

## 6軸力覚センサとアプリケーションの開発

Development of Six-Axis Force/Torque Sensor and application using this Sensor

小林 岳久見\* 田名網 克周\*  
Takumi Kobayashi Yoshikane Tanaami

牧野 泰育\*\* 伊藤 康二\*\*  
Hiroyasu Makino Koji Ito

Leptrino, leading company of Six-Axis Force/Torque Sensor, and Sinto formed technical tie-up and Sinto had started this sensor business. This Six-Axis Force/Torque Sensor measures all six components of force and torque, namely,  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  and  $M_z$ , simultaneously. Because this sensor detects the force/torque by using strain gauge, it is easy to meet the customer's needs. The authors are also developing many application of industrial robot using this sensor in order to achieve to save manpower and improve productivity.

This technical paper provides fundamental information of Six-Axis Force/Torque Sensor and application robot using this sensor.

KEY WORDS: Six-Axis Force/Torque Sensor, Strain Gauge, Industrial Robot

### 1. はじめに

製造工場の自動化に伴い、産業用ロボットの普及は顕著である。製造品の品質向上や、トレーサビリティ、更には人協働ロボットの実用化の観点から、様々なセンシング技術が用いられている。特に、ビジョンカメラ、力覚センサ、AI制御技術は産業用ロボットの高機能化に大きく貢献している。

そこで、需要が急速に拡大している力覚センサに着目し、先行メーカーである株式会社レプトリノと技術提携をして2019年2月から力覚センサ事業を開始した。標準的な6軸力覚センサをFig. 1に示す。

本報告では力覚センサを技術的な点から解説し、その特徴を紹介する。また、力覚センサを使ったアプリケーション開発の一例を紹介する。

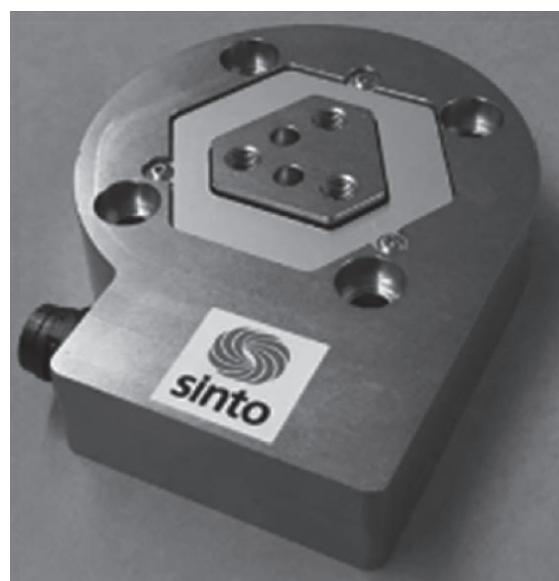


Fig. 1 Six-Axis Force/Torque Sensor.

### 2. 力覚センサとは

力覚（りきかく）とは、JIS B 0134に「ロボットの動作に関する力の感覚」<sup>1)</sup>と定義されている。力覚は広義の意味での触覚の一部である。狭義の触覚が対象表面の凹凸や摩擦係数を知覚する皮膚感覚であるのに対し、力覚は対象の大まかな形状・重さを知覚する深部感覚であると言える<sup>2)</sup>。

人は道具を使用するとき、何らかの形で力覚を

\* 新規事業PJ推進

\*\* 開発本部 開発グループ

使用すると言われている。また、人は手袋をした（触覚を遮断した）状態で作業できることから、触覚より力覚の方が重要とも言われる<sup>3)</sup>。この「力覚」を力覚センサは計測することができる。

力覚センサは、Fig. 2に示すように三次元空間における直交する3方向を表すX-Y-Z軸方向の力 $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$ と、各軸回りのモーメント $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ の大きさと方向を測るセンサである。中でも、前述した6つの力・モーメントをすべて計測することができる力覚センサを6軸力覚センサと呼ぶ。

