

点字読み取り触覚センサ機構：センサ構造と設計パラメータ

On the Design of a Tactile Sensor Segment for Braille Pattern Recognition:
Sensor Structure and Design Parametersアラブシャヒ サイエド アリレザ^{*1}, 江 鐘偉^{*1}(正員), 渡辺 哲陽^{*1}

Sayyed Alireza ARABSHAHI, Zhongwei JIANG (Mem.), Tetsuyou WATANABE

The purpose of this report is to introduce and discuss about the design parameters for a segment of a tactile sensor which will be used to read one dot of a braille alphabet. A single segment of a tactile sensor, consisting of a piezoelectric (PVDF) film sandwiched between two elastic materials, is designed. The design parameters, regarding the geometry and Young's modulus of the sensor are introduced. Simulations are used to investigate the influence of the design parameter on the sensor output, and to show the design criterion in order to obtain enough large sensor output. The results show that 1) for obtaining enough large sensor output, the layer, which is closer to the contact point with the dot of a Braille alphabet, should be "thinner" than and have a "similar hardness" to the other layer, 2) the output of sensor is mostly dependent on the bending effect near the PVDF layer and the Clamped structure can encourage more bending.

Keywords: tactile sensor, braille, design parameter, piezoelectric.

1 はじめに

触覚センサは科学技術の様々な分野において幅広く応用されているセンサである。ロボットや義手への適用を初め、触診による医療診断[1-4]、リハビリ[5]、化粧品などへの応用が行われている[6]。近年様々な触覚センサが開発されているが、その使用目的が特化されているため、触覚センサはどうあるべきかといった設計指針や指標については、ほとんど論じられていない。これに対し、筆者ら[2]は、前立腺触診用の触覚センサ開発のため、設計パラメータとして“やわらかさ”の概念を提案している。しかしながら、構造や材料がセンサ性能に与える影響については調べられていない。

触覚センサには様々な用途があるが、本研究では中でも、点字読み取り[5]などに必要とされる、単純なパターン認識用触覚センサに着目する。点字は、正確なドットパターンであるため、シンプルな構造の触覚センサでよく、設計パラメータの設定・解析に都合が良い。目に不自由な人の中には、年齢を重ねるにつれ、目が見えなくなったり、目に損傷を受けたりした人が数多くいる。点字習得は、大変労力がかかるものであり、子供であっても数年はかかるとされている。このため、高齢者にとって、点字習得は大変困難であり、

連絡先：江 鐘偉，〒755-8611 宇部市常盤台2丁目16-1，
山口大学大学院理工学研究科，
e-mail: jiang@yamaguchi-u.ac.jp

^{*1} 山口大学

点字を読めないでいる人々が数多くいる。ゆえに、訓練なしに点字読み取りを行えるような自動点字読み取り装置（触覚センサ）の開発が望まれている。目の不自由な人には、自らの意志で点字読み取りを行いたいという望みがある。触覚を用いた点字読み取り装置は触れながら操作する装置のため、視覚を用いた装置と比べ、オペレータの意志が尊重される。この意味から、触覚を用いた装置の開発が望まれている。さらに、触覚センサを用いた点字読み取り装置の応用として、触覚を取り戻すためのリハビリ用装置や目が不自由な人の点字習得トレーニング用装置などが考えられる。

本研究では、この点字読み取り用の触覚センサを提案すると共に、その概念設計のための設計パラメータを導入する。数値シミュレーションを用いて、設計パラメータがセンサ性能へ与える影響について解析し、センサ設計のための指針を提示する。

触覚センサは、人間の指の指球付近の感覚受容器と皮下組織を模して、PVDF（ポリフッ化ビニリデン）フィルムセンサと柔軟材料とで、層構造を成す構造とする[7]。PVDF 高分子フィルムは、張力や圧力などの歪みを加えると、誘電分極や電界が発生し（圧電効果）、逆に電圧を印加して分極させると歪みが生じる（逆圧電効果）性質をもつ。さらに環境変化に対して強く、柔軟性を有する上、加工しやすいため、自由に形状を設定することができるという利点を持つ。簡単のため、

