

半導体ピエゾ抵抗効果を利用した 指先サイズの6軸力センサ

Fingertip-size Six-axis Force and Moment Sensor Using Semiconductor Piezoresistance Effect

大 里 毅*
Takeshi OHSATO
保 家 茂 則*
Shigenori YASUIE

櫻 井 伸 弘*
Nobuhiro SAKURAI
平 林 祐 輔*
Yusuke HIRABAYASHI

神 部 靖 彦*
Yasuhiko JINBU
横 林 寛*
Hiroshi YOKOBAYASHI

要 旨

ロボットの把持機能を向上させるために、指先に搭載できる小型の6軸力センサを提案する。

具体的には、半導体ピエゾ抵抗効果を利用して、シリコンチップ(以下、チップ)で6軸力を検知する方式にした。さらに温度補償用の抵抗素子をチップに形成して温度特性を安定させた。チップと金属製の応力減衰機構を組み合わせる構造にして、センサに加わる荷重でチップが破壊するのを防止できるようにした。陽極接合と精密勘合で構成部材を一体化することで、高精度なセンサ特性を得られるようにした。

上記構想に基づいて試作したセンサは、指先サイズで定格荷重 30 N(モーメントは 30 Ncm)を実現し、定格荷重印加における出力精度は 2.4 %FS(FS= 定格相当の出力)、荷重ゼロの状態での温度特性精度は、0.19 %FS/°C(0 – 60 °C)を確認した。

ABSTRACT

A compact six-axis force and moment sensor that can be mounted in a fingertip is proposed to enhance the holding function of robots.

Specifically, the sensor system uses the semiconductor piezoresistance effect to detect the six-axis force and moment with a silicon chip (hereafter, “chip”). In addition, a resistive element for temperature compensation is fabricated into the chip to stabilize the temperature characteristics. The structure combines the chip with a metallic stress attenuation mechanism, enabling prevention of the load applied to the sensor from damaging the chip. Accurate sensor characteristics are obtained by integrating the components using anodic bonding and precision integration.

A fingertip-size prototype sensor based on the above concepts realized a rated load of 30 N (moment: 30 Ncm). The output accuracy at the rated load was confirmed to be 2.4 %FS (FS = rated equivalent output), and the temperature characteristics accuracy in the zero load state was confirmed to be 0.19 %FS/°C (0 to 60°C).

1. まえがき

Fig. 1に示す通り、6軸力とは3軸方向の力(F_x , F_y , F_z)とモーメント(M_x , M_y , M_z)であり、主に産業機器用途として、歪みゲージ式、静電容量式、光学式、などの6軸力センサが製品化されている。いずれの方式も、高精度なセンサ特性を得るためには検知素子の配置を高精度に行わなければならない。高い製作技能を必要とし、さらに小型化するためには、製作する難易度が一層高くなる。例えば、歪みゲージ式センサでは、荷重が伝達される構造体(起歪体)に、数枚から

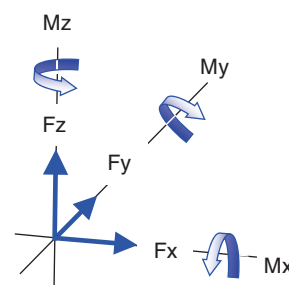


Fig. 1 Six-axis force and moment

* 基礎技術研究センター

数十枚の金属歪みゲージを貼る作業が必要になり、また指先サイズまで小型化する場合は、歪みゲージの寸法や枚数によっては、物理的な配置が不可能な場合も起こり得る。以上を鑑み、指先サイズまで小型化するため、半導体ピエゾ抵抗効果を利用した6軸力センサの提案に至った。

2. 基本構想

本センサの基本構想を(1)から(3)に示す。

- (1) 半導体ピエゾ抵抗効果⁽¹⁾を利用して6軸力を検知する方式にすることで、従来技術で製作困難な小型の検知素子を、微細かつ正確に配置できるようにする。さらに温度補償用の抵抗素子をチップに形成して温度特性を安定させる。
- (2) チップと応力減衰機構を組み合わせる構造にして、センサに加わる荷重でチップが破壊するのを防止できるようにする。
- (3) 陽極接合⁽²⁾と精密勘合で構成部材を一体化することで、高精度なセンサ特性が得られるようにする。

