

学術論文

二本指機構を用いたヒトの触覚代行センシングの研究

Substitute Tactile Sensing Using an Artificial Two-finger System

田中 真美	(東北大学)	正員
李 楠	(東北大学大学院)	
長南 征二	(東北大学)	正員

Mami TANAKA	Tohoku University	Member
Nan LI	Graduate School, Tohoku University	
Seiji CHONAN	Tohoku University	Member

This paper is concerned with the comparative evaluation of active tactile sensing using an artificial two-finger system and human tactile sensation. First, paper samples such as newspaper, superfine paper, tracing paper, paper towel and toilet paper are pinched and rubbed by the thumb and forefinger of subject volunteers, and their respective perceptions of softness and roughness are obtained and classified via questionnaire. Next, the same samples are pressed and rubbed by the PVDF tactile sensor mounted on an artificial robotic two-finger system and the output signals from the sensor are collected and stored. Features on the collected data are then extracted by introducing the wavelet analysis and calculating the variance. They are compared with the evaluation of the human fingers. Results of the comparison suggest that the active tactile sensing using the artificial two-finger system well evaluates and describes human tactile sensation.

Keywords: Tactile Sensing, substitute, two-finger system, PVDF sensor, wavelet analysis.

1 緒言

触覚は視覚と共にヒトの生活において必要不可欠な感覚であり、ヒトは日常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さわ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。

ヒトの手は優れたアクチュエータであると同時に優れたセンサでもあるが、近年このようにアクチュエータとセンサの両機能を有するロボットハンドの開発が鋭意進められている[1,2]。これまでロボットアームおよびハンドについては、対象物の安定把握と把持力制御について数多くの研究がなされ、十分滑らかな動きと安定な把持が実現されている[3]。またセンシング機能が付加され、それらの密接な相互作用を通して多機能な認識や行動を実現する研究も行われている[4]。しかしながら、ヒトの手指の代替となりうるほどの機能性や感覚、感性を有する人工指は未だ十分に開発されていない。

触覚センサについても様々の研究がなされており、感圧導電ゴムを使用したものや静電容量の変化を利用した

ものなどが開発されている[2,5]。これらの触覚センサの多くは力や変位等の物理量を検出するものであり、ロボットの力制御や対象物認識のために使用されている。しかしながら、ヒトの触覚感覚を代行し、客観的に評価するセンサおよびその評価法については未だ十分な研究がなされていない。

著者らは、これまでの研究でヒトの手触り感と感覚量の関係について調査しており、重回帰分析を行うことで柔らかさと粗さが触覚感性量と大きく関わっていることを明らかにした[6,7]。さらに高分子圧電体のPVDFフィルムは、圧力負荷に対する出力電圧特性がヒトの真皮内にある感覚受容器のパチニ小体の出力電圧特性に似ていること[8]に着目し、PVDFフィルムをセンサ受感材とする前立腺癌・肥大症判別用センサ、柔軟材の表面形態計測用センサおよび皮膚表面形態計測用センサを開発し、対象物に対してアクティブに押しつける、擦る等のヒトの触動作を考慮することにより、対象物のやわらかさおよび粗さを計測することが可能であることを明らかにした[9,10]。

これらのことより、PVDF触覚センサを搭載した数種類の触動作の実現可能なロボット指を作製することは、単一のフィンガによって柔らかさや粗さ等の複数情報を同時測定可能、さらに感覚の客観評価が可能になること

連絡先： 田中 真美, 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 04, 東北大学大学院工学研究科, e-mail: mami@rose.mech.tohoku.ac.jp

が考えられる。

以上に鑑み本研究は、PVDF フィルムを受感材とした触覚センサを搭載した高精度かつ微小力で把持可能な二本指機構を製作し、物体を把持する、あるいは把持して擦る等の触動作を実現し、得られたセンサ出力とヒトの柔らかさおよび粗さについての感覚との対応を検討するものである。具体的には対象物として5種類の紙を用い、始めにヒトの柔らかさと粗さについての手触り感の調査を行う。次に PVDF フィルムを受感材として用いた触覚センサを装着した二本指機構を製作し、本機構を用いて対象物に対し触動作を行う。さらに、得られたセンサ出力について信号処理を行い柔らかさと粗さの評価パラメータを抽出する。最後に、触覚センサ出力と柔らかさおよび粗さの手触り感との対応について比較検討を行う。

