

Development of Thin-Type Four-Axis Force/Moment Sensor for Robot Hand

Yuichiro HAYASHI*, Nobutaka TSUJIUCHI**, Takayuki KOIZUMI*** and Hiroko OSHIMA****

(Received April 17, 2009)

Multi-axis force/moment sensor, which can measure force and moment, is useful for robotic force control. However, the smallest multi-axis force/moment sensor has excess height, which in effect worsens the stability of tasks. With the reason, it is expected to develop a thin type multi-axis force/moment sensor, which enables robot hand to grasp object, as if it were human. In the present study, we aim to develop a thin type four-axis force/moment sensor, which can be mounted to finger cushion direction. Firstly, we designed four-axis force/moment sensor and optimized positions, placing strain gauges from finite element analysis. Secondly, we applied these determined positions from simulation model and obtained sufficient sensitivities in each axial force and twisting moment around z-axis, as a result of sensitivity evaluation. Finally, we made a production model of four-axis force/moment sensor and performed characteristics test by applying determined positions. As results in the present study, we obtained sufficient sensitivities in each axial force and twisting moment around z-axis by sensitivity evaluation of experiments, and showed the effectiveness of the developed sensor.

Key words : robot hand, four-axis force/moment sensor, strain gauge, optimization, sensitivity

キーワード : ロボットハンド, 4軸力覚センサ, ひずみゲージ, 最適化, 感度

ロボットハンド用薄型4軸力覚センサの開発

林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 大島裕子

1. はじめに

現在, ロボットに関する様々な研究が進んでいる. 産業用ロボット¹⁾が主であるが, 人型の二足歩行ロボット²⁾など需要に応じたロボットの研究および開発も進められている. 中でも人間の手を模擬した動作を可能とする多指ロボットハンドを持つロボットは多い. それらを用いて, 対象物を落とさずにつか

み続ける把持動作や, 物体の位置または姿勢を変化させる操り動作などを実現するための研究が多くおこなわれている^{3,4)}. 把持や操りなどの動作をする際にはロボットの力制御をおこなうために, 指先が対象物との接触面から受ける力やモーメントの計測が必要となる.

ロボットハンドの指先が受ける外力を計測する装

* Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6488, Fax: +81-774-65-6488, E-mail: etj1302@mail4.doshisha.ac.jp

** Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone/Fax: +81-774-65-6493, E-mail: ntsujiuc@mail.doshisha.ac.jp

*** Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone/Fax: +81-774-65-6492, E-mail: tkoizumi@mail.doshisha.ac.jp

**** Department of Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone/Fax: +81-774-65-6488, E-mail: sk107645@mail.doshisha.ac.jp

置として代表的なものは多軸力覚センサである。複数の軸方向に同時に作用する外力を計測し、ロボットハンドに装着可能な様々な形状の多軸力覚センサが開発されている。その多くは起歪部の表面に貼ったひずみゲージの電気抵抗変化から外力を検出するものであり、ロボットに力感覚を付与する重要な計測装置といえる^{5,6)}。

しかし、現在市販されているロボットハンドの指先用6軸力覚センサは、最小のもので直径12[mm]、高さ15[mm]の円柱型であり、柔軟被覆材をセンサの先端部にかぶせて使用するため、指先が半球形状となる⁷⁾。このセンサは構造上、半球形の先端部に受けた外力以外は計測できず、設置方向も任意に決定できない。したがって、センサの先端部が対象物の面に対して垂直に近い角度で接触する必要がある、把持動作や操り動作などの安定性が低下する。よって、人間が対象物をつかむなど指の腹を用いた把持動作を可能とするため⁸⁾、指の腹方向に装着して対象物から受ける外力を計測可能な薄型の多軸力覚センサの開発が必要である。

そこで、本研究ではロボットハンドの指の腹方向に装着して、対象物から受ける外力を検出可能な薄型の4軸力覚センサの開発を目的とする。開発するセンサを x , y , z 座標空間におき、上面に対してせん断方向を x , y 軸方向、押圧方向を z 軸方向とした時、本センサは x , y , z 軸方向の3分力 F_x , F_y , F_z と z 軸回りに作用するモーメント M_z の計4分力を計測可能である。また、既存のセンサと比較して薄型の形状とし、計測原理としては起歪部の表面に貼ったひずみゲージの電気抵抗変化から力とモーメントを検出する方式を採用している。本研究ではセンサの形状を設計し有限要素解析をおこない、ひずみゲージの貼り付け位置を決定する。さらに、実機モデルを試作し、シミュレーションによって決定した貼り付け位置を適用して特性試験をおこなって、開発したセンサの有効性を検証する。

2. 薄型4軸力覚センサ

2.1 センサの設計

開発する4軸力覚センサの仕様目標値を表1に示す。

本来、多軸力覚センサとして開発されたものは6軸力覚センサが一般的であるが、ここでは自由空間における対象物の重心座標点を計測することは目的としていない。そのため、押圧方向の力および滑りによる摩擦力以外に対象物がずれ落ちる際の捻りモーメントを計測対象とした4軸力覚センサを開発する。

また、表1に示すようにセンサの高さは5[mm]であり、市販されている最小の多軸力覚センサと比較して薄型の形状といえる。しかし、この高さではセンサの起歪部が小型化してしまうため、力覚センサにおける代表的な起歪部の形状である円柱型⁹⁾もしくは十字ビーム型^{10, 11)}のうち、図1に示す十字ビーム型の構造を選択する。本センサは図1に示す4本の梁の側面に貼ったひずみゲージの電気抵抗変化からセンサ中心に作用した外力を検出する。ひずみゲージは抵抗値120[Ω]、ゲージ率1.9、自己温度補償範囲0～150[°C]、長さ1.6[mm]、幅1.2[mm]、ゲージ長0.2[mm]である単軸式の共和電業製箔ひずみゲージKFR-02N-120-C1-11-N10C2を用いる。本センサに使用するひずみゲージは計16枚である。

実際に製作するセンサの形状を図2に示す。図2より、荷重をセンサの中心部に対して均等に負荷するためピンを中心部に取り付けた構造となっている。センサ本体、ピンの材料はそれぞれアルミニウム合金A2024、ステンレスSUS304である。

