示すために  $\phi = 90^\circ$  のときの実験結果を図 12 に図示する。横軸に時間軸、縦軸にセンサの出力電圧を示す。3 章で述べたように、 $F_z$  が 2000 倍に、 $M_x, M_y$  が 500 倍に増幅されている。また、図 12 の (a) から (f) までの図は、傾斜角  $\theta$  を変化させたときの結果である。

この結果から分かるように、 $\theta$  が増加するにしたがって  $M_y$  も同様に増加しているが、逆に  $M_x$  は変化していない。この現象は図 9-(b) のモーメントの位置関係 ( $\phi = 90^\circ$ ) から理解できる。また、 $F_z$  がほとんど変化していないことが分かる。これは図 8 にあるように、ロッドを通して TES に加わる荷重の方向が指先半球形状の中心を向いているためである。逆言すると、接触外力が TES に対して求心方向を向いている限り、どの角度から圧縮しても  $F_z$  は変化しないことを意味する。仮に、荷重方向が TES の傾斜面に垂直である場合、理

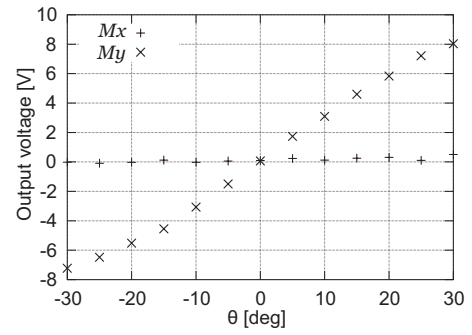


Fig. 13 Relationship between  $M_x$  and  $M_y$ .

論と実験の両観察から傾斜角  $\theta = 0^\circ$  のときに  $F_z$  が極小を持つことが知られている<sup>(5)</sup>。また、図 12-(c), (d), (f) において、 $M_x$  がわずかに上昇していることが分かる。この理由として、それらの傾斜治具の取り付け精度が挙げられる。つまり、 $\phi = 90^\circ$  になるように治具の取り付けを行っているが、実際にはわずかな誤差があったと考えられる。その結果、特に感度が良いモーメント出力 (ここでは  $M_x$ ) がわずかに検出され、増幅されることによって  $M_x$  が増加したと推察される。

次に、モーメントの軌跡をさらに観察するために、 $M_x, M_y$  をまとめた結果を図 13 に示す。第 1 象限にプロットした点列が  $\phi = 90^\circ$  の  $M_y$  データに相当し、第 3 象限のそれが  $\phi = 270^\circ$  の  $M_y$  データに相当する。図から分かるように、 $M_x$  と  $M_y$  間のクロストーク (他軸への不必要な信号の漏れ) がほとんどなく独立に計測できることを示している。また、 $M_y$  の軌跡ではわずかに S 字カーブが見受けられる。この現象は、指先柔軟材料の幾何学的、材料学的非線形性に起因すると考えられ、数理モデルとして明確化するためにはさらなる実験的検証が必要である。

## 6. おわりに

本稿では、MEMS 技術で設計し開発されたタクトイルセンサを埋め込んだ柔軟指先 (TES) を製作し、その基本性能ならびに、製作工程を記述した。また、本触覚デバイスへの圧縮実験を行うことで、クロストークなく 3 軸の出力値それぞれが独立に計測できていることが分かった。これらの基礎実験を通して、今回製作した触覚デバイス (TES) の基本特性を明らかにし、本プロジェクトに利用可能なデバイスであることを確認できた。

今後は、ロボットハンドによる操り問題への拡張を視野に入れて改良し、計測値から把持対象物情報を解析的に求めることのできる逆問題の定式化に取り組む。

**謝辞** 本研究の一部は、21 世紀 COE プログラム「マイクロ・

## 文 献

- (1) Yamada,D. et. al., Development of Elastic Robot Finger having Rides which can Detect a Distribution of Contact Condition, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.70, No.690 (2004), pp.236-242.
- (2) Chang,L.Y. and Matsuoka,Y., A Kinematic Thumb Model for the ACT Hand, *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, (2006), pp.1000-1005.
- (3) Murakami,K. and Hasegawa,T., Tactile Sensing of Edge Direction of an Object using a Robotic Fingertip with Soft Skin, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.24, No.2 (2006), pp.240-247.
- (4) Tada,Y. et. al., Anthropomorphic Soft Fingertip with Tactile Receptors in the Skin, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.23, No.4 (2005), pp.482-487.
- (5) Inoue,T. and Hirai,S., Elastic Model of Deformable Fingertip for Soft-Fingered Manipulation, *Transactions of the IEEE on Robotics and Automation*, Vol.22, No.6, (2006), pp.1273-1279.
- (6) Dzung Viet Dao, "Study on Silicon Piezoresistive Six-Degree of Freedom Micro Force-Moment Sensors and Application to Fluid Mechanics", *Doctoral thesis*, Ritsumeikan University, (2003).
- (7) Wang,Q. et. al., Development of a Soft Fingertip Sensor Utilizing MEMS-based Multi-axis Force Sensor, *Proceedings of Int. Symp. on Flexible Automation*, (2006), pp. 128-131.
- (8) Inoue,T. and Hirai,S., Elastic Force Models of Hemispherical Soft Fingertip with Geometric and Material Nonlinearities for Fine Soft-fingered Manipulation, *Journal of the Robotics Society of Japan (RSJ)*, Vol.25, No.2 (2007), pp.221-230.