

# 静電容量型 6 軸力覚センサの 開発・設計・製造\*

Development, Design and Production of Capacitive 6-Axis Force Sensor

佐伯和司\*\* 西沖暢久\*\* 鈴木信人\*\*\* 岡田和廣\*\*  
Kazushi SAEKI, Nobuhisa NISHIOKI, Nobuhito SUZUKI and Kazuhiro OKADA

**Key words** 6-axis, force, torque, moment, capacitive, reliability

## 1. 緒 論

【力】は物理量の最も基本であるにもかかわらず、力を検出するセンサの市場は全世界でも 20 億～40 億円/年と小さい。他の物理量（光、音、温度、湿度、加速度、圧力など）を検出するセンサは数千億円/年の市場規模に達している。その理由は、他のセンサが単価 10～1000 円に対し、力センサは数十万円と高額なためと考えられる。

近年、人件費の高騰、少子化の影響により、ロボットによる作業工程の置き換え需要が急速に高まっている。ロボット先端に力覚センサを用いることでロボットに力覚を与え、これまで人間が行っていた作業をロボットが行うことが可能となり、市場への普及が徐々に拡大してきた。その一方で、力覚センサへ求められる要求が多様となった。

従来の多軸力センサはひずみゲージ式であり、一般的に起歪体の構造が複雑で、生産性に劣り、過負荷・衝撃に弱いといった問題があった。

われわれは、力の検出原理として従来のひずみゲージ式とまったく異なる静電容量型力覚センサを開発し、市場へ供給してきた<sup>1)~6)</sup>。産業用ロボットへ採用されるにあたり、特に低コスト、高信頼性が必要となるが、静電容量型センサは従来のセンサと比べ構造が簡単で組み立てが容易であることから、高信頼性かつ大量生産による低コスト化が可能という特長がある。

以下に、われわれが開発した静電容量型 6 軸力覚センサについて紹介する。

## 2. 原理と構造

静電容量型力覚センサの基本構造は、静電容量を形成する 2 枚の平行平板である。図 1 のように、片側の平板を

金属の切削加工による起歪体、もう片側を回路基板上のパターンにて形成できるため、シンプルな構造となっている。起歪体に力を加えることで微小な変形が発生し、平板間の距離が変化することで静電容量が変化し、それを回路基板上の検出回路にて検出する。

起歪体は、荷重により変形するダイフラムと、その変形を支える台座（剛体部分）に分かれる。センサの定格荷重は、このダイアフラムの変形量によって決まるため、ダイアフラムをいかに設定するかが設計のポイントとなる。このように、設計が比較的容易であることも本構造の特長である。

図 1 では、起歪体＝筐体が静電容量を形成する電極となっている。電気的には検出する静電容量の片側の電極が露出しており、外部からのノイズによって検出値が乱れてしまうことがある。

われわれはさらに、図 2 のように筐体と検出静電容量を電気的に分離し、かつ筐体を内部に対するシールドとして機能させることで、外部から印可されるノイズへの耐性を向上させている。

また、図 1、図 2 は、 $F_z$ 、 $M_x$ 、 $M_y$  検出の 3 軸力覚センサを形成しており、6 軸力覚センサはさらにこれを 4 カ所対称に配置する構造となっている。各箇所静電容量変化を演算することで 6 軸の力・モーメント成分を検出することができる。

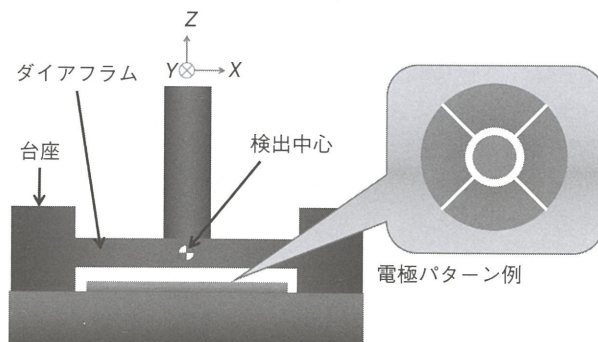


図 1 静電容量型センサの基本構造

\*原稿受付 平成 30 年 1 月 18 日

\*\* (株)ワコーテック (富山県高岡市二上町 122 ものづくり研究開発センター 102 号室)

\*\*\* (株)ワコーテック東京営業所 (東京都台東区上野 3-2-2 アイオス秋葉原 905)

