ロボット指のための小型触覚センサの開発*

伊藤 彰人^{*1}, 辻内 伸好^{*2}, 小泉 孝之^{*2}
大島 裕子^{*2}, 野尻 芳郎^{*3}, 土屋 陽太郎^{*4}
平間 直道^{*5}, 黒木 史郎^{*5}

Development of a Small Tactile Sensor for Robot Finger

Akihito ITO^{*6}, Nobutaka TSUJIUCHI, Takayuki KOIZUMI,
Hiroko OSHIMA, Yoshiro NOJIRI, Yotaro TSUCHIYA,
Naomichi HIRAMA and Shiro KUROGI

^{*6} Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, Doshisha University,
1-3 Tatara-miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0332 Japan

This paper presents a new tactile sensor that can detect the vertical force and the shear force. This proposed tactile sensor detects an applied force as a change in electrical resistance in strain gauges attached to the surface. For outputs of this proposed sensor, the interaction occurs structurally, and the hysteresis also occurs since the force applying on the sensor is detected by the strain gauge attached to the surface. However, since the effects of the hysteresis are small and difficult to correct, we disregard the hysteresis, and only correct the interaction. Measurement of the vertical and shear forces applying on this proposed tactile sensor becomes possible after correcting the interaction. The experimental results show that three dimensional forces can measure using this proposed tactile sensor. This proposed tactile sensor has simple structure. Therefore, because of this structure, this tactile sensor can be made easily and realized as small size.

Key Words: Sensor, Measurement, Mechatronics and Robotics, Finite Element Method, Tactile Sensor, Strain Gauges, Robot Fingers

1. 緒 言

現在, ロボットには, 工業のみならず, 高度な作業を行う介護・福祉機器などに活躍の場が広がることが期待されている⁽¹⁾⁽²⁾. ロボットの適用分野の拡大に伴い, ロボットハンドの操作には, 物体を損傷させることなく, かつ滑らないように, 安定した状態で把持するなど, きめ細やかなマニピュレーションが必要である⁽³⁾⁽⁴⁾. このような高度な動作を実現するためには, ロボットハンドの表面に作用する圧力だけでなく, 表面に作用する滑り力を同時に検出する必要がある⁽⁵⁾. このことからロボットハンドには三軸触覚センサが必要不可欠となり三軸触覚センサへの期待も高まっている.

これまで様々な三軸触覚センサの研究, 開発が行われてきた. 金属梁の変形を歪ゲージにより計測するセ

ンサ⁽⁶⁾, マーカを埋め込んだ透明弾性体を CCD カメラで撮影し弾性体の変形情報から力を計測する光学式触覚センサ⁽⁷⁾, 弾性体表面に取り付けられた一次励磁コイルの位置を弾性体の反対側に取り付けられた二次誘電コイルによって検出することにより弾性体の変形を検出する電磁誘導の原理を用いた三軸触覚センサ⁽⁸⁾などが開発されている. しかし, 金属梁を用いるセンサでは構造が複雑になり, 光学式触覚センサでは映像装置が必要であるため小型化が困難である⁽⁹⁾. また, 電磁誘導の原理を用いた三軸触覚センサは小型化が可能であるが, 精度, 時間応答特性等の課題が残されている.

そこで本研究では, 歪ゲージを受感素子として用いた小型化が可能な触覚センサを提案する. 歪ゲージを用いた触覚センサは (i) 精度が良く直線性が良い, (ii) 温度変化による影響が少ない, (iii) 変位量が極めて小さく静的現象, 動的現象の測定が可能などの利点がある⁽¹⁰⁾. しかし, 歪ゲージを用いた三軸触覚センサの小型化に関してはあまり議論がなされてこなかった. そこで, まず三軸触覚センサの新しい構造を提案し, 有限要素解析により各軸方向の力が計測可能であること, 及び固有振動数が十分に高いことを確かめる. 次

* 原稿受付 2006 年 1 月 20 日.