解析対象とする点字ドットパターンは、1セグメントとする。PVDF フィルムセンサと柔軟材料が層構造を成すことから、センサ周辺部材の厚さとヤング率に基づく設計パラメータを導入し、センサ感度を解析する。数値シミュレーションを用いて解析し、設計パラメータがセンサ感度に大きく影響することを示す。これに関し、曲げ変形がセンサ感度と深く関係していることを示す。実際の点字読取り用触覚センサは、提案するセグメントを並べたものとなる。このため、セグメントの位置によって、センサ側面の境界条件が、自由、固定またはそれら二つの中間の状態となりうる。このことを鑑み、この二種類の境界条件の両方において大きなセンサ出力が得られるような設計指針を提示する。

2 センサ構造と設計パラメータ

2.1 センサ構造

点字は目の不自由な人が読み書きをするためのシステムであり、盛り上がったドットパターンにより表現される。一般に、どの言語においても、点字ブロックは、六個のドットにより構成され、その組み合わせにより一文字を表す。Fig. 1(a) は日本語の“か”を表す点字ドットを表している。ドットの幾何学的形状とドット間距離は、言語によって多少異なる [8]。また、同じ言語であっても、ドットの大きさには多少ばらつきがある。Fig. 2(a)は、日本語の点字で使用されているドットの幾何学的形状を示している[8]。

Fig. 1(b) に、提案するセンサセグメントの構造を示す。PVDF フィルムセンサを二つの材料 Medium#1 および #2 ではさみこんだサンドイッチ状の層構造である。Medium#1 の下側には、表面効果器が取り付けられている。後に示す解析結果より、PVDF フィルムの曲げ変形はセンサ出力を増大する。PVDF フィルムの曲げ変形を助長しセンサ出力を向上させつつ、点字ドットと確実に接触できるような表面積を持たせるため、突起形状の表面効果器を取り付けている。Fig. 1(b) に示すように、センサが点字ブロックに対して正対している場合、その効果器が点字ドットと接触する。有限要素 (FEM) 解析を行うため、点字ドットの幾何学的形状を単純化する。Fig. 1(b) の概念図をもとに、Fig. 2(b) に示されるような幾何学的形状に関して解析を行う。

2.2 設計パラメータ

本節では、設計パラメータ[2]について述べる。セ

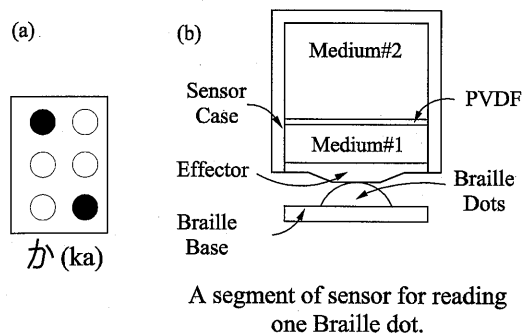


Fig. 1 (a) Japanese braille for “ka”, and (b) concept of sensor segment.

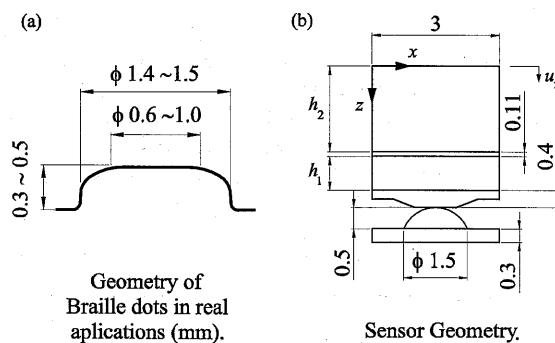


Fig. 2 Geometry of (a) braille dot, and (b) sensor segment.

ンサ設計用に考慮すべきパラメータは数多くある。しかしながら、各パラメータがセンサ感度にどのような影響を与えるのかが不明であるため、全てのパラメータを考慮することは現実的ではない。ここでは、センサの幾何形状と材質に関わる二つのパラメータに着目する。幾何形状に関するパラメータとして、Medium#1 と #2 の厚さの比である“厚さ指標”を以下に定義する。