2.2 計測原理

このセンサの特徴は、合計8枚のひずみゲージによって構成される4種類のハーフブリッジ回路の出力を組み合わせて F_x , F_y , M_z に対応するひずみを検出可能なことである。ひずみゲージを貼り付ける面およびブリッジ回路の構成図を図3に示す。ここで、図中のひずみゲージA1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2はせん断ひずみを計測するため梁の中立軸に対して斜め45[deg]方向に貼ったひずみゲージであり、A3, A4, B3, B4, C3, C4, D3, D4は軸方向力を計測するため軸方向に対して垂直に貼ったものである。ひずみの演算式は、図3に示すブリッジ回路番号1～5に対応するひずみの出力を $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5$ 、各荷重成分に対応するひずみの出力を $\varepsilon_{F_x}, \varepsilon_{F_y}, \varepsilon_{F_z}, \varepsilon_{M_z}$ とすると、次式

で表される.

$$\varepsilon_{F_x} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2-1)$$

$$\varepsilon_{F_y} = \varepsilon_3 + \varepsilon_4 \quad (2-2)$$

$$\varepsilon_{F_z} = \varepsilon_5 \quad (2-3)$$

$$\varepsilon_{M_z} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) / 2.0 \quad (2-4)$$

ここで、各ひずみゲージに生じるひずみを $\varepsilon_{A1}, \dots, \varepsilon_{D4}$ とすると、

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{D4} - \varepsilon_{B3} \quad (2-5)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{D3} - \varepsilon_{B4} \quad (2-6)$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{C4} - \varepsilon_{A3} \quad (2-7)$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_{C3} - \varepsilon_{A4} \quad (2-8)$$

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_{A1} + \varepsilon_{A2} + \varepsilon_{B1} + \varepsilon_{B2} + \varepsilon_{C1} + \varepsilon_{C2} + \varepsilon_{D1} + \varepsilon_{D2} \quad (2-9)$$

のようになる.

本センサは4本の梁による十字ビーム方式を採用しているため、各軸方向荷重が負荷された時に計測する対象以外の荷重成分に対して出力が発生する相互干渉が起こる. 式(2-1) - (2-9)に示した各ひずみの演算式は、これによって生じる干渉成分を演算により打ち消すことができるように設定している.

Table 1. Technology Target Value.

Geometric Dimension	20 [mm](W) × 20 [mm](D) × 5 [mm](H)
Rating Capacity	$F_x, F_y, F_z = 100$ [N] $M_z = 0.1$ [N·m]
Nonlinearity	Within 2 [%RO]
Hysteresis	Within 2 [%RO]
Material	A2024

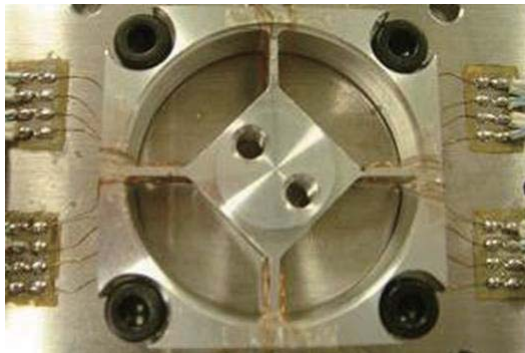


Fig.1. Overhead View of Four-Axis Force/Moment Sensor.

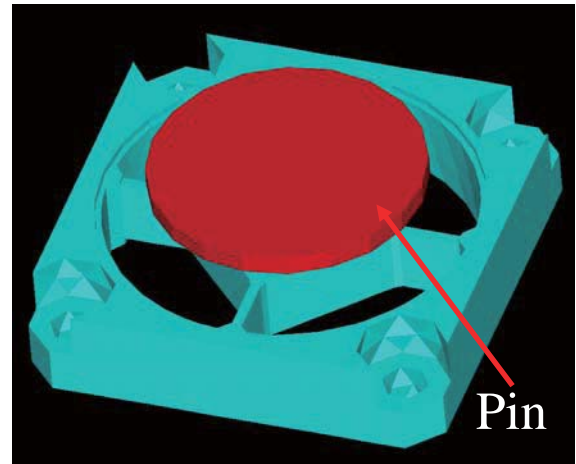


Fig.2. Structure of the Production Model.

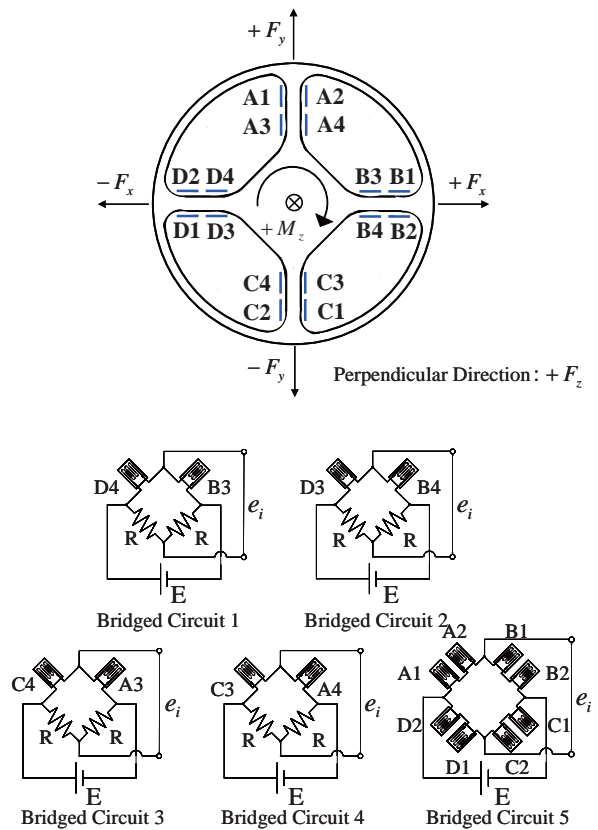


Fig.3. Position to Paste Strain Gauges and Connecting Diagram on the Four-Axis Force/Moment Sensor.

3. 力覚センサの評価方法

本論では力覚センサの性能を定量的に評価するため、内山¹²⁾および中村¹³⁾によって提案された以下に示す評価方法を用いる. センサに作用した外力 f と、作用した外力に対応して出力するひずみ ε の関係は、干渉成分が線形であると仮定すると、ひずみコンブ

ライアンス行列 \mathbf{C} を用いて次式で表される.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C}\mathbf{f} \quad (3-1)$$

ただし,

$$\mathbf{f}_j = [F_{xj} \ F_{yj} \ F_{zj} \ M_{zj}]^T \quad (3-2)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_j = [\varepsilon_{F_xj} \ \varepsilon_{F_yj} \ \varepsilon_{F_zj} \ \varepsilon_{M_zj}]^T \quad (3-3)$$

とする. ここで, $\boldsymbol{\varepsilon} = [\boldsymbol{\varepsilon}_1 \ \dots \ \boldsymbol{\varepsilon}_n]$, $\mathbf{f} = [f_1 \ \dots \ f_n]$, $j=1, \dots, n$, n はデータ数とする. また, 成分ごとの単位の取り方や次元の違いによる影響を排除するために, $\boldsymbol{\varepsilon}$ は計測したひずみの最大値, \mathbf{f} は力およびモーメントの最大値によって各成分ごとに正規化して $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$, $\bar{\mathbf{f}}$ とすると式(3-1)は次式で表せる.