^{*1} 正員, 同志社大学大学院工学研究科 (〒610-0332 京田辺市多々羅都谷 1-3).

^{*2} 正員, 同志社大学工学部.

^{*3} センサ・デバイス開発研究所 (〒182-0012 調布市深大寺東町 5-23-3).

^{*4} 正員, (株) テック技販 (〒611-0033 宇治市大久保町西ノ端 1-22).

^{*5} 東芝電子エンジニアリング (株) (〒235-8522 横浜市磯子区新杉田町 8).

E-mail: etf302@mail4.doshisha.ac.jp

に、三軸触覚センサを試作し、各軸方向の出力値の特性を計測し、本センサの評価を行う。試作したセンサは長さ 25[mm]、幅 25[mm]、高さ 10[mm]の大きさであり、機械的に構造が単純であるため製作が容易であり、小型化も可能である。

2. 三軸触覚センサの構造及び出力原理

三軸触覚センサの形状を図 1 に示す。触覚センサの材料は黄銅 (C2801) であり、上部の板が 4 本足で支えられた構造となっている。4 本の足の底面を本センサの剛性より高い鋼材 (SS400) に接着剤により固定されている。触覚センサの大きさは長さ 25[mm]、幅 25[mm]、高さ 10[mm]、厚さ 0.5[mm]である。本センサは作用する力を表面に貼られた歪ゲージの電気抵抗変化として検出する。Z 軸方向に作用する力を計測するための歪ゲージは半径方向の歪を計測するダイヤフラムゲージであり、図 2(a)に示す上面板の裏側の a, b, c, d の箇所に貼る。X, Y 軸方向に作用する力を計測する歪ゲージは箔歪ゲージであり、図 2(b)に示す足表面の a, b, c, d の箇所に貼る。X, Y, Z 軸方向を検出する歪ゲージには、各軸ごとに図 3 に示すブリッジ回路が組まれ、差動電圧を計測することで作用力を計測している。これにより本センサは垂直力とせん断力を計測することができる。4 本足の上下折り曲げ部にはくびれをつけ、X 軸方向もしくは Y 軸方向に力が作用した時に Y 軸方向もしくは X 軸方向の 2 本の足に生じる歪を小さくし、相互干渉を小さくしている。また上面には、直径 5.0[mm]、厚さ 1.0[mm]のゴム板が接着されており、Z 軸方向の作用力が上面板内で等分布になるようにしている。

3. 解析による検証

3.1 センサの計測値の検証 前章に示した三軸触覚センサが力を計測可能であることを検証するため有限要素法を用いて歪ゲージの変位量の解析を行う。シミュレーションには、構造解析ソフトウェア (UGS PLM ソリューションズ(株)NX Nastran, Ver.3.0) を用いた。本研究で使用した三軸触覚センサの有限要素モデルを図 4 に示す。本モデルは節点数 2323、要素数 2012 で構成されている有限要素モデルである。本モデルの縦弾性係数は $1.0 \times 10^5 [\text{N/mm}^2]$ 、横弾性係数は $3.7 \times 10^4 [\text{N/mm}^2]$ 、ポアソン比は 0.35 とした。これらは、実際のセンサの材料である黄銅 (C2801) の物性値である。

解析方法は、4 本足の底面の節点の変位を拘束し、ゴム板の貼られている部分の合力が各方向の作用力になるように一様に負荷した。そして、各節点の変位量から負荷時と無負荷時の各歪ゲージの長さを計算することで、作用力と歪量の関係を検証した。なお、三軸触覚センサとしての構造の有効性を検証するために解析を行ったので、本解析では上面に貼り付けたゴムについては考慮していない。

