

触覚感性の計測*

(人間の触感と PVDF センサの出力の対比)

田中真美*¹, 長南征二*¹
江鐘偉*¹, 中島英貴*²

Measurement and Valuation of Touch Sensation

(Tactile Perception of Forefinger Compared with PVDF Sensor Output)

Mami TANAKA, Seiji CHONAN
Zhongwei JIANG and Hideki NAKAJIMA

This paper is a study on the valuation and mathematical formulation of human touch sensation. First, the feelings of touch are collected on five natural and chemical fabrics through the SD (Semantic Differential) method questionnaires sent to twenty three examinees. The feelings are valued on each fabric by using the weighted mean on graded factor feelings. The multiple regression analysis is then introduced to represent the overall evaluation of touch on every fabric by a linear function of the valuations on feelings of touch. Next, a soft tactile sensor made of a PVDF (Polyvinylidene Fluoride) film patch and rubber layers is assembled and slid over the same sample fabrics to collect the surface tactile information on the fabrics. The features on the collected data are then extracted by calculating the temporal average of absolute out signal and using the intensity of power spectral density on the medium frequency range. Comparison of the results show that the PVDF sensor well describes the tactile perception of forefingers.

Key Words: Sensor, Measurement, Tactile Perception, PVDF Sensor, SD method, Multiple Regression Analysis

1. 緒言

触覚は視覚と共に人間の生活において必要不可欠な感覚であり、我々は日常の生活の中でいろいろなものに触れ、触覚を通して感じ生活している。特に指先は単に物に触れるという動作だけでなく、撫でる擦るといった触運動をアクティブに行うことによって質感や手触り感などの感性量を収集している。ところで従来、触覚センサと呼ばれるものは圧力を中心とした力学的物理量を検出するもの⁽¹⁾が大部分であり、人間の感性や感性量を計測するセンサ⁽²⁾および評価する方法⁽³⁾は未だ十分に開発されていない。

ポリフッ化ビニリデン(PVDF)フィルムは圧力パルスに対する応答が人間の皮膚の感覚受容器の一つであるパッシブニ小体の出力電圧特性応答⁽⁴⁾に良く似てい

る事が知られている。著者らは近年、PVDFと他の柔軟材を層状に組み合わせせたセンサを試作し様々な接触実験を行った^{(5)~(7)}。その結果、柔らかい対象物またはしこり状の異物が含まれた対象物に本センサを押し当てることで対象物の硬さや異物の存在を特定出来ることを確認しPVDFセンサが触診において有効であり触覚機能を果たすことを明らかにした。

本研究は人間の指の触覚感性とPVDF圧電ポリマーセンサの出力について、綿布類を用いた実験を行い両者を比較検討するものである。布の風合いと評価については一般に客観評価システム⁽⁸⁾を用いた計測が行われている。この風合いの客観評価システムとは引張り・せん断・曲げ・圧縮・表面特性および構造を4種の測定器を用いて測定するもので、全ての測定結果より職業的熟練者の使う表現である風合いを表現するものである。本研究は、人間の触覚感性を単体のPVDFセンサの出力信号を用いて評価するもので、圧電ポ

* 原稿受付 1998年1月28日。

¹ 正員、東北大学大学院工学研究科(☎980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉)。

² 東北大学学部生。

E-mail: mami@rose.mech.tohoku.ac.jp

リマーセンサを用いたアクティブセンシングが指の触動作の代替となり得るかも合わせて検討する。具体的には始めに、人間の指の触覚感性についてSD法によるアンケートをもとに客観的評価として感性情報量を、また主観的評価である手触り感を数値を用いて表わし、両者の対応関係を重回帰分析を用いて定式化する。次に、PVDFフィルムと柔軟材を組み合わせたセンサを製作、センサによって試料表面をなぞり、出力波形を測定、信号処理を行う。得られた結果を人間の感性量と比較し、両者の対応関係を調べるとともに、圧電フィルムセンサを用いたアクティブセンシングが指の触動作を模擬するかどうか、さらにセンサ出力より人間の主観的評価である手触り感の判断が可能であるか否かの検討を行う。

