

ひずみゲージを用いた柔軟な四軸触覚センサの開発 —酸化クロム薄膜ひずみゲージの作製—

Development of a Four-axis Flexible Tactile Sensor with Strain Gauges — Using Cr-O Thin Film as Strain Gauges —

松永 崇*	小栗 泰造**	日下 忠興*
Takashi Matsunaga	Taizo Oguri	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21日 受理)

A flexible tactile sensor using a Cr-O thin film strain gauge has been developed. The Cr-O thin film strain gauges are sputter-deposited on a polyimide film and patterned photolithographically. Both diamond-like carbon (DLC) and SiC thin films deposited by chemical vapor deposition (CVD) method are also used as intermediate layers between the Cr-O thin film and the polyimide film. The Cr-O thin film strain gauge on the polyimide film is patched on the side of a four-sided truncated silicone rubber pyramid. The ability to detect the direction of the horizontal force applied to the top face of a four-sided truncated pyramid and to detect the vertical force are the salient characteristics of this flexible tactile sensor. In this paper, we also propose measurement of torque using a flexible tactile sensor. Therefore, this sensor is useful as a four-axis flexible tactile sensor.

Key words: tactile sensor, Cr-O thin film, strain gauge, soft material

1. はじめに

近年、高機能なロボットの研究開発が活発に行われている。特に知能化、自立化したロボットは、従来の産業用ロボットに限らず、福祉、医療分野、家庭環境など人の生活環境での実用化が望まれているが、そのためには各種センサの開発が非常に重要となる¹⁾。中でも、生物の皮膚感覚の役割を担う触覚センサは、高

感度で高集積化が可能であると同時に、柔軟性も要求される。そこで触覚センサの開発では、それらの要求を満たし、かつ比較的簡便に加工できるセンサ材料として、感圧導電ゴムが用いられている²⁾。しかし感圧導電ゴムは、センサ表面に対して垂直方向の荷重成分は検出可能だが、滑り、把持力の検出に必要な水平(面内)方向の荷重成分が検出できない。そのため、触覚センサの機能としては不十分である。特に医療、福祉の分野では要求を満たさない。そこで筆者らは、四角錐台形のシリコンゴムの側面に、ポリイミドフィルム上に作製した酸化クロム薄膜ひずみゲージを貼り付けた触覚センサを考案した。本センサは、センサへの

* 情報電子部 電子・光材料系

** 機械金属部 金属材料系

*** 化学環境部 化学材料系

**** 元 業務推進部 研究調整課

荷重の垂直成分だけでなく、水平成分も検出可能であるため、前述の滑り、把持力の検出に必要な機能を持つ。本報告では、面内方向(x, y)及び垂直方向(z)の荷重におけるセンサの諸特性について述べるとともに、垂直方向を軸とした回転力(トルク)の検出方法について検討した結果を報告する。

2. 触覚センサの構造及び動作原理

Fig. 1 に作製した触覚センサの概略図とその断面図を示す。本センサは、ポリイミドフィルム上に形成された酸化クロム薄膜ひずみゲージを、高さ5 mm、底面の1辺が10 mm、底面と側面が成す角度(テーパー角)が75°のシリコンゴム製の四角錐台の4つの側面に1つずつ貼り付けた構造となっている。ここで、ポリイミドフィルムは、フレキシブルプリント基板として広く使われており、またシリコンゴムは、人肌程度の柔らかさが実現可能で、さらに、用途に応じてその硬度のコントロールが比較的容易であるため、本センサの構成材料として使用することとした。なお、図では側面に形成したセンサの厚みは誇張して示しており、実際の厚さは後述のように25 μm程度である。

Fig. 2 に外力の検出方法を示す。例えば、底面が固定された触覚センサに、図中の矢印に示す様に、図の左から右に水平方向に荷重を印加したとすると、右側のひずみゲージには圧縮応力、左側のひずみゲージには引張応力が加えられ、それぞれの抵抗値が変化する

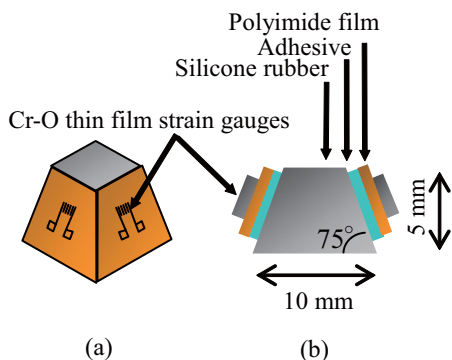


Fig. 1 Schematic illustration of tactile sensor (a) and its cross section (b).

