

# コーティング式触覚センサの開発

## 2次元センサへの拡張に向けた検討

Development of a spray-coated tactile sensor  
-Study for extension to 2D sensor-

佐藤 弘基 (福島大大学院) Luis CANETE (福島大) 正 高橋 隆行 (福島大)

Kouki SATO, Graduate school of Fukushima University, kouki@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

Luis CANETE, Fukushima University, luis@rb.sss.fukushima-u.ac.jp

Takayuki TAKAHASHI, Fukushima University, taka@sss.fukushima-u.ac.jp

This paper presents the development of a tactile sensor that has a simple structure and can be sprayed over three-dimensional shapes such as curved surfaces. The sensor can be modeled by the distributed constant RC circuit, and the contact point is detected as a signal phase delay caused by it. The application of the sensor to a robotic hand is being considered. As a first step, a cylinder that represents a finger was coated with an actual 1-axis sensor and experimental results were verified with simulations. To model sensors with larger widths, a mesh model using a T-type RC circuit was developed and initial results show improved accuracy.

**Key Words:** Spray-Coating Tactile Sensor, Signal Phase Delay, Robot Hand

### 1 緒言

ロボットが物体の接触を検出するために触覚センサが用いられており、抵抗値変化方式や静電容量変化方式 [1] など様々なセンサが開発されている。触覚センサを装着するロボットのほとんどは3次元形状であり、中には複雑な曲面形状を有しているものもある。そのような複雑な3次元形状にセンサを装着させるための工夫の一つとして、柔らかい素材を用いることでセンサ自体に柔軟性を持たせる方法 [2, 3] がある。しかし、上記のセンサを含むこれまでに開発されたセンサは、複雑な3次元形状へ装着させるために全体構造や製造方法の複雑化、大量の配線処理、全体的なコストの増加等の課題が生じてしまっている。

そこで北島らは、上記の課題を考慮し、コーティング式触覚センサの開発 [4, 5] を行なった。コーティング式触覚センサの概念図を図1に示す。本センサはスプレーガンなどで物体に“塗布”するだけでその表面を触覚センサとすることができ、シンプルな構造・製造方法である為、複雑な3次元形状に容易にセンサを配置することができる。それ故に、これまで接触位置の検出が困難であった部分への応用が期待できる。北島らは、車輪型ロボットの車輪への応用を目指し、センサの1軸モデル [4] と円筒曲面での検討 [5] を行なった。

筆者らは、ロボットハンドへのコーティング式触覚センサの応用を考えている。本論文では、指を模した円筒にセンサを塗布し、性能実験を行い、センサの2次元モデルへの拡張を試みる。

### 2 コーティング式触覚センサ

本センサの構造を図2に示す。センサを塗布する基材(ロボットの表面等)の上に導電膜(導電性を有する基材の場合は不要)、圧電膜、抵抗膜の順で積層したシンプルな構造である。また出力端子は抵抗膜上に必要数配置すれば良い。圧電膜は樹脂系圧電素子のスプレーコーティング工法(ムネカタ株式会社)[6]を用いており、膜厚は約25[ $\mu\text{m}$ ]である。本センサはセンサ上に力が加えられることで圧電膜が変形し起電力を発生させ、それが出力されるため、センサ自体を稼働させるための電源は不要である。

本センサは出力信号の時間遅延によって接触位置の検出を行っている。例えば、出力端子が2つのセンサの出力信号波形の例を図3に示す。2つの出力端子をそれぞれ出力端子A、出力端子Bと呼ぶ。出力端子Aの信号のピークに達した時刻を基準とした出力端子A、Bの信号のピークに達した時刻の差を遅延時間とす

