

器用な作業を実現するための触覚センサ技術

Tactile Sensing Technologies for Dexterous Robots

菅原 淳

■ SUGAHARA Atsushi

近年、多品種少量生産のためのセル生産方式が注目されるようになり、この方式に対応できる新しいロボットが求められている。また、工場だけでなく、店舗、施設、家庭などでもロボットの活用が期待されている。このような用途では、傾いていたり、逆さになっていたりする多種多様な対象物を、一つのロボットハンドで把持することが求められている。そのためには、ハンドと対象物との接触位置と姿勢を的確に検出しておくことが望ましい。

そこで東芝は、これらの検出のために指先全周囲を被覆することができる触覚センサを新たに開発した。これを装着することにより、ロボットが傾いた皿の上の楊枝（ようじ）をつまんだり、重なった皿の1枚だけを取ったりするなど、器用な作業を行えるようになった。更に、ロボットの指による周囲の障害物検知なども可能になった。

Cell production systems for multi-item, small-lot production have been attracting attention in recent years, leading to demand for new robots that can be applied to such systems. There are also expectations for the use of robots in stores, various facilities, and homes in addition to factories. These applications require the capability to grasp a variety of tilted or inverse objects with one hand. Detection of the proper contact position and posture between the object and hand is necessary for this purpose.

Toshiba has developed novel tactile sensors that can cover the entire fingertip areas of a robot to meet this requirement. Dexterous handling operations by robot have been achieved using these sensors, such as picking up a toothpick on a tilted dish and picking up one dish out of a stack. Obstacle detection by robot fingers can also be accomplished with the sensors.

1 まえがき

同じ製品を大量に生産する従来型の工場では、産業用ロボットは、一つの工程に対して1台置かれ、パーツフィードなどによって方向を整えられた1種類の対象物を常に一定の方向からピックアップする作業を行えばよかった。このような場合、対象物の位置検出にカメラ画像を使うこともあるが、2次元位置と方向の検出に限られていた。また、ロボットの手先には、接触の有無を検知する簡単なスイッチセンサがあれば十分であった。

しかし近年、多品種少量生産に対応したセル生産方式が注目されるようになり、また、工場だけでなく、店舗、施設、家庭などでもロボットの活用が期待されるようになった。このような用途では、1台のロボットで多様な対象物を扱う必要があり、更に、ばら積みの対象物などもハンドリングしなければならない。そのためには、対象物の3次元位置や姿勢を確実に検出する必要がある。

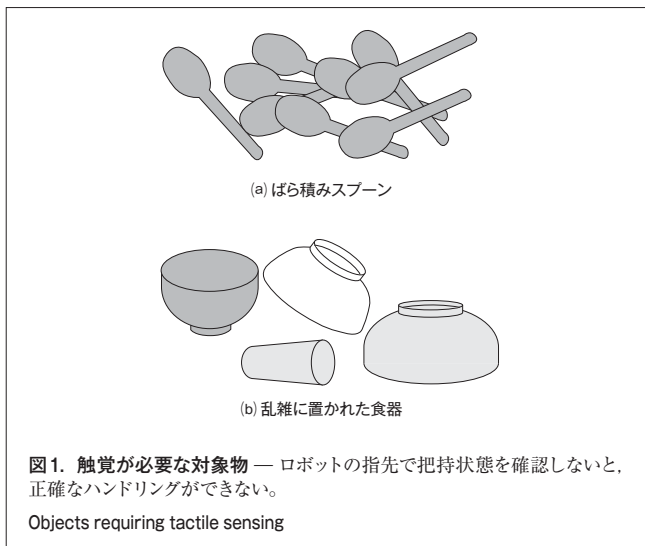
最近の計算機の高速度化、及び画像センサやレーザー距離計の高性能化とともに、これらの検出がある程度は可能になってきたが、位置精度がまだ ± 5 mm程度と不十分で、把持対象物とロボットの指先の位置関係があいまいなため、取り損ねなどエラーが生じてしまう。

東芝は、この新しい用途に対応したロボットの研究開発を進めており、取り損ねなどのエラーを防ぐために、ロボットの指先に圧力分布センサ、すなわち触覚センサを取り付けることを有力な手段の一つに選んだ。これによりロボットは、対象物の位置確認と把持力の確認ができ、更に、指を動かして対象物の面の法線方向を見つけ、姿勢を算出できると考えたからである。具体的には、対象物に把持力を与えても滑らない安定な面の条件と探索方法をあらかじめロボットに教示しておくことで、人間が無意識にやるように指先を動かして安定な面を探し、より確実な把持ができるようになるはずである。