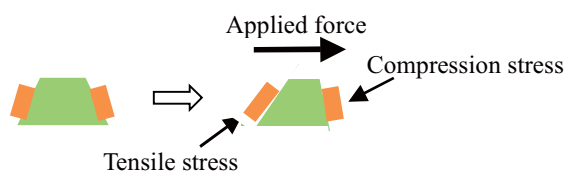


Fig. 2 Schematic drawing of measurement method for the applied force.

ので、荷重の方向が検知できる。

この様に凸型の構造を持ち、その側面にひずみセンサを有することで、せん断力及び垂直荷重の検知が可能となり、本センサの主要な特徴となる。

3. 酸化クロム薄膜ひずみゲージの作製

クロムは、ひずみゲージとして用いる場合の感度の目安となるゲージファクタが比較的大きい材料として知られている。しかし、純クロムは電気抵抗が低いため、センサの抵抗体としては、より高抵抗な酸化クロムの方がひずみゲージとして扱い易い。我々は、これまでに金属ダイヤモンド上に酸化クロム薄膜ひずみゲージを配置した圧力センサを開発し、実用化することに成功している³⁾。そこで、比較的ゲージファクタが大きく、技術的蓄積がある酸化クロム薄膜を、本触覚センサのひずみゲージとして用いることとした。

酸化クロム薄膜は反応性スパッタ法を用いて作成した。Fig. 3 に、酸化クロム薄膜の比抵抗のスパッタ時の酸素ガス流量依存性を、Fig 4 に酸化クロム薄膜の抵抗温度係数 (TCR: Temperature Coefficient of

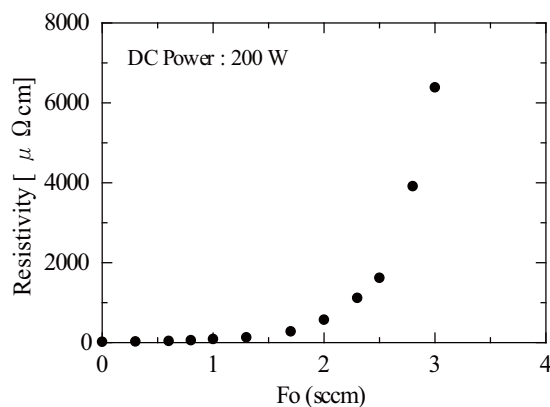


Fig. 3 Resistivity of Cr-O film as a function of O₂ flow rate.

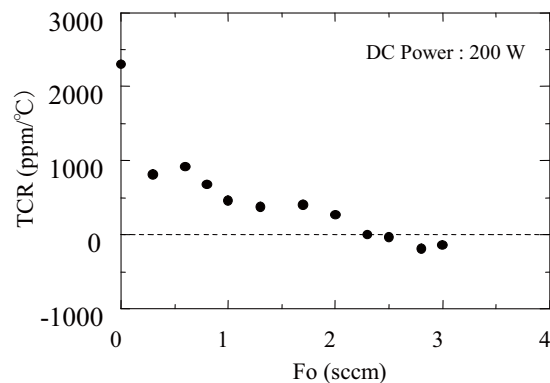


Fig. 4 TCR of Cr-O films as a function of O₂ flow rate.

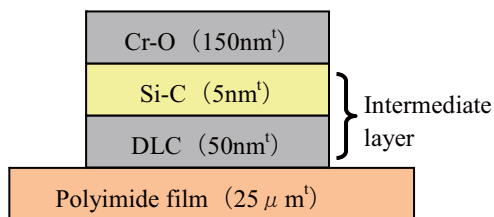


Fig. 5 Schematic drawing of Cr-O thin film strain gauge.

Resistance) を示す。酸素ガス流量が増加するに従い、クロムの酸化の割合が進むため比抵抗は増加するが、TCR は金属クロムの約 2300 ppm から 0 をはさんで - 数百 ppm の範囲に減少した。TCR は 0 に近いことが望ましいが、0 に近くなる酸素流量 2.5 [sccm] 付近では、比抵抗が急峻に変化する。そのため、素子の抵抗値を制御しにくい。本センサの使用目的から室温での使用を前提としているため、比較的溫度変化の少ない環境であることを考慮して、酸化クロム薄膜作製時の酸素ガス流量は、1.5 ~ 2.0 [sccm] とした。