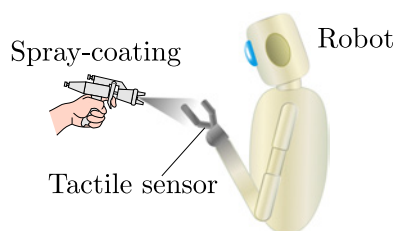


Fig.1: Concept of spray-coating tactile sensor

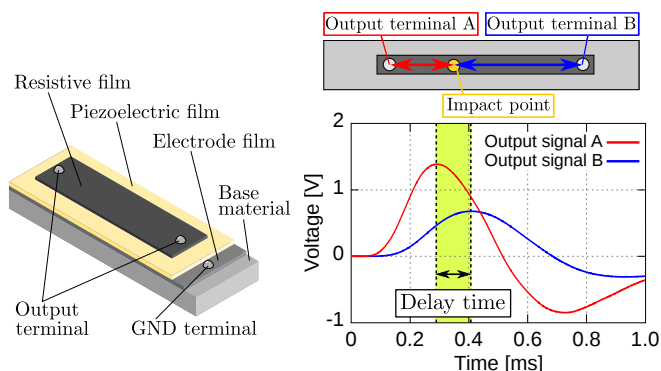


Fig.2: Structure

Fig.3: Definition of delay time

る。この遅延時間は接触位置によって異なるため、それを用いて接触位置を推定することが可能である。

また、出力信号の時間遅延は抵抗とコンデンサで構成される“RC分布定数回路”によって生じている [4]。本センサの構造上、抵抗膜による抵抗成分と、誘電体である圧電膜が抵抗膜と導電膜の2枚の電極に挟まれることによって形成されるコンデンサ成分がセンサ上にて無限に分布していると考えられることができる。したがって、多くのローパスフィルタが存在する構造となり、電圧ノイズに強いという特徴を持つ。そして、RC分布定数回路による時間遅延を原理とした位置検出方法は既存のセンサにはない“新しい検出原理”である。

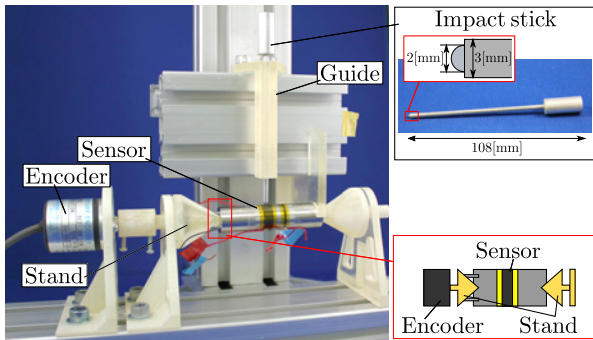


Fig.4: Experimental setup

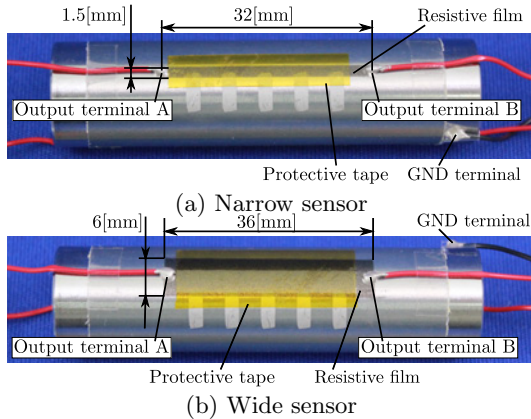


Fig.5: Spray-coated tactile sensor (type A)

Table 1: Specification of type A

Item	Unit	Value	
		Narrow	Wide
Size of resistive film	[mm]	1.5 × 32	6.0 × 36
Resistance between output terminals	[MΩ]	7.68	1.66
Thickness average of piezoelectric film	[μm]	26.56	26.56

### 3 センサの性能実験

本研究はロボットハンドへの応用を目標としている為、人の指を模した  $\phi 15[\text{mm}] \times 60[\text{mm}]$  の円筒 (SUS304) を基材とし、センサの試作を行なった。この円筒の長さ方向 (円筒軸に沿った方向) と円周方向にそれぞれ 1 軸センサを幅 1.5[mm](Narrow) と幅 6.0[mm](Wide) で塗布し、位置検出センサとして機能するか検証を行う。

#### 3.1 実験方法

機能検証の為に、センサを加圧し遅延時間を測定した。センサの加圧には図 4 に示す装置を用いた。装置は、センサを加圧するインパクトスティック (6.5[g], アルミ製) とインパクトスティックを垂直に落下させる為のガイド、センサを固定する固定台、ロータリーエンコーダ (O EZ-05-2M, NEMICON) で構成されている。まず、図 4 右下に示すようにセンサを固定台で挟み込むように固定し、測定点直上にガイドを固定する。この時、測定点の長さ方向の位置は円筒の端からノギスを用いて測定し、円周方向の位置はロータリーエンコーダを用いて測定する。遅延時間は、インパクトスティックを高さ 20[mm] から落とす際のセンサの出力信号波形をオシロスコープ (Tektronix, TBS1154) で測定し算出した。なお、遅延時間は出力端子 A のピーク到達時刻を基準とした出力端子 B のピーク到達時刻との差とする。

