

## 医療・介護ロボット分野における有機センサの可能性

—触覚センサを中心として—

九州工業大学 大学院生命体工学研究科 ○高嶋 一登  
神戸大学 大学院工学研究科 堀江 聡, 石田 謙司, 上田 裕清  
香川県産業技術センター システム技術部門 竹中 慎  
理化学研究所 基幹研究所 向井 利春

### 1. はじめに

近年, ロボット技術が医療, 介護・福祉などの分野に適用され, ロボットが人と接する機会が増大している。「人と接するロボット」においては, 従来の産業用ロボットと異なり, 人とロボットが接したときのお互いの損傷が少ないように柔軟な素材を使って触覚センサを構成することが必要な場合が多い。これは, 産業用ロボットでは, 安全対策として, 人間とロボットを安全柵などで空間的に分離するのに対して, 「人と接するロボット」においては, そのような安全対策が難しいためである。その観点から, 柔軟な有機材料は触覚センサにとって非常に有望な材料である。

本稿では最初に人間の五感, 特に, 触覚について簡単に説明したあと, それを工学的に実現した触覚センサの応用分野, さらに, 有機材料を用いた触覚センサの例をいくつか紹介する。

### 2. 人間の五感

人間は視覚・聴覚・嗅覚・味覚・触覚に分類される五感を使って巧みな動きを実現している。その中でも特に, 視覚・聴覚については古くから研究・開発がなされてきた。一般に, 人間が外界から得る情報の 8 割程度は視覚により, 聴覚から得られる情報は 1 割程度であると言われている<sup>1)</sup>。

さらに, 触覚は五感の一つであり, 視覚や聴覚と共に人間の生活において必要不可欠な感覚である。例えば, 人間は触覚を利用して様々な情報を得て, 巧みな動きを実現している。さらに, 触覚を利用して, 古くから医療の現場で「触診」が行われてきた。特に, 視覚は対象物との距離が大きい場合の情報を得るのに対して, 触覚は対象物との距離が小さい場合であり, 前述のようにロボットと人が接するようになって, 近年, 研究が進んできている。また, 従来の触覚センサのないロボットは手袋をして作業をしているようなものなので, ロボットに巧みな作業が求められるようになり, 必要性が高まってきている。しかし, 画像提示技術や音声認識技術など視覚や聴覚に関する研究開発に比べて, 触覚に関する研究開発はあまり進んでいない<sup>2,3)</sup>。その理由も含め, 触覚についての特徴を説明するうえで, 同じ五感の一つであり, 身近に応用の進んでいる視覚と比較していくと分かりやすい。視覚との違いを以下に挙げる。ただし, 皮膚が検出する情報として, 温度, 化学的作用などもあるが, 本稿では機械変形に絞って考える。

- (a) 全身に分布している: 身体は皮膚で覆われ, 指先, 腕, 背, 唇, 足など触覚を使う身体の一部は動きが異なるので, 集中した他の感覚に比べて役割が分かりにくく, その機能を工学的に模倣しにくい。
- (b) 動きが重要である: 触覚受容器には周波数依存性があるが, 人間は, テクスチャ,

硬さ、形状のような欲しい情報に応じて、撫でる、押しつける、包み込む等の動作を無意識のうちに選ぶ<sup>4)</sup>。すなわち、欲しい情報によって必要な動作がそれぞれ異なる。

(c) 自分自身の皮膚の機械的変形や温度変化などを介して自己を計測する<sup>3,5)</sup>：個人差の影響が顕著で、変形状態の把握が難しい。また、対象物の変形によっても、皮膚の変形状態は影響を受ける。

### 3. 触覚センサの医療・福祉への応用

以上のような特徴を持つ触覚の機能を工学的に実現した触覚センサの医療の分野における用途としては、①対象物である生体の触診や、②低侵襲医療デバイスに取り付けて、先端の触覚力を算出することによる手術の操作性・安全性の向上がある。

