

# 静電容量型柔軟触覚センサの開発

## —計測精度と空間分解能の両立構造検討—

○白岡貴久(東海ゴム工業(株)) 磯部宏(東海ゴム工業(株)) 稲田誠生(東海ゴム工業(株))  
郭士傑(東海ゴム工業(株)) 向井利春(理化学研究所)

### 1. はじめに

介護や福祉の分野では、人間共存ロボット、車椅子や床ずれ防止ベッド等のような福祉機器のニーズが高まっており、研究や商品開発も盛んに行なわれている。このようなロボットや機器においては、人と接触する部位の柔軟性が求められており、接触の位置や形状、接触力を検出できる触覚センサが重要である。センサがこれらに適応するためには、接触位置を微細に判別できる空間分解能、微小な入力の変化を判別できる精度が必要である上、実装しても接触部位の柔軟性を損なわないことが求められる。このようなニーズに対し、従来のセンサは、半導体圧力センサ[1]に代表されるような、小型・高精度の単点計測のものや、抵抗型[2]や静電容量型の面状触覚センサなどがある。本研究グループは、半導体圧力センサの集積による触覚センサ[3]の研究開発も行なっており、高い機能や精度を実現しているが、配線や構造が複雑になるため大量生産には不向きで、コスト面でも課題がある。抵抗型のセンサも同様に柔軟性やコストなどの面で課題がある。

一方、静電容量型面状触覚センサは有望視されているが、従来提案されているセンサ構造[4]は、コストのほか、精度を向上させるためにS/N比を上げようとすると、空間分解能が低下するという課題があった。本論文では、その解決方法を提案し、センサの試作、評価結果について報告する。

### 2. 静電容量型触覚センサの原理

#### 2.1 基本構造と原理

ここではまず、静電容量型触覚センサの基本構造と原理について説明する。

図1に静電容量型触覚センサの構造を示す。発泡ウレタンなどの柔軟な誘電層を中間層とし、それに対して対向する2つの電極群を配置しており、2つの電極群はそれぞれ90°になるように交差している。電極群は複数本の電極からなり、電極の本数は用途に応じて変更できる。電極群の交差部分をセルと呼び、それぞれのセルが1つのコンデンサを形成している。電極群は、柔軟基材に対して導電性インクをスクリーン印刷することにより生成する。センサは表面基材によって外部と絶縁されている。

このセンサは誘電層が柔軟な材料であるため、外力を受けると誘電層が変形し、電極間距離が変化する(図2)。1つのセルが均等に厚さ方向に変形する場合、静電容量 $C$ は、センサの厚さ方向の変位 $x$ の関数として、

$$C(x) = \frac{\epsilon S}{d - x} \quad (1)$$

と表わされる。ここで、 $\epsilon$ は誘電層の誘電率、 $S$ はセルの電極面積、 $d$ は誘電層の初期厚み(初期の電極間距離)である。変位 $x$ は、センサが受ける法線方向の圧力 $P$ によるものと仮定し、 $P = f(x)$ とおくと、

$$C(P) = \frac{\epsilon S}{d - f^{-1}(P)} \quad (2)$$

となり、静電容量を圧力の関数として表わすことができる。式(2)を変形することで、

$$P = f\left(d - \frac{\epsilon S}{C}\right) \quad (3)$$

と与えられる。よって、各セルの静電容量を計測することで、圧力の検出ができる。

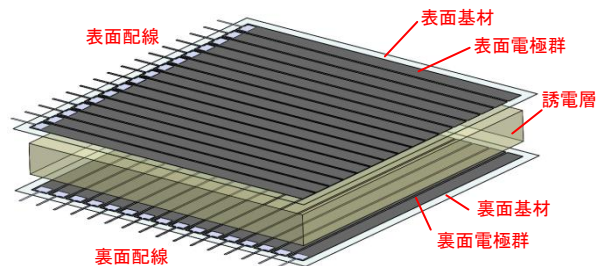


図1 静電容量型触覚センサの構造

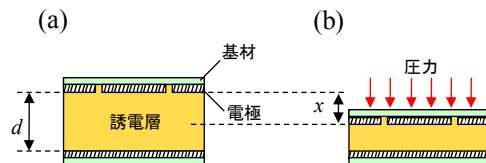


図2 静電容量型センサの構成と計測原理  
(a)初期状態. (b)圧力負荷状態.