$$f = h_1/h_2 \quad (1)$$

ただし、 h_1 , h_2 は、それぞれ、Medium#1 と #2 の厚さを表している。

材質に関わるパラメータとして、材料の剛性に着目し、PVDF フィルムセンサを取り囲む材料の“ヤング率比”を以下に定義する。

$$e = E_1/E_2 \quad (2)$$

ただし、 E_1 , E_2 は、それぞれ、Medium#1 と #2 のヤング率を表している。

これら二つの指標をまとめて、一つの指標 S_i として表すことを考える。

$$S_i = \frac{h_i}{E_i} \quad (3)$$

この指標は、人間の触れ感に基づく“やわらかさ”指標であり、Medium# i の厚さとヤング率の比で表される。“やわらかさ”指標と PVDF フィルムセンサの出力 V の関係は、[2]において導出されている“やわらかさ”指標と PVDF フィルム出力との関係を本センサに適用することで、以下のように表すことができる。

$$V \propto ((\alpha_1 + \beta_1) \frac{S_1}{S_1 + S_2} + \alpha_2 \frac{S_2}{S_1 + S_2}) \quad (4)$$

ここで、 α_1 、 α_2 、 β_1 はポワソン比や境界条件などの材質に関わるパラメータである。式(4)からセンサ出力は、 S_i 、すなわち、 e および f に関係があり、センサ周辺部材 (Medium#1, Medium#2 の材質) の構造や材質がセンサ出力に大きく関わるのがわかる。

3 シミュレーションによる解析

本章では、シミュレーションを用いて、設計パラメータである、 e 、 f 、 S_i とセンサ出力の関係を調べ、センサ感度を大きくするための設計指針を見出す。まず、 e を固定し f を変化させた場合、ならびに f を固定し e を変化させた場合についてシミュレーションを行い、設計パラメータとセンサ感度の関係について考察する。ついで、 e 、 f を共に変化させた場合のシミュレーションを行い、十分なセンサ感度を得るために必要な設計パラメータの選択方針について考察する。

3.1 シミュレーション設定

シミュレーションで用いる、センサを構成する材料のパラメータを Table 1 に示す。材料は全て等方線形弾性材料であるとする。シミュレーションには、有限要素解析ソフト ANSYS 7.1 を用いた。シミュレーションでは、センサの基礎部 (Medium#2 の PVDF フィルムと接触していない $z=0$ の xy 面) を $u_2=0 \sim 0.3$ mm だけ一様に押し込むものとした (Fig.2 参照)。また、点字ドットは剛体であると仮定し、効果器が点字ドットに接触している状態を対象として、過渡応答法による接触解析を行った。点字ドットとセンサの接触面におけるすべりを防ぐため、クーロン摩擦モデルを導入する。接触面から離れたところでは四角形要素を用いた要素分割を行い、センサと点字ドットの接触面近くでは三角形要素を用いてより細かい要素分割を行った。出力

Table 1 Material properties.

Location on sensor	Material	Modulus of elasticity (Pa)	Poisson's ratio	Density (Kg/m ³)
Braille dots	Steel	2×10^{11}	0.28	7850
Effector	Rubber	1×10^6	0.495	900
Medium#1	VNR	5×10^6	0.495	950
PVDF	PVDF	2.9×10^9	0.29	1780
Medium#2	VNR	5×10^6	0.495	950

値として、PVDF の電圧出力を用いた。境界条件は以下の2種類を用いた。

BC Free : センサの基礎部 ($z=0$ の xy 面) をケースに固定し、センサの側面 ($x=0$ ならびに $x=3$ の面) はケースに固定しないものとする。この場合、ケースを z 方向に u_2 だけ押し込むと、センサの基礎部上に一樣の力が作用することとなる。これは、センサセグメントが金属箱の中にそのまま入れられている状態に相当する。

BC Clamped : センサの基礎部 ($z=0$ の xy 面) ならびにセンサの側面 ($x=0$ ならびに $x=3$ の面) をケースに固定するものとする。この場合、センサケースを z 方向に u_2 だけ押し込むと、センサの基礎部と側面の両方がその押し込みに従って移動する。これは、センサセグメントが金属箱に貼り付けられている状態に相当する。側面を固定することにより、PVDF フィルムの曲げ変形を助長させるような変形が生じやすくなると考えられる。