##### 3.1.1 長さ方向の検証

試作したセンサ type A の外観と仕様を図 5, 表 1 に示す。図 5 左端が出力端子 A, 右端に出力端子 B がある。出力端子 A を原点とし、出力端子 A から出力端子 B にかけて任意の位置でセンサに加圧を行い、その時の位置と遅延時間を測定した。結果を

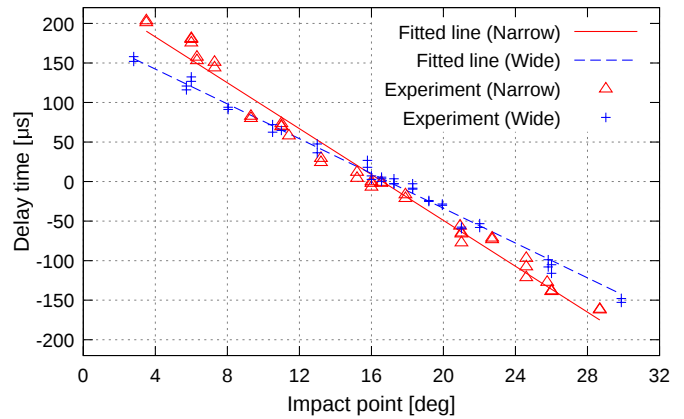


Fig.6: Delay time of type A

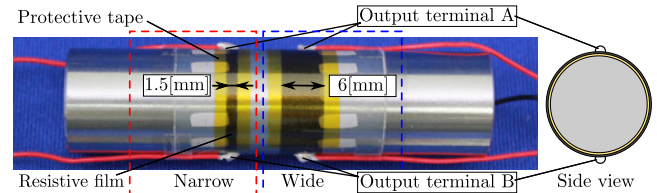


Fig.7: Spray-coated tactile sensor (type B)

Table 2: Specification of type B

Item	Unit	Value	
		Narrow	Wide
Width of resistive film	[mm]	1.5	6.0
Resistance between output terminals	[MΩ]	2.19	0.76
Thickness of piezoelectric film	[μm]	25.8	27.7

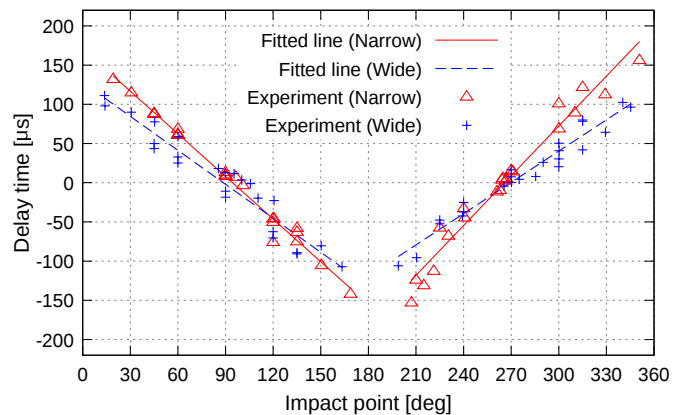


Fig.8: Delay time of type B

図 6 に示す。理想的な場合では、センサの中心位置 16[mm] で遅延時間が 0 となり、その点に対し対称なグラフとなる。試作したセンサでも理想的な場合に近い結果が得られ、幅を広げても位置検出センサとして機能することを示した。

##### 3.1.2 円周方向の検証

試作したセンサ type B の外観と仕様を図 7, 表 2 に示す。センサには図 7 下方にそれぞれ出力端子 A, 180[deg] 反対の位置に出力端子 B がある。抵抗膜は全周に塗布され、リング状となっている。出力端子 A を原点とし、360 度回転させながら任意角度でセンサの加圧を行い、その時の角度と遅延時間を測定した。結果を図 8 に示す。全周に塗布されたセンサは先行研究を含め検証されていないが、理想的な場合ではセンサの中心位置 90, 270[deg] で遅延時間が 0 となり、180[deg] を軸とした線対称なグラフになると考えられる。試作したセンサでも理想的な場合に近い傾向となった。よって円筒の円周方向に全周に塗布したセンサがその抵抗膜幅を広げた場合でも位置検出センサとして機能することを示した。