2. 人の触覚感性の計測

始めに人の綿布類に対する手触り感の実験を行い、得られた結果を示す。被験者の24名（男性11名、女性13名）にウール、りんず、ピロード、ちりめんおよびコーデュロイの5種類の布を人差し指で擦ってもらい、それぞれの布について感じたこと、ならびに5種

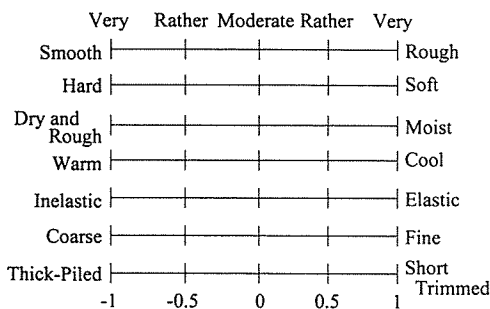


Fig. 1 Questionnaires based on semantic differential method.

類の布で手触り感の良いもの悪いものについてアンケート調査を行った。この際、触覚感性だけで対象物が判断できるよう、布が何であるか見えないよう箱の中に置き、さらに指の擦る方向が手触り感に影響しないよう、指を一定速度で横方向に擦らせることを被験者に指示した。

2.1 SD法を用いたアンケート調査の結果

図1に示すSD (Semantic Differential) 法のアンケート用紙を用いて行った調査の結果を以下に示す。各人に、図の縦方向に置いた7項目の感性量について「とても」、「やや」および「どちらでもない」と言う表現による5段階評価を依頼した。さらに、各評価に対して左からそれぞれ-1,-0.5,0,0.5,1という評価値を対応させ、5種類の布について得られたアンケート結果の各項目について加重平均を求め、それを右側に示す各感性量の評価値とした。得られた結果を表1に示す。

同様に手触り感についても「手触り感が悪い」-「手触り感がよい」と言う項目について5段階のSD法調査を行い、加重平均による評価値を求めた。得られた結果を表2に示す。

次に、各項目間の相関関係を調べるために、以下の式を用いて相関係数 r を求める。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \tag{1}$$

ここに x_i および y_i は各項目の感性評価の評価値、また \bar{x} と \bar{y} は各々 x と y の平均値を表す。表1より求めた相関係数の結果を表3に示す。表より、共通の評価をもたらす正の相関は「弾力の度合い」と「柔らかさ」、および「毛足の短さ」と「冷たさ」間に顕著に

Table 1 Valuations on feelings of touch

	A(Wool)	B(Figured Satin)	C(Velvet)	D(Crepe)	E(Corduroy)
Roughness	0.5417	-0.9375	-0.1250	0.7917	0.1042
Softness	0.1875	-0.2292	0.8125	-0.5417	0.4375
Moistness	0.0417	0.3542	0.500	-0.6667	0.1458
Coolness	-0.2500	0.4375	-0.8125	0.5208	-0.5833
Elasticity	0.0833	-0.4130	0.6667	-0.5208	0.5000
Fineness	-0.417	0.7708	0.1250	-0.3542	-0.2500
Short Trimmed	0.1875	0.9375	-0.875	0.8542	-0.4375

Table 2 Valuations on overall feelings of touch

	A(Wool)	B(Figured Satin)	C(Velvet)	D(Crepe)	E(Corduroy)
Valuation	-0.3393	0.0000	0.5893	-0.4107	0.1786

Table 3 Correlation coefficients of valuations on feelings of touch

	Roughness	Softness	Moistness	Coolness	Elasticity	Fineness	Short Trimmed
Roughness	1.0000	-0.1523	-0.7542	-0.0255	-0.0246	-0.9559	-0.0411
Softness		1.0000	0.7332	-0.9794	0.9799	-0.0514	-0.9638
Moistness			1.0000	-0.5949	0.6135	0.5936	-0.5459
Coolness				1.0000	-0.9959	0.2413	0.9842
Elasticity					1.0000	-0.1940	-0.9887
Fineness						1.0000	0.2300
Short Trimmed							1.0000

Table 4 Correlation coefficients of valuations on overall feelings of touch

	A(Wool)	B(Figured Satin)	C(Velvet)	D(Crepe)	E(Corduroy)
A(Wool)		-0.3638	-0.1214	0.0178	0.3358
B(Figured Satin)			0.0000	0.0296	-0.1512
C(Velvet)				0.1153	0.4846
D(Crepe)					0.3912
E(Corduroy)					