#### 3-1. 触診

医療従事者でなくても日常生活において、マッサージの効果を見るのに、筋肉のはりなどを触って判断したりする。臨床の現場では、生体組織の診断のために、医師が生体を触診することは、非常に有用であり、体内のさまざまな部位の診断に応用されている。例えば、関節疾患の診断のために、フック状のプロープによる触診が広く行われる。また、医学会では乳がんが硬くなる特徴を利用して、直径2 cmの大きさを治療の目安としているし<sup>6)</sup>、肝臓移植などの外科手術において、肝臓の硬さや大きさを触診の手技によつて的確に判断することは極めて重要である<sup>6)</sup>。一方、前立腺癌や肥大症の最も手軽な診断方法として、医師の指による直腸内触診法がある<sup>7)</sup>。

以上のように触診は広く応用されているものの、従来の手で行っている触診は主観的であり、診断結果は医師の経験に大きく左右される。このため曖昧な人間の触覚による触診に代わる定量的な測定方法が求められている。

#### 3-2. 低侵襲手術

近年、カテーテルや内視鏡等の細長い医療機器を用いる低侵襲手術が広く用いられている。例えば、脳動脈瘤や脳梗塞の治療のために、細長いカテーテル／ガイドワイヤ（頭部用マイクロガイドワイヤで直径1 mm以下）を用いて、大腿部内側から血管を経て頭部にアプローチし治療をする低侵襲手術が盛んに行われている。低侵襲手術は患部を切開しないか、切開を最小限に留めるので、患者の苦痛の軽減、治療時間の短縮、生体組織の損傷の減少、治療コストの低下、機能回復期間の短縮等の利点がある。しかし、非常に細長い医療デバイスを、複雑な屈曲・分岐の多い生体内に挿入するので、視覚や触覚が制限され、熟練した医師の高度な技術を必要とする。

そのため、触覚センサを低侵襲手術用の医療デバイスに取り付けて先端の接触力を算出し過負荷検知することは、手術の操作性・安全性の向上を図るうえで非常に有効な手段である。また、このような手術においては、前節の手による触診もできないが、小型化した触覚センサを用いれば、手では触れられないような場所を触診することも可能になる。一方、生体組織は生体から切り出した時点で性質を変えてしまうこともあるので、生体外に取り出さずに生体内で低侵襲に測定することは重要である。

#### 3-3. 介護・福祉ロボット

高齢化社会の進展とともに要介護者の数は急速に増えている。介護者にとって最も負担の大きい作業は、自力で移動できない被介護者をベッド、床と車椅子の間で移乗する

介助であり、その作業を代替するため、さまざまな介護ロボットが提案されている<sup>8,9)</sup>。本応用ではロボットと人が直接触れ合うので、前述のように触覚センサの重要性は高い。一方、人と触れ合うなどの相互作用によって、人に楽しみや安らぎなどの精神的な働きかけを行うことを目的にした動物型のロボットも提案され、触覚センサによって撫でられたり、抱かれたりしている状況を認識している<sup>10)</sup>。

その他、医療・福祉分野以外にも、自動化が進んだ産業分野においても、例えば、自動車鋼板の面不良検査などの現場では熟練工の触覚が重要な役割を果たしており、同様の触覚センサによる触診の応用が期待できる<sup>3)</sup>。さらには、危険な環境で作業する人間がセンサスーツとしてそれらを装着し、感覚を補強する応用や、ネットショッピング、映画、ゲームなどでの、操作感や臨場感の向上などの用途も考えられる。

## 4. 触覚センサの例

### 4-1. 触覚センサの構成

ここからは具体的にロボットに触覚を与える工学的手段、すなわち、触覚センサの例について紹介する。少し単純に考えると、何らかの手段で機械変形を電気信号に変換できればよいが、変形したときに何らかの特性が変わる物質はいくらでもあり、センサには無数の構成が考えられる。そのため、行う動作や使われる環境に応じて使い分けが必要であり、どの状況でも優位な構成はない。例えば、空間的なサンプリング密度としては、人間の指先の触覚受容器の密度は1 mm弱の間隔であるが、指先以外の受容器密度は著しく小さい<sup>2)</sup>。これは、身体の各部位で行っている作業によって必要な空間分解能が異なることを示す。そのため、使用状況によっては、必要以上に微細化した構造ではなく、大きいサイズで信頼性を上げる方がよい。また、触覚によって検出する機械変形と言っても様々な情報を含むので、必要な情報を分析することが必要である。

