

## ポリマー材料を用いた静電容量型面状センサの開発\* (測定精度と空間分解能両立構造の提案)

白岡 貴久<sup>\*1,\*2</sup>, 郭 士傑<sup>\*3,\*4</sup>, 橋本 和信<sup>\*1</sup>, 向井 利春<sup>\*4</sup>

### Development of a Polymer-Based Flexible Sensor Sheet Using Electric Capacitance (A New Structure Achieving Both High Precision and High Resolution)

Takahisa SHIRAOKA, Shijie GUO<sup>\*3,\*4</sup>, Kazunobu HASHIMOTO and Toshiharu MUKAI

<sup>\*3</sup> Tokai Rubber Industries, Ltd., 1, 3-chome, Higashi, Komaki-shi, Aichi, 485-8550 JAPAN

<sup>\*4</sup> RIKEN RTC, 2271-130, Anagahora, Shimoshidami, Moriyama-ku, Nagoya, 463-0003, JAPAN

Traditional capacitance sensor sheets usually have a three-layered structure, with a dielectric layer sandwiched by two electrode layers. Each electrode layer has a number of parallel ribbon-like electrodes. The electrodes on the two electrode layers are oriented orthogonally and each crossing area of two crossing electrodes makes up a capacitance sensor cell on the sheet. It is well known that compatibility between measuring precision and resolution is difficult since decreasing the width of the electrodes is inevitable to obtain a high resolution, however, this may lead to reduction of the area of the sensor cells, and as a result, lead to a low S/N ratio. To overcome this problem, a new multilayered structure and related signal processing approach were proposed. This new structure stacks two or more sensor sheets with shifts in position. Both a high precision and a high resolution can be obtained by combining the signals of the stacked sensor sheets. Trial production was made and the effect was confirmed.

**Key Words** : Capacitance Sensor, Tactile Sensor, Flexible Sensor, Rubber, Conductive Rubber, Screen Printing

## 1. 緒 言

介護福祉の分野では、人間共存ロボットや床ずれ防止マットレスのような機器に対するニーズが高まっており、研究や商品開発も盛んに行われている。このようなロボットや機器では、人とのインターフェイスとして、信頼性の高い面状触覚センサが要求されることが多い<sup>(1)~(3)</sup>。そのために、様々な触覚センサが提案され、研究開発されている。代表的なものとして、離散型半導体センサを利用するもの<sup>(4)</sup>や、接触抵抗を利用するもの<sup>(5)</sup>、導電性ゴムを利用するもの<sup>(6)</sup>、圧電ポリマーを利用するもの<sup>(7)</sup>、静電容量を利用するもの<sup>(8)</sup>などが挙げられる。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の研究開発も行っており、介護支援ロボット RIBA の柔軟外装に導入し、人の接触検知や触覚によるロボット操作を実現している<sup>(9)</sup>。しかし、半導体センサは測定精度が優れている反面、柔軟性が欠け、高価であるため、ロボット全身を覆うような大面積採用は困難である。一方、接触抵抗型や圧電ポリマーを用いた面状センサは曲げに対する柔軟性はあるが、布やゴムのような、伸縮に対する柔軟性が不十分であり、人に優しく接するための目的には不向きである。

上記の認識のもと、本研究グループは数年前からポリマー材料をベースに静電容量型の柔軟面状センサを開発してきた。センサの構成を図 1 に示す。薄い誘電層を両面からそれぞれ複数の一定幅の平行電極を有する電極層

\* 原稿受付 2012 年 7 月 14 日

<sup>\*1</sup> 東海ゴム工業(株) (〒485-8550 愛知県小牧市東 3-1)

<sup>\*2</sup> (独) 理化学研究所 理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター  
(〒463-0003 愛知県名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2271-130)

<sup>\*3</sup> 正員, 東海ゴム工業(株)