認められ、反対の評価をもたらす負の相関は「冷たさ」と「柔らかさ」、「弾力の度合い」と「冷たさ」、「毛足の長さ」と「柔らかさ」、「毛足の長さ」と「弾力の度合い」、および「細かさ」と「ざらざらさ」間に顕著に認められることが分かる。

以上より、上記の7項目の感性量は以下の3グループに大別される事が分かる。

- a: 毛足が長い、暖かい、柔らかい、弾力がある
- b: ざらざら、粗い
- c: しっとり

次に、上述の項目のどれが主に手触り感に関わっているかを調べる。表2の手触り感に関して対象物間の相関係数を求めた結果を表4に示す。表より、「ピロード」と「コーデュロイ」、「ウール」と「りんず」間にはそれぞれ顕著な正負の相関がある事が分かる。一方表1の評価値についていえば、値の離れているものは感性が相対するものすなわち負の相関、評価値の近いものは感性の類似しているものすなわち正の相関を有すると考えられる。表1でこれら5試料間に同様な相関関係にある感性量を探すと、「ざらざらさ」と「細かさ」の2項目が該当する。これより、手触り感の評価する際には「ざらざらさ」と「細かさ」に注目していることが推察される。

2.2 重回帰分析

人間は綿布類について「柔らかさ」や「ざらざらさ」などの感性情報を総合的に判断して手触り感の良し悪しを定めている。このような因果関係に対する統計的な解析法の一つとして重回帰分析法⁽⁹⁾があげられる。重回帰分析法では、1つの目的変数 y を p 種の説明変数

x_1, x_2, \dots, x_p の線形結合

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \quad (2)$$

で表す。ここに、 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ は偏回帰係数である。目的変数 y の標本値 y_λ に対する回帰推定値 \hat{y}_λ の差 $\epsilon_\lambda (= y_\lambda - \hat{y}_\lambda)$ を予想誤差と呼び、偏回帰係数 b_p は予想誤差 ϵ_λ の平方和 S が最小となるよう決定される。ここに

$$\begin{aligned} S &= \sum_{\lambda=1}^N \epsilon_\lambda^2 = \sum_{\lambda=1}^N (y_\lambda - \hat{y}_\lambda)^2 \\ &= \sum_{\lambda=1}^N [y_\lambda - (b_0 + b_1x_{1\lambda} + b_2x_{2\lambda} + \dots + b_px_{p\lambda})]^2. \end{aligned} \quad (3)$$

本式を用いた場合、 λ 番目の説明変数 $x_{1\lambda}, x_{2\lambda}, \dots, x_{p\lambda}, \lambda = 1, 2, \dots, N$, に対する目的変数の推定値 \hat{y}_λ は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \hat{y}_1 &= b_0 + b_1x_{11} + b_2x_{21} + \dots + b_px_{p1}, \\ \hat{y}_2 &= b_0 + b_1x_{12} + b_2x_{22} + \dots + b_px_{p2}, \\ &\vdots \\ \hat{y}_N &= b_0 + b_1x_{1N} + b_2x_{2N} + \dots + b_px_{pN}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

一般に得られた重回帰式の評価には重相関係数を計算する。重相関係数 R は目的変数の標本値 y_λ と回帰推定値 \hat{y}_λ の相関係数であり、以下のように定義される。

$$R = \frac{\sum_{\lambda=1}^N (y_\lambda - \bar{y})(\hat{y}_\lambda - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{\lambda=1}^N (y_\lambda - \bar{y})^2 \sum_{\lambda=1}^N (\hat{y}_\lambda - \bar{\hat{y}})^2}}, \quad (5)$$

ここに、 \bar{y} と $\bar{\hat{y}}$ は各々 y_λ と \hat{y}_λ の平均値を表す。以下の計算では $\lambda = 1, 2, \dots, 5$ を各々ウール、りんず、 \dots , コー