例えば、低侵襲手術用には、ピエゾ抵抗効果、静電容量センサ、レーザ光の反射量変化、赤外線をカットするパターンの画像処理などを利用した小型力覚センサが提案されている<sup>1, 11)</sup>。また、センサを振動させて、測定物体に接触させると物体の硬さに応じて共振周波数が変化することを利用したセンサもある<sup>6)</sup>。生体内へのセンサの応用を考えた場合、生体適合性、耐水性も求められる。

一方、人を抱き上げる介護ロボットの用途では、曲面状のロボットの腕の表面など大きな面積を柔軟に覆うことが求められ、半導体圧力センサを弾性体で覆った構成や、発泡ウレタンなどの柔軟な誘電層を電極で挟んだ静電容量センサの構成などが提案されている<sup>8,9)</sup>。

### 4-2. 有機強誘電体を用いた触覚センサ

触覚センサの一つとして、有機強誘電体であるポリフッ化ビニリデン (PVDF)、フッ化ビニリデン (VDF) と三フッ化エチレン (TrFE) のコポリマー (P(VDF/TrFE))、VDF オリゴマーの圧電効果を利用したものがある<sup>3,4,7,12~18)</sup>。これらは有機材料ならではの特性として、以下のような利点がある。

- (1) 圧電定数が大きい。
- (2) 軽量かつ柔軟であるため、衝撃や屈曲によく耐える：例えば、血管内の医療デバイスには大きな屈曲状態をとるため、センサの柔軟性は重要な要求性能である。

- (3) 共振が鋭くなく広範囲の周波数に応答する。
- (4) 化学的な耐食性がある。
- (5) 代表的な圧電材料である PZT のように鉛を含んでいない。
- (6) センサに加わった応力の絶対値でなく、微分値を出力する（後述の式 (1)）。

強誘電体膜の圧電特性を評価するために用いられる、圧電歪み定数  $([d_{31} \ d_{32} \ d_{33}])$  は、印加された応力  $(\sigma = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \sigma_3])$  と出力電荷の関係を定めるもので材料に固有の材料定数である。このとき、発生する電荷を測定するのに、強誘電体を電流アンプに接続して、発生した電流  $(I)$  を測定する場合が多い。強誘電体には、圧電効果以外に焦電効果による出力電荷もノイズとして加わるが、温度変化は圧力変化に比べて遅い場合が多いので、 $I$  を測定することで両者を分離できる。すなわち、以下の式が得られる。

$$I = A \left( d_{31} \frac{d\sigma_1}{dt} + d_{32} \frac{d\sigma_2}{dt} + d_{33} \frac{d\sigma_3}{dt} \right) \quad (1)$$

ここで、 $A$  は強誘電体膜を挟む電極の面積である。すなわち、 $I$  は、式 (1) のように印加された応力の 1 階時間微分特性に比例する。空気加圧した VDF オリゴマーの出力例を図 1 に示す<sup>17)</sup>。