2 ヒトの手触り感の調査

始めにヒトの触動作の確認調査を行った。新聞紙、スーパーファイン用紙およびトイレットペーパーの3種類の紙について、柔らかさと粗さを判別する際どのような判別動作をとるかについて、10人被験者に対してアンケート調査を行った。得られた回答より、柔らかさの判別動作は「押す」(4人)、「押し付ける」(2人)、および「挟む」(4人)であり、動作の違いはあるもののヒトは対象物の柔らかさを把持にかかわる動作で判断していることがわかった。また粗さについての判断動作は全員が「擦る」と回答した。

次に、柔らかさと粗さについての手触り感の実験を行った。被験者は男女各15人(年齢21歳~58歳)であり、平均年齢27歳である。対象物試料としては(A)新聞紙、(B)スーパーファイン用紙、(C)トレーシングペーパー、(D)ペーパータオル、および(E)トイレットペーパーの5種類の紙を用いた。実験では触覚のみで手触り感の判断ができるよう試料を箱の中に置き、各試料の柔らかさと粗さについてSD法を用いた調査を行った。図1にSD法のアンケート用紙を示す。図に示すように、柔らかさと粗さについて各々、「非常に」、「かなり」、「やや」、および「どちらともいえない」という表現を用いた7段階評価で回答依頼した。また、左側からそれぞれ1点~7点と配分し、アンケート調査結果について被験者の評価の平均点を求め、これを感覚量を示す値とした。実験では、前述の確

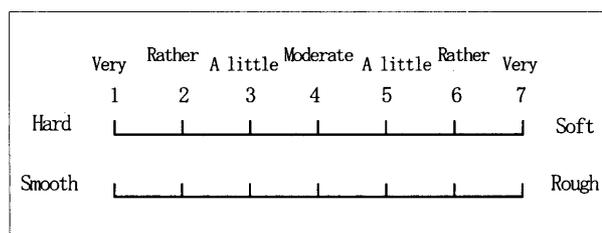


Fig. 1 Questionnaire based on semantic differential method.

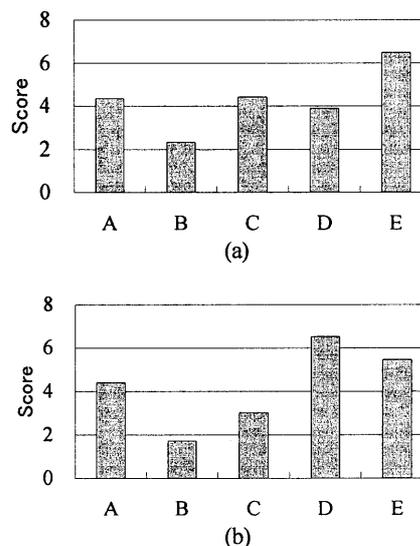


Fig. 2 Score on (a) softness and (b) roughness. A, Newspaper; B, superfine paper; C, tracing paper; D, paper towel; E, toilet paper.

認実験を基に、判別動作として柔らかさについては親指と人差し指で把持するよう、また粗さについては親指と人差し指で擦るよう指示した。得られた結果を図2に示す。手触り感としての柔らかさおよび粗さの評価値を、5種類の紙について示している。図2(a)より、柔らかさの評価値は(E)トイレットペーパー、(C)トレーシングペーパー、(A)新聞紙、(D)ペーパータオル、および(B)スーパーファイン用紙の順に小さくなっていること、また図2(b)より、粗さの評価値は(D)ペーパータオル、(E)トイレットペーパー、(A)新聞紙、(C)トレーシングペーパー、および(B)スーパーファイン用紙の順に小さくなっていることが分かる。

3 二本指機構

銅製のはりの根元にバイモルフ型圧電素子を貼り付けた二本指機構(フィンガ1, 2)を作製した。フィンガ1の先端には力センサを、フィンガ2の先端には触覚センサをそれぞれ装置した。力センサは対象物に対する把持

力を測定するものであり、厚さ 6mm の二枚のスポンジゴム、半導体ひずみゲージ(KYOWA KSP-2-E4)、および厚さ 0.1mm の銅板から構成されている。触覚センサは母材として厚さ 6mm の二枚のスポンジゴムを積層し、その上に厚さ 0.8mm ゴムシートを巻き、さらに受感材料としての PVDF フィルムを重ね、最外部に紙テープを巻いたものである。受感材は長さ 30mm×幅 12mm、厚さ 28 μ m の PVDF 高分子圧電フィルム(東京センサ DT1-028K)を使用している。ロボット指およびセンサの構造の詳細を図 3 に示す。