### 2.2 従来の静電容量型触覚センサにおける課題

静電容量型センサにおいては、空間分解能は電極面積が小さいほど向上する。また、静電容量が大きいほど S/N 比がよく、計測精度は向上する。静電容量を大きくするには式(1)に示すように、誘電層の誘電率を大きくする、電極間距離を小さくする、電極面積を大きくする、の3点が考えられる。誘電率を大きくすることは、材料が硬くなる傾向にあり、柔軟性を付与する技術[5]はあるものの、本センサで求められる柔軟性には至っていない。電極間距離を小さくすると変形可能な量が小さくなり、計測可能な圧力範囲が狭くなってしまふ。電極面積を拡大すれば容易に静電容量を大きくすることができるが、空間分解能を低下させることにつながる。よって、いずれの手法も計測精度を向上させることはできるが、空間分解能や柔軟性の低下を招いてしまふ。

このため、空間分解能と計測精度、柔軟性の3つの要求を全て満足することは、従来の静電容量型センサでは実現が困難であった。

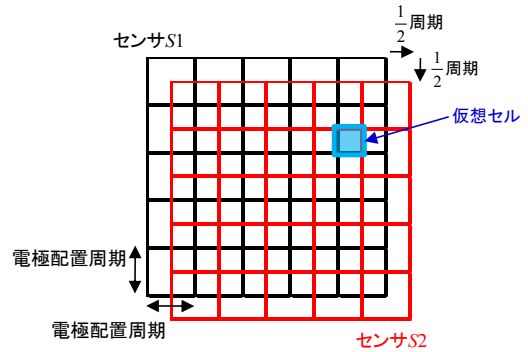


図3 センサ積層の概念図  
(25ch(5×5)センサの2層積層の場合)

## 3. 積層静電容量型センサ構造の提案

### 3.1 積層静電容量型センサの構造

そこでこの課題を解決する方法として、積層構造のセンサを提案する。これは、2つの同構造のセンサ S1 と S2 を積層し、それを電極群の各電極の配置周期に対し 1/2 周期ずつずらすというもので、図3に概念を示す。センサ S1 とセンサ S2 を積層することにより、センサの重なり部分に、空間的には元のセンサセルの 1/4 の面積の仮想セルができる。それぞれのセンサの該当部位の静電容量を複合処理することにより、細分化された仮想セルの静電容量を算出することができる。基本構造は従来の静電容量型センサと同じものであるから、計測精度や柔軟性は犠牲にせず、空間分解能を4倍に向上させることができる。また、原理的には3層以上の多層化も可能で、同一構造のセンサを 1/N 周期ずつずらして N 層積層する場合、空間分解能を  $N^2$  倍に向上させることができる。