3. センサの構造

本センサの構造について説明する。

Fig. 2(a) はセンサの外観を示しており、直径 13 mm の円柱形状であり、金属製の筐体には溝加工が施されていて、応力減衰機構として機能する。Fig. 2(b) は内部構造を示しており、チップとガラスが陽極接合 (Anodic bonding) されていて、さらにガラスと金属製の筐体も陽極接合されている。また図中の破線は、 F_z 方向の力を印加した場合の変形イメージを示している。この図は、センサ下半分に相当する金属製の筐体が省略されていて、ハウジングとして機能する。その形状はセンサ上半分の筐体とほぼ同じであり、精密勘合で一体化する構造になっている。

Fig. 3 はチップに荷重 (例として F_x) が伝達されたときの変形イメージ図であり、チップにはT字形の梁を微細加工プロセス^{(3), (4)}で形成し、この梁が変形してピエゾ抵抗素子に歪みが伝達するようにした。またT字梁以外の部位にもピエゾ抵抗素子を形成し、この部位には歪みが伝達されないで温度補償用の抵抗素子として用いた。

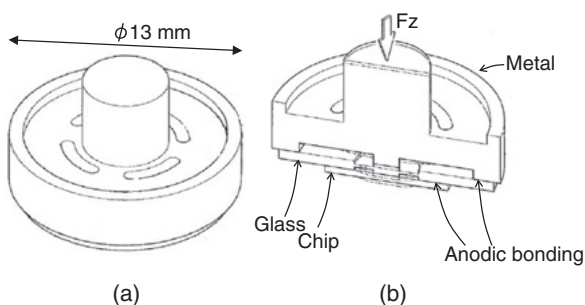


Fig. 2 Oblique perspective view of sensor

センサを構成する部材の寸法や形状は、指先サイズ ($\phi 13$ mm)、定格荷重 (力: 30 N, モーメント: 30 Ncm) を設計目標にして、材料力学的な知見と有限要素法による構造解析に基づいて決定した。

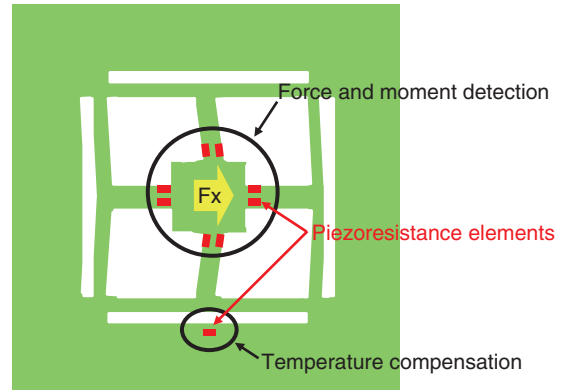


Fig. 3 Image of chip deformation

4. 6軸力の計算方法

本センサのチップは、T字梁にピエゾ抵抗素子が形成されていて、荷重に応じて発生する歪みを8個のピエゾ抵抗素子によって検出することができる。6軸力への変換は、単軸毎に既知の荷重を印加して、8個の素子 (R1 から R8) の抵抗変化を計測し、式 (1) に示す行列 $[A]$ の成分を事前に求めておき、未知の荷重が入力したときには、式 (2) に示す逆行列 $[A]^{-1}$ を用いる計算を行った。

$$\begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \\ R4 \\ R5 \\ R6 \\ R7 \\ R8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & & A_{81} \\ & \ddots & \\ A_{81} & & A_{86} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Fx \\ Fy \\ Fz \\ Mx \\ My \\ Mz \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[F, M] = [A]^{-1} [R] \quad (2)$$

また Fig. 4 に示す計算方法で温度補償も行えるようにした。具体的には、荷重ゼロの状態から 60 °C の温度変化を与えた時の出力を事前に計測し補償用抵抗との相関を得ておき、未知の温度環境では、補償用抵抗の出力との相関から得られた荷重検知抵抗の出力を差し引くことで、温度補償できるようにした。