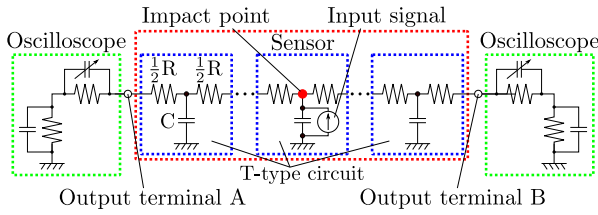


Fig.9: 1-axis sensor model

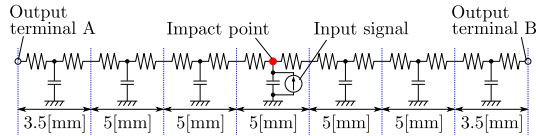


Fig.10: Base model of type A (Narrow, Wide)

#### 4 センサのモデル化

北島らは平板に塗布した長さ 40[mm]、幅 1.5[mm] のセンサのモデル化を行なった [4]。北島らの提案した T 型 RC 集中定数回路による 1 軸センサモデルを図 9 に示す。このセンサモデルは、2 つの抵抗と 1 つのコンデンサから成る “T 型近似” [7] を用いた集中定数回路への近似である。なお、このモデルには、オシロスコープについてもモデル化して含めている。これは、センサの抵抗値 (数 [MΩ]) に対し、測定に用いているオシロスコープのプロブインピーダンスが 10[MΩ] と無視出来ない値であった為である [4]。

本章では、このモデルが第 3 章で検証したセンサに応用可能か検討していく。

##### 4.1 type A のモデル化

type A(Narook, Wide) は北島らがモデル化したセンサを円筒に再現したものとその抵抗膜幅を広げたものである。故に、図 9 と同様に 7 段の T 型 RC 回路でモデルを構築した。そのモデルのセンサ部を図 10 に示し、Base model と呼ぶ。図 10 のモデルでは、センサの出力端子に図 9 に示したオシロスコープも含んでいるが、図の簡略化のため、以降省略する。

本論文で示すモデルの各パラメータ値は、センサが均一に塗布され、全て等しいと仮定し決定していく。本モデルでは 1 段の T 型 RC 回路が 3.5[mm] または 5[mm] 分の抵抗値と静電容量値を担うこととなる。この担う距離を  $x$  とする。このセンサの出力端子間距離  $l_{AB}$  は 32[mm] であり、出力端子間抵抗値  $R_T$  は 7.68[MΩ] であった。これらを用いて 1 段当たりの抵抗値  $R$  を  $(x/l_{AB})R_T$  とした。また全体の静電容量値  $C_T$  は、圧電膜厚  $d$  と円筒半径  $r$  を用いて次式で求めることができる。この時、誘電率  $\epsilon$  は  $106 \times 10^{-12}$ [F/m] である。

$$C_T = \frac{2\pi\epsilon l_{AB}}{\ln(r/d)} \quad (1)$$

これを同様に  $(x/l_{AB})$  倍したものが 1 段当たりの静電容量値  $C$  である。また type A(Wide) も type A(Narook) と同様に 1 段当たりの抵抗値  $R$  と静電容量値  $C$  を求めた。

次にこれらのモデルを回路シミュレータ “LTspiceXVII” (リニアテクノロジー社) で検証を行う。シミュレーションでの入力信号 (加圧) は、センサ上面に FlexiForce(ニッタ, A202-25) を置き測定した力  $F$  と圧電歪定数  $d_{33} = 24$ [pC/N] を用いて表される圧電膜から発生する電流  $I = d_{33}(dF/dt)$  とした。出力端子 A から 6, 11, 16, 21, 26[mm] 地点の加圧シミュレーションを行い、その遅延時間を図 11 に示す。type A(Narook) では実験値と一致し Base model が適用できることが分かった。しかし、type A(Wide) では実験値と大きな誤差が生じた。これは、幅が広がることで加圧点から同心円上に無数に広がるであろう信号の影響を無視できなくなり、集中定数回路では近似が困難になったのではないかと考えた。