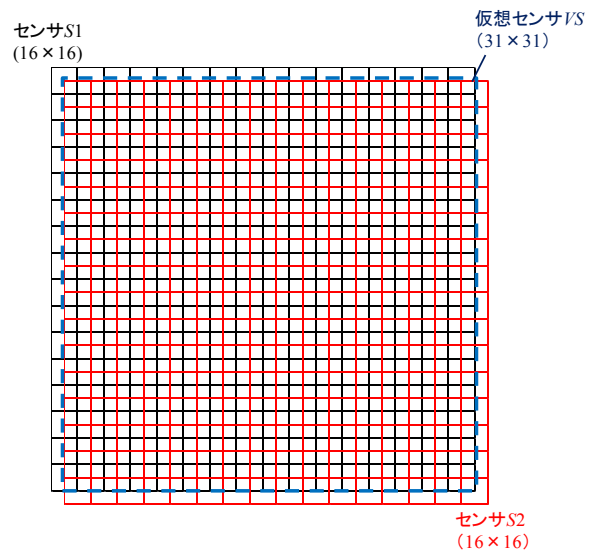


図4 センサ積層による仮想センサ VS

### 3.2 複合処理による仮想セルの圧力算出方法

センサ S1 とセンサ S2 の積層によってできる仮想センサを VS とし、センサ S1 の  $i$  行  $j$  列目のセル  $S1(i,j)$  とセンサ S2 の  $k$  行  $l$  列目のセル  $S2(k,l)$  の重なり部分に仮想センサ VS のセル  $VS(m,n)$  ができるとする。ここで、例としてセンサ S1, S2 はそれぞれ  $16 \times 16$ ch とした(図4)。それぞれのセルの静電容量を  $C_{S1(i,j)}$ ,  $C_{S2(k,l)}$ ,  $C_{VS(m,n)}$  と表わすことにする。 $16 \times 16$ ch の場合、 $1 \leq i, j, k, l \leq 16$ ,  $1 \leq m, n \leq 31$  となる。

まず式(3)により、静電容量  $C_{S1(i,j)}$ ,  $C_{S2(k,l)}$  に対応する圧力  $P_{S1(i,j)}$ ,  $P_{S2(k,l)}$  が算出できる。複合処理の最も簡易的な手法は、重なり部分の圧力を平均化することにより、

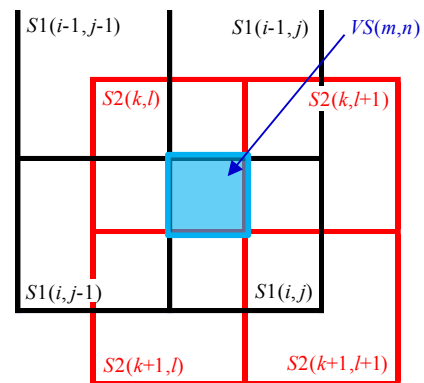


図5 センサ出力の補正

$$P_{VS(m,n)} = \frac{1}{2}(P_{S1(i,j)} + P_{S2(k,l)}) \quad (4)$$

を求めるものである。ここで、 $i, j, k, l$  はそれぞれ  $m, n$  を用いて、

$$\begin{cases} i = (m+1) \bmod 2 + [(m+1)/2] \\ j = (n+1) \bmod 2 + [(n+1)/2] \\ k = m \bmod 2 + [m/2] \\ l = n \bmod 2 + [n/2] \end{cases} \quad (5)$$

と表われ、 $\bmod$  は剰余、 $[\ ]$  はガウス記号を表わす。

式(4)の複合処理手法に対し、より処理精度を向上させるために補正を行なう。例えば、センサ  $S1$  のセル  $S1(i,j)$  の静電容量出力が  $C_{S1(i,j)}$  である場合、対応する圧力  $P_{S1(i,j)}$  が算出できる。これはセル  $S1(i,j)$  に作用する平均圧力であるため、実際にはセル内で圧力分布に偏りが生じている場合がある。これを補正するため、センサ  $S2$  の静電容量出力を用いて補正する。図5のように、センサ  $S1$  のセル  $S1(i,j)$  にはセンサ  $S2$  の4つのセル  $S2(k,l), S2(k+1,l), S2(k,l+1), S2(k+1,l+1)$  が  $1/4$  ずつ重なっている。この4つの出力を比較することで、セル  $S1(i,j)$  内の圧力分布の偏りを評価することができる。

これにより、補正容量  $C'_{S1(i,j)}$  を求める。

$$C'_{S1(i,j)} = \frac{4C_{S2(k,l)}}{C_{S2(k,l)} + C_{S2(k+1,l)} + C_{S2(k,l+1)} + C_{S2(k+1,l+1)}} C_{S1(i,j)} \quad (6)$$