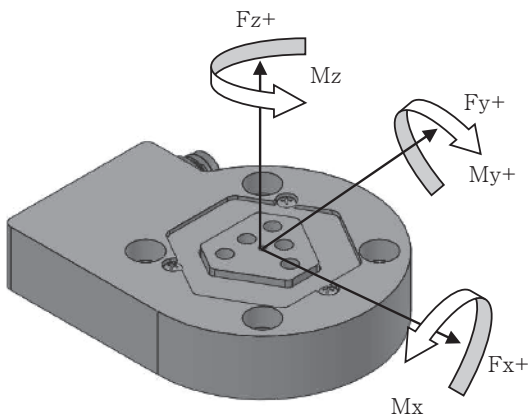


Fig. 2 Six axis direction on Force/Torque Sensor.

力覚センサは、ロボットに力や重心などの情報を与えることを可能にするツールの1つである。力覚センサから得られる情報を基に様々なフィードバック制御（ロボットハンドの物体把持制御、歩行ロボットの歩行制御、ロボットによる組立・バリ取り作業など）が行われる。また、力覚センサを内蔵したフォースプレートで人間の重心移動を計測することにより、アスリートの運動を計測・解析することが可能である。さらに、近年普及してきた人協働ロボットは、ロボットが人やモノと接触した際の力情報の計測が必要であることから、力覚センサの重要性が高まっている。

力覚センサは、センサに力を加えた際の構造体のひずみなどの物理量を様々な検出方法で電気信号に変換し、力を測定している。

力覚センサは、力の検出方法からひずみゲージ式・圧電式・光学式・静電容量式などに分けられ

る。ここでは、従来技術の蓄積と汎用性の高さから、ひずみゲージ式を採用している。

### 3. ひずみゲージ式力覚センサ

#### 3.1 ひずみゲージの計測原理<sup>4) 5) 6)</sup>

Fig. 3に示すように、長さ $L$ の構造体（以下、起歪体）に外力が加わると起歪体に変形する。外力による変形量を $\Delta L$ としたとき、 $L$ と $\Delta L$ の割合ひずみ $\varepsilon$ を次式で表す。

$$\varepsilon = \Delta L / L \cdots (1)$$

ひずみゲージは、起歪体に外力が加わったときに生じるひずみの大きさに応じて、電気抵抗が変化する性質を持つ。Fig. 4にひずみゲージの構造を示す。外力が加わったときのひずみゲージの抵抗変化量を $\Delta R$ とすると、元の抵抗 $R$ と $\Delta R$ の割合 $\Delta R / R$ は起歪体に生じるひずみに比例する。

$$\Delta R / R = K \cdot \varepsilon \cdots (2)$$

ここで、 $K$ をゲージ率と呼ぶ。ゲージ率はひずみゲージの材料によって決まる定数である。

ひずみゲージは、起歪体の中でひずみが大きく発生する部分に貼り付けられ、起歪体に生じるひずみを抵抗変化量に変換する。ひずみゲージの抵抗変化量は極めて小さく、直接計測することは困難である為、ひずみゲージでホイートストンブリッジ回路を組み、ひずみゲージの抵抗変化量を電圧変化に変換する。ブリッジ回路からは印加電圧とひずみに比例した電圧信号が出力される。

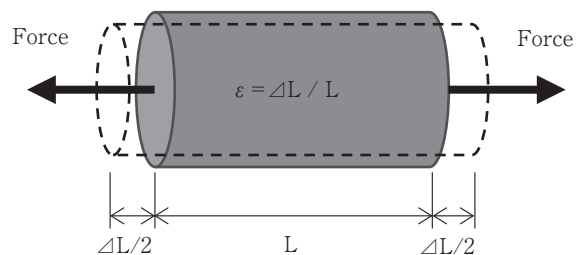


Fig. 3 Definition of strain.

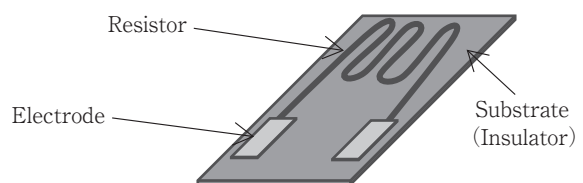


Fig. 4 Structure of strain gauge.