<sup>\*4</sup> 正員, (独) 理化学研究所 理研-東海ゴム人間共存ロボット連携センター

E-mail: tri.guo@nagoya.riken.jp



で挟む構造をしており、両側の電極が直角に交差するように配置される。2本の電極の交差部分（セルと呼ぶ）で一つの静電容量型センサを構成する。このようなセンサ構成は古くから提案されており、金属電極のセンサも市販されているが<sup>(8)</sup>、介護支援ロボット等の福祉機器への応用に際しては、伸縮性不足、コストが高い等の課題が残っている。そこで、本研究グループはゴムシートに導電性ゴムインクを印刷して電極層を生成する製法を開発した<sup>(10)</sup>。この製法は複雑な形状にも対応でき、安価で大面積のセンサ製作に適している。配線も含めて全てポリマー材料で作成するため、スマートラバーセンサと名付けている。

図1に示すセンサ構成では、空間分解能は2本の電極の交差部分（セル）の面積になる。柔軟性を実現するために、誘電層はポリマー材料で作ることが望ましいが、比誘電率が小さいために、電極の幅を一定値以上に大きくしなければ、静電容量が小さく、S/N (Signal/Noise) 比を上げることが困難である。これに対して、S/N 比を上げようとして電極の幅を大きくすると、セルの面積が大きくなり、空間分解能が低下する。つまり、測定精度と空間分解能の両立が困難である。これを解決するために、著者らは多層構造のセンサを提案し、試作評価を行った。本論文ではその原理と結果について報告する。

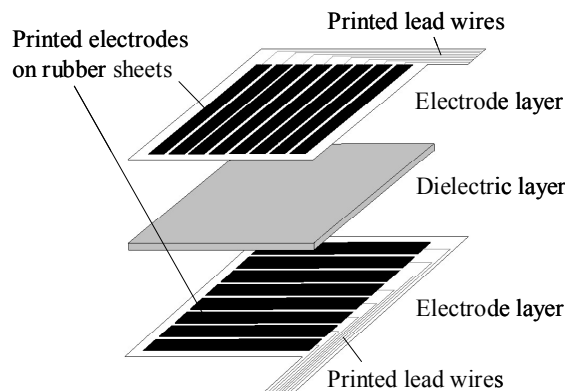


Fig.1 Schematic structure of a traditional smart rubber sensor sheet

## 2. 従来センサシートのセンシング原理と課題

### 2・1 構造と検出方法

図1に静電容量型面状センサの構造を示す。両側の電極が直角に交差するように配置され、2本の電極の交差部分で一つの静電容量型センサを構成し、両側の電極本数はそれぞれ  $I$  本と  $J$  本とすると、1枚のセンサシートに  $I \times J$  個の静電容量型センサが形成される。片面の電極層の  $i$  本目の電極ともう一方の電極層の  $j$  本目の電極が交差してできたセル  $(i, j)$  の静電容量  $C(i, j)$  は下式で表すことができる。

$$C(i, j) = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S(i, j)}{d(i, j)} \quad (i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J) \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率、 $\epsilon_r$  は誘電層の比誘電率、 $S(i, j)$  はセル  $(i, j)$  の電極面積、 $d(i, j)$  はセル  $(i, j)$  の電極間距離(誘電層の厚さ)をそれぞれ表す。 $d(i, j)$  はセル  $(i, j)$  に作用する圧力  $P(i, j)$  に依存する。両側の電極を順次切り替えながら全てのセルの静電容量  $C(i, j)$  を測定すれば、式(1)より各セルの電極間距離  $d(i, j)$  を求めることができる。一方、変形前の電極間距離(誘電層の厚さ)を  $d_0$  とし、セル  $(i, j)$  に圧力  $P(i, j)$  が作用することにより  $d_0$  が  $d(i, j)$  に変化したとすると (図2)、変形量