デュロイとし、表1に示す各試料について得られた感性量評価値を説明変量 $x_{p\lambda}$ として、また手触り感を目的変量として重回帰分析を行う。ここで、前述のように綿布類の感性量は3つのグループ a,b,c に大別されたことより、以下では説明変量の数を $p = 3$ として計算する。説明変量 x_1, x_2, x_3 には、前節の3グループ a,b,c に関係した感性量よりそれぞれ一つを選ぶ。これらの説明変量に対して重回帰分析を行い、得られた偏回帰係数 b_0, b_1, b_2, b_3 ならびに重相関係数 R を表5にまとめて示す。選択された3つ説明変量に対してそれぞれ高い重相関係数が得られているが、特に値の大きいのは説明変量を「毛足の長さ」、「細かさ」、「しっとりさ」とした場合である。このときに得られた回帰式は

$$\hat{y} = 0.1441 - 0.6546x_1 + 0.8088x_2 - 0.4401x_3. \quad (6)$$

各試料について、表1に示す「毛足の長さ」、「細かさ」、「しっとりさ」の評価値を用いて求めた手触り感の推定値 \hat{y}_λ と表2に示す手触り感のアンケート結果(標本値 y_λ)、ならびに予想誤差 $\epsilon_\lambda = y_\lambda - \hat{y}_\lambda$ をまとめて表6に示す。いずれも予想誤差は小さく、重回帰分析で得られた回帰式は綿布類に対する人間の手触り感を良く表していると言える。

3. PVDF 触覚センサを用いた実験ならびに信号処理

次にポリフッ化ビニリデン PVDF フィルムを受感材とした触覚センサを製作し、センサを用いて対象物の綿布類表面を走査、得られた出力について信号解析を行った結果を以下に示す。

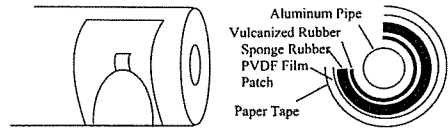


Fig.2 Geometry of PVDF piezopolymer sensor.

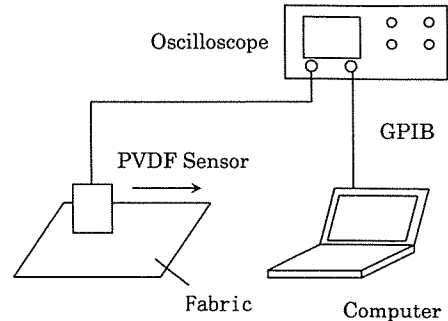


Fig.3 Experimental setup.

図2に、実験で使用したセンサの形状と構造を示す。直径9mmのアルミパイプに表面に厚さ1mmの天然加硫硬質ゴム、および厚さ3mmのスポンジゴムを順に巻き、その上に直径12mmの円形受感部を持つPVDFフィルムを接着した。さらにセンサ感度を向上させる目的でセンサ表面に人間の指の指紋に対応する表面の粗いように紙テープを巻き付けた。実験装置の概略を図3に示す。センサからの出力信号はオシロスコ

Table 5 Partial regression and multiple correlation coefficients for various sets of factor variables

Factor Variable x_1	Factor Variable x_2	Factor Variable x_3	b_0	b_1	b_2	b_3	R
Softness	Roughness	Moistness	0.0049	1.4424	-0.9618	-1.6198	0.9787
Softness	Fineness	Moistness	-0.0685	1.4692	1.1066	-1.2817	0.9948
Coolness	Roughness	Moistness	0.0079	-0.9615	-0.8361	-0.9840	0.9396
Coolness	Fineness	Moistness	-0.0517	-1.3066	1.3647	-1.2025	0.9997
Elasticity	Roughness	Moistness	0.0412	0.9116	-0.6248	-0.6459	0.9410
Elasticity	Fineness	Moistness	0.0155	1.2209	1.0403	-0.8420	0.9944
Short Trimmed	Roughness	Moistness	0.1824	-0.6189	-0.6608	-0.6228	0.9814
Short Trimmed	Fineness	Moistness	0.1441	-0.5646	0.8808	-0.4401	0.9998

