

ひずみゲージを用いた柔軟な四軸触覚センサの開発 — センサ形態および外力推定方法に関する基礎的検討 —

Development of a Four-axis Flexible Tactile Sensor with Strain Gauges — Fundamental Investigation of the Sensor Shape and an Estimation Method for the External Force Applied on the Sensor —

小栗 泰造 *	松永 崇 **	日下 忠興 **
Taizo Oguri	Takashi Matsunaga	Tadaoki Kusaka
寛 芳治 **	岡本 昭夫 **	佐藤 和郎 **
Yoshiharu Kakehi	Akio Okamoto	Kazuo Satoh
山元 和彦 ***	吉竹 正明 ****	
Kazuhiko Yamamoto	Masaaki Yoshitake	

(2010年6月17日 受理)

A new type of a flexible tactile sensor is proposed. It comprises a truncated quadrangular pyramid-shaped silicone rubber and four strain gauges patched on four side surfaces of the rubber. The application of force to the tactile sensor causes deformation of the sensor and a change in the resistance of the strain gauges. The strain responses of the sensor to external forces of various types were investigated analytically and experimentally. Results showed that the horizontal force, the vertical force, and the torque are detectable from the combination of a change in the resistance of the strain gauges.

Key words: flexible sensor, tactile sensor, torque, silicone rubber

1. 序 論

ロボットハンドに人間の手に匹敵する把持動作を行わせるには、視覚および触覚の知覚機能が必要であると考えられている¹⁾。このため、知覚センサの開発が活発に行われており、触覚についても様々な方式のセンサが報告されている²⁻⁷⁾。しかし、触覚センサが備えるべき検出機能(接触点検出機能、形状検出機能、力覚検出機能、および滑り検出機能)をすべて備える

ものは、まだ存在しないように思われる。

接触点検出および形状検出の点で優れているのは、感圧導電ゴム型の触覚センサであると考えられる。柔軟でロボットハンドの把持面全体を覆うことができるため、接触点の任意性を担保できるうえ、把持部が被把持物の形状にならうことを利用してその形状を容易に捉え得るからである。

しかし、この方式では外力の作用方向を特定することが難しく⁸⁾、力覚検出機能および滑り検出機能が十分ではない。

そこで、筆者らは、柔軟な立体形状弾性体に複数のひずみゲージを貼付し、これを面状に多数アレイ化することにより構成する四軸触覚センサ(並進三軸およ

* 機械金属部 金属材料系
** 情報電子部 電子・光材料系
*** 化学環境部 化学材料系
**** 元 業務推進部 研究調整課

び回転一軸)を提案する。複数のひずみ測定値を組み合わせることで、作用方向の特定を含む高い力覚検出機能および滑り検出機能が得られるものと期待される。また、シンプルな形態であるため、小型化とアレイ化を図ることができ、接触点検出機能および形状検出機能も付与することが可能である。

本研究では、提案の有効性を確認するための第一段階として、一個の立体形状弾性体に外力が作用したときに生じるひずみから、当該外力を逆解析できるか否かについて調べた。具体的には、外力推定に適する立体形状について検討した後、適すと判断した立体形状に関して、並進三軸および回転一軸の外力成分を推定する方法について検討した。また、モデル試料として、汎用ひずみゲージを側面に貼付した一個の四角錐台形シリコンゴムを作製し、ひずみ応答特性を調べるとともに前記推定法に基づく外力推定の実験を行った。

2. 柔軟な触覚センサ

望ましいセンサ形状を選定し、選定した形状のセンサについて、ひずみ応答特性を解析的に求めた。

2.1 センサ形状

ここでいう柔軟な触覚センサの仕様は次のとおりである：(1)柔軟な触覚センサは、外力を検出し得る柔軟な小型センサ(以下「センサ要素」という。)を把持面に多数配列することによって構成するものとする。(2)センサ要素は、柔軟な立体形状弾性体とその表面に設けたひずみゲージで構成するものとする。(3)推定の目的とする外力成分は並進三軸および回転一軸の計4成分であるものとする。

したがって、センサ要素の形状が満たすべき条件は、以下のとおりである。

- (1) 配列させたときに平面を隙間なく埋め尽くせること(接触点の任意性を担保するため)。
- (2) 外力を推定するのに必要な情報量(最低4個の独立したひずみ)が得られる形状であること。
- (3) 外力によって誘起されるひずみが大きいこと。