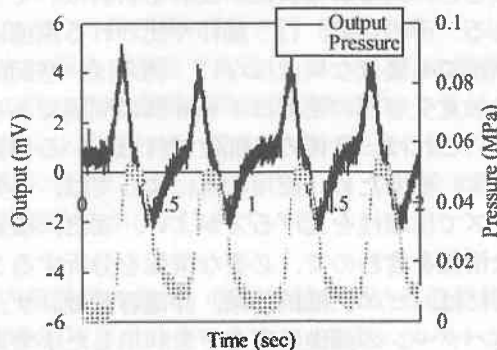


図 1 VDF オリゴマーサンプルを加圧したときの出力例

また、有機強誘電体膜を弾性体に埋め込んだセンサが接線方向に一定速度で移動する場合、連鎖率により<sup>12)</sup>、 $\partial\sigma/\partial t$  に比例する強誘電体の出力から、対象物表面の応力分布が測定できる。このようにセンサ計測に動きを加えることで、センサの能力の不足を補う手法は「アクティブセンシング」と呼ばれ、より高度な認識能力を実現可能である。例えば、対象物の表面粗さや微小な段差を測定するためにレコードの針のように人が指を動かすのも、さらには手による触診も触覚受容器の周波数応答特性を利用したアクティブセンシングである。一方、式 (1) のように有機強誘電体の出力は応力の 1 階時間微分特性に比例するので、アクティブセンシングに適している。アクティブセンシングには、さまざまな利点があり<sup>12)</sup>、例えば、センサを 2 次元に配置することなく、1 個のセンサを走査させて 2 次元の情報を取得可能である。一方、実際には測定値として、絶対値が必要なのではなく、近接する測定点間の相対的な違いを細かく求めることが必要な場合が多い。センサを動かして測定することによって近接した場所との小さな違いも一つのセンサですぐ検出可能である。また、その際、センサ出力の絶対値の校正が不要である。

### 4-3. PVDF

PVDF を用いた触覚センサは、例えば、ロボティクスの分野においては、把持物体と滑りが発生したときの振動を検出する滑りセンサとして用いられることが多い。ロボティクスの分野においては、シリコンゴム内などに PVDF フィルムを埋め込み、初期局所滑りや表面粗さを検出ターゲットとした研究が数多く報告されてきた<sup>12-15)</sup>。

さらに、例えば、センサを対象物に擦りつけた際、表面の特性によって出力が変化することを利用して、触診<sup>4,7)</sup>や布の手触り感の計測<sup>3,4)</sup>などへの応用が検討されている。例えば、田中らによって、皮膚表面性状センサ、前立腺硬さ計測用センサ、布を対象とした触覚感性計測、毛髪触感測定システムが検討されている<sup>4,7)</sup>。

### 4-4. VDF オリゴマー

VDF オリゴマーは、PVDF の低分子量体であり、真空蒸着によって均一かつ構造制御された膜質を得ることが可能であり、PVDF と違い延伸過程が不要で、PVDF より高い残留分極量をもつ。そのような利点を生かして、これまで不揮発性メモリ、焦電型センサなどへの応用が研究されてきた<sup>16,17,19,20)</sup>。さらに、高嶋・石田らは、VDF オリゴマー

薄膜を用いた実験により、VDF オリゴマー膜は薄く均一であり、圧電定数 ( $d_{33}$ ) は PVDF や P(VDF/TrFE) に比べて大きいことを示した<sup>17)</sup>。そのため、従来のセンサの PVDF を VDF オリゴマーに単純に置き換えるだけで、PVDF と同様の利点を持つセンサのダウンサイズが図れ、カテーテル型の触覚センサの実現が期待される。また、図2のように、柔軟なフィルム上に成膜できるので、VDF オリゴマー自体の柔軟性を十分に活用できる。

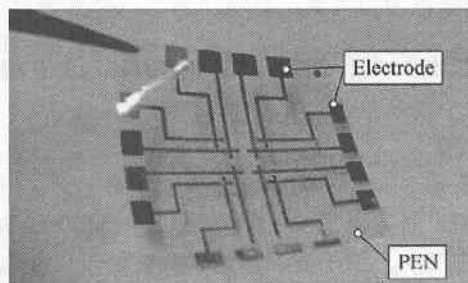


図2 ポリエチレンナフタレート (PEN) フィルム上に成膜した VDF オリゴマーサンプル

しかし、カテーテル型の触覚センサはこれまで臨床応用されておらず、新規のセンサを開発するにあたり、生体内で実際にどれくらいの力がセンサに加わるかなど、具体的な仕様は、実用的な試作品が実現できるまで求めることは難しい。一方、高嶋らは、これまで脳血管内カテーテル経路予測用シミュレータを開発してきた<sup>21)</sup>。本手術シミュレータは、血管壁、カテーテル等の力学特性および挿入手技によるパラメータを持つ運動方程式を計算するもので、術前・術中計画、カテーテル・ガイドワイヤ・センサの評価・設計などへの応用が期待される。図3左に示す解析モデルを用いて、病変部を想定し血管の摩擦係数や弾性などの物性を基本条件から部分的に変化させて、センサの出力に対する影響を、本シミュレータを用いて検討した<sup>18)</sup>。図3右のように、病変部にセンサが接触した部分(図中矢示)で、有機強誘電体触覚センサの出力が変化した。