$$\Delta d(i, j) = d_0 - d(i, j) \quad (2)$$

は圧力の関数とおくことができる。

$$\Delta d(i, j) = f[P(i, j)] \tag{3}$$

これにより、セル  $(i, j)$  に作用する圧力  $P(i, j)$  は下式で求めることができる。

$$P(i, j) = f^{-1}[\Delta d(i, j)] = f^{-1}[d_0 - d(i, j)] \tag{4}$$

変形量が小さく、圧力が変形量に線形比例すると仮定できる場合は、下式が成り立つ。

$$P(i, j) = Y \frac{d_0 - d(i, j)}{d_0} \tag{5}$$

ここで、 $Y$  は誘電層のヤング率を表す。

上記は圧力を受けるときに測定された静電容量から、セルの厚さ方向の変形及びそれから圧力を求める方法について述べたが、一般的にセルは圧力  $P(i, j)$  を受けると厚さ方向に変形すると同時に、面積  $S(i, j)$  も変化(増大)する。その変化量は材料に依存するが、本論文では、誘電層の材料として連続気泡の発泡ウレタンを使用しており、また、電極層の剛性が発泡ウレタンに比べて十分高いために、圧力を受けても厚さ方向に薄くなるだけで面積がほとんど変化しない。そのために、静電容量  $C(i, j)$  から圧力  $P(i, j)$  の計算に際して、面積  $S(i, j)$  の変化を考えなかった。セル面積の変化が無視できない場合はその影響を考慮する必要がある。

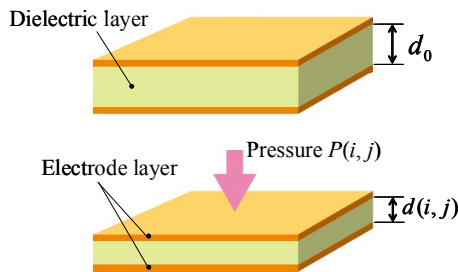


Fig.2 Deformation of a sensor cell subjected to a normal pressure

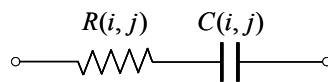


Fig.3 Equivalent circuit of sensor cell  $(i, j)$

セル  $(i, j)$  の等価回路を図 3 に示す。ここで、 $C(i, j)$  は該当セルの静電容量、 $R(i, j)$  はそのセルにおける電極と配線の抵抗をそれぞれ表す。電極はセルの電極であると同時に、配線の役割も果たしている。各セルの配線となる電極の長さが異なるために、 $R(i, j)$  はセルによって異なる。

静電容量の検出方法は多数あるが、本論文ではベクトル・インピーダンス・メーター方式を用いる<sup>(11)</sup>。この方式は、セルに一定振幅の調和波電圧をかけ、流れる電流の振幅と電圧に対する位相差を測定することにより静電容量の変化を検出するもので、応答速度が速く、 $C(i, j)$  と  $R(i, j)$  を分離することができ、抵抗変化に対応できる長所を持っている。

## 2・2 従来の静電容量型面状センサの課題

図 1 に示すセンサの構成では、空間分解能はセルの電極面積が小さいほど（電極の幅が小さいほど）向上する。

これに対して、測定精度は式(1)に与えられる静電容量の出力が大きいほど向上するので、セルの電極面積が大きいほうが有利である。静電容量を大きくする方法として、式(1)に示す関係式から、誘電層の比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。誘電層の比誘電率を大きくしようとすると、材料が硬くなる傾向になり、柔軟性を付与する技術<sup>(12)</sup>はあるものの、十分な柔軟性を得ることが困難である。電極間距離を小さくすると変形可能な量が小さくなり、柔軟性を損なうだけでなく、底付きしやすくなるため測定可能な圧力範囲が狭くなってしまう。電極面積を大きくすると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なる。よって、いずれの方法も測定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う。このため、空間分解能と測定精度、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困難である。

### 3. 積層構造の提案

#### 3・1 積層静電容量型センサの構造

前述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つの同じ構造を有するセンサシート  $S1$  と  $S2$  をずらして積層したものである。ずらし量は、電極の空間的配置周期に対し  $1/2$  周期ずつとし、図4にその概念を示す。ここで、配置周期とは、電極が等幅で、等間隔に配置されたものとし、隣り合う2本の電極間の距離(中心から中心まで)を指す。電極の配置周期を  $H$  とすると、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、周期(電極幅)が  $H/2$  の仮想セルが形成される。重なっているセンサ  $S1$  と  $S2$  の各セルの静電容量の変化から、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、測定精度や柔軟性を犠牲にせず、空間分解能を4倍向上させることができる。また、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  $N$  層積層することにより、空間分解能を  $N^2$  倍向上させることが原理的に可能である。