5. 試作による特性評価

5.1. 荷重印加特性

センサを試作して、室温一定環境での荷重印加による出

力精度を評価した。本稿には F_x 印加と M_x 印加の結果を抜粋して示す。

Fig. 5 は、定格荷重の力 (F_x : ± 30 N) を印加した場合の出力結果である。グラフに示す通り F_x のみを検知し、他の荷重は殆ど検知しないことを確認した。Fig. 6 は、Fig. 5 の出力特性について最小二乗法で線形近似した直線からのズレ (誤差) を示しており、 F_x の荷重印加 30 N に対し最大のズレは 0.4 Ncm の M_z 出力となることから、 F_x 印加による出力精度は 1.4 %FS (FS= 定格相当の出力) を確認した。

Fig. 7 と Fig. 8 は、モーメント (M_x : ± 30 Ncm) についての出力データである。同様に、最大のズレは 0.7 N の F_z 出力であり、 M_x 印加による出力精度は 2.4 %FS を確認した。

なお、本稿で省略した他の荷重 (F_y , F_z , M_y , M_z) を印加した場合の出力精度は、上述 M_x 印加による結果と比べて、高い出力精度を確認したので、本センサの定格荷重印加における出力精度は 2.4 %FS と考えた。

5.2. 温度特性

センサへの荷重ゼロの状態、0 から 60 °C の温度変化を与えた時の出力精度を評価した。Fig. 9 は荷重検知抵抗 (R1 から R8) と温度補償用抵抗との関係である。なお、抵抗変化は電圧として計測したため、グラフは電圧出力で示されている。この関係を Fig. 4 に示した計算方法に代入して、温度補償後の精度を評価した。

Fig. 10 は、0 から 60 °C の温度変化を与えた場合のセンサ出力を温度補償した結果であるが、 F_z 出力に 3.4 N のズレが生じ、これは定格荷重 (30 N) の 11.3 % に相当するので、計測温度範囲 60 °C における本センサの温度特性精度は、0.19 %FS/°C と考えた。

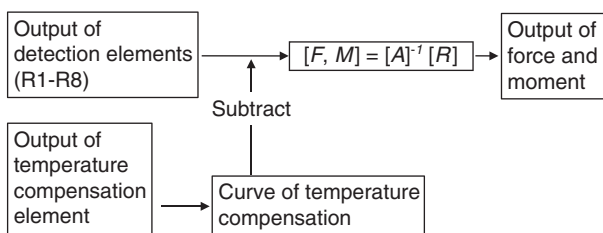


Fig. 4 Block diagram of force and moment detection

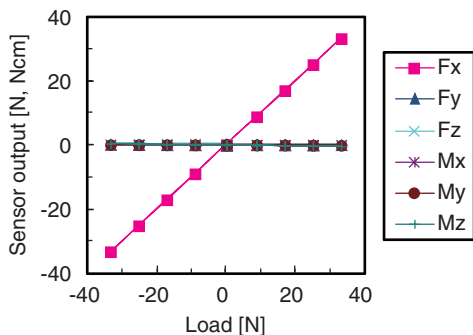


Fig. 5 Characteristic of load impression (F_x)

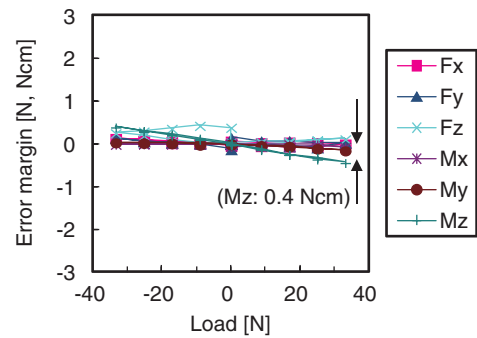


Fig. 6 Detection error margin of load impression

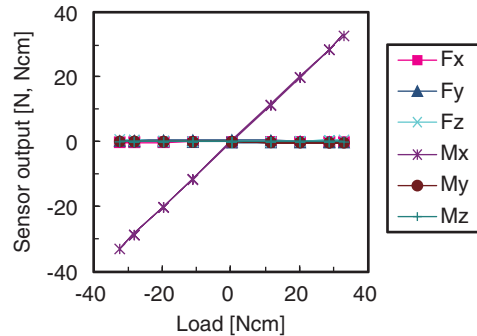


Fig. 7 Characteristic of load impression (M_x)