Table 6 Propriety of multiple regression analysis

	Regression Estimator \hat{y}_λ	Sample Value y_λ^*	Error ϵ_λ
A (Wool)	-0.3340	-0.3393	-0.0053
B (Figured Satin)	-0.0021	0.0000	0.0021
C (Velvet)	0.5979	0.5893	-0.0086
D (Crepe)	-0.4081	-0.4107	-0.0026
E (Corduroy)	0.1641	0.1786	0.0145

* Table 2

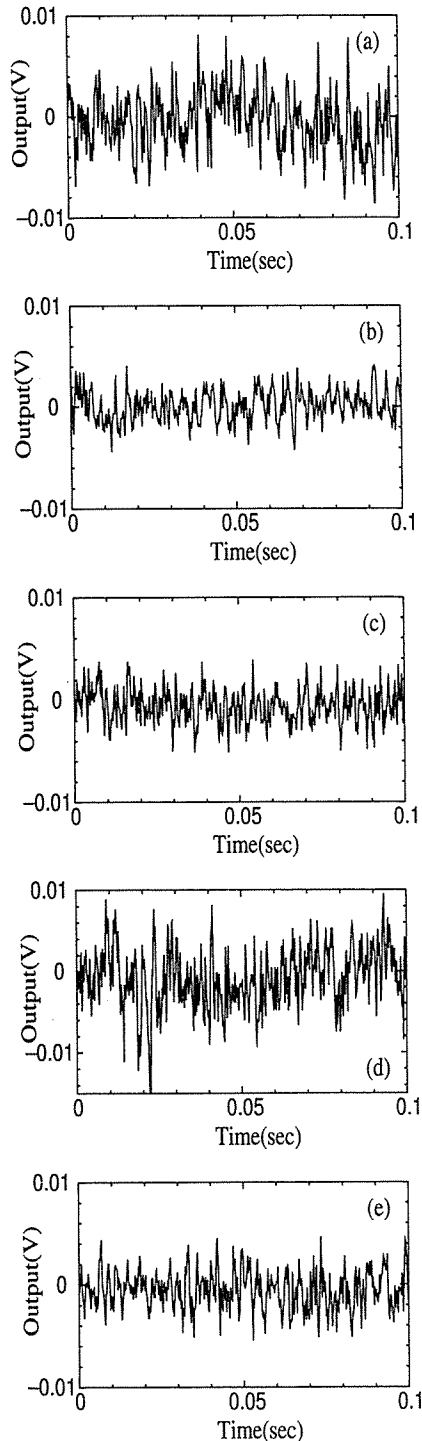


Fig.4 Output of PVDF sensor on (a)wool, (b)figured satin,(c)velvet,(d)crepe and (e)corduroy.

ープ (HITACHI VC-7524) 経由で GPIB ボード (ADTEK SYSTEM SCIENCE AXP-GP01) を経てコンピュータに転送され、信号処理のための元信号としてデータ保存される。センサは人間の手で把持され、一定の速度と押し付け力が維持されるよう加減されながら試料表面上を掃引される。なお、データ測定時のサンプリング周期は 0.2msec とし、データ測定点を 500 個とした。得られたセンサ出力波形の一例を図 4 に示す。PVDF フィルムからの出力の大きさを評価する方法としては信号の最大値を読み取る方法があるが、PVDF は応力速度に比例した電流出力を発生することより瞬時に加わる外乱に対しては大きな信号が生じる。このため、データの最大信号値には大きな誤差が含まれるものと思われる。このことに鑑み、本解析では式 (7) に示すように PVDF 出力の絶対値の測定時間域 (0.1sec) における平均値 I_k を求め、それをセンサ出力とした。データは 3 回読み取り、得られた平均値 I を最終的にセンサの出力値とした。すなわち

$$I = \frac{1}{k} \sum_{k=1}^3 I_k \quad (7)$$

ここに

$$I_k = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N |V_k(n)| \delta t = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |V_k(n)|,$$

$$T = N \delta t, N = 500, \delta t = 0.2 \text{msec}.$$

各試料について得られたデータの信号処理結果を表 7 に示す。表より、ウールやちりめんはセンサ出力が他の布より大きいことが分かる。表 7 の結果を表 1 に示す綿布類の感性量に関する評価値の大小関係と比較すると、「ざらざらさ」とは同一の大小関係、「細かさ」とはほぼ逆の大小関係にあることが分かる。これらの感性量は前章 2.1 のグループ b に分別されている。そこで、表 7 のセンサ出力値と表 1 のこれら 2 項目の評価値の相関係数を求めてみると表 8 のようになる。明らかに PVDF センサの出力はグループ b のこれら感性情報量と強い相関のあることが分かる。表 1 の「ざらざらさ」の評価値と表 7 のセンサ出力値、ならびにそれらの回帰式を参考に図 5 に示す。