せん断力方向に力を作用させたときの作用力と歪の関係を図 5 に示し、垂直力方向に力を作用させたときの作用力と歪の関係を図 6 に示す。せん断力方向に力を作用させた場合には出力値に良い直線性が得られた。垂直力方向に力を作用させた場合には上面板の表面の伸びには非直線性が現れている。しかし、センサへの最大負荷が小さいことより、変形量は微小となるため、直線で近似しても問題はないと考えられる。これにより、各方向の作用力に対して歪ゲージによる力の計測が可能であることが示せた。

Fig. 1 The structure of tactile sensor

Fig. 2 The position of strain gauges

Fig. 3 The full bridge circuit

Fig. 4 The finite element model of sensor

Fig. 5 The analysis result of shear force

Fig. 6 The analysis result of vertical force

3.2 動特性の検証 前節同様に構造解析ソフトウェア (UGS PLM ソリューションズ(株)NX Nastran, Ver.3.0) を用いて固有値解析を行った。その結果を表 1 に示す。前節同様に 4 本足の底面の変位を拘束して解析した。1 次と 2 次のモード形状は上面板が X 軸もしくは Y 軸方向に振動するモードであり、3 次のモード形状は上面板が上下方向に振動するモードであり、4 次のモード形状は上面板が回転するねじれモードである。この結果より、本センサの固有振動数は 1000[Hz] 以上であり、ロボットハンドに搭載しても問題なく動的な力の計測が可能である。

Table 1 The dynamic characteristics of sensor

Natural mode	Eigenfrequency [Hz]
The first mode	8.601×10^3
The second mode	8.604×10^3
The third mode	1.338×10^4
The forth mode	1.507×10^4

4. 実験

試作した触覚センサを用いて出力値を検証するための実験を行った。

4.1 実験方法 センサに力を作用させた時の出力値の計測実験を行う。本研究における実験では、共和電業製のオンライン型コンディショナ(MCE-24)を動歪測定器として用いて、作用力に対する歪値の計測を行う。以下に示す 2 つの条件に対して実験を行う。

条件(a) X, Y, Z 軸それぞれの方向に力を作用させる。

X, Y 軸方向の作用力は、0.0[N]から 14.7[N]まで 4.9[N]ずつ増加させ、その後 4.9[N]ずつ減少させた。Z 軸方向の作用力は、0.0[N]から 49.0[N]まで 9.8[N]ずつ増加させ、その後 9.8[N]ずつ除去する。各方向力を作用させ、除去するまでの過程を 3 回続けて行う。

条件(b) X, Y, Z 軸方向に同時に力を作用させる。作用力は条件(a)の作用力の組み合わせとする。

条件(a)は本センサの出力値の特性を検証するための実験である。この実験により本センサの特性である定格出力値、非直線性、ヒステリシス、相互干渉性、繰り返し性を求めることができ、各計測値より本センサの精度を算出できる。条件(b)は垂直力とせん断力が同時に計測可能であるかを検証するための実験である。

実験装置には、図 7 に示す垂直力とせん断力を作用させることが可能な負荷実験機を用いる。この装置は

センサから離れた点に重力を利用した荷重を加えることでセンサに任意の力ベクトルを作用させる装置である。センサの表面には図8に示す黄銅の円盤を接着する。せん断力を作用させる場合には図9に示すようにこの円盤にワイヤーをねじで固定し、滑車を介し錘を載せる。このようにしてセンサにせん断力を作用させる。垂直力を作用させる場合にはこの円盤の上に球体を載せ、図10に示すように錘を載せる。このようにしてセンサに垂直力のみを作用させる。X, Y, Z軸方向に同時に力を作用させる場合は、上記の方法を組み合わせることによりセンサに三軸力を作用させる。

4.2 実験結果 条件(a)の結果を図11-13に示す。この結果より得られた本センサの特性を表2に示す。非直線性、ヒステリシス、繰り返し性は各方向の定格出力値に対する百分率[%RO]で示し、相互干渉は作用力方向の出力値との百分率で示した。また、各特性は実験で得られた値の最大値とした。本センサの各成分の出力は、各方向の作用力に対してほぼ線形関係にあり、ヒステリシスと相互干渉、繰り返し性の補正を行う必要があることがわかる。