そこで type A(Wide) を網目状に T 型 RC 回路が無数に広がるような分布定数回路での近似を試みた。提案する “Mesh model” を図 12 に示す。本モデルは 1 段の T 型 RC 回路で 1[mm] 四方分の抵抗値と静電容量値を表す。まず、モデルの合成抵抗値を出

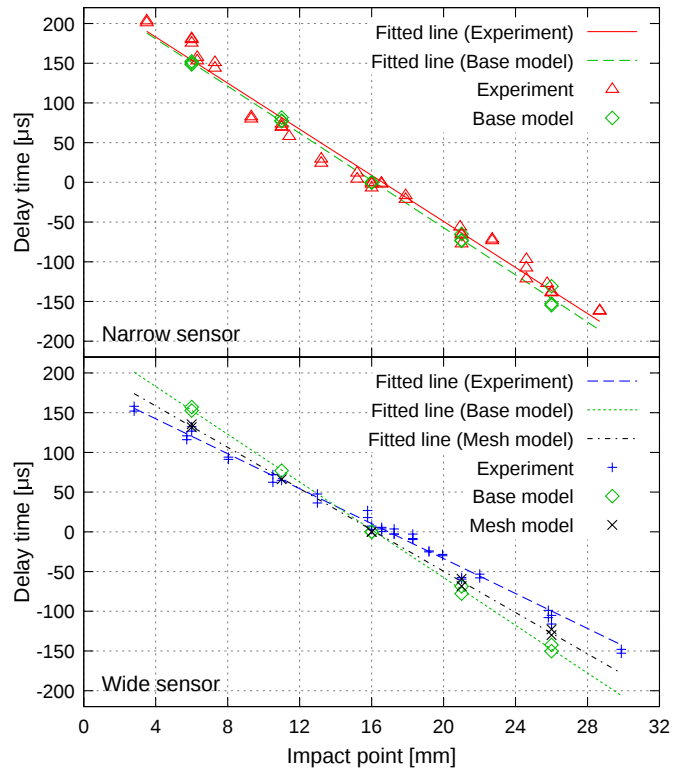


Fig.11: Simulation of delay time (type B)

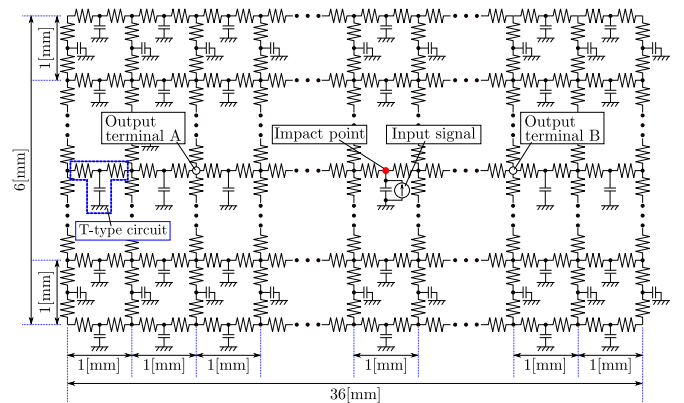


Fig.12: Mesh model of type A (Wide)

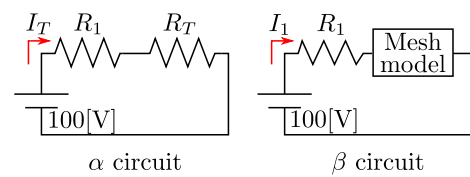


Fig.13: Test circuit

力端子間抵抗値  $R_T$  に一致させる為に、LTspiceXVII を用いて試行錯誤的に 1 段当たりの抵抗値  $R$  を決定する。図 13 に示すような 100[Ω] の抵抗  $R_1$  と出力端子間抵抗値  $R_T$  を直列接続した回路  $\alpha$  と、抵抗  $R_1$  と Mesh model を直列接続した回路  $\beta$  を用意し、それぞれ 100[V] を印加する。この時、回路  $\beta$  の抵抗  $R_1$  に流れる電流  $I_1$  を回路  $\alpha$  に流れる電流  $I_T$  に等しくなるよう Mesh model の 1 段当たりの抵抗値  $R$  を設定する。次に 1 段当たりの静電容量値  $C$  を求める。センサ 6×36[mm] を 1[mm] 四方に分割した数  $a$  は 216 段であり、全体の静電容量値  $C_T$  を  $1/a$  倍したものが 1 段当たりの静電容量値  $C$  である。提案モデルと同様に遅延時間のシミュレーションを行い、結果を図 11 に合わせて示す。センサの幅が広がった場合、Base model よりも提案した Mesh model の方が実験値に近いモデルであることが示された。