二本指機構は、バイモルフ型圧電素子で駆動される微小力把持の可能な指機構と、大変位開口を可能とする DC サーボモータとボールねじよりなる開閉機構で構成されている。始めに、DC サーボモータで両フィンガを駆動し、指先が対象物に接触するまで指を移動する。その後バイモルフ型圧電素子に電圧を加え、微小把持力制御を実現する。二本指機構の全体図を図 4 に示す。さらに、計測システムの概略図を図 5 に示す。

触覚センサからの出力信号は電源のノイズをカットするため、カットオフ周波数 70Hz のハイパスフィルタを通した後デジタルオシロスコープで観測するとともに、GPIB 経由でパーソナルコンピュータに転送し信号処理を行う。なお、サンプリング周波数は 40kHz、データ取得時間は粗さを計測する場合は 102.4ms、柔らかさを計測する場合は 204.8ms とした。

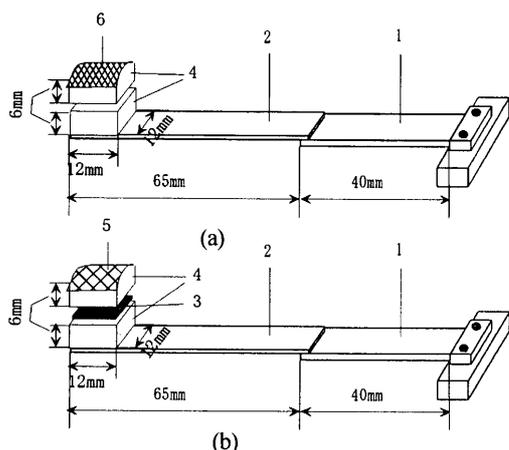


Fig. 3 Geometry of sensors and fingers. (a) Finger1 with force sensor; (b) finger2 with tactile sensor. 1, Piezoelectric bimorph actuator; 2, copper beam; 3, copper plate and strain gauge; 4, sponge rubber; 5, acetate film and rubber sheet; 6, acetate film, PVDF film and rubber sheet.

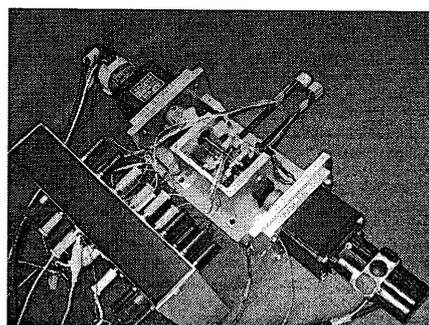


Fig. 4 Configuration of two-finger system.

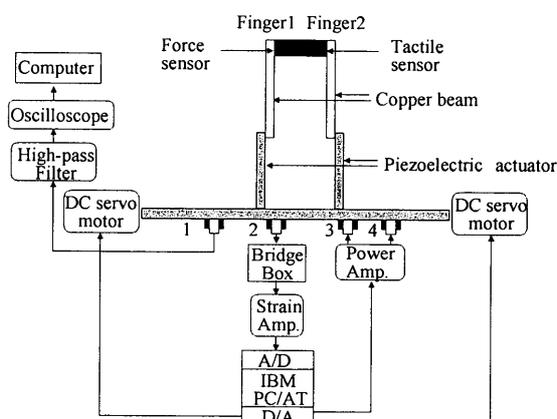


Fig. 5 Experimental setup. Terminal1 for tactile sensor, terminal2 for force sensor, terminal3 for piezoelectric actuator for finger1, and terminal4 for piezoelectric actuator for finger2.