条件(1)および(2)から、Fig. 1に示すような六面体形状が適していると考えられた。4つの側面にそれぞれひずみゲージが貼付でき、四角形は平面を埋め尽くすことができるからである。なお、候補形状Fig. 1(a)、(b)および(c)は、底面寸法および高さが同一で、底面に対する側面の傾きのみが異なっている。

候補形状Fig. 1(a)、(b)および(c)の間で頂面に作用する外力を一定とした場合、条件(3)にもっとも適合

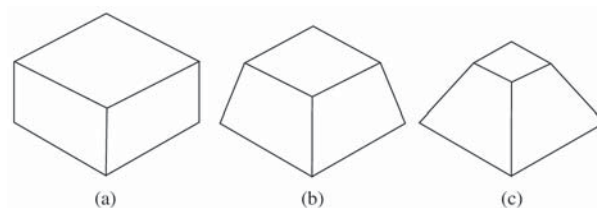


Fig. 1 Schematic illustrations of the shape of the sensor-element proposed.

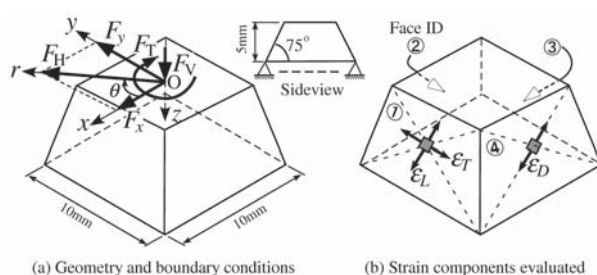


Fig. 2 Conditions for the analysis. Young's modulus: 2.57 MPa, Poisson's ratio: 0.499, $F_H = F_V = 1$ N, $F_T = 1$ N·mm.

する形状はFig. 1(c)である。体積が最小で、剛性が最小だからである。しかし、センサ要素をアレイ化した際には、側面の傾きが大きくなるとともに隣り合う頂面間の間隔が広がり、条件(1)からの乖離が大きくなる。したがって、側面の傾きはできる限り小さい方がよい。

以上の検討に基づき、四角錐台形状Fig.1(b)が適していると判断した。なお、入手可能な試料は、底面と側面のなす角が75°のものであったので、以下では、その角度のものについて検討した。

2.2 ひずみ応答特性

使用するひずみゲージは一軸ゲージであるから、その感度軸は、外力4成分を分離し得る範囲内で、できる限りひずみが大きく現れる方向に向けるべきである。そこで、有限要素解析を通じて、外力作用時におけるセンサ要素側面部のひずみ応答特性を調べ、採るべき感度軸の方向について検討した。

2.2.1 FEM 解析条件

Fig. 2(a)に解析対象の形状・寸法および境界条件を示す。頂面の中心を原点Oとする直角座標系O-xyzおよび極座標系O-rθzを定める。z軸は頂面の法線に平行とし、x軸は頂面の一辺に直交する方向にとるものとする。θの基準軸はx軸とし、θの正の方向はz軸方向に進む右ねじが回転する方向とする。四つの側面を識別するための指数として、面番号①、②、③および④を定義する。面番号は、Fig. 2(b)に示すように、x軸を基準としてθ軸の正方向に順に定めるものとする。

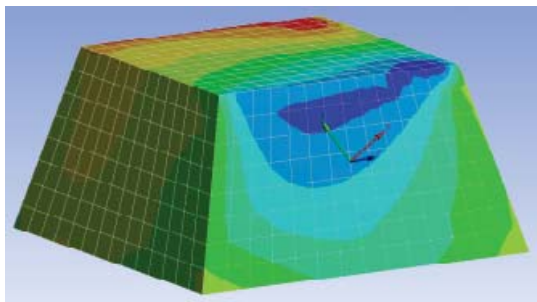


Fig. 3 Contour plot of the normal strain, ϵ_D , calculated for the torque F_T applied on the top of the sensor element.