3.2 厚さ指標”または“ヤング率比”を固定した場合

まず、“ヤング率比”のセンサ感度へ与える影響を調べるため、 f を 1 に固定し ($h_1=h_2=2$ mm), $e=0.01, 1, 100$ と e を変化させて、シミュレーションを行った。基準となる Medium#1 と #2 の材質を VNR (Vulcanized Natural Rubber) とし、Medium#1 の材質を基準として $E_1=5$ MPa に固定し、Medium#2 の材質を $E_2=0.05, 5, 500$ MPa と変化させることにより e を変化させた。次に、“厚さ指標”のセンサ感度へ与える影響を調べるため、 e を 1 に固定し ($E_1=E_2=5$ MPa), $f=0.4, 1, 2$ と f を変化させて、シミュレーションを行った。Medium#2 の厚さを基準として、 $h_2=2$ mm に固定し、Medium#1 の厚さを $h_1=0.8, 2, 4$ mm と変化させることにより、 $f=0.4, 1, 2$ とした。

Fig. 3, Fig. 5 に、 $f=1$ と f を固定し、 $e=0.01, 1, 100$ と e を変化させた場合の結果を、Fig. 4, Fig. 6 に、 $e=1$ と e を固定し、 $f=0.4, 1, 2$ と f を変化させた場合の結果を示す。Fig. 3, Fig. 4 は境界条件が BC Free

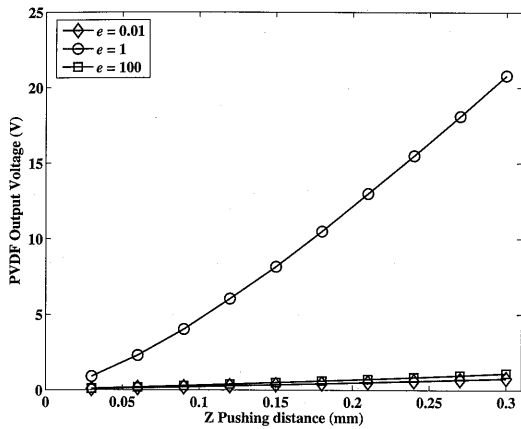


Fig. 3 Sensor output influenced by $e = E_1/E_2$; while $f = 1$. (Boundary Condition : BC Free)

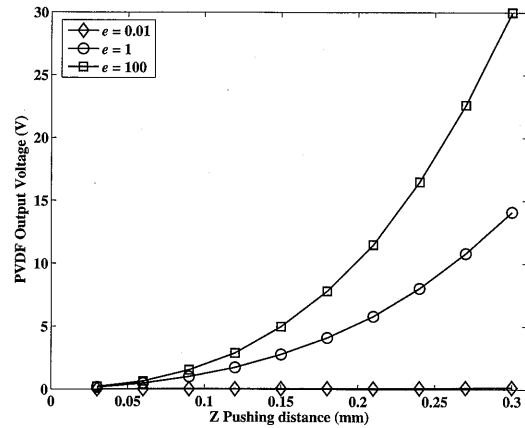


Fig. 5 Sensor output influenced by $e = E_1/E_2$; while $f = 1$. (Boundary Condition : BC Clamped)

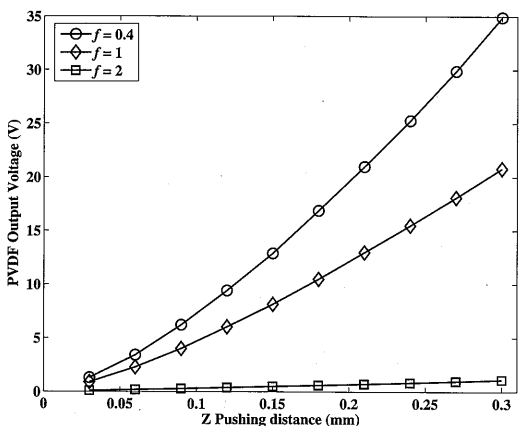


Fig. 4 Sensor output influenced by $f = h_1/h_2$; while $e = 1$. (Boundary Condition : BC Free)

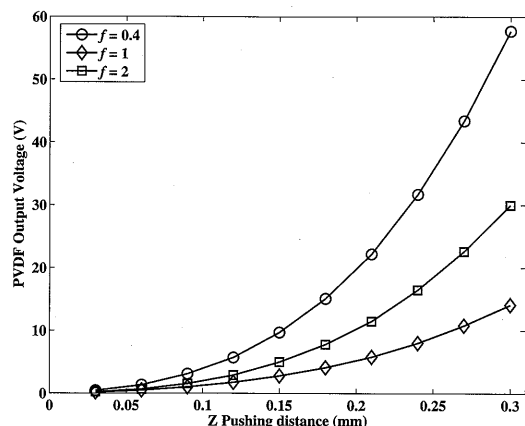


Fig. 6 Sensor output influenced by $f = h_1/h_2$; while $e = 1$. (Boundary Condition : BC Clamped)