この領域では、膜中の酸素含有量が少ないものは、ゲージファクターが大きく、センサ感度の向上に繋がるが、同時に内部応力が大きく、膜に亀裂、剥離が起こる可能性がある。本センサでは、酸化クロム薄膜とポリイミドフィルムの中に中間層(DLC: ダイヤモンドライカーボン膜)を挟むことで膜の応力を緩和し、酸化クロム薄膜がその内部応力によって自己破壊することを防いでいる。Fig. 5 に酸化クロム薄膜ひずみゲージと中間層の断面概略図を示す。

DLC は、シリコンゴムなどの上に直接成膜可能で、基材の変形に比較的追従することが知られている。酸化クロム薄膜、及び中間層(DLC、Si-C)の成膜には、(株)神港精機製高密度プラズマアシスト成膜装置 ACV-1060 を使用した。本装置の概略図を Fig. 6 に示す。

本装置は、低エネルギー且つ大電流のイオン照射が可能のため、高分子基材の様に融点の低い材料上にも、比較的高速に成膜することが可能である。また、ガスを原料としたプラズマアシスト成膜と、装置側面のターゲットを用いたスパッタ成膜が可能であるので、前処理としてのポリイミドフィルムへのイオン照射から、最上層の酸化クロム薄膜まで、途中、試料を大気に曝すことなく処理することができる。そのため、各層間の高密着性が期待できる。

膜のパターンニングはフォトリソグラフィによるリフトオフ法を用いた。まず、レジストによるセンサのネガパターンが形成されたポリイミドフィルム上に DLC を成膜し、次に DLC 及びクロム系薄膜双方と良

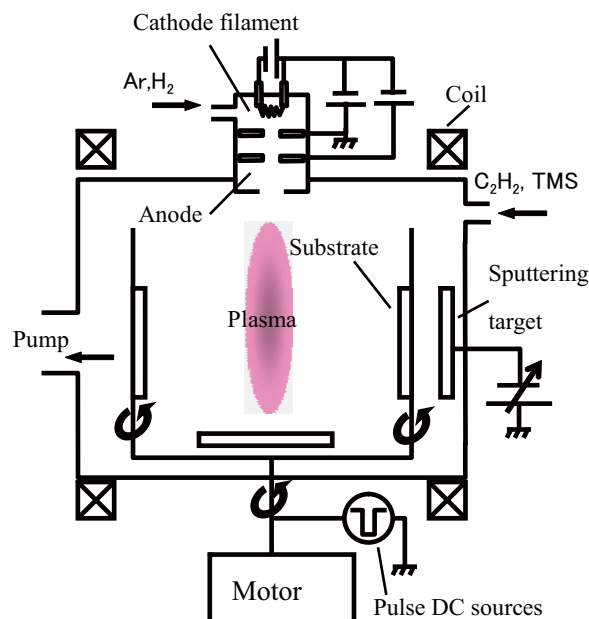


Fig. 6 Schematic diagram of PIG-PECVD apparatus.

好な密着性を持つ SiC を成膜する。これらの中間層の上に、クロムターゲット、及びアルゴンガス、酸素ガスを用いた反応性スパッタ法によって、酸化クロム薄膜を成膜した。これら一連の薄膜作製プロセスの後に、レジストをアセトンで除去することで、酸化クロム薄膜ひずみゲージを作製した。以上の方法で作製した酸化クロム薄膜のゲージファクターは、市販のゲージファクターが既知の金属ひずみゲージをリファレンスとすることで測定した結果、約 7 であった⁴⁾。市販の一般的な金属ひずみゲージのゲージファクターが、2 前後であることから、この酸化クロム薄膜ひずみゲージを使用することで、比較的高感度なひずみ検出が可能となる。

4. 触覚センサの作製

第 2 章で述べたように、本センサの特徴には、その立体的な構造が重要な要素となっている。しかし、一般的に構造物の側面に薄膜パターンを形成することは、非常に困難である。そこで我々は、できるだけ簡便な方法として、以下の方法を考案した(Fig. 7)。まず、ポリイミドフィルム(東レ・デュボン(株)製 カプトン 100H)上に真空薄膜作製プロセスと、フォトリソグラフィ技術によるリフトオフ法を用いて 4 つの酸化クロム薄膜ひずみゲージを作製し、その中心部に十字に切り込みを入れた。この中心部を、シリコンゴム製の四角錘台に被せて、ポリイミドフィルムとシリコンゴムを接着すると、触覚センサの 1 ユニットの完成となる。ここで、酸化クロム薄膜ひずみゲージは、