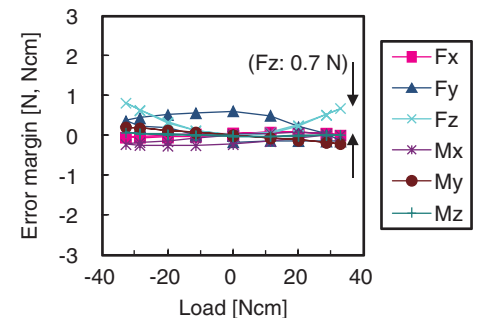


Fig. 8 Detection error margin of load impression

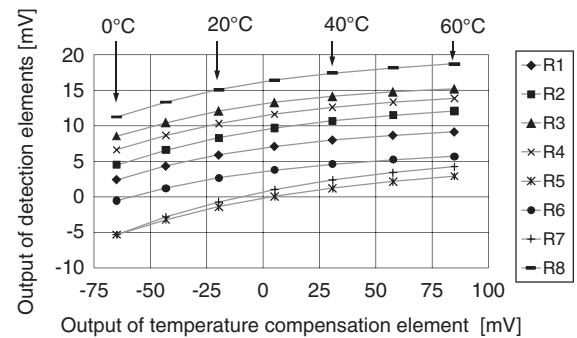


Fig. 9 Curve of temperature compensation

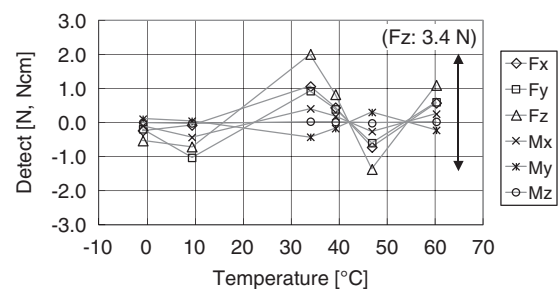


Fig. 10 Sensor output (after temperature compensation)

Table 1 Sensor characteristic results

Diameter		13 mm
Load range	Force	30 N
	Moment	30 Ncm
Accuracy	Load	2.4 %FS
	Unload 0 – 60 °C	0.19 %FS/°C

6. まとめ

Table 1 に、試作したセンサの特性を示す。指先サイズまで小型化し、かつ高精度な出力が得られるセンサを実現することが出来た。

ロボット指先の把持機能を向上させるために、小型6軸力センサが必要になるが、本稿で提案したセンサの基本構想は有効な達成手段と考える。

また、半導体技術を用いた本センサは、小型高精度に加えて、piezo抵抗素子の高抵抗化による消費電力低減や、特殊技能を必要としない半導体プロセスで製作することによる量産性向上も期待できると考える。

参考文献

- (1) Kanda.Y: A Graphical Representation of the Piezo-resistance Coefficients in Silicon, IEEE Transactions on Electron Devices, VOL. ED-29, NO. 1 p.64-70(1982)
- (2) G.Wallis, D.I.Pomerantz: Field assisted Glass-Metal Sealing, Journal of Applied Physics,49, p.3946-3949(1969)
- (3) A.M.Hynes, H.Ashraf, J.K.Bhardwaj, J.Hopkins, I.Johnston, J.N.Shepherd: Recent advances in silicon etching for MEMS using the ASE™ process, Sensors and Actuators A: Physical Volume: 74, p.13-17(1999)
- (4) F.Laermer, A.Urban: Milestones in Deep Reactive Ion Etching, Digests of Technical Papers, Transducers' 05, p.1118-1121(2005)

■著 者■



大 里 毅



櫻 井 伸 弘



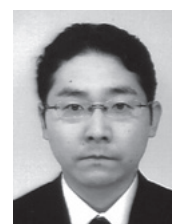
神 部 靖 彦



保 家 茂 則



平 林 祐 輔



横 林 寛