の場合、Fig. 5、Fig. 6は境界条件が BC Clamped の場合の結果である。図中、横軸は、 z 方向（紙面縦方向）の押し付け量を、縦軸は、PVDF フィルムセンサの出力電圧を表す。

Fig. 3より、BC Free の場合、押し込み量に関わらず、 e が 1 に近いほどセンサ出力が大きいことがわかる。Fig. 5より、BC Clamped の場合、 e が大きい程、センサ出力が大きいことがわかる。実際の点字読取り用触覚センサは、今回提案したセグメントを並べたものとなる。このことを考慮すると、実際のセンサにおける境界条件は、BC Clamped と BC Free が組み合わさったものになると考えられる。このことから、Medium#1 のヤング率と Medium #2 のヤング率を（材質を変えるなどにより）ほぼ同じにすることで、センサ出力を大きくすることができる。Fig. 4より、BC Free の場合、 f が小さい程センサ出力が大きいことがわかる。Fig. 6より、BC Clamped の場合、 $f = 1$ ではセンサ出力が小

さくなり、 $f > 1$ または $f < 1$ ではセンサ出力が大きくなることからわかる。なお、材料のヤング率（材質）を変えると傾向が変わる場合があることを付記する。ただし、全体としては、Medium#1 の厚さを Medium#2 の厚さと比べ、小さくすることで、センサ出力を大きくすることができる。

以上より、センサ出力は“ヤング率比”、“厚さ指標”の両方に大きく影響されることがわかった。

3.3 “厚さ指標”、“ヤング率比”の両方を変化させた場合

“やわらかさ”指標（“厚さ指標”と“ヤング率比”）ならびに境界条件がセンサ出力へどのような影響を与えるかを調べるため、Table 2 に示すような様々な e と f の組み合わせに対し、センサ出力値を計算した。なお、Table 2 では、Medium#1 ならびに Medium#2 のパラメータの組み合わせを、 S_1 の値の小さい順に示している。ただし、 S_1 が同じ値の場合は、 S_2 の値の大きい

Table 2 Design parameter values for each case.

Case	S_1 (m/Pa)	S_2 (m/Pa)	f	e
1	1.6×10^{-10}	4×10^{-8}	0.4	100
2	1.6×10^{-10}	4×10^{-10}	0.4	1
3	4×10^{-10}	4×10^{-8}	1	100
4	4×10^{-10}	4×10^{-10}	1	1
5	1.6×10^{-8}	4×10^{-10}	0.4	0.01
6	4×10^{-8}	4×10^{-10}	1	0.01

Table 3 Comparison of PVDF outputs in experiments with in simulation.

Case	h_1 (mm)	E_1 (MPa)	h_2 (mm)	E_2 (MPa)	Average PVDF outputs in experiment (V/mm)	PVDF outputs in simulation (V/mm)
I	0.3	3000	5	5	0.094	27.1
II	1	1	5	5	0.041	15.8

順に示している。

結果を Fig. 7, Fig. 8 に示す。このシミュレーション結果を評価するため、同形状のセンサによる実験とシミュレーションを行った。結果を Table 3 に示す。実際の実験ではシミュレーション程大きな出力は得られないことがわかる。ここで、ノイズなどの観点から 30 mV 以上の出力があればセンサとして機能すると仮定する。Table 3 のデータから換算すると、本シミュレーションにおいては、10 V 以上の出力値が得られればセンサとして機能することになる。このことをもとに考察する。

まず、境界条件 BC Free の場合について考察する。Fig. 7 より、 $S_2 \approx S_1$ となる Case2 と Case4 の場合 ($f \leq 1$ ならびに $e \approx 1$ の場合、) PVDF フィルムセンサ出力が大きくなり、 $u_2=0.3$ の場合十分な出力が得られているのがわかる。これは、Medium #1 の硬さを Medium #2 の硬さとほぼ同じにした上で、Medium #1 を Medium #2 に比べ“より薄く”することで、十分なセンサ出力が得られることを意味している。