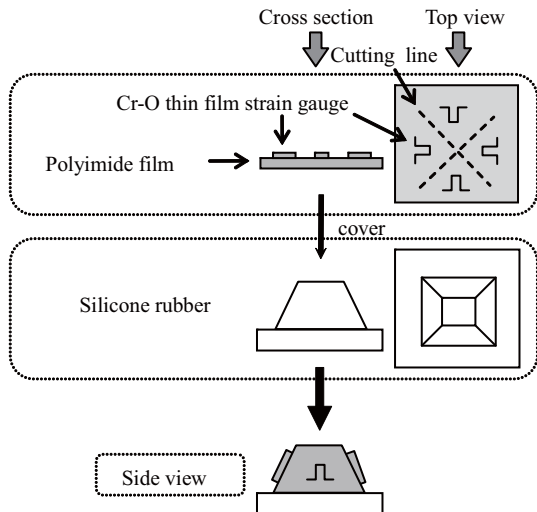


Fig. 7 Fabrication process of the tactile sensor.

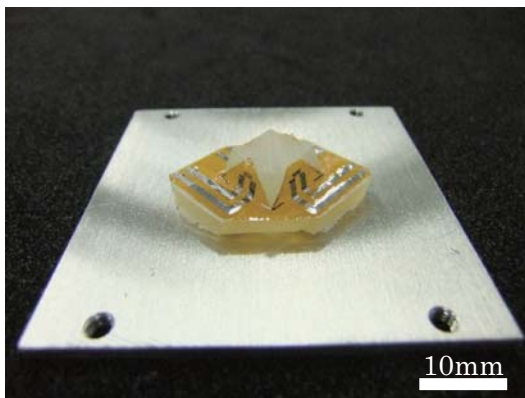


Fig. 8 External view of the flexible tactile sensor.

四角錐台の側面の対角線の交点に位置し、高さ方向のひずみを検知するように形成した。なお、ポリイミドフィルムとシリコーンゴムを接着する接着剤には、弾性接着剤(セメダイン(株)製 スーパー X)を使用した。乾燥後、硬化する接着剤では、触覚センサの外力による変形が妨げられ、感度低下につながる。乾燥後もその柔軟性を保つ弾性接着剤を用いることで、ソフトマテリアルの柔軟性を維持し、センサの高感度化を図った。

以上の方法で作製した触覚センサの写真を Fig. 8 に示す。まず平坦なフィルム上に薄膜ひずみゲージを形成し、それを凸構造のゴムに被せて接着することで、比較的簡便にせん断力の検知が可能な触覚センサの作製が可能となった。また、フォトリソグラフィ技術を使用しているため、センサの集積化が可能となる。

5. 触覚センサの諸特性

四角錐台の4つの側面に形成された薄膜ひずみゲ

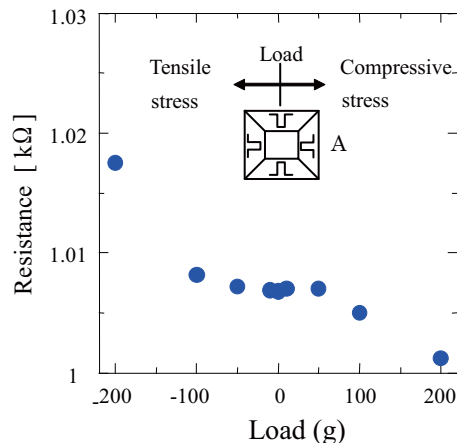


Fig. 9 Relation between load and resistance of Cr-O thin film strain gauge A.

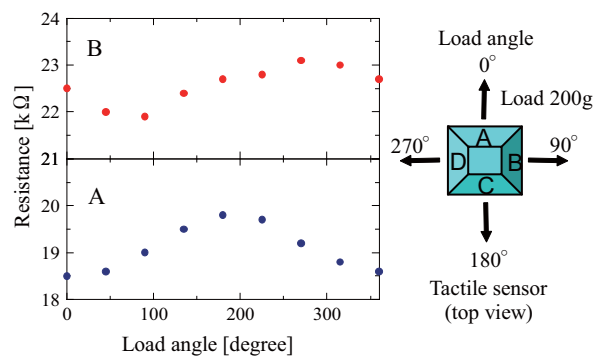


Fig. 10 Relation between load angle and resistance of Cr-O thin film strain gauge A, B. (load 200 g)

ジを A, B, C, D とする。Fig. 9 に作製したセンサの上面に平行に荷重を加えた時の、薄膜ひずみゲージ A の電気抵抗の荷重依存性を示す。図より、薄膜ひずみゲージに圧縮応力が印加されると電気抵抗が減少し、引っ張り応力が印加されると電気抵抗が増加することが分かる。また、荷重の増加とともに電気抵抗の変化も増加することが分かる。つまり、電気抵抗の変化から、面内の荷重の方向及び大きさを推測することができる。