る。

拘束条件としては、底面全体を完全拘束する条件を与えた。荷重条件は、 r 軸方向の力 F_H (以下「水平方向力」という。), z 軸方向の力 F_V (以下「垂直方向力」という。), および z 軸まわりのモーメント荷重 F_T (以下「トルク」という。) のいずれか一つを頂面全体に与えた。 F_H および F_V は 1 N とし、 F_T は 1 N·mm とした。トルクの正の方向は、座標軸 θ に準拠するものとする。

Fig. 2(b) に、評価対象とするひずみ成分を示す。評価するひずみは、垂直ひずみおよびせん断ひずみのうち、ひずみゲージで測定し得る垂直ひずみとし、側面の二つの対角線が交わる位置における当該側面に平行な方向の垂直ひずみのうち、以下の三成分とした： xy 平面に平行な方向のひずみ ϵ_T (以下「横方向ひずみ」という。), ϵ_T に直交する方向のひずみ ϵ_L (以下「縦方向ひずみ」という。), および対角線 (当該側面にある二つの対角線のうち、頂面を上にして当該側面の外側に正対したときに右上がりとなる対角線) に平行な方向のひずみ ϵ_D (以下「対角方向ひずみ」という。). 各ひずみは、四側面のそれぞれについてコンター図 (Fig. 3) から読み取った。

センサ要素の基材の物性値には、シリコーンゴムの値 (ヤング率 2.57 MPa, ポアソン比 0.499) を用いた。解析システムには ANSYS Design Space 9.0 を用い、線形静解析を行った。非線形性に関する事項は、各種負荷モードに対する相対的なひずみ応答特性を調べることが目的であることから、無視した。

2.2.2 解析結果

Fig. 4 に、水平方向力のみを $0 \leq \theta < 360^\circ$ の範囲内で作用させたときの各側面における前記垂直ひずみ三成分の応答を示す。いずれのひずみ成分に注目した場合でも、特定の作用方向 θ における四側面のひずみ値の組み合わせは、 θ に関して重複していない。例えば対角ひずみ ϵ_D (Fig. 4(c)) に着目した場合、 $\theta = 45^\circ$ における各側面のひずみ値は、第②面および第③面では

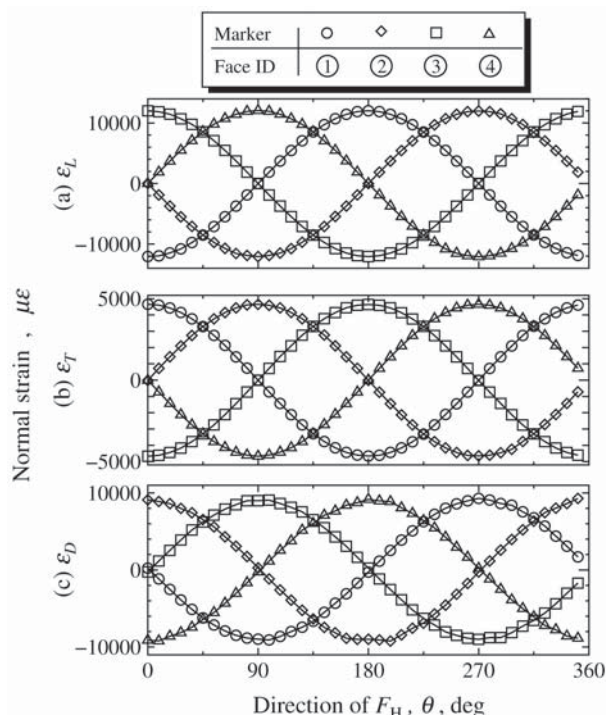


Fig. 4 Relations between the direction of the horizontal force F_H , θ and the normal strain (a) ϵ_L , (b) ϵ_T and (c) ϵ_D calculated for the respective sides of the sensor (face ID from ① to ④) under the condition of the single horizontal load F_H .

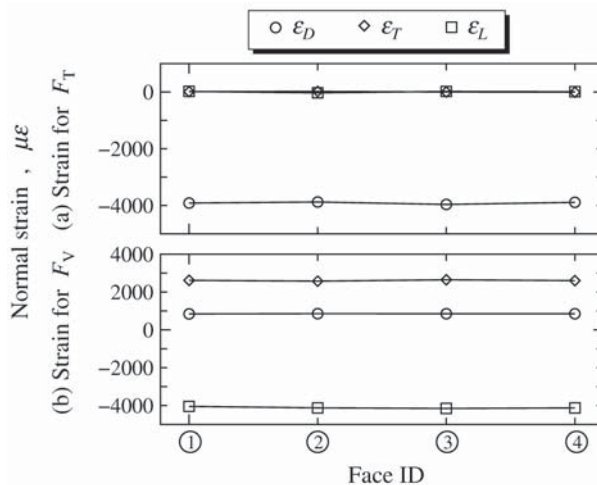


Fig. 5 Relations between the face ID and the three normal strain components ϵ_L , ϵ_T and ϵ_D calculated for the single load: (a) the torque F_T and (b) the vertical force F_V respectively.