4 柔らかさのセンシング

前述の 5 種類の紙を用いて柔らかさのセンシング実験を行った。まず予備実験として、対象物の柔らかさの参考値として、各紙の曲げ剛さを測定した。具体的には、各紙片より片持ちはりを作製し、その質量と先端変位を測定することにより曲げ剛さを算定した。次に、本研究で作製した二本指機構装置を用いてヒトの動作と同様にロボット指で対象物を把持し、得られたセンサ出力より紙の柔らかさの識別を試みた。

4.1 曲げ剛さの測定

柔らかさの指標の参考として、5 種類の紙を用いて幅 2cm、および長さ 7cm (トイレットペーパーに関しては長さ 5cm) のはりを作製し、それらを一端固定の等分布荷重を受ける片持ちりと考えて先端変位を測定し、曲げ剛さ EI を求めた。単位長さあたり等分布荷重 w を受ける全長 l の片持ちりについて、固定端から距離 l のはり先端

Table 1 Flexural rigidity of sample papers of 2cm width. A, newspaper; B, superfine paper; C, tracing paper; D, paper towel; E, toilet paper.

Sample paper	A	B	C	D	E
$EI (\times 10^{-9} \text{N}\cdot\text{m}^2)$	4.51	42.9	3.79	18.4	0.224

のたわみを y_{\max} とすると, EI は以下の式より算定される。

$$EI = \frac{wl^4}{8y_{\max}} \quad (1)$$

y_{\max} を測定し上式に代入することにより 5 種類の紙の曲げ剛さが求められた。得られた結果を表 1 に示す。表より, 5 種類の紙の曲げ剛さは (E) トイレ用紙, (C) トレーシングペーパー, (A) 新聞紙, (D) ペーパータオル, (B) スーパーファイン用紙の順に小さくなっていることが分かる。この結果と先の実験により得られた柔らかさの手触り感を比較すると同一順位になっている。また曲げ剛さと手触り感のデータの相関係数は-0.86 であった。これより, ヒトの手触り感の柔らかさと曲げ剛さには十分な相関関係のあることが分かった。また, 対象物の曲げ剛さが小さいほど, ヒトは柔らかく感じる事が分かった。

4.2 柔らかさのセンシング実験

二本指機構により対象紙をステップ力で把持し, その際得られたセンサ出力より紙の柔らかさを評価した。2 種類の把持力(a)0.25N, および(b)0.06N のもとに対象紙を各 5 回把持し, 計測を行った。得られたセンサ出力信号の一例を図 6 に示す。図より, 対象紙によってセンサ出力の振幅が異なることが分かる。

以下, センサ出力をデータ処理して特性を抽出し, それより紙の柔らかさの識別が可能であるかどうかを検討する。センサ出力の特性を表わすものとして, 信号の分散を求めることとする。得られたセンサ出力は離散データであるため分散は次式で表わされる。

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^2 \quad (2)$$

ここに, $x(i)$ は i 番目の離散データの値, \bar{x} は離散データの平均値, N は総データ数である。

把持力(a)および(b)について, 得られた信号の分散を 5 回求めその平均値を求めた。結果を図 7 に示す。図より,

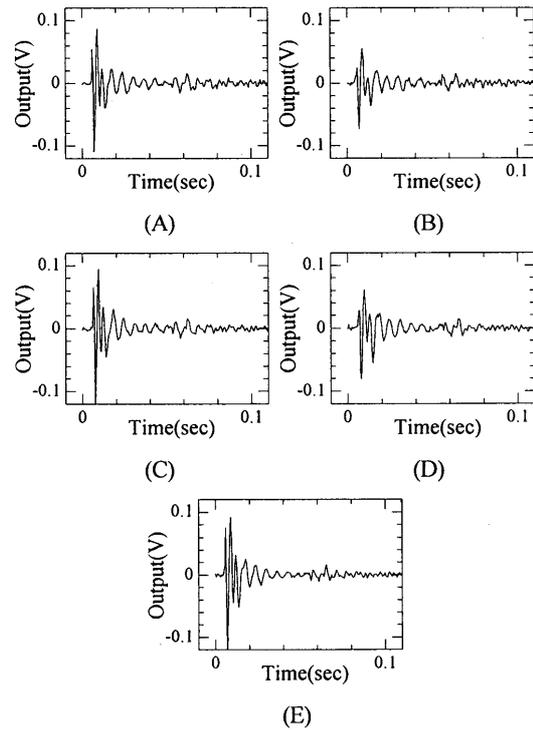


Fig. 6 Output of tactile sensor on (A) newspaper, (B) superfine paper, (C) tracing paper, (D) paper towel and (E) toilet paper. Applied step force to paper is 0.25N.