同様に、センサ  $S2$  のセル  $S2(k,l)$  についても、センサ  $S1$  の4つのセル  $S1(i,j), S1(i-1,j), S1(i,j-1), S1(i-1,j-1)$  が  $1/4$  ずつ重なっているため、 $C_{S2(k,l)}$  の補正容量  $C'_{S2(k,l)}$  も以下のように求められる。

$$C'_{S2(k,l)} = \frac{4C_{S1(i,j)}}{C_{S1(i,j)} + C_{S1(i-1,j)} + C_{S1(i,j-1)} + C_{S1(i-1,j-1)}} C_{S2(k,l)} \quad (7)$$

式(6)、(7)の補正容量から、対応する圧力  $P'_{S1(i,j)}$ 、 $P'_{S2(k,l)}$  を算出できる。よって仮想セル  $VS$  に加わる圧力は、

$$P_{VS(m,n)} = \frac{1}{2}(P'_{S1(i,j)} + P'_{S2(k,l)}) \quad (8)$$

と求められる。

このように、積層構造のセンサで複合処理を行なうことで、従来のセンサに対して4倍の空間分解能で圧力分布を求めることができる。

## 4. センサの試作と特性評価

### 4.1 センサの試作

提案手法の有効性を検証するため、積層センサの試作を行なった(図6)。センサ電極群はウレタン基材上に導電性インクをスクリーン印刷で生成した。電極群は、電極幅を14mm、隣接する電極との間隔を2mmとして16本配置した。よってこの場合、センサの電極配置周期は16mmである。対向電極群も同一条件とし、面状での計測点は256ch(16×16)となる。誘電層には厚み3mmの発泡ウレタンを用いた。このセンサを2層、電極配置周期の1/2(8mm)ずつずらして積層した。センサと計測装置間の配線は、将来的には電極と同様に導電性インクのスクリーン印刷により生成する予定であるが、初期試作のためリード線を電極に直接接着する方法をとった。

また、図6に記載しているようにセンサのA-A断面、B-B断面を考え、その断面構造を図7に示すが、中間層は1枚の基材に対して両面に電極を印刷しており、多層化による部品点数の増加を抑えるよう配慮した。

計測には我々が本開発のために試作したキャパシタンスメータを用いており、セルに正弦波を入力し、出力信号との位相差、振幅を計測することで静電容量を算出するものである。入出力端子を順に切り替えることで、全面を走査し各セルの静電容量の計測を行なう。

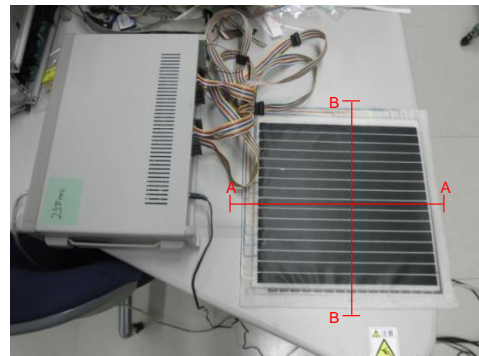


図6 試作した積層センサ(256ch×2層)

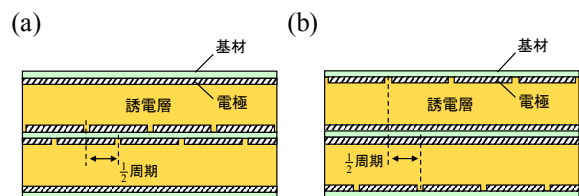


図7 試作した積層センサの断面構造  
(a)A-A断面、(b)B-B断面  
(断面抽出部位は図6に記載)

#### 4.2 センサ特性評価結果

試作したセンサの特性を評価するため、センサに圧力を加えた際の、一つのセルの静電容量を計測した。その結果を図 8 に示す。この特性を用いれば、計測した静電容量から圧力を求めることができる。