次に、境界条件 BC Clamped の場合について考察する。Fig. 8 より、 $S_2 \geq S_1$ となる初めの四ケース ($f \leq 1$ ならびに $e \geq 1$) の場合、センサ出力が大きい。特に $u_2=0.3$ の場合は、どの四ケースにおいても十分な出力が得られているのがわかる。これは、Medium #1 の材質を Medium #2 に比べて“より硬く”し、Medium #1 を Medium #2 に比べ“より薄く”することで、大きなセンサ出力が得られることを意味している。 $S_2 < S_1$ となる残りの二ケースでは、センサ出力が小さくなっていることがわかる。

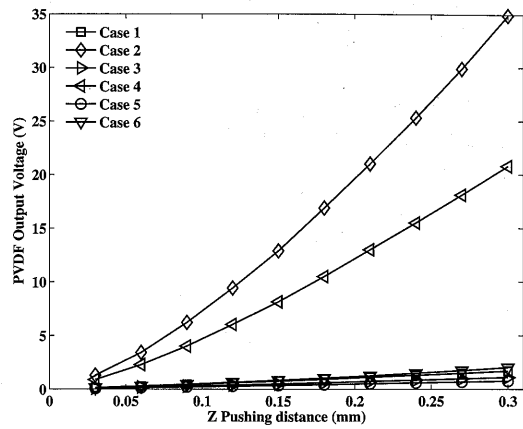


Fig. 7 Sensor output for different cases of simulation. (Boundary Condition : BC Free)

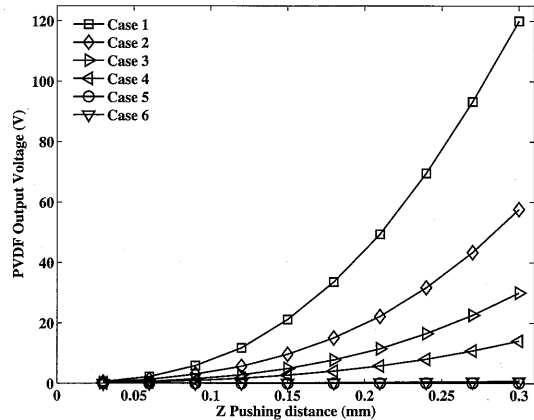


Fig. 8 Sensor output for different cases of simulation. (Boundary Condition : BC Clamped)

Fig. 7 と Fig. 8 を比較すると、境界条件 BC Clamped の場合の方が、境界条件 BC Free の場合よりも大きなセンサ出力が得られていることがわかる。境界条件 BC Free の場合、押し込み量とセンサ出力との関係が線形に近い一方で、境界条件 BC Clamped の場合、押し込み量が大きくなるにつれて、センサ出力が急に上昇する。これは、PVDF フィルム曲げ変形がセンサ出力に大きな影響を及ぼしているのではないかと考えられる。このことを調べるため、センサセグメントの変形概要を Fig. 9 に示す。Fig. 9 (a) が BC Free, Fig. 9 (b) が BC Clamped の場合の結果である。Fig. 9 からわかるように、BC Free の場合、PVDF フィルムの曲げ変形がほとんど無いのに対し、BC Clamped の場合、曲げ変形が誘起されていることがわかる。このことから、曲げ変形がセンサ出力に大きく関わっていることがわかる。前節の Fig.3 と Fig.5 では、 $f = e = 1$ の場合、BC Clamped の場合よりも、BC Free の場合の方が、セン

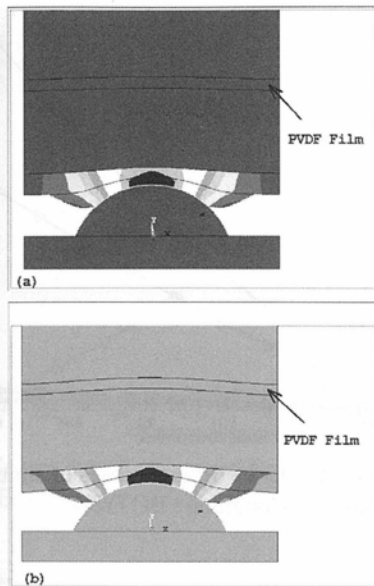


Fig. 9 Deformation of PVDF film for (a) BC Free and (b) BC Clamped.