ひずみゲージを使ったセンサで一般的に普及しているものがロードセル（一軸の力覚センサとも言える）である。ロードセルは起歪体に力が加わると力を電気信号に変換する為、荷重変換器とも呼ばれる。

### 3.2.6 軸力覚センサの構造<sup>7)</sup>

6軸力覚センサはロードセルとは異なり、すべての方向から力を受けて計測する。その為、ひずみを発生させる起歪体の構造とひずみゲージを装着する位置が重要である。

Fig. 5は、クロスビーム型と呼ばれる6軸力を検出する一般的な起歪体の構造である。クロスビーム型の起歪体は最も単純で理解し易い為、これを例に6軸力覚センサの起歪体について説明する。

クロスビーム型起歪体に各軸方向の外力が加わったときの変形は、Fig. 5～Fig. 9のようになる。

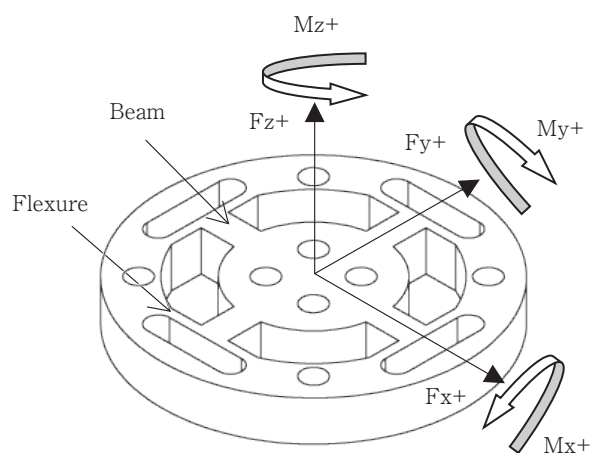


Fig. 5 Structure of strain body.  
Type: X beam

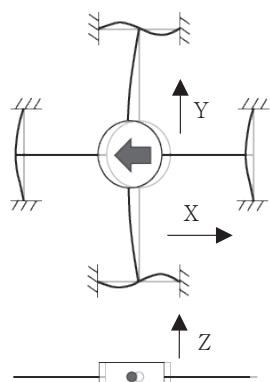


Fig. 6 Deformation of strain body in the case of  $F_x$  is applied.

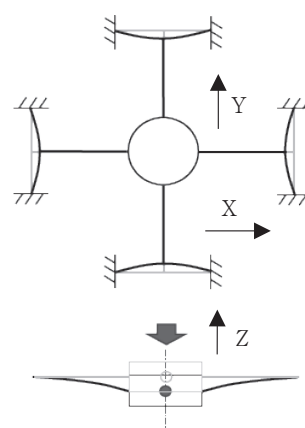


Fig. 7 Deformation of strain body in the case of  $F_z$  is applied.

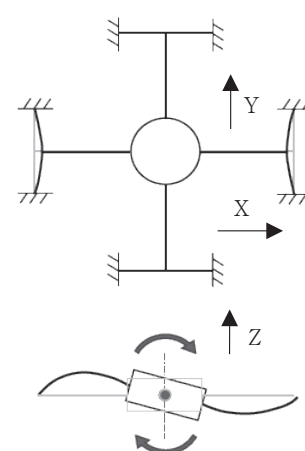


Fig. 8 Deformation of strain body in the case of  $M_y$  is applied.

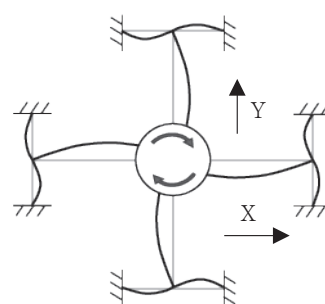


Fig. 9 Deformation of strain body in the case of  $M_z$  is applied.