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \bar{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{f}} \quad (3-4)$$

$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$, $\bar{\mathbf{f}}$ を用いて導出されるひずみコンプライアンス行列 $\bar{\mathbf{C}}$ を評価に用いる. $\bar{\mathbf{C}}$ を求める際は, 作用した外力およびひずみのデータをそれぞれ 4 種類以上並べた行列を正規化した $\bar{\mathbf{f}}$ と $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ を用いる. $\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}$ に $\bar{\mathbf{f}}$ の一般化逆行列 $\bar{\mathbf{f}}^+$ を右から掛けることにより, $\bar{\mathbf{C}}$ を求めることができる. $\bar{\mathbf{C}}$ における各行ベクトルのノルム $\|\bar{\mathbf{C}}_i\|$ をひずみゲージ感度, $\bar{\mathbf{C}}$ の最小特異値 σ_{\min} を力覚感度, 最大特異値を最小特異値で割った値 $\sigma_{\max} / \sigma_{\min}$ を条件数 $\text{cond.}\bar{\mathbf{C}}$ と定義し, それぞれ評価に用いる. ひずみゲージ感度とは, 力やモーメントに対する個々のひずみゲージの感度を表し, 力覚感度とはひずみゲージの出力が全体として 3 軸方向の力や軸回りのモーメントを十分に含んでいるか否かを評価するものである¹³⁾. 条件数については,

$$0 \leq \frac{\Delta F / F_0}{\Delta \boldsymbol{\varepsilon} / \boldsymbol{\varepsilon}_0} \leq \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (3-5)$$

の関係が成立することにより, 計測したひずみ $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ から作用した外力 F_0 を算出した場合, 外力における誤差 ΔF の割合が, 計測したひずみにおける誤差 $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ の割合に対して, 最大 $\text{cond.}\bar{\mathbf{C}}$ 倍まで拡大されることを表す. 力覚センサが理想的な構造を有する場合, 力の各成分を独立して計測でき, 感度も等しくなる. したがって, $\bar{\mathbf{C}}$ は単位行列となり, ひずみゲージ感度, 力覚感度および条件数は 1 となる¹⁴⁾.

4. ひずみゲージ貼り付け位置の最適化

ひずみゲージ式力覚センサにおいて, 各軸方向の

感度が互いに等しく, かつ高くなるようにひずみゲージの貼り付け位置を決定する作業は不可欠である. 本章では有限要素解析による解析結果を用いて, ひずみゲージの貼り付け位置座標を最適化する. なお, 後に第 5.6 節で述べるように剛性は限界値に近いものとする. 有限要素解析には, 構造解析ソフトウェア (UGS PLM ソリューション社製 NX Nastran, Ver.4.1) を用いる. 力覚センサの有限要素モデルは図 2 に示すものとし, 荷重条件としては表 1 に示す定格荷重を用いる. 有限要素モデルは節点数 2488, 要素数 8167 であり, 解析条件としてアルミニウムの縦弾性係数 72.4 [GPa], ポアソン比 0.33, 密度 2.77×10^3 [kg/m³], ステンレスの縦弾性係数 193 [GPa], ポアソン比 0.3, 密度 7.93×10^3 [kg/m³] とし, 4 隅のボルト穴を完全拘束した場合において中央部に各軸方向の定格荷重を単独で負荷するものとする.

図 3 で示した A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2 を総称してゲージ 1, A3, A4, B3, B4, C3, C4, D3, D4 を総称してゲージ 2 とし, 貼り付け位置の座標を決定する. 図 3 におけるひずみゲージ D1, D3, B4, B2 を貼る面を正面から見た図を図 4 に示す. せん断ひずみを計測するゲージ 1 は枠に近い外側に, その他は中心に近い内側に貼り付けるものとする. また, ひずみゲージの中心は梁の中立軸上に合わせる. 貼り付け可能な範囲内で, 有限要素解析によって荷重負荷時の部分ひずみを求める. 荷重条件は各軸方向の定格荷重を単独で負荷するものとする. F_x 負荷時はひずみゲージ D3, B4, F_y 負荷時は B2, M_z 負荷時は B3, B4 のひずみをそれぞれ求める.

最適化では各軸方向荷重に対応するひずみだけでなく, 干渉成分についても考慮する. 演算結果の一例として, 起歪部の梁におけるひずみと軸方向座標の関係を近似した図を図 5, 図 6 および図 7 に示す. 式(3-1)で \mathbf{f} を荷重の最大値で正規化すると \mathbf{f} は単位行列となり, $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C}$ が成立する. 図 4 のようにセンサの中心を原点座標とし, ゲージ 1, 2 の貼り付け位置座標を x_1, x_2 とおくと, 各荷重に対応するひずみの成分は $\varepsilon_{F_x}(x_2)$, $\varepsilon_{F_y}(x_2)$, $\varepsilon_{F_z}(x_1)$, $\varepsilon_{M_z}(x_2)$ のように各座標の関数として考えられ, それらは干渉成分

も含めて \mathbf{C} 上で以下のように表される.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{F_x}(x_2) & \varepsilon_{F_y}(x_2) & \varepsilon_{F_z}(x_1) & \varepsilon_{M_z}(x_2) \\ \varepsilon_{F_x}(x_2) & \varepsilon_{F_y}(x_2) & \varepsilon_{F_z}(x_1) & \varepsilon_{M_z}(x_2) \\ \varepsilon_{F_x}(x_2) & \varepsilon_{F_y}(x_2) & \varepsilon_{F_z}(x_1) & \varepsilon_{M_z}(x_2) \\ \varepsilon_{F_x}(x_2) & \varepsilon_{F_y}(x_2) & \varepsilon_{F_z}(x_1) & \varepsilon_{M_z}(x_2) \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

以下, 式(4-1)で各成分を式(4-2)のように表現する.