約 $8000 \mu\epsilon$ で、第①面および第④面では約 $-8000 \mu\epsilon$ である。この値の組合せは、 $0 \leq \theta < 360^\circ$ の範囲内で一組しか存在しない。これは、水平方向力のみが作用する場合に、その作用方向を特定し得ること、ならびに前記垂直ひずみ三成分のいずれれに着目してもその効果が得られることを示している。ただし、横方向ひずみ

値の大きさは他の二成分のそれと比べて小さいことから、感度の観点からは縦方向ひずみまたは対角方向ひずみに着目することが望ましいと考えられた。

Fig. 5 に、トルクおよび垂直方向力をそれぞれ作用させたときの各側面における前記垂直ひずみ三成分の応答を示す。Fig. 5 によれば、いずれのひずみ成分についても、ひずみ値は全側面ではほぼ一定である。これは、トルクおよび垂直方向力が複合して作用した場合には、単一のひずみ成分に依っては両荷重を区別して認識できないことを示している。一方、両外力間では、同一側面かつ同一成分のひずみ値は異なっている。例えば第①面の対角ひずみ ϵ_D に着目した場合、トルク作用時のひずみ値は約 $-4000 \mu\epsilon$ であるのに対し、垂直方向力作用時のひずみ値は約 $1000 \mu\epsilon$ である。すなわち、複合負荷に対応するには、二以上のひずみ成分に注目して、これらひずみ成分間の外力に対する感度差を利用する必要のあることが示された。

3. 作用力の推定方法

前章での検討結果に基づき、外力四成分 (F_H, F_V, F_T または $F_{H(\theta)}, F_V, F_T$) を特定するには、縦方向ひずみと対角方向ひずみの双方を利用する必要がある。そこで、Fig. 6 に示すような 2 モデルを想定し、頂面に未知の複合的外力が作用した場合における外力推定方法について述べるものとする。

Fig. 2 に示す三種の外力 (F_H, F_V および F_T) がそれぞれ単独で作用する場合における、側面の縦方向ひずみを ${}^j\epsilon_{Li}$ と、対角方向ひずみを ${}^j\epsilon_{Di}$ と記述するものとする。添字 i はセンサ要素の側面の面番号とし、①, ②, ③または④のいずれかをとるものとする。添字 j は外力識別子とし、 H_x (水平方向力の x 成分), H_y (水平方向力の y 成分), V (垂直方向力), または T (トルク) のいずれかをとるものとする。同様に、前記三種の外力が同時に作用した場合における、側面に生じる縦方向ひずみを ϵ_{Li} と、対角方向ひずみを ϵ_{Di} と記述するものとする。

単一の外力成分に対するひずみ応答は、他の外力成分に対するそれとは独立していると考えられる。したがって、外力が複合的に作用した場合における、一の側面 (面番号 i) に生じる縦方向ひずみ ϵ_{Li} および対角方向ひずみ ϵ_{Di} は、単一外力 (識別子 j) により生じるひずみ (${}^j\epsilon_{Li}$ および ${}^j\epsilon_{Di}$) の外力様式 (j) に関する線形和で表すことができる。

$$\epsilon_{Li} = \sum_j {}^j\epsilon_{Li} \quad (1)$$

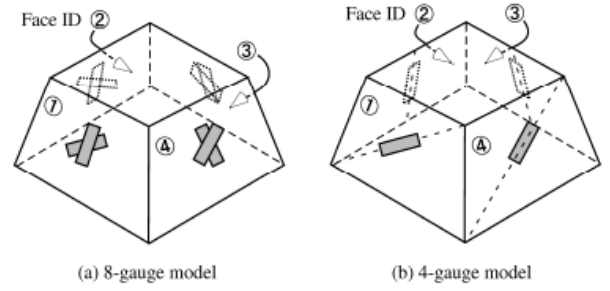


Fig. 6 Schematic illustrations of the sensor element with (a) 8 strain gauges, (b) 4 strain gauges.