外力 $F_x$ （または $F_y$ ）がかかった場合、X軸（またはY軸）方向にのみ変形する（Fig. 6）。外力 $F_z$ がかかった場合、Z軸方向にのみ変形する（Fig. 7）。外力 $M_y$ （または $M_x$ ）がかかった場合、Y軸（またはX軸）を中心に回転する（Fig. 8）。外力 $M_z$ がかかった場合、Z軸を中心に回転する（Fig. 9）。この様に、クロスビーム型起歪体は加わった外力の方向にのみ変形する。その為、起歪

体の各梁の変形を検出することで、6方向の力に変換することができる。

6軸力覚センサにおいて最も重要なのは、起歪体が以下の構造を持っていることである。

- ・外力方向に対し、線形に変形すること
- ・外力方向に対し、別の方向に変形しないこと
- ・一体構造であること
- ・固定した際の影響が無いこと

これらを満たした起歪体の変形を精度良く検出可能ならば、力覚センサの検出方法はひずみゲージ式以外でも測定が可能である。

#### 4. 6軸力覚センサの特性

##### 4.1 非直線性と他軸干渉性

起歪体構造は、6軸力覚センサの精度を表す「非直線性・他軸干渉性」に影響する。非直線性は力覚センサに一軸の力を加えたとき、力覚センサが検出する力と加えた力のずれの大きさを示す。一方、他軸干渉性は加えられた一軸以外から検出する力の大きさを示す。例えば、Fzに100Nの力を加えたとき、力覚センサがMxを検出すると、FzとMxは他軸干渉していると言える。このとき検出するMxの最大値を他軸干渉性として表現する。

非直線性・他軸干渉性を決定する原因の一つが前述した起歪体構造にある。外力に対して起歪体が線形に変形しない6軸力覚センサは、非直線性の性能が低い。また、外力に対して起歪体が別方向に変形する6軸力覚センサは、他軸干渉性の性能が低い。

非直線性・他軸干渉性を決定するもう一つの原因として、力を加える位置が正確でないことが挙げられる。例えば、1,000Nの力をセンサに加えたとき、力を加える位置がセンサの焦点(X、Y、Z軸が交わる点)から0.1mmずれると、センサはモーメントとして0.1Nmを検出する。力を高精度にセンサの焦点に与えることは困難である為、非直線性・他軸干渉性という仕様項目が重要である。

非直線性・他軸干渉性は、力覚センサの定格容量(計測できる最大の荷重)に対する百分率で表現される。新東工業の力覚センサ(Fig. 1)の定

格容量はF<sub>x</sub>、F<sub>y</sub>、F<sub>z</sub>が500N、M<sub>x</sub>、M<sub>y</sub>、M<sub>z</sub>が20Nmである。Fig. 10のグラフは、新東工業の力覚センサにF<sub>x</sub>荷重を100Nずつ加えたときに計測した、各軸力から計算した非直線性・他軸干渉性である。F<sub>x</sub>に500N(定格容量の100%)を加えたときの非直線性・他軸干渉性が0.5%以下であることから、このときのセンサ出力は各軸力の真値から±2.5N、±0.1Nm以下のズレであると言える。

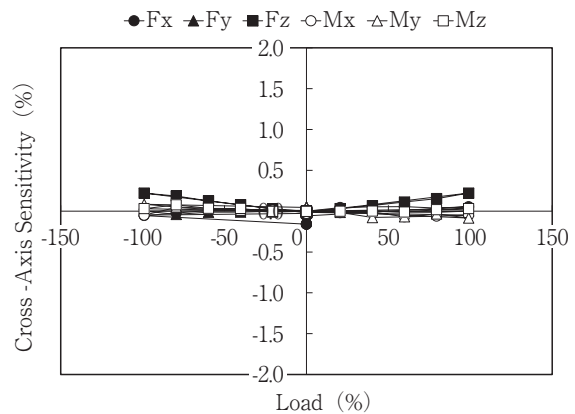


Fig. 10 Cross-axis sensitivity of Six-Axis Force/Torque Sensor in the case of 500N loaded in the x direction.