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}(x_2) & \varepsilon_{12}(x_2) & \varepsilon_{13}(x_1) & \varepsilon_{14}(x_2) \\ \varepsilon_{21}(x_2) & \varepsilon_{22}(x_2) & \varepsilon_{23}(x_1) & \varepsilon_{24}(x_2) \\ \varepsilon_{31}(x_2) & \varepsilon_{32}(x_2) & \varepsilon_{33}(x_1) & \varepsilon_{34}(x_2) \\ \varepsilon_{41}(x_2) & \varepsilon_{42}(x_2) & \varepsilon_{43}(x_1) & \varepsilon_{44}(x_2) \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

式(4-2)で \mathbf{C} は正方行列なので特異値は固有値と一致する. 本章では \mathbf{C} の最大固有値と最小固有値の比を第 3 章で定義した条件数とし, 目的関数に用いる. 固有値を求めると, 最大固有値 λ_{\max} および最小固有値 λ_{\min} は以下のようになる.

$$\lambda_{\max} = \sqrt[3]{-P + \sqrt{P^2 + Q^3}} + \sqrt[3]{-P - \sqrt{P^2 + Q^3}} + \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} + \varepsilon_{33} + \varepsilon_{44}) \quad (4-3)$$

$$\lambda_{\min} = \varepsilon_{11} - \varepsilon_{12} \quad (4-4)$$

ここで

$$P = \frac{1}{2}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12})(\varepsilon_{34}\varepsilon_{43} - \varepsilon_{33}\varepsilon_{44}) + \varepsilon_{13}(\varepsilon_{31}\varepsilon_{44} - \varepsilon_{34}\varepsilon_{41}) + \varepsilon_{14}(\varepsilon_{41}\varepsilon_{33} - \varepsilon_{43}\varepsilon_{31}) - \frac{1}{27}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} + \varepsilon_{33} + \varepsilon_{44})^3 + \frac{1}{6}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} + \varepsilon_{33} + \varepsilon_{44}) \times \{(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12})(\varepsilon_{33} + \varepsilon_{44}) - (\varepsilon_{34}\varepsilon_{43} - \varepsilon_{33}\varepsilon_{44}) - 2(\varepsilon_{13}\varepsilon_{31} + \varepsilon_{14}\varepsilon_{41})\} \quad (4-5)$$

$$Q = \frac{1}{3}\{(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12})(\varepsilon_{33} + \varepsilon_{44}) - (\varepsilon_{34}\varepsilon_{43} - \varepsilon_{33}\varepsilon_{44}) - 2(\varepsilon_{13}\varepsilon_{31} + \varepsilon_{14}\varepsilon_{41})\} - \frac{1}{9}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} + \varepsilon_{33} + \varepsilon_{44})^2 \quad (4-6)$$

とする. 条件数の最適値は 1 なので, λ_{\max} と λ_{\min} の比から 1 を引いたものの絶対値を最小化するように, 目的関数 $E(x_1, x_2)$ を以下のように定義する.

$$E(x_1, x_2) = \left| \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} - 1 \right| \quad (4-7)$$

本センサはひずみゲージを梁の側面に貼り付けるため, ひずみゲージが梁の面内からはみ出さず, かつフィレット部に掛からないように設計寸法を考慮し, 目的関数の定義域は以下の通りとする.

$$5.9 \leq x_1 \leq 7.5 \quad (4-8)$$

$$5.7 \leq x_2 \leq 7.7 \quad (4-9)$$

さらに, ひずみゲージ同士が接触しないような制約条件として

$$x_1 - x_2 \geq 1 \quad (4-10)$$

が加わり, 最終的な制約条件は式(4-8) - (4-10)のようになる. これらの制約条件下で式(4-7)に式(4-3), (4-4)を代入し, \mathbf{C} 言語によってプログラミングしたアルゴリズムを用いて式(4-7)を最小化した時の x_1, x_2 を求めると $x_1 = 6.7$ [mm], $x_2 = 5.7$ [mm] となり, これらがゲージ 1 およびゲージ 2 の貼り付け位置座標と決定される.

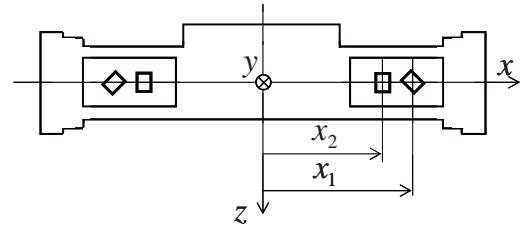


Fig.4. Coordinates of the Strain Gauges.

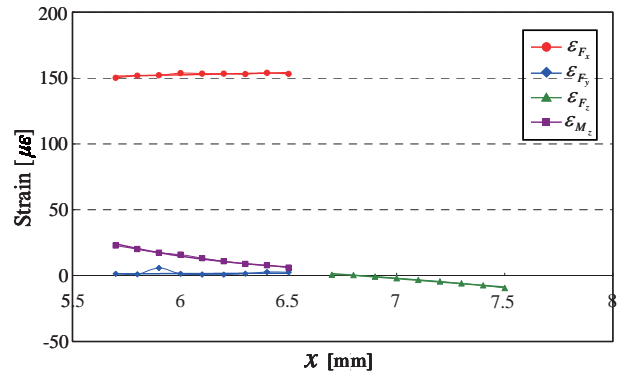


Fig.5. Approximate Function of $F_x(F_y)$.

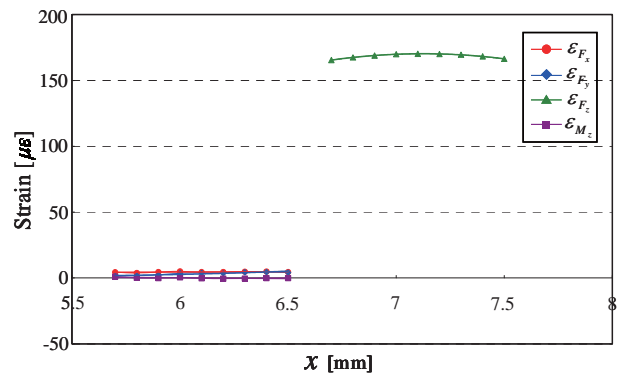
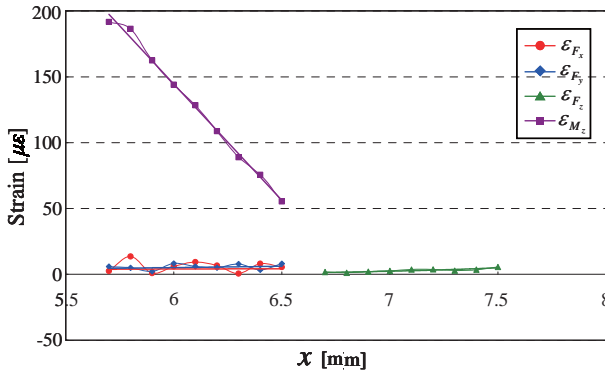


Fig.6. Approximate Function of F_z .