例えば、図1(a)のようなばら積みのスプーンがあった場合、カメラ画像だけでは位置精度が不十分なので、触覚センサで把持状態を確認することで、把持の確実性が増加する。また、図1(b)のような乱雑に置かれた食器があった場合、食器のエッジ部や曲面の法線方向を触覚センサの付いた指先で探索することで、より安定な把持が行えるようになる。

しかし、現在市販されている触覚センサでは、上記のことを行ううえで、耐久性、素材の柔軟性、そして感度が不足している。また、ロボットの指先に装着した場合、指が太くなってしまうものが多く、実用化に向けての課題であった。

そこで当社は、周りとの接触状態も検知できるよう、ロボットの指先全周囲を被覆できる柔軟で高感度な触覚センサ⁽¹⁾を新



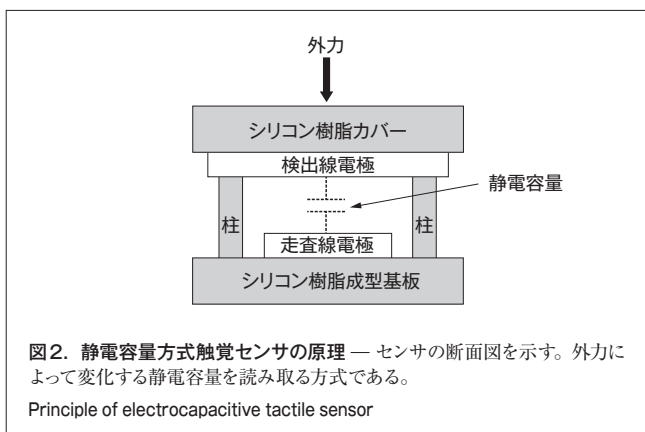
たに開発した。更に、ばら積みの物のすき間に挿入できるように可能なかぎり薄くして、ロボットの指先に装着した。

ここでは、感覚センサの原理と構造を述べ、その特長を生かした器用な作業例をいくつか示す。

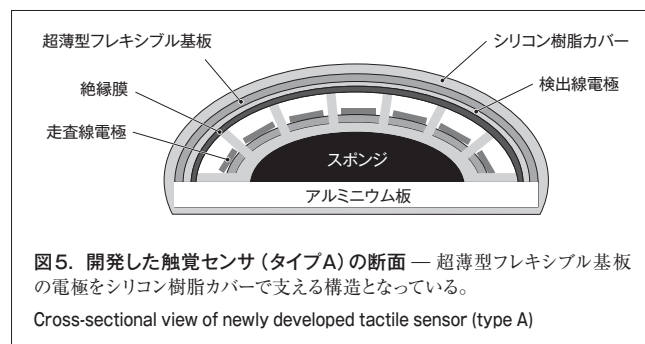
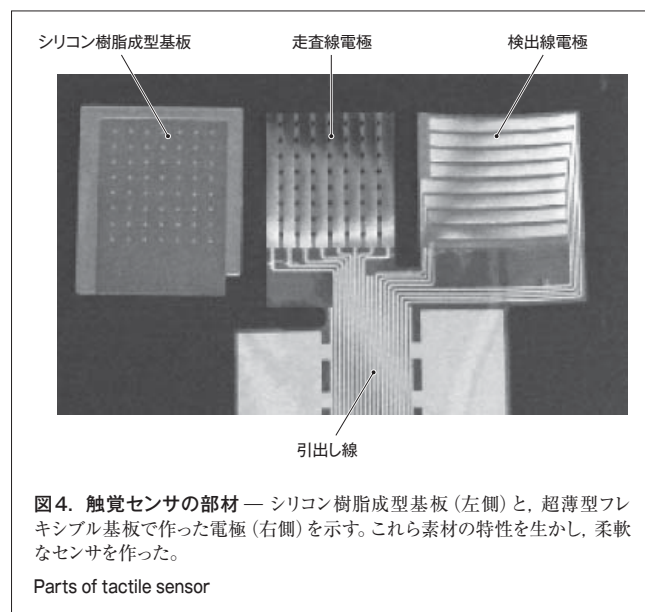
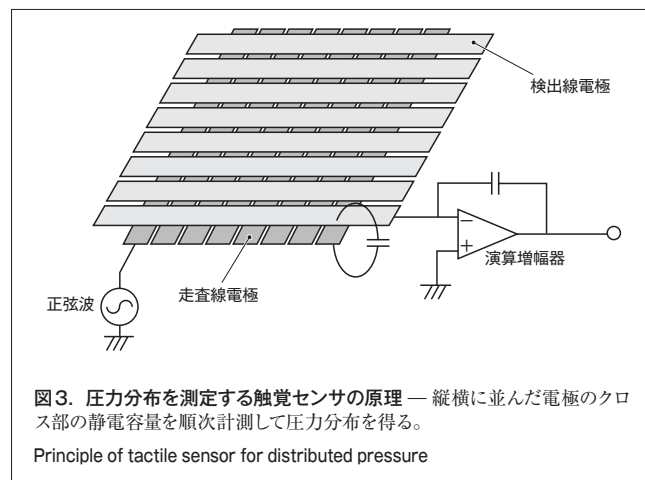
2 開発した触覚センサの原理と構造