本稿では、強誘電体の触覚センサへの応用に焦点を絞って話を進めたが、焦電効果を視覚センサに応用すれば、ロボットの複雑形状に貼り付けて物体と人/動物との識別や、画像記録が敬遠され匿名性が必要なトイレ、風呂、病室などでの人検知など、触覚センサ以外へも幅広い応用が期待できる<sup>16,20)</sup>。

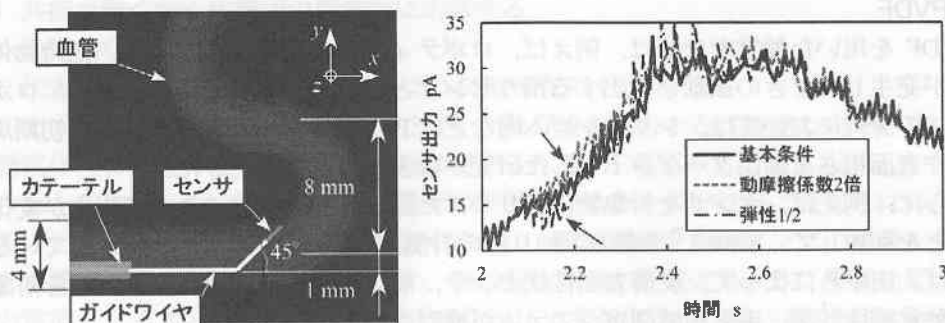


図3 カテーテルシミュレータによる触覚センサの評価  
(左) 解析モデル, (右) 出力例

## 5. まとめ

本稿では、医療・介護ロボット分野における有機センサの可能性について、いくつかの例を紹介した。本分野に興味を持つ研究者にとって、一助となれば幸いである。

## 謝辞

VDF オリゴマーおよびP(VDF/TrFE)をご提供頂いたダイキン工業様に謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 超五感センサの開発最前線, エヌ・ティー・エス (2005).
- 2) 篠田: 日本ロボット学会誌, 18(6) (2000) 767.
- 3) 田中ほか: 電子情報通信学会技術研究報告, 107(332) (2007) 97.
- 4) 田中: 日本ロボット学会誌, 26(3) (2008) 230.
- 5) 前野: 電気学会センサマイクロマシン部門誌, 122-E(10) (2002) 469.
- 6) 尾股: 日本音響学会誌, 66(2) (2010) 84.
- 7) 田中ほか: 日本機械学会論文集 C 編, 69(685) (2003) 2389.
- 8) T. Mukai et al.: IEEE Trans. Robotics, 24 (2) (2008) 505.
- 9) 佐藤ほか: 日本機械学会論文集 C 編, 78(789) (2012) 595.
- 10) T. Shibata et al.: J. Robot. Mechatron., 13(5) (2001) 505.
- 11) Y. Haga et al.: Proceedings of the IEEE World Automation Congress, 14 (2002) 291.
- 12) R. D. Howe et al.: IEEE Trans. Robotics Autom., 9(2) (1993) 140.
- 13) P. Dario et al.: 13th International Symposium on Industrial Robots and Robots 7, 2 (1983) 14.
- 14) 藤本ほか: 日本ロボット学会誌, 22(6) (2004) 806.
- 15) 多田ほか: 日本ロボット学会誌, 23(4) (2005) 482.
- 16) 石田ほか: 月刊ディスプレイ, 18(2) (2012) 31.
- 17) 高嶋ほか: 日本ロボット学会誌, 26(6) (2008) 711.
- 18) 高嶋ほか: 日本ロボット学会誌, 30(2) (2012) 195.
- 19) 野田ほか: M&BE 誌, 12(2) (2001) 81.
- 20) 石田ほか: 機能材料, 31(6) (2011) 55.
- 21) 高嶋ほか: 日本機械学会論文集 C 編, 72(719) (2006) 2137.