Fig. 10 に、作製したセンサの上面に平行に 200 g の荷重を加えた時の、荷重の方向と、A 面、B 面の薄膜ひずみゲージの電気抵抗の変化を示す。この様に隣り合う位置のひずみゲージは、電気抵抗変化の位相が 90° ずれるので、それらの電気抵抗を計測することで、面内の荷重の方向を推測することができる。また、垂直荷重については、すべての薄膜ひずみゲージの電気抵抗が、一様に変化することで、検出することができる。この様に、本センサは、面内方向 (x, y)、垂直方向 (z) の 3 軸触覚センサとして有効であることがわか

る。なお、この結果は、有限要素解析を用いた本センサの外力に対するひずみ応答特性のシミュレーション結果と一致する⁵⁾。

6. トルクの検出

前章までは高さ方向のひずみが検出可能な様に、ひずみゲージを側面の対角線の交点上に、底面と頂面を結ぶ方向に感度があるように作製していたが、本章では、トルクを検出するために、Fig. 11 の様に底面が固定された四角錐台の側面に、ひずみゲージを対角線方向に設置する構造を検討した結果について述べる。シミュレーションから、Fig. 11 のように配置した場合、時計方向のトルクでは圧縮応力、反時計方向のトルクでは、引っ張り応力となることがわかっている⁵⁾。

Fig. 11 に示す構造の妥当性を検証するために、市販のひずみゲージを四角錐台形のシリコンゴムに貼り付け、検証用試料とした。Fig. 12 に、この試料に回転力を印加した時の、各面のひずみゲージの抵抗値の時間変化を示す。回転の方向に応じて、抵抗値が変化しているのがわかる。この結果から、本構造の妥当性が立証され、トルクの検出が可能であることがわかった。

7. まとめ

ソフトマテリアルを用いた柔軟な触覚センサを開発した。四角錐台形の側面に酸化クロム薄膜ひずみゲージを配置することで、滑りや、把持力の検出に不可欠な、荷重の内面方向の検出が可能となった。提案した作製方法は、集積化が可能で、比較的簡便なため、企業への技術移転が容易であると考えられる。また、トルクの検出方法について検討した結果、ひずみゲージを側面の対角方向に作製することにより、トルクが検出可能であることが分かった。現在、3軸とトルクを同時に計測可能な触覚センサの構造について検討中である。

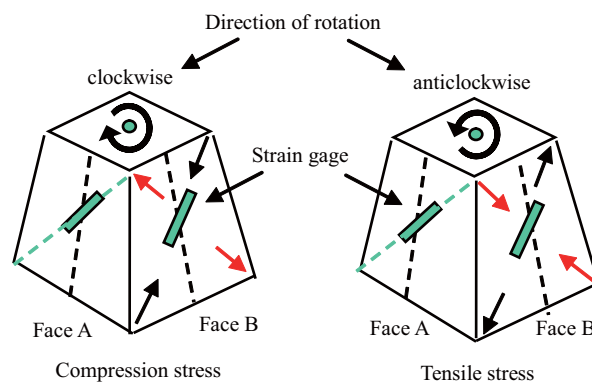


Fig. 11 Schematic view of tactile sensor to measure torque.

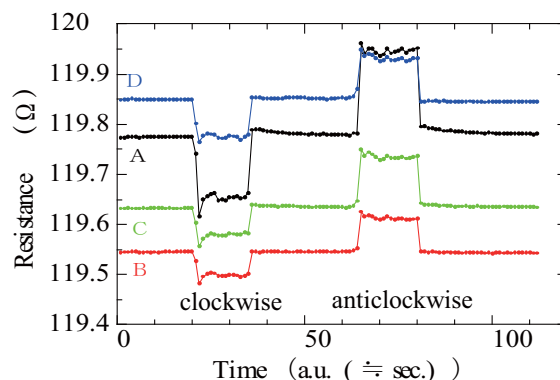


Fig. 12 Relation between rotational force and resistance of strain gauges.

参考文献

- 1) 向井利春他(全63名):超五感センサの開発最前線,(株)エヌ・ティ・エス(2005)251.
- 2) 勅使河原誠一, 清水 智, 多田隅建二郎, 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, RJSJ2009AC311-04(2009)
- 3) 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.
- 4) 日下忠興, 松永 崇, 笥 芳治, 岡本昭夫, 佐藤和郎, 小栗泰造, 山元和彦, 吉竹正明:第25回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 3O17(2007)
- 5) 小栗泰造, 松永 崇, 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)59.