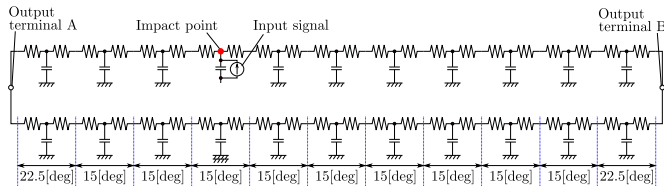


Fig.14: Loop model of type B (Narrow, Wide)

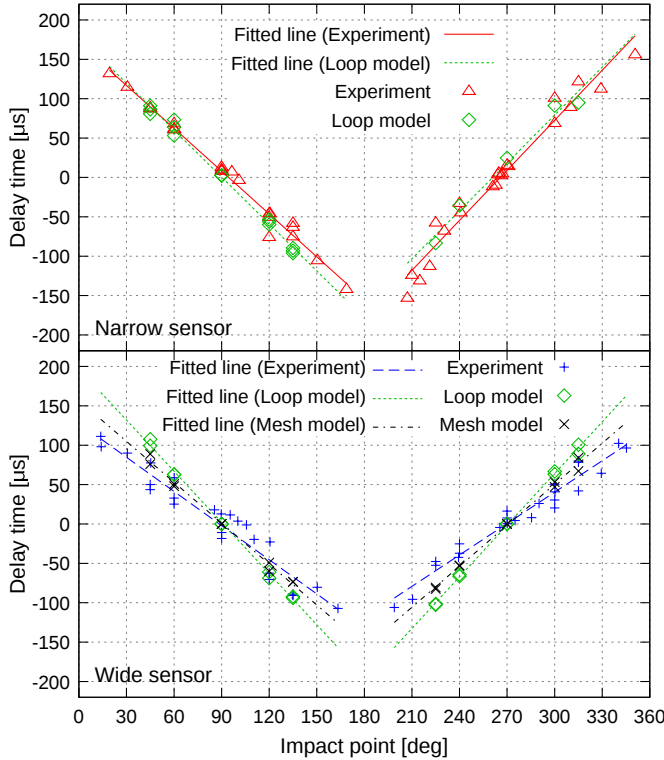


Fig.15: Simulation of delay time (type B)

#### 4.2 type B のモデル化

type B のように円筒の全周に塗布されたセンサのモデル化は行われていない。その為、初めにモデルの提案を行う。円筒の全周に塗布されていることから、Base model を図 14 のようにループ状に拡張した Loop model が相当すると考えた。図 14 では 11 段の T 型 RC 回路の Base model を 2 つ並列に接続した。本モデルでは 1 段の T 型 RC 回路が 15[deg] または 22.5[deg] 分の抵抗値と静電容量値を担うこととなる。type B(Narrow, Wide) の各パラメータは Base model と同様の方法で設定した。

モデル検証の為に、出力端子 A から 45, 60, 90, 120, 135, 225, 240, 270, 300, 315[deg] 地点のシミュレーションを行い、その遅延時間を図 15 に示す。type B でも幅の狭い type B(Narrow) は実験値と一致したが、type B(Wide) は大きな誤差が生じてしまう。そこで同様に type B(Wide) を Mesh model での近似を試みた。type B(Wide) の Mesh model を図 16 に示す。同様に 1[mm] 四方でセンサを分割していく。円筒の半径  $r$  は 7.5[mm] であるため、円周方向は 7.5[deg] 刻みに分割することでその円弧が約 1[mm] となり、1[mm] 四方に分割することが出来た。各パラメータは type A の Mesh model と同様の方法で設定した。Mesh model のシミュレーション結果を図 15 に合わせて示す。type A と同じく、Mesh model の方が実験値に近いモデルであることが示された。