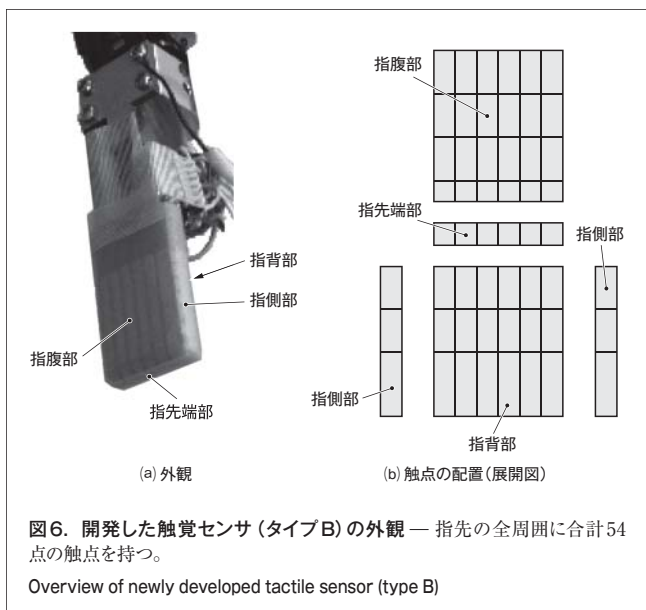
開発した触覚センサは静電容量方式で、図2に示すように、エアギャップコンデンサを押ししたときの静電容量変化を、演算増幅器で電圧に変換して出力するものである。電圧をAD (Analog to Digital) 変換すれば、パソコン (PC) に取り込むことができる。コンデンサの上下の電極を縦横に並べ、図3のようにマトリクスを形成することで、圧力分布が測定できる。

開発したセンサは図4に示すように、柔らかなシリコン樹脂成型基板と、超薄型フレキシブル基板で作った電極から構成され、市販品に比べて柔軟で、 50 mN/cm^2 と数倍高い感度を持っている。湾曲した表面を形成したタイプA (図5) と、指先全周囲に触点を設けたタイプB (図6) の2種類の形状を開発した。



タイプAは基本動作検証のために作ったもので、触点ピッチ2 mmで縦横 8×8 の合計64点の触点があり、後述するエッジ認識の実験に用いた。タイプBの触点ピッチもタイプAと同様に2 mmであるが、触点は指先に6点、指腹部に24点、指側部に3点ずつ、指の背に18点あり、合計54点の触点を指先全周囲に設けたことで、周囲との接触関係を明確にし、指