##### 4.2 剛性と感度

6軸力覚センサには、正確な力検出と定格荷重(検出可能な力の大きさ)以上の荷重がかかった際にも起歪体を破壊しないことが必要である。力覚センサは、どのような検出方法であっても起歪体の変形を検出し、力に変換している。起歪体の変形は外力が大きいくほど大きくなり、限界を超えると起歪体を破壊する。剛性の低い(小さな力で大きく変形する)起歪体を持つ6軸力覚センサはストッパー機構を設けることで過負荷からセンサを保護することが可能である。しかし、固有振動数などを考えると、力覚センサの剛性は可能な限り高いことが好ましい。一方、「起歪体の剛性が高い」ことは「大きな力をかけても起歪体に変形しない」ことを意味する。その為、剛性が高い起歪体を使った力覚センサは力の感度が低い。

検出方法によって差はあるものの、剛性と感度はトレードオフの関係にある。その為、力覚セン

サの使用目的に応じて、剛性・感度を決定する必要がある。

#### 4.3 ひずみゲージ式6軸力覚センサ

クロスビーム型起歪体の場合、四本の梁の上下・左右の面にひずみゲージを貼り付け、梁の曲げひずみを検出し力に変換する。梁の形状や起歪体の材質を変えることで、感度や剛性を調整することができる。その為、他の検出方法に比べ、容易に用途に合わせた設計が可能である。また起歪体の構造が正しければ、従来の力覚センサの様に、固定用ボルトの締め付けトルクに細かく気を使う必要が無い。

ひずみゲージ式6軸力覚センサならば、非常にシンプルな構造にすることも可能である。Fig. 1は、これらの技術的観点を踏まえて開発をした、起歪体とカバーのみで構成されたひずみゲージ式の薄型6軸力覚センサである。

#### 5.6軸力覚センサを使ったアプリケーション

これまで開発を進めてきた、6軸力覚センサのアプリケーション例を紹介する。

##### 5.1 研磨作業

Fig. 11は、産業用ロボットと力覚センサを使用し、ステンレス板の溶接痕を研磨したときの写真である。ロボットによる研磨で鏡面研磨ができることを確認した。

力覚センサとグラインダーをロボットに接続し、力覚センサが計測する力を使ってロボットを制御し、研磨した。力覚センサを取り付けることで、ロボットはグラインダーとステンレス板が接触する力を検知できるようになる。その結果、過剰研磨や研磨不足を防ぎつつ研磨することができる。また、各研磨工程で力覚センサから検出する力を一定にすることで、研磨のクオリティを一律にできると考えられる。

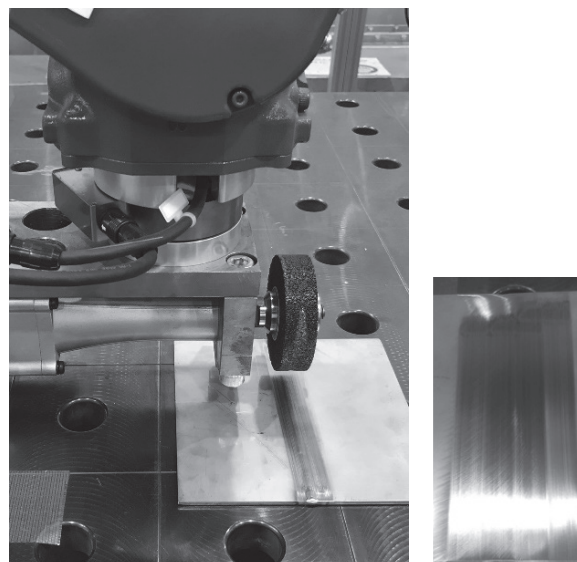


Fig. 11 Outside view of polishing robot and polished test piece.