Fig.7. Approximate Function of M_z .

5. 薄型 4 軸力覚センサの性能評価

5.1 計測値の解析による感度評価

4 軸力覚センサの有限要素モデルを用いたシミュレーションによって決定した貼り付け位置を適用し有限要素解析をおこない、各荷重条件に対応したひずみを求める。その後ひずみコンプライアンス行列を用いた感度評価をおこなう。感度評価に使用した有限要素モデルを図 8 に示す。解析条件は有限要素モデルの節点数 1361、要素数 4086 である以外の値は第 4 章と同様のものとした。解析結果の一例として、ひずみコンプライアンス行列 \bar{C} 、ひずみゲージ感度 $\|\bar{C}_i\|$ 、力覚感度 σ_{\min} および条件数 $\text{cond.}\bar{C}$ をそれぞれ式(5-1) - (5-4)に示す。

$$\bar{C} = \begin{pmatrix} 0.5626 & -0.0554 & 0.0239 & 0.0569 \\ -0.0554 & 0.5626 & 0.0239 & 0.0569 \\ 0.0058 & -0.0169 & 0.9329 & 0.0390 \\ -0.0310 & 0.0019 & 0.0383 & 0.6844 \end{pmatrix} \quad (5-1)$$

$$\|\bar{C}_1\| = 0.5687, \|\bar{C}_2\| = 0.5687, \|\bar{C}_3\| = 0.9339, \|\bar{C}_4\| = 0.6862 \quad (5-2)$$

$$\sigma_{\min} = 0.5045 \quad (5-3)$$

$$\text{cond.}\bar{C} = 1.8634 \quad (5-4)$$

5.2 固有値解析による動特性の検証

実測時においてセンサに加わる外力は時々刻々変化するため、共振が発生し出力値に誤差が生じる恐れがある。本節では固有値解析をおこない、1 次モードにおけるセンサの固有振動数を調べ、4 軸力覚センサの動特性を評価する。第 5.1 節と同じ条件下における解析結果の一例として、1 次モードにおける固有振動数は 1.47×10^4 [Hz] となった。ロボットの

サンプリング周波数は 1000 [Hz] 程度であるため、センサをロボットハンドに装着しても共振の影響なく外力を計測可能といえる。

5.3 特性試験による有効性の検証

開発した 4 軸力覚センサおよび第 4 章で決定したひずみゲージの貼り付け位置の有効性を検証するため、4 軸力覚センサを試作し、シミュレーションによって決定した貼り付け位置を適用し、各荷重について以下のような手順により特性試験をおこなう。製作したセンサの実機モデルを図 9 に示す。使用した A/D 変換器は共和電業製データロガー UCAM-60B である。

F_x, F_y については、 $+F_x, -F_x, +F_y, -F_y$ の 4 方向についておもりを 0.0 [N] から 98.0 [N] まで 19.6 [N] ずつ負荷し、その後 19.6 [N] ずつ除去して試験をおこなった。 F_z については、試験者手前方向を $+F_x$ 方向とした場合と、90 [deg] 回転して $+F_y$ 方向とした場合の 2 方向についておもりを 0.0 [N] から 98.0 [N] まで 19.6 [N] ずつ負荷し、その後 19.6 [N] ずつ除去して試験をおこなった。 M_z については、センサ中心から片端まで 5 [mm]、両端で 10 [mm] のアームにおもりを 0.0 [N] ~ 9.8 [N] まで 1.96 [N], 3.92 [N], 9.8 [N] というように両端同時に載せ、その後、おもりを両端同時に除去して試験をおこなった。アームの両端におもりを吊り下げるため、最大で 2×9.8 [N] \times 0.005 [m] = 0.098 [N · m] のモーメントが負荷される。この工程をアームが x 軸および y 軸に平行な場合でそれぞれ $+M_z, -M_z$ に対しておこなった。

得られた試験結果の一例を図 10, 図 11, 図 12 および図 13 に示す。これらより、各軸方向に対する出力とともに、干渉成分についても荷重に対して線形の挙動を示すことが分かる。よって、干渉補正行列を用いてセンサの出力に含まれる干渉成分を補正しやすいと考えられる。また、試験結果から求めたセンサの基本特性値として、各荷重における出力の非直線性とヒステリシスを表 2 に示す。これらは表 1 の仕様目標値を満たすことが分かる。

さらに、試験結果の一例として感度評価をおこなうと、ひずみコンプライアンス行列 \bar{C} 、ひずみゲー

ジ感度 $\|\bar{C}_i\|$, 力覚感度 σ_{\min} および条件数 $\text{cond.}\bar{C}$ は次のように得られた。

$$\bar{C} = \begin{pmatrix} 0.5393 & 0.0073 & 0.0165 & -0.0037 \\ 0.0073 & 0.5393 & -0.0256 & -0.0215 \\ -0.0008 & -0.0008 & 1.0000 & 0.0102 \\ 0.0083 & 0.0083 & -0.0642 & 0.6693 \end{pmatrix} \quad (5-5)$$

$$\|\bar{C}_1\| = 0.5396, \|\bar{C}_2\| = 0.5404, \|\bar{C}_3\| = 1.0001, \|\bar{C}_4\| = 0.6725 \quad (5-6)$$

$$\sigma_{\min} = 0.5313 \quad (5-7)$$

$$\text{cond.}\bar{C} = 1.8891 \quad (5-8)$$

5.4 干渉補正

センサに 4 分力が作用した場合において, 相互干渉により生じる出力値は作用力に対してほぼ線形な関係があるので, 相互干渉により生じる出力値を予測することが可能である。よって, 式(5-9)の関係が成り立つ。ここで, F_x, F_y, F_z, M_z は相互干渉補正前の出力値, $\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{F}_z, \bar{M}_z$ は相互干渉補正後の出力値であり, $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{31}, a_{32}, a_{33}, a_{34}, a_{41}, a_{42}, a_{43}, a_{44}$ は各計測値における近似直線の傾きを表す。

$$\begin{aligned} \bar{F}_x &= a_{11}F_x - a_{12}F_y - a_{13}F_z - a_{14}M_z \\ \bar{F}_y &= -a_{21}F_x + a_{22}F_y - a_{23}F_z - a_{24}M_z \\ \bar{F}_z &= -a_{31}F_x - a_{32}F_y + a_{33}F_z - a_{34}M_z \\ \bar{M}_z &= -a_{41}F_x - a_{42}F_y - a_{43}F_z + a_{44}M_z \end{aligned} \quad (5-9)$$