条件(b)の結果を図14に示す。図14は、条件(b)の結果の一例であり、X軸、Y軸方向に9.8[N]の力を作用させ、Z軸方向に0.0[N]から49.0[N]まで9.8[N]ずつ作用力を増加させた時の実験結果である。これにより、センサに三軸力が同時に作用した場合においても出力値は作用力に対して線形性があり、相互干渉が生じていることがわかる。従って、相互干渉を補正する必要がある。

Fig. 7 The experimental equipment

Fig. 8 The shape of the disk

Fig. 9 The applied method of shear force

Fig. 10 The applied method of vertical force

Fig. 11 The outputs of sensor of X-axis direction forces

Fig. 12 The outputs of sensor of Y-axis direction forces

Fig. 13 The outputs of sensor of Z-axis direction forces

Table 2 The characteristic of sensor

	X, Y-axis	Z-axis
Nonlinearity [%RO]	3.5	1.5
Hysteresis [%RO]	3.6	1.3
Repeatability [%RO]	0.8	0.7
Interaction [%]	8.0	16.0

Fig. 14 The outputs of sensor of three-axes forces

4.3 出力値の補正方法、及び補正結果 ヒステリシス、繰返し性は影響が小さく信号処理による補正が困難であることより無視し、相互干渉補正のみを行う。ここで、相互干渉により生じる出力値に注目する。図 15 に Z 方向に力を作用させた時、相互干渉の影響から生じる X, Y 方向の出力を示し、図 16 に図 14 の結果の X, Y 方向の出力値を示す。

図 15, 16 より、干渉により生じる出力値にも作用力に対してほぼ線形関係があることが確認できる。よって、相互干渉により生じる出力値を予測することが可能なことから式(1)が導かれる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= c_{11}f_x + c_{12}f_y + c_{13}f_z \\ \varepsilon_y &= c_{21}f_x + c_{22}f_y + c_{23}f_z \\ \varepsilon_z &= c_{31}f_x + c_{32}f_y + c_{33}f_z \end{aligned} \quad (1)$$

すなわち、式(2)となる。

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix} = CF \quad (2)$$

ただし、 ε は発生した歪、 F は本センサに作用する力、 C は歪コンプライアンス行列である。よって、キャリブレーションにより歪コンプライアンス行列を求めれば、歪コンプライアンス行列の逆行列 C^{-1} を用いて歪ゲージの出力から相互干渉を補正したセンサに作用する力 F を求めることができる。

Fig. 15 The X-axis and Y-axis direction outputs of sensor of Z-axis direction forces

Fig. 16 The X-axis and Y-axis directions output of sensor of three-axes forces

キャリブレーションにより求めた試作したセンサの歪コンプライアンス行列 C を以下に示す。

$$C = \begin{pmatrix} 1566.5 & 27.0 & 74.4 \\ 60.5 & 1823.6 & -20.2 \\ -451.2 & -383.2 & 2882.4 \end{pmatrix} \quad (3)$$

この歪コンプライアンス行列を用いて相互干渉補正を行った結果を表 3 に示す。表 3 には、作用力と相互干渉補正後の計測値との誤差を定格値 (X, Y 方向; 14.7[N], Z 軸方向; 49.0[N]) に対する百分率で示した。相互干渉補正後の計測値には、補正不可能な誤差としてセンサ素子の出力値の非直線性、ヒステリシス、繰返し