#### 4.3 2次元への拡張

本論文では、type A(Narrow, Wide) と type B(Narrow, Wide) という 1 軸センサと小さな 2 次元センサを試作した。Wide sensor の場合、本論文では出力端子間を結ぶ線  $L$  上のみを加圧し、そのシミュレーションを行なったが、その線  $L$  から外れた位

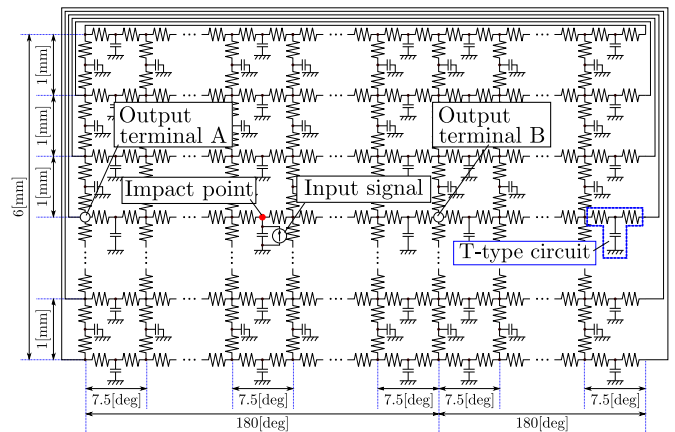


Fig.16: Mesh model of type B (Wide)

置を加圧することも可能である。実際に、type A(Wide) の Mesh model において、線  $L$  上にある出力端子 A から 21[mm] 地点とその点から垂直に 3[mm] 外れた位置にある T 型 RC 回路への加圧シミュレーションを行なった。加圧点と各出力端子間の最短距離が異なるため両者の遅延時間に差が生じると考えられ、シミュレーションでも 0.1 ~ 0.9[μs] 程度の差が生じた。したがって、Mesh model がさらに大きな 2 次元センサのモデルとなる可能性があり、さらに大面積のセンサを試作し確認を行う。

### 5 結言

コーティング式触覚センサのロボットハンドへの応用を考え、指を模した円筒の長さ方向と円周方向にそれぞれ 1 軸センサを塗布し、性能実験を行い、位置検出センサとして機能することを示した。次に、それらのモデルによる検証を行い、1 軸モデルでは幅が広い場合に実測値と大きな差が生じた。そこで、網目状の新たな T 型 RC 回路を用いた分布定数回路モデル “Mesh model” を提案した。提案モデルと実験値に差が少ないことを示し、その有用性を示した。さらに、提案モデルが 2 次元センサのモデルとなることを示唆した。

今後は 2 次元センサを試作し提案モデルの有用性を確認した後に、ロボットハンドに実装する。

### 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くのご助言を頂き、センサの試作サンプルを製造して頂きましたムネカタ株式会社の海野雄士様、金澤彰裕様、桑田拓弥様、郡司資孝様にこの場をお借りして御礼申し上げます。また、本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究(B)15H02760 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] 白岡貴久, 磯部宏, 稲田誠生, 郭士傑, 向井利春: 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-, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 2L1-3, (2011) .
- [2] 篠田裕之: 柔らかい機械の人工皮膚, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.7, pp.814-817, (2001) .
- [3] 大村吉幸, 鷺坂隆志, 長久保晶彦, 國吉康夫, 尾崎和行: フレキシブル基板に埋め込まれた小型・柔軟触覚センサ, 第 29 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 DVD-ROM, 3L2-2, (2011) .
- [4] 北島諒一, Luis CANETE, 高橋隆行: コーティング式触覚センサの開発 センサモデルの改良, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集, 1P1-N01, (2017) .
- [5] 北島諒一, Luis CANETE, 高橋隆行: コーティング式触覚センサの開発 円筒曲面塗布型センサ実現可能性の検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集, 1A1-N01, (2017) .
- [6] ムネカタ株式会社: PIEZO-ELECTRIC コーティングによる樹脂系圧電素子, <http://www.munekata.jp/eh/>, 2014.8.11
- [7] 里周二, 小堀順二, 原田達哉, 佐伯正盛, 脳本隆之: RC 分布定数回路の集中定数近似によるステップ応答時間誤差, 電学論 A, 118 巻 11 号, (1998) .