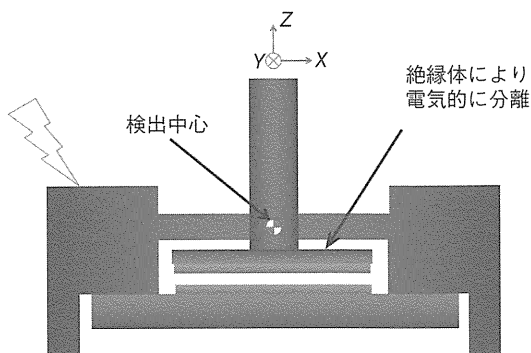


図2 筐体の分離とシールド

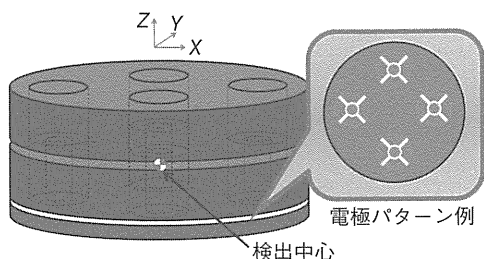


図3 6軸検出構造

基板上的回路により検出された静電容量値は、パルス幅変調 (PWM) 信号としてセンサ内部のマイコンへ入力され、数値処理・演算が行われる。また、その数値を RS-422 や USB といったデジタル信号にて外部へ出力する。そのため、センサ外部での演算処理や、外付けユニットは不要で、電源供給と通信インターフェースがあればよい。

### 3. センサの信頼性試験

#### 3.1 過負荷対策

作業用ロボットに使用されるとき、ロボットへの取り付け・教示時や高速移動、予期せぬ動作等が起こった場合に、過度な負荷が印可されることがある。そのときにセンサが破壊してしまうと、作業中の人間の安全性や作業の中断等の大きな問題が発生する。

そこで、われわれが開発した力覚センサは、ストッパ構造を内蔵し、過負荷が加わってもストッパ構造にて耐えるような仕組みを取り入れ、耐過負荷性の向上を図っている。図4、図5のように、定格荷重を超えて機構が変形した場合に、さらに頑強な機構によって変形を抑制し、ダイアフラムを保護する。

#### 3.2 耐ノイズ性

使用される環境は主に工業環境であり、ケーブルはモータ等のケーブルと共に束ねられることも多く、センサ本体や通信線へ定常的にノイズが印可される。

われわれの開発する力覚センサは、通信に信頼性の高い RS-422 を用い、また、センサ内部に絶縁回路を設けることで耐ノイズ性が向上している。各種のノイズ試験によ

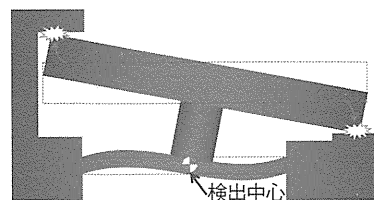


図4 ストッパ構造

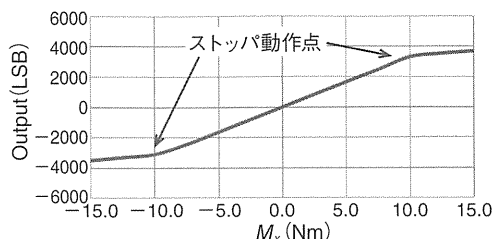


図5 過負荷時のストッパの効果

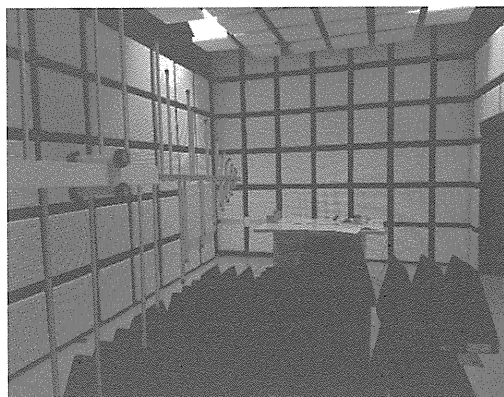


図6 電波暗室でのノイズ試験の様子

り、EN61000-6-4、EN61000-6-2<sup>7)</sup>を満たすことを確認した(図6)。

#### 3.3 防水・防じん性

力覚センサの産業用ロボット用途では、ロボット先端で使用されることから、飛沫や粉じんが降りかかることが想定される。われわれの開発するセンサは、側面のコネクタ部やカバー部にパッキンを挿入しており、防水・防じん性を確保している。また、防水・防じん試験を行い、IP65の性能を確認した(図7)。