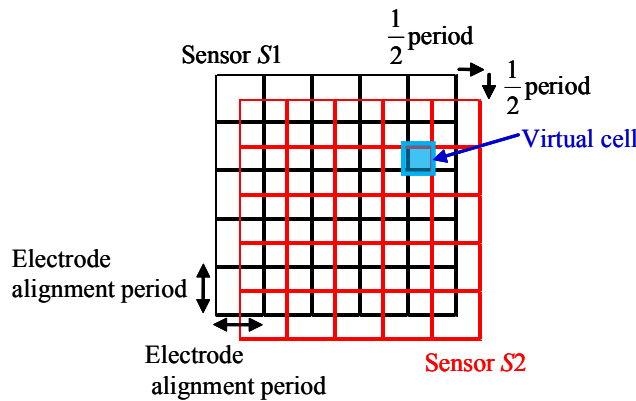


Fig.4 Conceptual diagram of a two-ply sensor by stacking two traditional sensor sheets

#### 3・2 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  $SV$  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  $SV$  のセル  $SV(m, n)$  ができるとし、セルの静電容量をそれぞれ  $C_{S1(i,j)}, C_{S2(k,l)}, C_{SV(m,n)}$  で表す(図5を参照)。

まず式(1)と式(4)より静電容量と圧力の関係を下式で表すことができる。この式はセンサシート1とセンサシート2の両方に適用する(2層以上の場合では全ての層に適用する)。

$$P(i, j) = f^{-1} \left[ d_0 - \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S(i, j)}{C(i, j)} \right] \tag{6}$$

式(6)を用いれば静電容量  $C_{S1(i,j)}$ ,  $C_{S2(k,l)}$  に対応する圧力  $P_{S1(i,j)}$ ,  $P_{S2(k,l)}$  が算出できる. 近似として重なり部分の圧力を平均化することにより仮想セルに作用する圧力  $P_{SV(m,n)}$  を下記のように求めることができる.

$$P_{SV(m,n)} = \frac{1}{2}(P_{S1(i,j)} + P_{S2(k,l)}) \tag{7}$$

ここで,  $i, j, k, l$  はそれぞれ  $m, n$  を用いて,

$$\begin{cases} i = (m + 1) \bmod 2 + [(m + 1) / 2] \\ j = (n + 1) \bmod 2 + [(n + 1) / 2] \\ k = m \bmod 2 + [m / 2] \\ l = n \bmod 2 + [n / 2] \end{cases} \tag{8}$$

で表すことができる. 式中, mod は剰余, [] はガウス記号をそれぞれ表す.

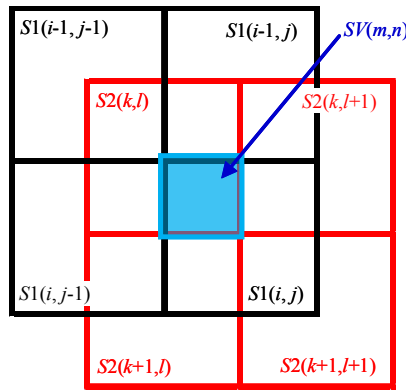


Fig.5 Virtual cells formed by stacking two sensor sheets

上記のように処理することにより, 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. ただし, 式(7)の単純平均では, センサ S1 のセル  $S1(i, j)$  の静電容量  $C_{S1(i,j)}$  から算出する圧力  $P_{S1(i,j)}$  はセル  $S1(i, j)$  に作用する平均圧力で, セル内で圧力分布に偏りが存在しても, それを考慮することができない. センサ S2 に対しても同様なことが言える. 偏りによる誤差をなくするために以下に述べる補正を行う. 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  $S1(i, j)$  内での圧力分布の偏りを評価することができ,  $C_{S1(i,j)}$  の補正後の静電容量  $C'_{S1(i,j)}$  は下式で与えられる.

$$C'_{S1(i,j)} = \frac{4C_{S2(k,l)}}{C_{S2(k,l)} + C_{S2(k+1,l)} + C_{S2(k,l+1)} + C_{S2(k+1,l+1)}} C_{S1(i,j)} \tag{9}$$