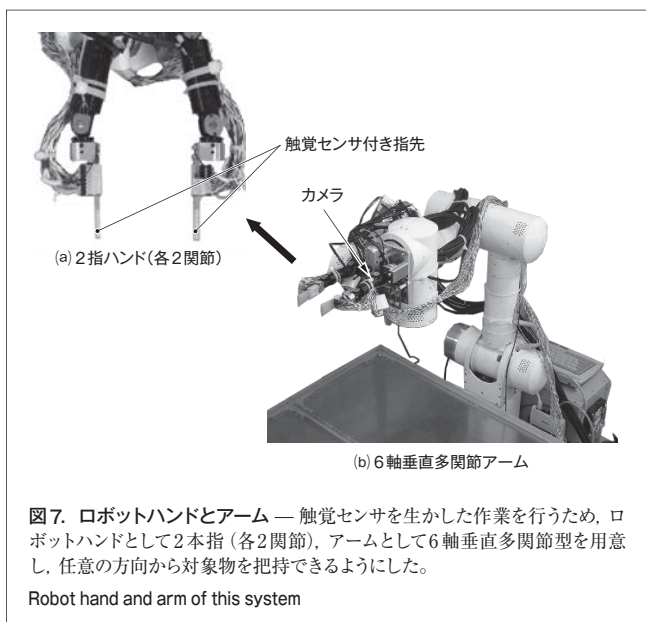




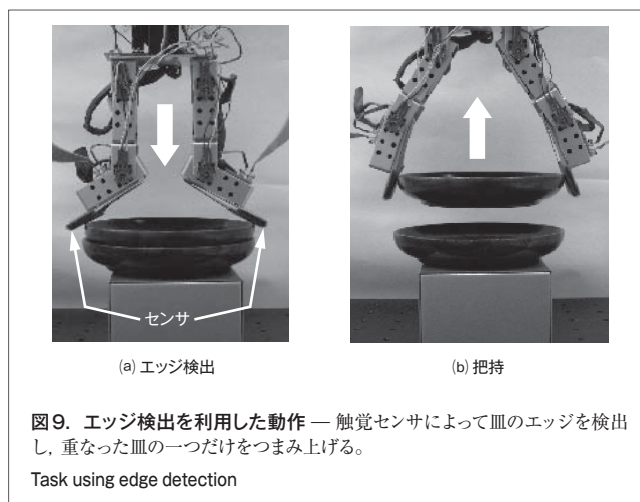
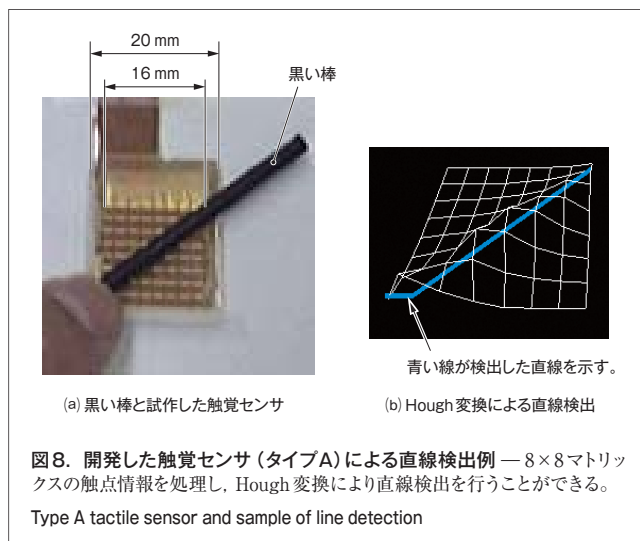
先での作業中に障害物を検知する狙いがある。

3 触覚センサを取り付けたロボットハンドと触覚を使った作業

タイプAとタイプBのセンサを、それぞれロボットハンドの指先に装着した。ロボットハンドは2本指で、各指は2関節から成る。タイプBを装着したハンドと、それを先端につけた6軸垂直多関節ロボットアームを図7に示す。これらを用いて触覚センサを使ったハンドリング実験を行った。



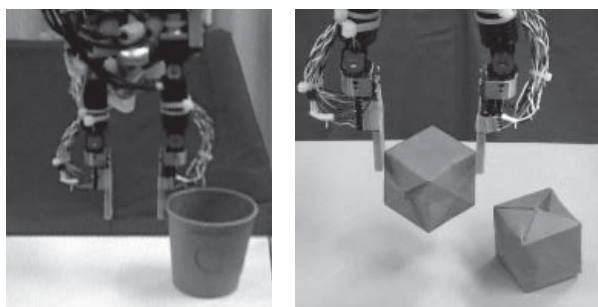
(注1) デジタル画像処理で用いられる特徴抽出法の一つ。



タイプAによる直線検出のようすを図8に示す。センサで検出した圧力分布をPCに送り、Hough変換処理^{(2)(注1)}で直線を抽出した。この処理によって、際だったエッジの方向ベクトルを出すことができる。エッジは物体の位置確認のために役立ち、例えば図9のように、2枚の重なった皿の一方だけを確実に持ち上げることができた。

タイプBは、前述のように触点を指先全周囲に取り付けたことと、感度を高めたことが特長であり、図10(a)のような障害物の検知を行わせた。机の上に置かれた紙コップに指の背が当たると、紙コップを倒さずに停止し、次の動作に移ることができた。また感度が高いことから、折り紙風船を指腹で壊さずに図10(b)のようにつまむことができた。

また、指の先端には6点の触点があるので、平面の法線方向(または傾き)を検知することができる。図11では、傾けて置かれた皿の上に楊枝が置かれている。指先を上から皿の方に下降させていき、センサの1点が皿に当たると、その点を中心に手首を回転させて指を傾けていく。指先全体が皿に当たっ