##### 5.2 中子入れ（嵌合作業）

Fig. 12は、力覚センサを取り付けた産業用ロボットに casting 中子入れ作業を、デモで行わせたときの写真、Fig. 13は力覚センサが測定したデータの例である。

中子入れは砂で成形した中子を主型に入れる作業であるが、崩さないように中子を取める必要がある為、ロボットによる自動化が少ない工程である。

力覚センサは、中子入れ時の主型と中子の接触を水平方向の力成分 ( $F_x$ ,  $F_y$ ) として検出する。水平方向の力を検出せずに垂直方向の力 ( $F_z$ ) が所定値になるように力を制御することで、熟練作業者が中子を入れるように、安定した中子入れができたことを確認できる。

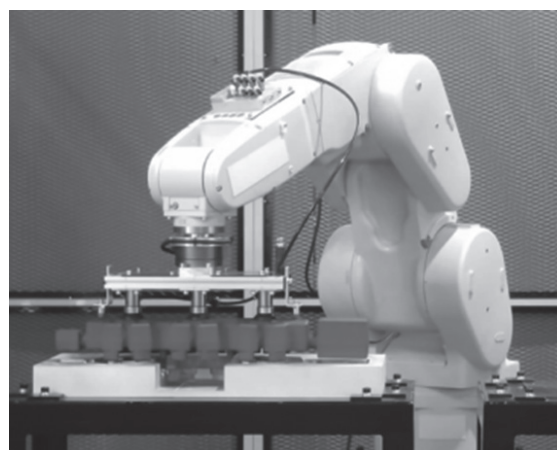


Fig. 12 Demonstration of core setting robot.

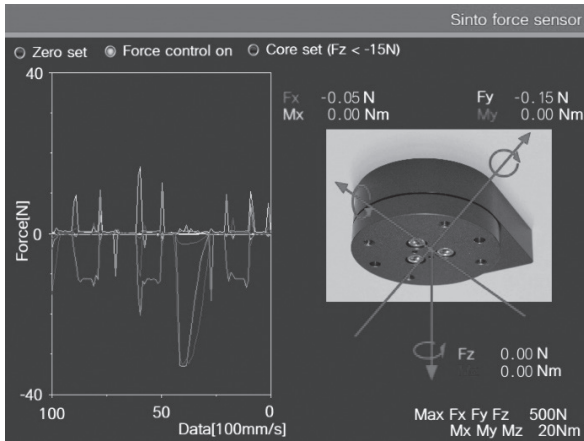


Fig. 13 Example of measured force and torque during core setting process.

### 5.3 面あい作業

最後に、力覚センサと産業用ロボットを使って面あい（文字を書く）作業を行った例を紹介する。

表面が波打つ板の上に紙を敷き、ロボットに取り付けたマジックで「令和」を描かせている。Fig. 14 にロボットに書かせた文字の写真を示す。

力覚センサがついていない場合、ロボットは位置制御で動く為、波板の凹凸形状に滑らかに追従することが困難で、文字を書けていない部分がある。

一方、力覚センサがついている場合、ロボットは力制御と位置制御で動く為、波板の凹凸形状に接触して確実に文字を書くことができる。



(a) Without sensor (b) With sensor

Fig. 14 Demonstration of writing robot.

## 6. まとめ

本稿では、新たに事業を開始した力覚センサについて、技術的な解説とアプリケーションの紹介をした。

6 軸力覚センサにより、ロボットの高性能化、製造装置の高機能化が可能となり、省人化を推進できる。さらに、トレーサビリティにより付加価値の向上も可能となる。今後、様々なアプリケーションを開発することで、省人化、付加価値向上に取り組み、産業に貢献をしたい。

### 謝辞

本稿は株式会社レプトリノのご協力のもと、作成しております。ご助言をいただきました皆様に感謝を申し上げます。

### 参考文献

- 1) 日本工業規格 (JIS), JIS B 0134 : 1998. 産業用マニピュレーティングロボット-用語
- 2) 貴田恭旭：ロボット 192 (2010) 58-63
- 3) 福田収一、綿貫啓一：感覚・感情とロボット (工業調査会) (2008) 93, 98
- 4) 西田恵一：トランジスタ技術 2003年7月号 (CQ出版社) (2003) 257-264
- 5) トランジスタ技術 2007年7月号 (CQ出版社) (2007) 136
- 6) 岡野一雄：Interface2001年2月号 (CQ出版社) (2001) 65
- 7) 向井優、野田善之：精密工学会誌 84 (2018) 303-306