サ出力が大きいという結果を得ている。Medium#1 と Medium#2 に同じ材質で同じ厚さの材料を使っているため、BC Clamped の場合において、曲げ変形が誘起されにくくなったと考えられる。なお、曲げ変形は、接触領域の構造にも依存する。本センサでは、効果器を接触領域に取り付けることにより、PVDF フィルムセンサの曲げ変形を助長し、これにより点字ドットを読みやすくしている。

実際の点字読み取り用触覚センサは、今回提案したセグメントを並べたものとなる。このことを考慮すると、実際のセンサにおける境界条件は、BC Clamped と BC Free が組み合わさったものになると考えられる。このことから、センサ性能が高いセンサを構築するためには、Table 2 の Case2 ($f < 1$, $e \approx 1$) のようなセンサ構造が望ましいと言える。言い換えれば、Medium#1 と Medium#2 の硬さをほぼ同じにした上で、Medium#1 を Medium#2 に比べ”より薄く”することでセンサ性能の良いセンサを構築できる。

4 結論

本論文の結果をまとめると以下のとおりになる。

- 単一の点字ドットを読み取るための触覚センサセグメントを開発した。
- 数値シミュレーションにより、提案したセンサセグメントのセンサ感度は、PVDF フィルムを取り巻く二つの層の厚さの比、材料のヤング率の比、それらの比により構成される“やわらかさ” S_i に

依存することがわかった。

- BC Free の境界条件では、Medium#1 (点字ドットとの接触面に近い方の層) と Medium#2 (もう一つの層) の“やわらかさ” S_i をほぼ同じにすることでセンサ性能の良いセンサが得られることがわかった。BC Clamped の境界条件では、 $S_2 \geq S_1$ とすることでセンサ性能の良いセンサが得られることがわかった。
- 実際の点字読み取り用触覚センサは、今回提案したセグメントを並べたものとなる。このことを考慮すると、Medium#1 と Medium#2 の硬さをほぼ同じにした上で、Medium#1 を Medium#2 に比べ”より薄く”することでセンサ性能の良いセンサを構築できることがわかった。

本解析は、点字読み取り用触覚センサに対して行ったものであるが、その解析モデルは、点字読み取り用に特化したものでないため、同型の触覚センサに対しても有効である。

(2005年9月25日受付, 2006年5月30日再受付)

参考文献

- [1] M. H. Lee and H. R. Nicholls, Review article- Tactile sensing for mechatronics- a state of the art survey, *Mechatronics*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-31, 1999.
- [2] Z. W. Jiang, S. Chonan, Y. Tanahashi, M. Tanaka and T. Kato, Development of soft tactile sensor for prostatic palpation diagnosis: sensor structure design and analysis, *Shock and Vibration*, Vol. 7, pp. 67-79, 2000.
- [3] Z. W. Jiang, Development of soft tactile sensor using PVDF film for medical palpation diagnosis, *Toyota Research Report*, Vol. 54, pp. 87-97, 2001.
- [4] Z. W. Jiang, K. Funai, S. Chonan and M. Tanaka, Development of soft tribo-sensor using PVDF film for skin surface contour measurement, *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 10, pp. 481-488, 1999.
- [5] M. Tanaka, K. Miyata, T. Nishizawa and S. Chonan, Development of a tactile sensor system for reading Braille: fundamental characteristics of the prototype sensor system, *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, pp. 483-487, 2005.
- [6] M. Tanaka, J. L. Leveque, H. Tagami, K. Kikuchi and S. Chonan, The “Haptic Finger”- a new device for monitoring skin device, *Skin Research and Technology*, Vol. 9, pp. 131-136, 2003.
- [7] K. Miyata, M. Tanaka, T. Nishizawa and S. Chonan, Wearable Sensor System for Reading Braille Using Neural Networks, *Proceedings of the First International Conference on Complex Medical Engineering*, pp. 134-139, 2005.
- [8] 木塚, 中途視覚障害者の触読効率を向上させるための総合的学習システムの開発-点字サイズの評価法、サイズ可変点字印刷システム、学習プログラム・CAIの開発-、平成7年度～平成10年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1999. (<http://www.econ.keio.ac.jp/staff/nakanoy/article/braille/BR/index.html>)