また、センサの積層による効果を確認するため、センサに手のひらで圧力を加えた場合(図9)について、従来のセンサと圧力分布の比較を行なった。比較した結果を図 10 に示す。従来の単層センサでは空間分解能が 16mm 四方と粗く、形状を特定することは困難である。積層センサで提案手法による複合処理を行なうと、8mm 四方のサイズで分割して圧力を算出することができるため、形状が鮮明になり手のひらであると特定することができる。また、圧力の検出幅も変化しておらず、計測精度が維持されることが確認できる。

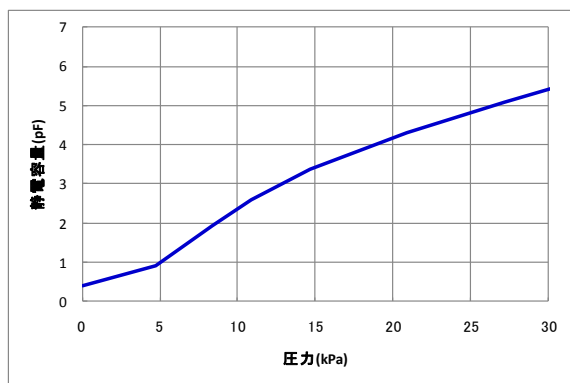


図 8 圧力を加えた際の静電容量出力特性



図 9 手のひらでの圧力を加える実験の様子

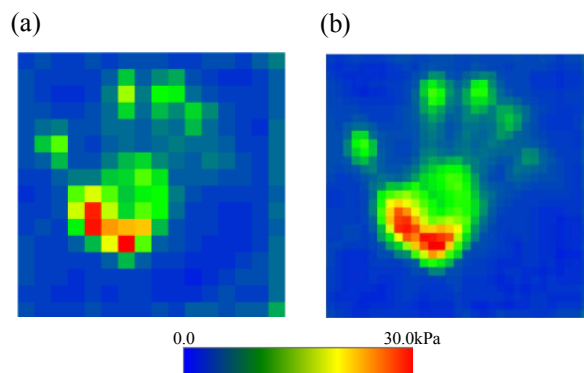


図 10 手のひらでの圧力を加えた際の圧力分布比較  
(a)従来の単層センサでの出力  
(b)提案手法での出力

#### 5. まとめ

高精度、高分解能で柔軟な面状触覚センサの実現手段として、積層構造の静電容量型センサを提案し、そのセンシング原理について述べた。また、試作した積層センサの特性評価を行ない、精度を低下させることなく空間分解能を向上させることができることを確認した。

本提案センサは柔軟性が高いため、ロボットの外装へ実装したり、柔軟物体の表面に配置することができる。そのため、従来のセンサでは困難であった、柔軟物体同士の接触表面に加わる圧力の検出が可能になると考えている。また、この 2 層のセンサはそれぞれ独立の計測を行なっているため、一方の層のセンサが出力異常や断線を起こした際にも他方の層のセンサは正常に計測できる。よって重なっているセルの出力値を比較し、異常判別を行なうロジックを組み込むことにより、異常検出の機能も持たせることができる。今後は、ロボットを始め介護・福祉機器への実装の研究を行なうと共に、本触覚センサの製品展開も目指していく。

#### 参 考 文 献

- [1] フジクラ, 半導体圧力センサ データシート, <http://www.fujikura.co.jp/products/electronic/sensor/data/fpbs.pdf>
- [2] B.Herold, M.Geyer, C.J.Studman, "Fruit contact pressure distributions equipment", *Computers and Electronics in Agriculture*, 32, pp.167-179, 2001.
- [3] T.Mukai and Y.Kato, "1ms Soft Areal Tactile Giving Robots Soft Response", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.20, No.3, pp.473-480, 2008.
- [4] R.Cork, "XSENSOR Technology: A Pressure Imaging Overview", *Sensor Review*, Vol.27, Iss:1, pp.24-28, 2007.
- [5] 大平晃也, "柔軟性及び耐衝撃性を付与したゴム系アンテナ材料の開発", *NTN Technical Review*, No.76, 2008.