Table 7 Output of PVDF sensor	
Fabrics	Sensor Output I
A (Wool)	0.000246
B (Figured Satin)	0.000129
C (Velvet)	0.000150
D (Crepe)	0.000282
E (Corduroy)	0.000161

Table 8 Correlation of sensor output and valuation of touch feeling on Group b

	Roughness	Fineness
Correlation	0.9026	-0.7658

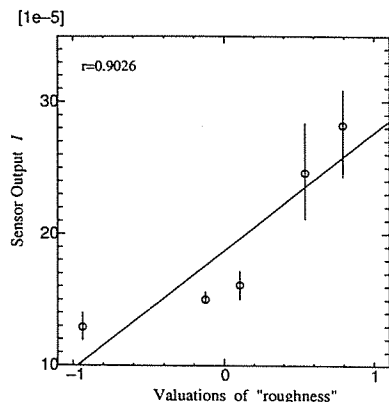


Fig.5 PVDF sensor output versus valuation of roughness given in Table 1. —,Regression line.

次に、センサの出力波形に対して周波数分析を行いパワースペクトルを求める。図4のセンサ出力に対するパワースペクトルを図6に示す。図より、いずれの試料についてもパワースペクトルは2000Hz以下に主に分布する事が分かる。ところで、人間の振動刺激に対する触感の閾値をみると、30Hzの低周波信号に対しては全振幅20μmの信号を識別できる一方で、200Hzの振動は最小振幅2μmの信号を感知することが知られている⁽¹⁰⁾。このように、人間が手で触って感じる信号は主に中周波域の信号と考えられるので、以下本領域で信号を主に評価することとする。

中・高周波数域に占める中周波域のパワースペクトルの分布比を R_s とすると、

$$R_s = \frac{S_a}{S_b}, \tag{8}$$

ここに、

$$S_a = \sum_{n=f_1}^{f_2} P(f), \quad S_b = \sum_{n=f_1}^{f_3} P(f).$$

上式において $P(f)$ はパワースペクトルを表す。ここでは f_1, f_2 および f_3 を各々100Hz, 500Hz および 2000Hz とした。得られた結果を表9に示す。 R_s の値を表1の評価値と比較すると、「毛足の長さ」と相関係数の強いことが分かる。そこで、「毛足の長さ」が属している表

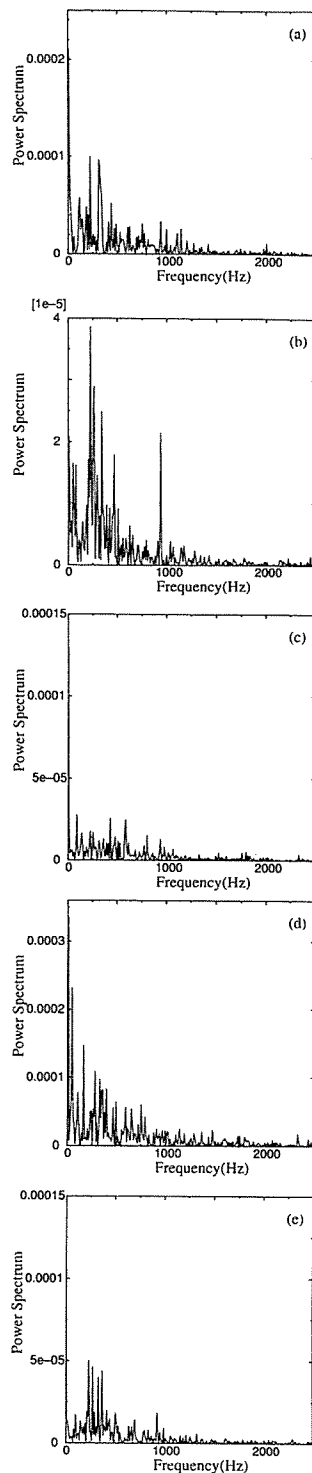


Fig.6 Power spectrum density of PVDF sensor output on (a)wool, (b)figured satin, (c)velvet, (d)crepe and (e)corduroy.