$$\epsilon_{Di} = \sum_j {}^j\epsilon_{Di} \quad (2)$$

ところで、単一外力に対する個々の成分のひずみは、その外力に比例すると考えられる。その比例係数は、外力様式、ひずみゲージの方向、貼付面の外力に対する方向、およびセンサ要素基材の物性に依存すると考えられ、センサ要素に貼付された各ひずみゲージに固有の感度係数と捉えることができる。したがって、前二式の右辺のひずみは、単一外力 (識別子 j) とこれに対応する縦方向ひずみに関する感度係数 ${}^ja_{Li}$ または対角方向ひずみに関する感度係数 ${}^ja_{Di}$ の積でそれぞれ表すことができると考えられる。

$${}^j\epsilon_{Li} = {}^ja_{Li} \cdot F_j \quad (3)$$

$${}^j\epsilon_{Di} = {}^ja_{Di} \cdot F_j \quad (4)$$

よって、式 (1) および式 (2) は次のように変形できる。

$$\epsilon_{Li} = \sum_j {}^ja_{Li} \cdot F_j \quad (5)$$

$$\epsilon_{Di} = \sum_j {}^ja_{Di} \cdot F_j \quad (6)$$

さらに、添字 i および j を展開して全式を行列形式にまとめれば、8 ゲージモデルの場合は次のように変形できる。

$$\epsilon = \mathbf{A} \mathbf{x} \quad (7)$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_{L1} & \epsilon_{L2} & \epsilon_{L3} & \epsilon_{L4} & \epsilon_{D1} & \epsilon_{D2} & \epsilon_{D3} & \epsilon_{D4} \end{bmatrix}^T$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} H_x a_{L1} & H_y a_{L1} & V a_{L1} & T a_{L1} \\ H_x a_{L2} & H_y a_{L2} & V a_{L2} & T a_{L2} \\ H_x a_{L3} & H_y a_{L3} & V a_{L3} & T a_{L3} \\ H_x a_{L4} & H_y a_{L4} & V a_{L4} & T a_{L4} \\ H_x a_{D1} & H_y a_{D1} & V a_{D1} & T a_{D1} \\ H_x a_{D2} & H_y a_{D2} & V a_{D2} & T a_{D2} \\ H_x a_{D3} & H_y a_{D3} & V a_{D3} & T a_{D3} \\ H_x a_{D4} & H_y a_{D4} & V a_{D4} & T a_{D4} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} F_{Hx} & F_{Hy} & F_V & F_T \end{bmatrix}^T$$

式 (7) の行列 \mathbf{A} は、センサ要素の感度特性を示す量であり、実験的に定めるべきものである。推定目的量

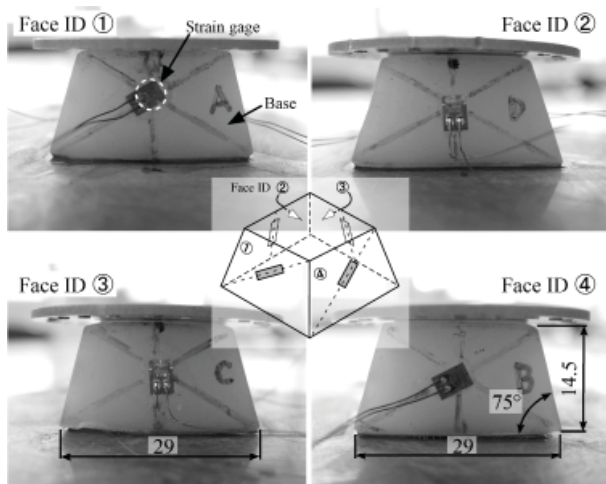


Fig. 7 Appearance of the specimen prepared.

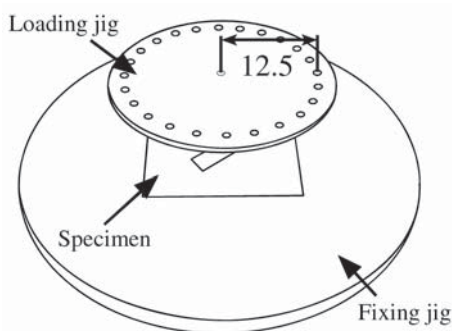


Fig. 8 Schematic illustration of the specimen combined with the loading jig and the fixing jig.