同様に, センサ S2 のセルである  $S2(k, l)$  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,  $C_{S2(k,l)}$  の補正静電容量  $C'_{S2(k,l)}$  も以下のように求められる.

$$C'_{S2(k,l)} = \frac{4C_{S1(i,j)}}{C_{S1(i,j)} + C_{S1(i-1,j)} + C_{S1(i,j-1)} + C_{S1(i-1,j-1)}} C_{S2(k,l)} \tag{10}$$

式(9), (10)で与えられる補正静電容量からそれぞれに対応する圧力  $P'_{S1(i,j)}$ ,  $P'_{S2(k,l)}$  を算出すれば,

$$P'_{SV(m,n)} = \frac{1}{2}(P'_{S1(i,j)} + P'_{S2(k,l)}) \tag{11}$$

が得られる。これにより仮想セル  $SV$  に作用する圧力を求めることができる。

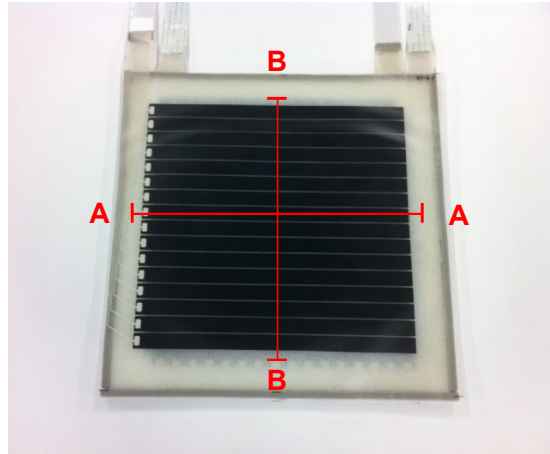


Fig.6 Picture of a prototype of the proposed sensor sheet

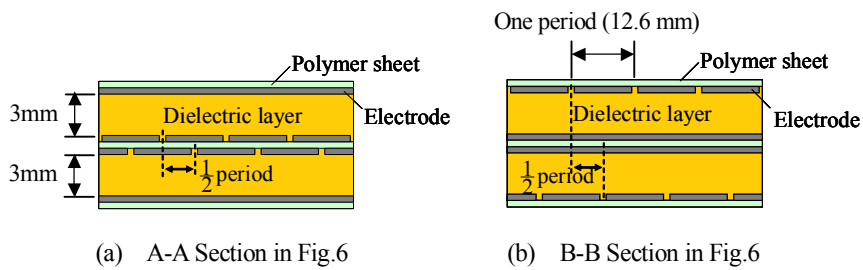


Fig.7 Cross sectional view of the two-ply sensor sheet

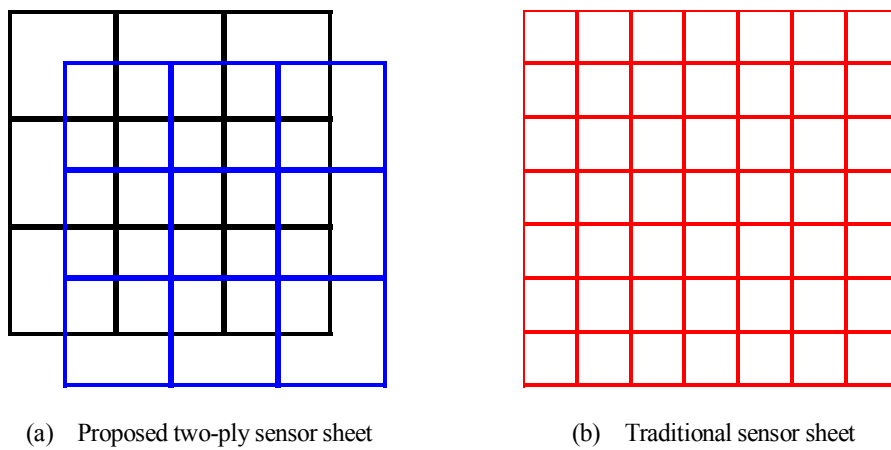


Fig.8 Conceptual diagram of the proposed sensor sheet (A in table.1) and a traditional sensor sheet with the same resolution (B in table.1)