式(5-9)を行列形式で書くと,

$$\bar{\mathbf{F}} = \begin{pmatrix} \bar{F}_x \\ \bar{F}_y \\ \bar{F}_z \\ \bar{M}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & -a_{12} & -a_{13} & -a_{14} \\ -a_{21} & a_{22} & -a_{23} & -a_{24} \\ -a_{31} & -a_{32} & a_{33} & -a_{34} \\ -a_{41} & -a_{42} & -a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_z \end{pmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{F} \quad (5-10)$$

ここで, ひずみ出力を $\boldsymbol{\varepsilon}$ とすると, \mathbf{F} と $\boldsymbol{\varepsilon}$ は線形関係にあるので, 比例定数をそれぞれ b_1, b_2, b_3, b_4 とし, 係数行列 \mathbf{B} を

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 \end{pmatrix} \quad (5-11)$$

とにおいて

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{F_x} \\ \varepsilon_{F_y} \\ \varepsilon_{F_z} \\ \varepsilon_{M_z} \end{pmatrix} = \mathbf{B}\boldsymbol{\varepsilon} \quad (5-12)$$

より,

$$\begin{pmatrix} a_{11} & -a_{12} & -a_{13} & -a_{14} \\ -a_{21} & a_{22} & -a_{23} & -a_{24} \\ -a_{31} & -a_{32} & a_{33} & -a_{34} \\ -a_{41} & -a_{42} & -a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & b_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a'_{11} & -a'_{12} & -a'_{13} & -a'_{14} \\ -a'_{21} & a'_{22} & -a'_{23} & -a'_{24} \\ -a'_{31} & -a'_{32} & a'_{33} & -a'_{34} \\ -a'_{41} & -a'_{42} & -a'_{43} & a'_{44} \end{pmatrix} \quad (5-13)$$

とにおいて, 式(5-14)が導かれる。

$$\bar{\mathbf{F}} = \begin{pmatrix} \bar{F}_x \\ \bar{F}_y \\ \bar{F}_z \\ \bar{M}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a'_{11} & -a'_{12} & -a'_{13} & -a'_{14} \\ -a'_{21} & a'_{22} & -a'_{23} & -a'_{24} \\ -a'_{31} & -a'_{32} & a'_{33} & -a'_{34} \\ -a'_{41} & -a'_{42} & -a'_{43} & a'_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{F_x} \\ \varepsilon_{F_y} \\ \varepsilon_{F_z} \\ \varepsilon_{M_z} \end{pmatrix} = \mathbf{A}'\boldsymbol{\varepsilon} \quad (5-14)$$

ただし, $\bar{\mathbf{F}}$ は補正後の荷重値, \mathbf{A}' は変換行列, $\boldsymbol{\varepsilon}$ はひずみ出力である。ここで, $\boldsymbol{\varepsilon}$ と \mathbf{F} に対して各作用力を変えた実験を N 回行い, 式(5-15)に示す相互干渉補正前の計測値行列 \mathbf{E} , 式(5-16)に示す相互干渉補正後の計測値行列 \mathbf{F}' を求める。

$$\mathbf{E} = (\boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad \cdots \quad \boldsymbol{\varepsilon}_N) \quad (5-15)$$

$$\mathbf{F}' = (\mathbf{F}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{F}_N) \quad (5-16)$$

ここで, 式(5-9)の拡張系を考えると, 式(5-15), (5-16)より式(5-17)が得られる。

$$\mathbf{F}' = \mathbf{A}'\mathbf{E} \quad (5-17)$$

式(5-17)に \mathbf{E} の一般化逆行列 \mathbf{E}^+ を右から乗ずることにより式(5-18)が得られる。

$$\mathbf{A}' = \mathbf{F}'\mathbf{E}^+ \quad (5-18)$$

式(5-18)より, 相互干渉補正前の計測値から相互干渉補正後の計測値を求める変換行列 \mathbf{A}' が算出できる。センサに各作用力を負荷・除去し, その時の出力より式(5-18)に示す変換行列 \mathbf{A}' を求め, 相互干渉補正を行うことが可能となる。第 5.3 節でおこなった特性試験の結果, \mathbf{A}' は式(5-19)のように求められた。

$$\mathbf{A}' = \begin{pmatrix} 0.05316 & -0.00425 & 0.00355 & -0.00219 \\ -0.00077 & 0.07217 & 0.00008 & -0.00041 \\ -0.00071 & 0.00191 & 0.07764 & 0.00188 \\ 0.00031 & -0.00003 & -0.00010 & 0.00284 \end{pmatrix} \quad (5-19)$$

5.5 モーメントの影響

本センサは F_x , F_y , F_z , M_z の 4 分力を計測するため、 x 軸および y 軸回りのモーメント M_x, M_y の影響については考慮しておらず、これらの干渉成分が生じた場合、式(5-19)に示す干渉補正行列では影響を補正できない。そこで、有限要素解析によってモデルに M_z の定格荷重と等しい $M_x, M_y = 0.1[\text{N}\cdot\text{m}]$ のモーメントを負荷し、ひずみゲージの出力を調べる。荷重条件は $M_x(M_y)$ もしくは M_x, M_y の双方を負荷するものとし、第 5.1 節と同じ条件下で解析をおこなった結果の一例として、ひずみの最大出力は 1.56×10^{-5} となった。これは本章でおこなった有限要素解析および特性試験において得られた最大出力の 6.6×10^{-3} 倍程度であったため、 M_x, M_y の影響は無視できる大きさといえる。

5.6 強度評価

一般的な金属材料では、降伏点に至るまでは弾性変形をするので、ひずみの弾性限界 ε_{\max} は、降伏応力 σ_y と材料の縦弾性係数 E をフックの法則に適用することで次式より算出できる。

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_y}{E} \quad (5-20)$$

一方、超々ジュラルミンなどのアルミニウム合金では、明確な降伏現象が見られない。このような金属を一般用途で用いる場合には、除荷した後の永久ひずみが 0.2[%] となる応力を 0.2[%] 耐力 $\sigma_{0.2}$ (または耐力) と称して、実用上、降伏応力と同様な意味を持つ強さの基準として用いることとされている。

しかしながら、今回製作する力覚センサは構造部材(起歪部)に永久ひずみが残ることが許されないため、上記のような扱いは妥当ではなく、より小さな領域を弾性域として定める必要がある。そこで、明確な降伏現象が見られる材料の降伏点のひずみが 0.2~0.3[%] であることに着目し、この値の最小値である 0.2[%] までのひずみの範囲を「材料に残る永久ひずみが無視できる弾性域」と解釈することとした。すなわち、 $\varepsilon_{\max} = 2.0 \times 10^{-3} (= 0.2[\%])$ を用いることとした¹⁴⁾。