性により生じる誤差が含まれる。よって、本センサの各方向の精度 E_r は式(4)により求まる。

$$E_r = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2} \quad (4)$$

ただし、 E_1 は非直線性、 E_2 はヒステリシス、 E_3 は繰り返し性である。一般的には式(4)に零点の温度影響、出力の温度影響も含めて用いるが、本実験では室内に使用を限っていることと、歪ゲージが接着剤で覆われていることにより温度影響は小さいと考え現段階では考慮しなかった。このことより本センサの精度は、X、Y軸方向では5.1[%RO]、Z軸方向では2.1[%RO]となる。ここで、表3に示した誤差は、この精度内であることより、本センサの計測値の相互干渉補正の有効性を示すことができた。これにより、試作した本センサは、垂直力、せん断力を計測可能であることが示せた。また、この実験で得られた本センサの仕様を表4に示す。

Table 3 The sensor element's output after correcting interaction

Applied force [N]			Error [%RO]		
X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis
9.8	9.8	9.8	3.75	4.67	0.44
9.8	14.7	9.8	1.10	4.08	0.78
14.7	9.8	9.8	3.57	4.72	0.48
14.7	14.7	9.8	1.30	4.54	0.06
9.8	9.8	29.4	4.17	0.62	0.64
9.8	14.7	29.4	1.52	0.28	0.52
14.7	9.8	29.4	2.04	0.08	0.01
14.7	14.7	29.4	0.08	0.49	0.08
9.8	9.8	49.0	4.34	3.60	0.85
9.8	14.7	49.0	4.00	4.44	0.40
14.7	9.8	49.0	2.48	4.45	0.70
14.7	14.7	49.0	0.01	4.75	0.41

Table 4 The specification for the sensor

	X, Y-axis	Z-axis
Rated force [N]	14.7	49.0
Accuracy [%RO]	5.1	2.1

5. 結 言

本論文では、歪ゲージを受感素子として用いた小型化が可能な三軸触覚センサを開発し、その有効性を解析的、実験的に考察した。その結果、下記の結論が得られた。

- (1) 本研究で提案した構造の触覚センサにより、三軸方向の力が計測可能であることを有限要素解析により示した。
- (2) 本研究で提案した構造を用いて長さ 25[mm]、幅 25[mm]、高さ 10[mm]の三軸触覚センサを試作した。
- (3) 試作した触覚センサを用いてセンサ表面に働く垂直力とせん断力を同時に計測できることを実験によって確認した。

提案したセンサは機械的に構造が単純であるため製作が容易であり、小型化も可能であると考えられる。

今後、ロボット指に分布配置が可能となる大きさにまで本センサの小型化に取り組む予定である。

謝 辞

本研究は、文部科学省の事業の一つである、関西化学術研究都市 地域知的クラスター創成事業「高度マシニングインターフェイス技術群のネオカデンへの応用に関する研究」における研究の一環として行った。

文 献

- (1) Sasaki, D., et al., Development of Pressure Measurement Type Tactile Soft Sensor for Life Assist Robot, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 70, No.689 (2004), pp. 77-82.
- (2) Ohka, M., Three-axis Tactile Sensor Capable of Detecting Simultaneously Normal and Shearing Stress Distribution, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 104 (2001), pp. 372-373.
- (3) Ohka, M., et al., Sensing Characteristics of an Optical Three-Axis Tactile Sensor Under Combined Loading, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 65, No.630 (1999), pp. 602-608.
- (4) Ohka, M., et al., Implementation of Experimental Three-Axis Tactile Sensor System Applying Optical Waveguide Plate, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 62, No.598 (1996), pp. 164-170.
- (5) Tomokuni, N., et al., An Electromagnetic Tactile Sensor for Three-Axis Force Sensing and Its Characteristics, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No.703 (2005), pp. 156-163.
- (6) Ohka, M., et al., Data processing of tactile information for three-axis tactile sensor, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 56, No.531 (1990), pp. 2919-2915.
- (7) Kamiyama, K., et al., Applying 3D Force Field Sensation to Robot Finger, *Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, Vol. 2005, (2005), IP1-N-104.
- (8) Abe, K., et al., Development of a 3-axis planer force/torque sensor for very small force/torque measurement, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 64, No.621 (1998), pp. 172-177.