Table 1 Sensors used for performance comparison

Sensor	Sensor A (Proposed two-ply)	Sensor B (Traditional high resolution)	Sensor C (Traditional)
Number of electrodes	16	32	16
Width of electrodes	11.6mm	5.3mm	11.6mm
Gap between two adjacent electrodes	1.0mm	1.0mm	1.0mm
Resolution	□6.3mm (virtual)	□6.3mm	□12.6mm
Output of one cell at pressure of 22 kPa (mean value)	4.7 pF	0.93 pF	4.7 pF
Noise level at pressure of 22 kPa (Ratio of deviation to mean value)	0.04	0.15	0.04

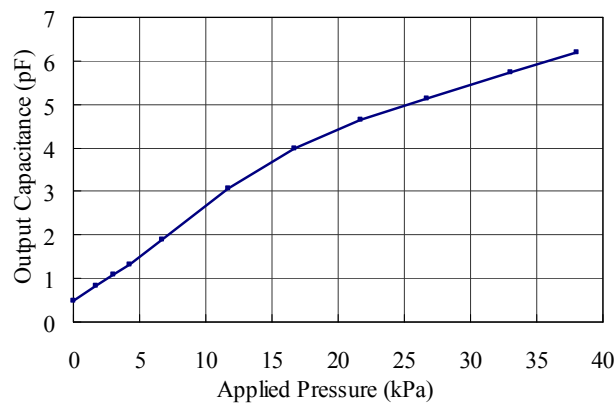
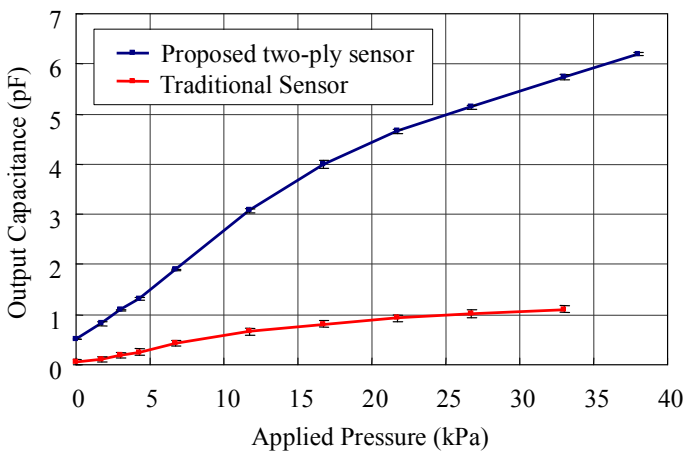
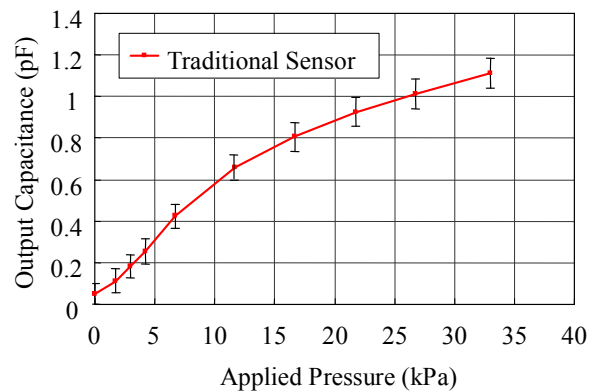


Fig.9 Relation between output(capacitance) and static pressure for a sensor cell with dimension 11.6mm × 11.6mm



(a) Comparison of traditional sensor and proposed two-ply sensor



(b) Traditional sensor

Fig.10 Comparison on output (capacitance) and noise level

#### 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った（図 6）。電極は、導電性ゴムインクをウレタン基材にスクリーン印刷することによって生成した。電極の本数は 16、幅は 11.6mm、隣接する電極間の間隔は 1mm とし、電極の配置周期は 12.6mm である。向かい合う両電極層の電極本数は共に 16 としたため、センサシートに形成されるセルの数は  $16 \times 16 = 256$  となる。誘電層として厚さ 3mm の発泡ウレタンを用いた。このようなセンサを 2 枚作成し、面内両方向に電極配置周期の半分である 6.3mm ずらして積層した。センサと測定装置の間の配線も、電極部分と同様に導電性ゴムインクを基材にスクリーン印刷して生成したが、導電性をより高めるために銀を配合した。また、試作に際して、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、中間の電極層は 1 枚の基材に対して両面に電極を印刷している。これにより、多層化による部品点数の増加を抑えるよう配慮した（図 7）。