である外力 \boldsymbol{x} は、ひずみ値 $\boldsymbol{\epsilon}$ を測定した後に式 (7) を \boldsymbol{x} について解くことにより得ることができる。8ゲージモデルの場合は未知数よりも式の数が多い優決定連立一次方程式となるから、未知数は最小二乗法によって求める必要がある。最小二乗解は、次の正規方程式の解 \boldsymbol{x} である。

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \boldsymbol{x} = \mathbf{A}^T \boldsymbol{\epsilon} \quad (8)$$

なお、Fig. 6(b) に示す 4ゲージモデルの場合は、面番号①および④が対角方向ひずみを、面番号②および③が縦方向ひずみを測定し得るように構成されているから、式 (7) の行列 \mathbf{A} および列ベクトルから第 1 行、第 4 行、第 6 行、および第 7 行を削除して、先と同様の手続きを経ることにより解を得ることができる。

4. 実験

提案したセンサ要素形態および外力推定方法の妥当性を検証するため、モデル試料を作製して外力に対するひずみ応答特性を調べるとともに、既知複合外力に対するひずみ応答から当該複合外力を正しく逆解析することができるか否かを調べた。

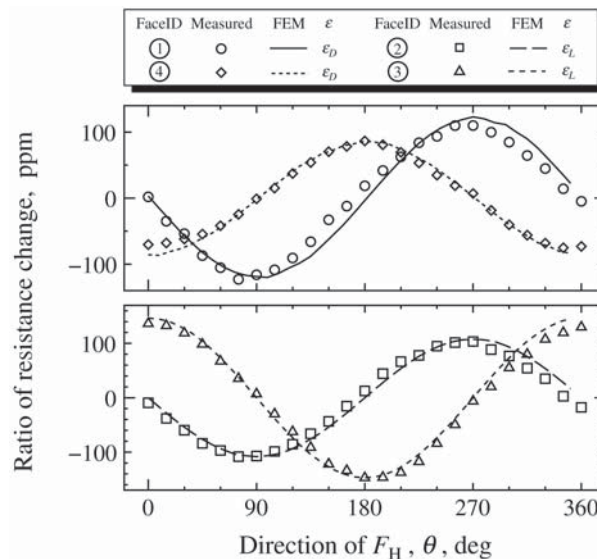


Fig. 9 Comparison of the experimental results with the FEM results on the relations between the direction of the horizontal force F_H , θ and the strain on the sides of the sensor (face ID from ① to ④) induced by the single horizontal load F_H .

4.1 実験方法

モデル試料として、4ゲージモデルのセンサ要素を用意した。Fig. 7 に、作製したモデル試料の外観を示す。基材はシリコンゴム (ゴム硬度 50) である。ひずみゲージには、汎用箔ひずみゲージ KFG-03-120-C1-11N15C2((株)共和電業)を用いた。ひずみゲージは、Fig. 6(b) に示す配置で、シアノアクリレート系瞬間接着剤 (コニシ (株) 製アロンアルファ) で基材に貼付した。

Fig. 8 に、試料を組み付けた負荷ジグの外観を示す。試料とジグ (固定板、載荷板) とは、シアノアクリレート系瞬間接着剤で接着した。水平方向力は、載荷板の外周部に設けた孔に糸を結んだフックをかけ、プーリーを介して他端に分銅をぶら下げることにより与えた。トルクは、偶力となる一對の水平方向力を前記方法で負荷することにより与えた。垂直方向力は、載荷板の上部に分銅を載せることにより与えた。

抵抗変化率は、測定電流を 1 mA としてひずみゲージの出力電圧を 4 端子法により測定し、除荷時の抵抗値を基準として求めた。

4.2 実験結果

4.2.1 応答特性

Fig. 9 に、200 g の分銅を用いて水平方向力のみを種々の方向に作用させたときの、各ひずみゲージの応答特性を示す。ただし、図中の FEM による結果は、その最大値とこれに対応する実験結果の最大値とが一致するように規格化してある。ひずみゲージ出力の応