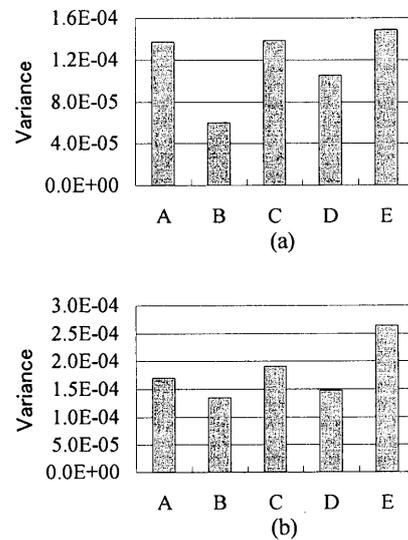


Fig. 7 Variance of sensor output for applied force (a) 0.25N and (b) 0.06N. A, Newspaper; B, superfine paper; C, tracing paper; D, paper towel; E, toilet paper.

各対象紙の分散の大きさの順位と図 2(a)に示す柔らかさについての手触り感の良し悪しの順位が一致していることが分かる。図 8 は, 図 2(a)に示したヒトの柔らかさの感覚値と図 7 の分散の関係, およびそれらの相関係数を示したものである。図より, ヒトの柔らかさの感覚値と

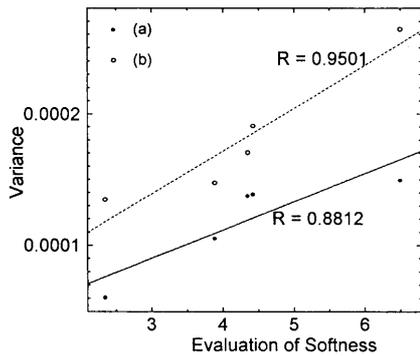


Fig. 8 Variance of sensor output of Fig.7 vs. softness given in Fig.2(a).

本センサシステムを用いて得られるセンサ出力の分散 V には大きな相関性のあることが分かる。

以上により、本論文で示した二本指機構を用いることにより、ヒトの感じる柔らかさ感覚の測定が可能であることが確認された。

5 粗さのセンシング

次に、二本指機構を用いて対象物を擦ることにより、5種類の紙の粗さ判別が可能かどうかを検討した。具体的には始めに、粗さが既知の精密研磨紙を用いて評価のために最適なパラメータの抽出を行った。次に5種類の紙についてこの最適評価パラメータを求め、センサの出力信号とヒトの手触り感の結果を比較した。なお実験では、二本指機構で紙を把持した状態でステップモータとプーリーからなる機構で紙を一定速度で引き上げ、紙表面を擦るという動作を実現した。

5.1 精密研磨紙を用いた実験

実験に用いた5種類の精密研磨紙は、粒度がそれぞれ $3\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $9\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$ および $15\mu\text{m}$ である。力センサが装着されているフィンガ1は精密研磨紙の背面と接触し、触覚センサが装着されているフィンガ2は精密研磨紙の表面に接触している。実験条件では把持力を 0.25N 、掃引速度を 0.312m/s とし、各3回測定を行った。得られた触覚センサ出力の一例を図9に示す。図より、センサの出力信号には様々の周波数成分が含まれていることが分かる。これは精密研磨紙が大きさのそろった粒子で敷き詰められたようになっていない[11]。そこで、ここでは信号処理法としてウェーブレット解析を導入し、センサ信号を各レベルの周波数成分に分解し、粒度と強い相関関係のある周波数成分を探すこととした。

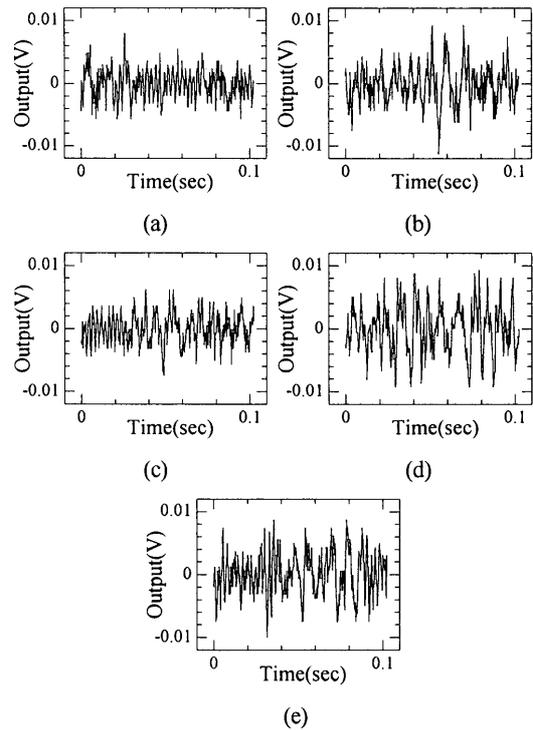


Fig. 9 Output of tactile sensor for sample abrasive papers of grading (a) $3\mu\text{m}$, (b) $5\mu\text{m}$, (c) $9\mu\text{m}$, (d) $12\mu\text{m}$ and (e) $15\mu\text{m}$.