#### 4・2 センサ特性評価

本提案の積層構造の効果を検証するため、従来構造のセンサとの比較を行った。そのために、表 1 に示すように、A：本提案の積層構造センサ、B：従来構造の高分解能センサ（電極幅を半分にしたもの）、C：積層構造の一方の層に相当する従来構造センサの 3 種類を製作して測定を行った。A と C では電極本数が 16 で、配置周期が 12.6mm である。センサ A では、積層により 6.3mm 四方に相当する空間分解能が得られることになる。従来構造のセンサで同じ空間分解能を得るためには、電極本数が 32、幅が 5.3mm のセンサが必要で（図 8 を参照）、そのために試作したものは表 1 のセンサ B である。後述するが、同じ圧力（1 例として 22 kPa）に対するセンサ出力の平均値とノイズレベル（変動幅の標準偏差と平均値の比）も表 1 に示す。センサの出力特性を示すデータの



Fig.11 Picture when measuring pressure of the palm of a hand

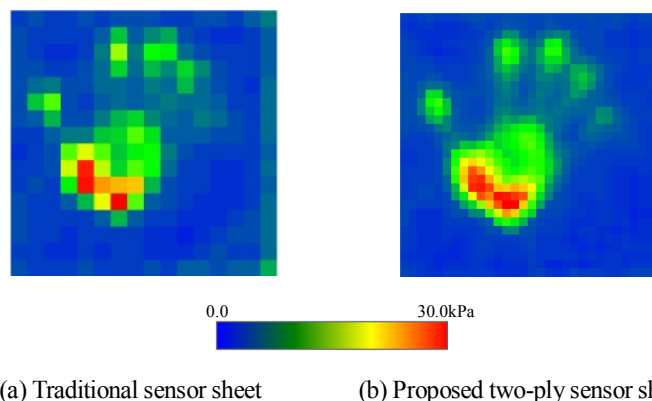


Fig.12 Distribution of pressure measured by pressing the palm of a hand onto sensor sheet



一例として、積層前のセンサシート（表 1 中のセンサ C）の 1 セルにスタンプを用いて加圧したときに測定した静電容量と圧力の関係を図 9 に示す。高分子材料を用いているために履歴依存性を完全に回避することができない。図 9 は、十分時間間隔をあけて圧力を離散的に小さい値から大きい値まで変化させたときに測定したものである（以下の図 10 も同様）。

1 セルの出力（静電容量）とノイズレベルについてのセンサ A と B の比較を図 10 に示す。図 10 は静的圧力を加えた場合の測定結果で、同じ測定環境において、荷重を 1 分間加え続けて測定した静電容量の出力平均値とその変動幅の標準偏差をプロットしたものである。また、図中、(b) は従来構造の高分解能センサ B の結果を拡大したものである。セル面積が小さくなると、同じ圧力に対し、1 セルの出力（静電容量）は電極面積に比例して小さくなるため、ノイズによる影響を受けやすくなり、測定誤差が大きくなる。これに対し、積層センサ A では、電極面積が大きいため、相対的にノイズの影響を受けにくく、測定誤差が小さい。図 10 だけではノイズレベルの違いを読み取りにくいので、1 例として圧力が 22 kPa のときに測定したセンサ出力の平均値とそのノイズレベル（変動幅と平均値の比）を表 1 に示した。センサ B のノイズレベルがセンサ A とセンサ C に比べてかなり大きいことがわかる。センサ A とセンサ C は同じ寸法のセルを有し、同じ圧力に対して、出力もノイズレベルも同じになる。本提案のセンサ A では、圧力分布は静電容量の測定値から第 3 章で述べた方法で計算で求めるため（計算誤差は一般的に小さい）、ノイズレベルが電極幅を小さくしたセンサ B に比べて小さくなる。つまり、本提案のセンサ構造では、計算処理は測定後に行うため、測定精度を犠牲にすることがない。