Table 9 Power spectrum intensity of medium frequency range

Fabrics	R_s
A(Wool)	0.5555
B (Figured Satin)	0.6180
C (Velvet)	0.4817
D (Crepe)	0.5724
E (Corduroy)	0.5475

Table 10 Correlation of power spectrum intensity in medium frequency range and valuation of touch feeling on Group a

Softness	Coolness	Elasticity	Short Trimmed
-0.8226	0.8524	-0.8397	0.9059

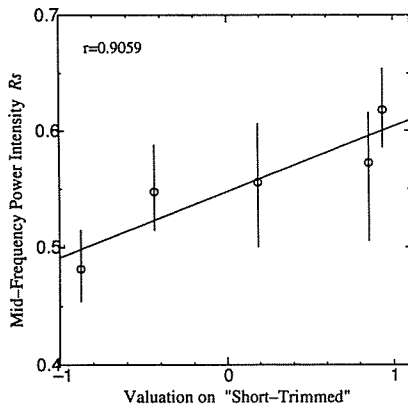


Fig.7 Power spectrum intensity of medium frequency range versus valuation of short-trimmed given in Table 1.
—,Regression line.

1のグループaの感性量評価値と表9の分布比の相関係数を求めてみると表10のようになる。中周波数域の信号強度とグループaの感性量は項目によって符号が異なるが、強い相関関係のあることが分かる。各試料について得られた表1の「毛足の短さ」の評価値と表9の分布比、ならびにそれらの回帰式を図7に示す。

以上により、PVDFセンサ出力の絶対振幅の積分値はグループbの感性量と、さらに中周波数域のパワースペクトル強度はグループaの感性量と相関の強いことが確認された。

4. 結 言

本研究は、人間の指の触覚感性与PVDF圧電ポリマーセンサの出力について綿布類を用いた実験を行い、両者の対応について比較検討したものである。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1)人間の指の触覚感性的についてSD法によるアンケートをもとに客観的評価としての感性情報量を、また主観的評価である手触り感を数値データを用いて表わし、両者の対応関係を重回帰分析法を用いて定式化した。

(2)試料表面をPVDFセンサでなぞり、センサ出力について絶対振幅の平均値と中周波数域におけるパワースペクトラム強さを求め、それらが人間の特定の触覚感性和それぞれ相関の強いことを確認した。

(3)圧電センサ出力を用いて人間の触覚感性的を客観的に予想することが可能であること、また得られた客観的評価を総合し触覚感性的の主観的評価である手触り感を判断することが可能であることを示した。

PVDFセンサを用いたアクティブセンシングは指の触動作の代替となることより、今後は本センサをロボット指⁽¹¹⁾に導入し、人間に代わり手触り感を判断するインテリジェント計測システムを構築する予定である。

文 献

- [1] J.Jurczyk and K.A.Loparo, IEEE Transactions on Robotics and Automation,5-3(1989),359-362.
- [2] 森和男,トライボロジスト,37-2(1992),91-95.
- [3] M.Tanaka, S.Chonan, Z.W.Jiang and T.Hikita, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics13 (IOS Press),(1998),289-292.
- [4] G.M.Shepherd, Neurobiology (Third Edition), (1994),270, Oxford University Press.
- [5] 江他,機械力学・計測制御講演論文集,B(1994),419-422.
- [6] 江他,日本機械力学会第72期通常総会講演会論文集,1(1995),457-458.
- [7] 江他,精密工学会東北支部学術講演会講演論文集1(1995),37-38.
- [8] 江他,精密工学会東北支部学術講演会講演論文集1(1995),37-38.
- [9] 川端季雄,色材,64(3)(1991),156-163.
- [10] 清水豊,人間工学,24-3(1988),157-163.
- [11] M.Tanaka, S.Chonan and Z.W.Jiang, Journal of Intelligent Systems and Structures,7(1996),301-306.