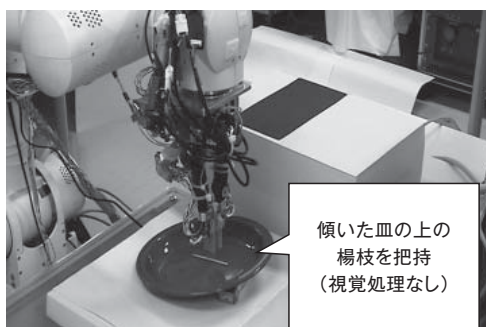


(a) 障害物検知
(紙コップに当たって停止)

(b) 折り紙風船の把持

図10. 高感度触覚センサ(タイプB)によるデリケートな動き — 指先全周囲に高感度な触覚センサを付けているので、紙コップに当たったことを検知したり、折り紙風船を把持したりすることができる。

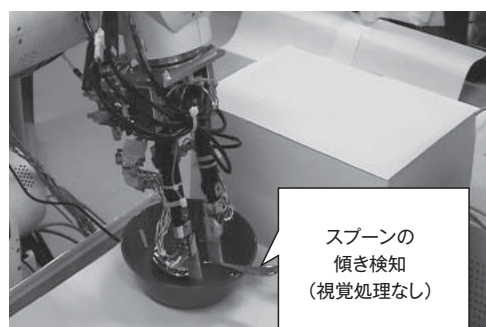
Delicate action with highly sensitive tactile sensor



傾いた皿の上の
楊枝を把持
(視覚処理なし)

図11. 傾いた皿の上の楊枝を把持 — 指先端の触覚センサが皿に当たると、その点を中心に手首を回転させ、指先と皿が平行になったことを確認してから、指先で楊枝をつまみ上げる(位置は事前に与えておく)。

Picking up of toothpick on tilted dish



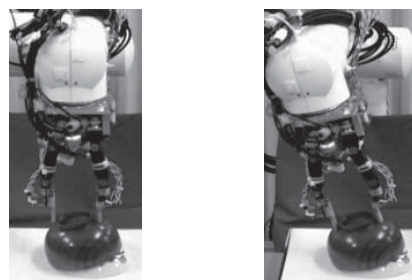
スプーンの
傾き検知
(視覚処理なし)

図12. スプーンの傾き検知 — 指先の触覚センサをスプーンの柄に当て、その点を中心に手首を回転させ、スプーンの柄と指先が平行になったら、スプーンを把持する(位置は事前に与えておく)。

Detection of tilt angle of spoon

たことを確認してから、指先をそろえ、楊枝をつまみ上げることができた。

同様な手順で図12のように、碗(わん)の上に斜めに置かれ



(a) 2本の指を下降

(b) 台座をつまみ上げ

図13. 逆さになって傾いた碗を把持 — 指を下降させ、一方の指が当たったら、それを中心に手首を回転させ、他方の指も当たったら、碗の台座をつまみ上げる。

Handling of inverted tilted bowl

たスプーンの柄の傾きを検知し、つまみ上げることもできた。

更に、適宜アルゴリズムを与えることで、図13のように逆さになって傾いている碗の台座をつまみ上げることもできた。ここでは、まず上から、台座幅より少し開いた2本の指を下降させていく。一方の指が碗の曲面に当たったことをきっかけに、その指先を中心に手首を傾けていき、他方の指先も碗の曲面に当たったことを確認して、台座をつまみ上げるという手順で行わせた。

4 あとがき

このように、触覚センサを取り付けることで、ロボットハンドと物体との接触状態が明確になり、カメラ画像だけでは難しかった器用な手作業が、少しずつではあるができるようになってきた。

今後、この技術の実用化の可能性を探るとともに、触覚による対象物の面方向探索のアルゴリズムに改良を重ねていく。そして、カメラ画像情報と相互に補完しあうことで、更に高度な技能をロボットに与え、工場のセル生産や、店舗、施設、家庭での要求に応えられるロボットの開発を目指して取り組んでいきたい。

文 献

- (1) 菅原 淳, ほか. “指先全周囲に装着した高感度触覚センサと画像処理を使った物体ハンドリング”. 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会SI2007予稿集. 広島, 2007-12. 計測自動制御学会, p.693 - 694.
- (2) Hough, P.V.C. U.S. Patent 3069654. Method and means for recognizing complex patterns. 1962.



菅原 淳 SUGAHARA Atsushi

研究開発センター 機械・システムラボラトリー主任研究員。
液晶、MEMSディスプレイ、触覚・視覚認識ロボット技術に従事。日本ロボット学会、電気学会、情報処理学会会員。
Mechanical Systems Lab.