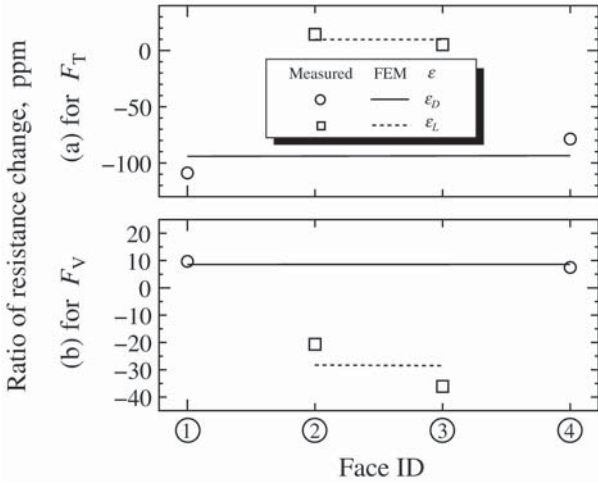


Fig. 10 Comparison of the experimental results with the FEM results on the relations between the applied load, F_T or F_V and the strain on the sides of the sensor (face ID from ① to ④).

答特性は、FEMによる結果とよく一致している。

Fig. 10に、正方向のトルクまたは垂直方向力のみが作用したときの各ひずみゲージの応答特性を示す。ただし、図中のFEMによる結果は、その平均値とこれに対応する実験結果の平均値とが一致するように規格化してある。用いた分銅は、トルクについては片側50 g、垂直方向力については200 gである。トルクまたは垂直方向力に対するセンサの応答は、センサ間の感度のばらつきが若干認められるものの、FEMによる解析結果とおおむね一致している。

4.2.2 複合外力の逆解析

前節で示した実験結果から試料の感度特性行列 \mathbf{A} を求めた。また、試料に既知の複合外力 \mathbf{x}_0 を作用させたときの各ひずみゲージ出力 $\boldsymbol{\epsilon}$ を測定し、前記 \mathbf{A} と $\boldsymbol{\epsilon}$ を式(7)に代入して解いた \mathbf{x} が \mathbf{x}_0 と実質的に一致するか否かについて調べた。

試料は、Fig. 7に示したように4ゲージタイプであるから、試料の感度特性行列は、式(7)の行列 \mathbf{A} および列ベクトル $\boldsymbol{\epsilon}$ から第1行、第4行、第6行、および第7行を削除したものである。感度特性行列の各成分には、単一の外力成分が作用したときに各面に生じる単位力あたりのひずみゲージ出力値をあてはめればよい。

具体的には、第1列は x 軸方向に作用する水平方向力に対応する応答特性であるから、Fig. 9の $\theta = 0$ deg 時における各面の実験値を読み、負荷荷重 $F_H = 200$ gf ≈ 1.96 N で除したものをあてはめる。同様に、第2列は y 軸方向に作用する水平方向力に対応する応答特性であるから、 $\theta = 90$ deg 時における各面の実験値を讀

み、1.96 N で除した数値をあてはめる。第3列(垂直方向力成分)および第4列(トルク成分)については、Fig. 10から各面の実験値を読み、前者は負荷荷重 $F_V \approx 1.96$ N で、後者は負荷トルク $F_T = 50$ gf \cdot 25mm ≈ 12.3 N \cdot mm でそれぞれ除したものをあてはめる。

これより、試料の感度特性行列 \mathbf{A} は次のように求められる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} H^x a_{L2} & H^y a_{L2} & V a_{L2} & T a_{L2} \\ H^x a_{L3} & H^y a_{L3} & V a_{L3} & T a_{L3} \\ H^x a_{D1} & H^y a_{D1} & V a_{D1} & T a_{D1} \\ H^x a_{D4} & H^y a_{D4} & V a_{D4} & T a_{D4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -4.7 & -54.5 & -10.5 & 1.2 \\ 69.6 & 3.6 & -18.4 & 0.4 \\ 1.0 & -59.2 & 5.0 & -8.9 \\ -35.9 & -0.6 & 3.8 & -6.4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \text{ppm/N} \\ \text{or} \\ \text{ppm/N} \cdot \text{mm} \end{pmatrix} \quad (9)$$

式(9)を第3節の作用力推定法にあてはめ、複合外力の逆解析を行った。試料に複合外力 \mathbf{x}_0 を負荷し、各ひずみゲージの出力を測定したところ $\boldsymbol{\epsilon}$ であった。