本提案構造による空間分解能向上を確認するため、センサに手のひらで圧力を加えたときの圧力分布を測定した（図 11、図 12）。従来構造のセンサ（表 1 の C）では空間分解能が 12.6mm 四方と粗く、形状を特定することは困難である。これに対して、本提案の積層センサ（表 1 の A）では 6.3mm 四方のサイズに分割して圧力を算出することができるため、形状が鮮明になっている。

## 5. まとめ

高精度、高分解能の柔軟面状触覚センサを実現する手段として、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、提案の積層センサを試作し、実測により従来センサとの比較を行った。その結果、本提案のセンサ構造は測定精度や柔軟性を低下させることがなく、空間分解能を向上させることができることを確認した。つまり、本提案のセンサ構造は同じ空間分解能を有する従来のセンサ構造に比べて高い測定精度を有する。ただし、圧力の作用領域が仮想セルより小さい場合はその測定精度が従来のセンサ構造と変わらない。

本提案のセンサは柔軟性が高いため、ロボットの外装へ実装するなど、柔軟物体の表面に配置することができる。そのため、従来困難であった、柔軟物体同士の接触表面に作用する圧力の検出が可能になると考えている。また、積層した 2 枚のセンサはそれぞれ独立に測定を行うため、一方のセンサが出力異常や断線を起こした際にも他方のセンサは影響を受けない。つまり、センサ 2 重化の役割も期待できる。また、重なっているセルの出力値を比較し、異常判別を行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すことができる。今後、ロボットを始め、介護・福祉機器へ実装するための研究を行うと共に、本触覚センサの製品化開発も行って行きたいと考えている。

## 文 献

- (1) 小田島正, 大西正輝, 田原健二, 向井利春, 平野慎也, 羅志偉, 細江繁幸, “抱え上げ動作による移乗作業を目的とした介護支援ロボット研究用プラットフォーム “RI-MAN” の開発と評価”, 日本ロボット学会誌, Vol.25, No.4 (2007), pp.554-565.
- (2) Ohmura, Y., Kuniyoshi, Y., “Humanoid Robot Which can Lift a 30kg Box by Whole Body Contact and Tactile Feedback”, 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2007), pp.1136-1141.
- (3) Iwata, H., Sugano, S., “Design of Human Symbiotic Robot TWENDY-ONE”, 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2009), pp. 3294-3300.
- (4) フジクラ, “FPBS データシート”, <http://www.fujikura.co.jp/products/electronic/sensor/data/fpbs.pdf> (参照日 2012 年 6 月 5 日)

- (5) Herold, B., Geyer, M., and Studman, C.J., "Fruit contact pressure distributions equipment", *Computers and Electronics in Agriculture*, 32 (2001), pp. 167-179.
  - (6) Shimojo, M., Araki, T., Teshigawara, S., Ming, A., Ishikawa, M., "A Net-Structure Tactile Sensor Covering Free-form Surface and Ensuring High-Speed Response", *IROS 2007* (2007), pp.670-675.
  - (7) 高嶋一登, 堀江聡, 向井利春, 石田謙司, 松重和美, "触覚センサのための VDF オリゴマーの圧電特性", 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.9 (2008), pp.243-249.
  - (8) Cork, R., "XSENSOR Technology: A Pressure Imaging Overview", *Sensor Review*, Vol. 27, Iss: 1 (2007), pp. 24-28.
  - (9) Mukai, T., and Kato, Y., "1ms Soft Areal Tactile Giving Robots Soft Response", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 20, No. 3 (2008), pp. 473-480.
  - (10) 來田歩, 早川知範, 小林淳, 橋本和信, 静電容量型面圧分布センサ, 日本国特許登録 P4565359 (2008年8月8日出願).
  - (11) Agilent Technologies, "インピーダンス測定ハンドブック", <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000JA.pdf>, pp.15-21. (参照日 2012年6月5日)
  - (12) 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), pp. 57-62.
-