本節ではセンサに生じる最大ひずみを ε_l とした

時、有限要素解析によって $\varepsilon_l < \varepsilon_{\max}$ が成り立つことを検証する。荷重条件は中央部に各軸方向の定格荷重を同時に負荷するものとし、第 5.1 節と同じ条件下で解析をおこなった結果の一例として、 $\varepsilon_l = 1.93 \times 10^{-3}$ となった。これは $\varepsilon_l < \varepsilon_{\max}$ を満たしているため、センサは完全に弾性域で変形しており、各軸方向に作用する外力を計測可能である。

5.7 考察

解析および特性試験の各感度評価結果を比較すると、式(5-1), (5-5)より双方ともひずみコンプライアンス行列は対角項と比較して非対角項が十分に小さくなっており、対角項の値も双方でほぼ等しくなっている。センサの出力に含まれる干渉成分が小さいことから、センサは 4 分力をそれぞれ独立した成分として検出可能なことが分かる。

また、式(5-2), (5-6)より双方ともに F_z に対するひずみゲージ感度と比較して F_x, F_y, M_z に対するひずみゲージ感度が低く、特に F_x, F_y については 0.5 倍程度となっていることが分かる。これは、せん断力である F_x, F_y が垂直力である F_z と比較して負荷しにくい上、 F_x, F_y, M_z に対応するひずみをハーフブリッジ回路によるひずみゲージ 4 枚分の出力から検出しているため、ひずみゲージを 8 枚用いたフルブリッジ回路からひずみを検出する F_z と比較して出力が小さくなったためであると考えられる。

力覚感度および条件数については、式(5-3), (5-4)および式(5-7), (5-8)から最適値である 1 に近いとはいえない結果を示した。これは、センサの仕様上 F_z に対する出力のみが他と比較して大きくなるためと考えられる。しかし、それらの値は双方でほぼ等しくなっており、実機モデルに対する有限要素モデルの妥当性は検証できた。

よって、本センサは各軸方向の感度に差があるものの、4 分力を独立した形で計測可能であり、解析および特性試験の各評価結果から見ても、センサの有効性は検証できた。

Table 2. Characteristic Value.

	F_x	F_y	F_z	M_z
Nonlinearity [%RO]	0.19	-0.07	0.20	-0.09
Hysteresis [%RO]	-0.06	-0.29	0.32	0.29

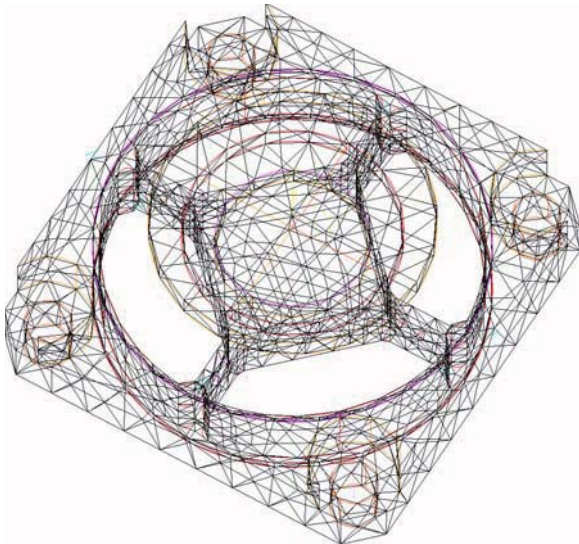


Fig.8. Simulation Model.



Fig.9. Overhead View of the Production Model.

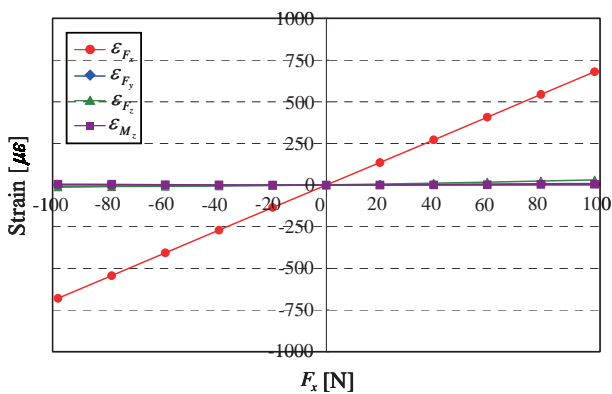


Fig.10. Each Output of strain to F_x .

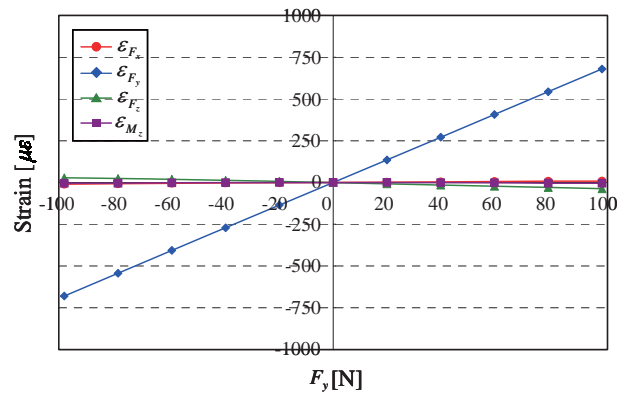


Fig.11. Each Output of strain to F_y .

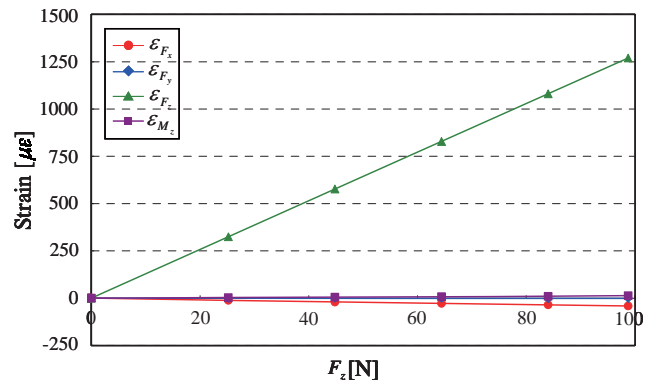


Fig.12. Each Output of strain to F_z .