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} F_{Hx} & F_{Hy} & F_V & F_T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 1.96 & 0 & 2.94 & 12.3 \end{bmatrix}^T \text{ (N, N} \cdot \text{mm)} \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{bmatrix} \epsilon_{L2} & \epsilon_{L3} & \epsilon_{D1} & \epsilon_{D4} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -47.5 & 65.8 & -115.6 & -156.8 \end{bmatrix}^T \text{ (ppm)} \quad (11)$$

式(9)と式(11)を式(7)に代入し、 \mathbf{x} について解けば、次式が得られる。

$$\mathbf{x} \approx \begin{bmatrix} 2.1 & 0.1 & 4.9 & 15.4 \end{bmatrix}^T \text{ (N, N} \cdot \text{mm)} \quad (12)$$

式(12)と式(10)を対比することにより、推定誤差が次のように求められた：水平方向力7%、トルク25%、垂直方向力65%。水平方向力については、おおむね正しく推定できているが、トルクと垂直方向力については、やや誤差が大きい。垂直方向力の推定誤差がきわだって大きいのは、Fig. 9およびFig. 10から明らかのように、ひずみ量が水平方向力およびトルクの場合に比べて小さく、測定誤差の影響を受けやすいためと考えられる。

推定精度の向上を図る方策としては、以下のものが考えられる。(1)高感度なひずみゲージを用いること、(2)ひずみゲージ数を増して情報量を増すこと(例えば8ゲージモデル)、(3)センサ要素の垂直方向の剛性を下げて発生ひずみ量を増すこと。

筆者らは、高感度の酸化クロム薄膜ひずみゲージ(ゲージ率約7%)⁹⁾を開発中であり、これを用いた触覚センサについて別途検討している¹⁰⁾。

5. 結論

- (1) FEM 解析を通じて、水平方向力、垂直方向力、およびトルクを検出するのに適した触覚センサの形態を探索した。触覚センサを四角錐台形にすれば、その四側面に生じるひずみから、前記外力を成分ごとに分離して求め得ることを明らかにした。
- (2) 四角錐台形触覚センサで外力を分離して求めるためには、側面における縦方向ひずみおよび対角方向ひずみを測定しなければならない。測定精度上は、四側面のすべてについて両ひずみ成分を測定することが望ましいが、一側面につき一方のひずみ成分のみの測定であっても外力推定は可能である。ただし、測定するひずみの成分が対向する側面間で同一にならないよう、四側面で両ひずみ成分を混在させる必要がある。
- (3) シリコンゴム製四角錐台の側面にひずみゲージを貼付したモデル試料を作製し、外力に対する応答特性を調べた。また、複合的に外力が作用したときの応答から当該外力を求める逆解析を行った。応答特性は、FEM 解析から予測され

た特性とおおむね一致した。複合外力の逆解析においては、推定誤差は、水平方向力 7%、トルク 25%、垂直方向力 65% であった。

参考文献

- 1) 金子 真：日本ロボット学会誌, **11** (1993) 21.
- 2) 多田泰徳, 細田 耕, 浅田 稔：日本ロボット学会誌, **23** (2005) 482.
- 3) 武繩 悟, 中本裕之, 北川洋一, 一森和之, 今村信昭：日本ロボット学会誌, **26** (2007) 90.
- 4) 元尾幸平, 新井史人, 福田敏男：日本ロボット学会誌, **24** (2006) 408.
- 5) 郡司大輔, 荒木拓真, 並木明夫, 明 愛国, 下条 誠：日本ロボット学会誌, **25** (2007) 970.
- 6) 堀川晴信, 増田良介：第 25 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3018 (2007)
- 7) 吉海智晃, 稲葉雅幸：第 27 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, **RSJ2009AC3I2-02** (2009)
- 8) 勅使河原誠一, 清水 智, 多田隈建二郎, 明 愛国, 石川正俊, 下条 誠：第 27 回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, **RSJ2009AC3I1-04** (2009)
- 9) 吉竹正明, 野坂俊紀, 日下忠興, 鈴木義彦, 竹中 宏, 沢村幹雄：電気学会論文誌 E, **124** (2004) 183.
- 10) 松永 崇, 小栗泰造, 日下忠興, 笥 芳治, 岡本昭夫, 佐藤和郎, 山元和彦, 吉竹正明：大阪府立産業技術総合研究所報告, No.24 (2010) 53.