#### 3.4 繰り返し荷重試験

センサ起歪体はアルミ合金の切削加工にてできているため、荷重を繰り返し与えると、金属疲労により徐々に劣化していく。最終的には起歪体の破断に至ってしまうため、十分な耐久性が要求される。

われわれは、定格荷重での繰り返し荷重 2000 万 ( $2 \times 10^7$ ) 回以上を満たすことを設計の社内基準としており、また、実機による繰り返し荷重試験にて、定格荷重で 2000 万 ( $2 \times 10^7$ ) 回の負荷を繰り返し与え、その特性を

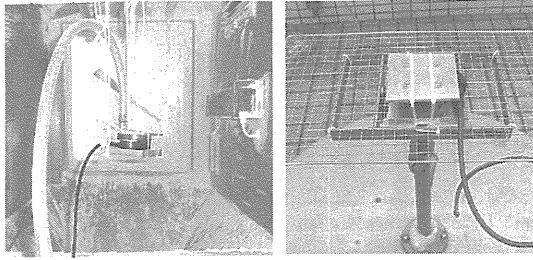


図7 防水・防じん試験の様子



図10 衝撃試験の様子

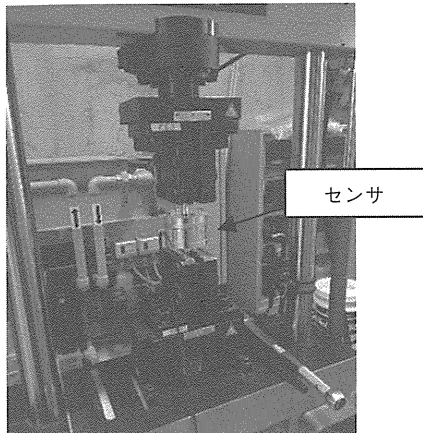


図8 繰り返し荷重試験の様子

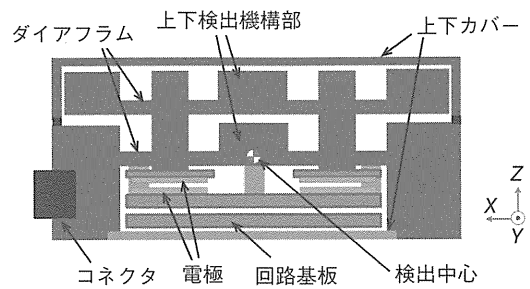


図11 センサ構成

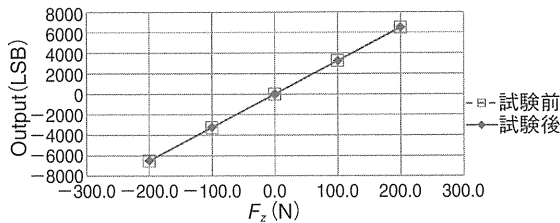


図9 繰り返し荷重試験による特性の変化

確認している (図8). 疲労により機構が劣化すると感度が変化してしまうが、図9のように2000万 ( $2 \times 10^7$ ) 回繰り返し後であっても、初期特性からほぼ変化しないことが分かる。

### 3.5 その他

落下・衝突時の衝撃や設置時の振動に対し、振動試験、衝撃試験 (図10) や温度サイクル試験なども行っている。

## 4. センサの製造

前述のとおりセンサ構造はシンプルであり、図11のように、主に上下の検出機構部、カバーと回路基板から構成される。組み立て作業のメインはネジ締め工程となるため、製造工程では、ネジへの緩み止め塗布とトルク管理を行っている。また、ハンダ付け等、各作業において社内資格を設け、資格保持者のみが組み立てを行うことで製品の品質管理を行っている。

組み立てられた製品は、温度特性・荷重特性の検査を行い、必要に応じ内部マイコンへ補正パラメータを与え、温度特性、他軸感度といった特性補正を行い出荷する (図12)。

検査工程は製品全数に対して行うため、工数が多くかかってしまう。われわれは、検査装置の改良や自動・高速化といった開発テーマを設定し、製品のさらなる短納期化、低価格化を目指している。

## 5. モーメント比率の改善

センサへの要求が増える中で最も多いのが、力・モーメント比率の改善である。従来品では、力・モーメント比率が50:1 (力:200 N, モーメント:4 Nm) であり、荷重の印加位置がセンサ検出中心よりも20 mm 以内の範囲でなければ、十分な性能を発揮することができなかった。例えば、横向き嵌合を行う場合に、力が定格荷重以下であっても、モーメントが定格荷重を超えてしまう。