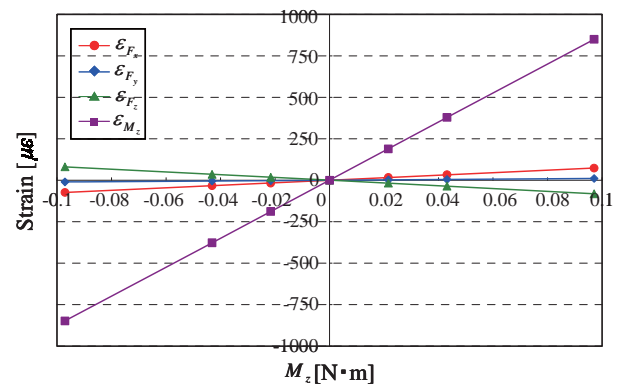


Fig.13. Each Output of strain to M_z .

6. 結 言

本研究ではロボットハンドの指の腹に装着して、作用力を計測可能な薄型の4軸力覚センサを開発した。本研究で得られた結論は以下の通りである。

1. 4軸力覚センサについて有限要素解析をおこない、得られた解析結果を用いてひずみゲージの貼り付け位置を最適化した。
2. 最適化したひずみゲージの貼り付け位置を有限要素モデルに適用し有限要素解析による感度評価をおこなった結果、貼り付け位置の有効性およびセンサが4分力を独立して計測可能なことを示した。
3. 固有値解析による動特性評価をおこなった結果、センサは共振の影響なく外力を計測可能なことを示した。
4. 4軸力覚センサの実機モデルを試作し特性試験をおこなった結果、ハーフブリッジ回路の出力を演算し外力を計測可能なことを示し、各荷重成分に対して十分に高い感度が得られ、開発したセンサの有効性は示された。

なお、本研究は文部科学省学術フロンティア推進事業「医工学研究の新展開」の支援を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 杉内肇, 渡辺紳一郎, “分布型触覚センサを有する多指ハンドによる物体操作”, 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集, **1**, 465-467 (2000).
- 2) ブウイ チョン クワン, 黄健, 藪田哲郎, “フィンガの可操作度を考慮したフィンガとアームロボットの協調動作”, 第 23 回日本ロボット学会 学術講演論文集, 34-36 (2005).
- 3) 多田泰徳, 細田耕, 石黒浩, 菅沼克昭, 浅田稔, “内部にセンサ素子を持つ人間型柔軟指の開発とそれを利用した適応的操りの実現”, (博士論文, 大阪大学, 2005), pp. 1-3.
- 4) 今関一飛, 前野隆司, “随意運動による反射運動の抑制を模倣したロボットハンドの把持・操り制御”, 日本機械学会[No.04-4]ロボティクス・メカトロニクス講演会’04 講演論文集, 12-13 (2004).
- 5) G. Kim, “Design of a six-axis wrist force/moment sensor using FEM and its fabrication for an intelligent robot,” *Sensors and Actuators A*, **133**, 28-35 (2007).
- 6) 角谷哲哉, 田中篤, 江良聡, 永井努, 佐伯和司, 岡田和廣, “静電容量型6軸力覚センサの開発”, 電気学会論文誌 E, **129-2**, 41-46 (2009).
- 7) 村上剛司, 野田明子, 長谷川勉, “多関節多指ハンドのための汎用指先と紐ほどき作業の試み”, 日本機械学会[No.03-4]ロボティクス・メカトロニクス講演会’03 講演論文集, 40-42 (2003).
- 8) 高野政晴, 「詳説 ロボットの運動学」, (オーム社, 東京, 2004), pp. 192-204.
- 9) J. Kim, D. Kang, H. Shin and Y. Park, “Design and analysis of a column type multi-component force/moment sensor,” *Measurement*, **33**, 213-219 (2003).
- 10) A. Song, J. Wu, G. Qin and W. Huang, “A novel self-decoupled four degree-of-freedom wrist force/torque sensor,” *Measurement*, **40**, 883-891 (2007).
- 11) 向井利春, 羅志偉, 加藤陽ほか, 「超五感センサの開発最前線」, (株式会社 NTS, 東京, 2005), 341-348.
- 12) 内山勝, 中村吉宏, 箱守京次郎, “特異値分解によるロボット力覚センサの構造評価”, 日本ロボット学会誌, **5-1**, 4-10 (1987).
- 13) 中村仁彦, 吉川恒夫, 二股一郎, “力覚センサの弾性要素の設計指針と信号処理”, 計測自動制御学会論文集, **23-5**, 433-439 (1987).
- 14) 永井清, 伊藤義典, 矢崎誠, 樋口克己, 阿部暁, “二重十字構造に基づく小型6分力力覚センサの開発”, 日本ロボット学会誌, **22-3**, 361-369 (2004).
- 15) L. Chao and K. Chen, “Shape optimal design and

- force sensitivity evaluation of six-axis force sensors,” *Sensors and Actuators A*, **63**, 105-112 (1997).
- 16) A. Bicchi, “A criterion for optimal design of multi-axis force sensors,” *Robotics and Autonomous Systems*, **10**, 269-286 (1992).
 - 17) J. Park and G. Kim, “Development of the 6-axis force/moment sensor for an intelligent robot’s gripper,” *Sensors and Actuators A*, **118**, 127-134 (2005).
 - 18) S. A. Liu and H. L. Tzo, “A novel six-component force sensor of good measurement isotropy and sensitivities,” *Sensors and Actuators A*, **100**, 223-230 (2002).
 - 19) G. Kim, “Development of 6-axis force/moment sensor for a humanoid robot’s foot,” *IET Sci. Meas. Technol.*, **2-3**, 122-133 (2008).
 - 20) J. Zhenlin, G. Feng and Z. Xiaohui, “Design and analysis of a novel isotropic six-component force/torque sensor,” *Sensors and Actuators A*, **109**, 17-20 (2003).
 - 21) G. Kim, “Development of a three-axis gripper force sensor and the intelligent gripper using it,” *Sensors and Actuators A*, **137**, 213-222 (2007).
 - 22) 林祐一郎, 辻内伸好, 小泉孝之, 大島裕子, 伊藤彰人, 土屋陽太郎, “ロボットハンドの指の腹に装着可能な薄型 4 軸力覚センサの性能評価”, *Dynamics and Design Conference 2008 CD-ROM 論文集*(2008).
 - 23) Y. Hayashi, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, H. Oshima, A. Ito and Y. Tsuchiya, “Performance evaluation of the thin-type four-axis force/moment sensor as two-times model for the robot hand’s fingertip,” *Proceedings IECON 2008*, 1765-1770 (2008).
 - 24) 広瀬茂男, 「ロボット工学 - 機械システムのベクトル解析 - 」, (裳華房, 東京, 2008), 138-212.
 - 25) 長松昭男, 「モード解析入門」, (コロナ社, 東京, 1993) .