そこでわれわれは、モーメント剛性を向上し、荷重の印加位置がより遠くとも、十分な性能を発揮するセンサを開発した。表1に従来品との仕様比較を示す。力の定格荷重200 N に対し、モーメント定格荷重を従来の5倍の20 Nm まで向上し、実際に使用されるツール長100 mm 程度までで、横向き嵌合が可能となった。

構造としては、図13のように、従来のセンサ外周部にモーメント剛性向上用部品を配置している。この部品は、

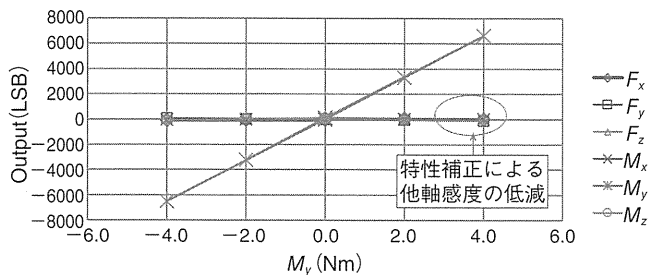


図 12 荷重特性（特性補正後）

表 1 従来との仕様比較

		従来品	新規開発品
定格	$F$	200 N	200 N
荷重	$M$	4 Nm	<b>20 Nm</b>
外形サイズ		$\phi 80 \times h 32.5$	$\phi 90 \times h 32.5$
防水・防じん性		IP65	IP65

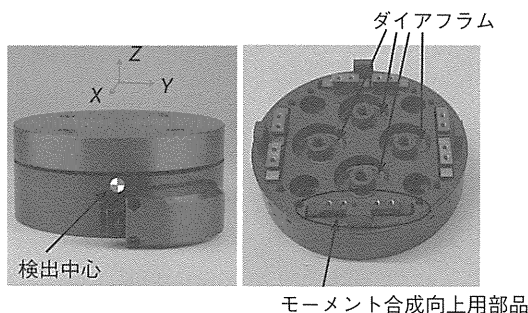


図 13 センサ構造

力に対しては柔らかく、モーメントに対しては打ち消すような働きをする。そのため、センサ性能としての SN 比は損なうことなくモーメント剛性を向上している。基本構造は従来品同様であり、追加部品による機能向上のため、高信頼性、量産による低コスト化といった特長もそのまま活かしている。

## 6. ま と め

われわれは、従来のひずみゲージ型とは異なる、静電容量型力覚センサを開発した。静電容量型力覚センサは、構造がシンプルなため、高信頼性、量産による低コスト化が可能といった特長がある。

製品化の信頼性を向上するため、各種信頼性試験を行っており、また、生産効率向上のため自動測定装置を開発した。測定機の高速化により、製品のさらなる短納期化、低価格化を目指す。

さらに、新たな市場ニーズに応えるため、力・モーメン

ト比率を改善したセンサを開発した。このセンサによりユーザでの使い勝手が改善され、さらなる用途が広がるものと思われる。

## 参 考 文 献

- 1) K. Okada et al.: Development of Micro-machined Three-axis Sensors in Venture Business, Transducers '01, Munich, (2001) 1280-1283.
- 2) K. Okada: Force Detection Device, US Patent No. 6915709, (2005).
- 3) K. Okada: Force Detection Device, US Patent No. 7121147, (2006).
- 4) K. Okada: Force-Detecting Device, US Patent No. 7219561, (2007).
- 5) 角谷哲哉, 田中篤ほか: 静電容量型 6 軸力覚センサの開発, 電気学会論文誌, **129**, 2 (2009) 41.
- 6) 佐伯和司ほか: 静電容量の変化を利用した 6 軸力覚センサ, 日本ロボット学会学術講演会予稿集 (CD-ROM), 28th, ROMBUNNO. 201-1, (2010).
- 7) Directive 2014/30/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to electromagnetic compatibility, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32014L0030> (2018/01/30 閲覧)



佐伯和司

2007 年(株)ワコーテック入社。力覚センサ開発に従事。



西沖暢久

2008 年(株)ワコーテック入社。力覚センサ開発に従事。



鈴木信人

2005 年(株)ワコー入社。力覚センサ、加速度センサの企画・販売に従事。2013 年ワコーテック入社。力覚センサの企画・販売に従事。



岡田和廣

2007 年 7 月(株)ワコーテック設立。代表取締役。博士(工学)。電気学会会員、ロボット学会、IEEE 会員。