信号の効率的な時間周波数解析を得るには離散ウェーブレット解析[12]を用いられる。離散ウェーブレット変換は

$$d_k^{(j)} = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} \overline{\psi(2^j x - k)} f(x) dx \quad (3)$$

逆変換は

$$f(x) \approx \sum_j \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^j x - k) \quad (4)$$

のようになる。ここで

$$g_j(x) = \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^j x - k) \quad (5)$$

と書き、また

$$f_j(x) = g_{j+1}(x) + g_{j+2}(x) + \dots \quad (6)$$

と書くことにする。ここで整数 j はレベルと呼ばれる。信号 $f(x)$ を $f_0(x)$ とみなすことより

$$f_0(x) = g_1(x) + f_1(x) = g_1(x) + g_2(x) + \dots \quad (7)$$

上式のようにオリジナル信号 $f_0(x)$ は一つの高周波数成分 $g_1(x)$ と一つの低周波数成分 $f_1(x)$ に分解され、さらに $f_1(x)$ はより低い成分に分解される。このデータの分解をウェーブレット解析では多重レベル分解と呼んでいる。なお、本研究ではもっとも簡単な Haar ウェーブレットを

用いて分解を行った。

前節と同様に信号の特性を表わすものとして分散を求めることとする、各レベルの成分の分散は式(8)により表わせる。

$$V_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_j(i) - \bar{x}_j)^2 \quad (8)$$

ここに $x_j(i)$ はレベル j 成分の i 番目離散データ値、 \bar{x}_j はその平均値、 N は総データ数である。

実験により得られた信号に対して多重レベル分解を行い、レベル7までの成分について分散を求めた。得られた結果を図10に示す。さらに、各レベルの分散と粒度の相関係数を表2に示す。結果より、粒度の大きさとレベル7の成分である g_7 の分散に最も大きな相関関係のあることが分かった。これにより、 g_7 の分散 V_7 を対象表面の粗さ状態を認識するための最適評価パラメータとして選択した。

5.2 粗さのセンシング

前節で選択した最適評価パラメータ V_7 を用い、5種類の紙の粗さ認識を行った。実験では掃引速度と把持力を (a)0.312m/s, 0.25N, (b)0.312m/s, 0.06N, (c)0.156m/s, 0.25N と変え、各紙についてそれぞれ5回の測定を行った。前述の実験条件において得られたセンサの出力信号を多重レベル分解によりレベル7まで分解し、レベル7の成分 g_7 の分散 V_7 を求めた。結果を図11に示す。結果より、全ての実験条件において V_7 の順位と図2(b)に示された粗さの手触り感の順位が一致していることが分かる。図12は図2(b)のヒトの粗さの感覚値と図11の分散の関係、およびそれらの相関係数を示したものである。これより、ヒトの粗さの感覚値と本センサシステムを用いて得られたセンサ出力の分散には強い相関関係のあることが分かる。

以上により、本センシングシステムを用いて粗さ感覚の測定が可能であることが確認された。

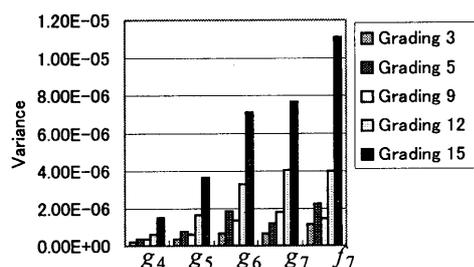


Fig. 10 Variance of g_4 to f_7 signals for grading 3 to 15.

Table 2 Correlation coefficient of variance and grading for g_i ($i=1-7$) and f_7 signals.

g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	f_7
0.0808	0.639	0.789	0.731	0.821	0.851	0.908	0.821

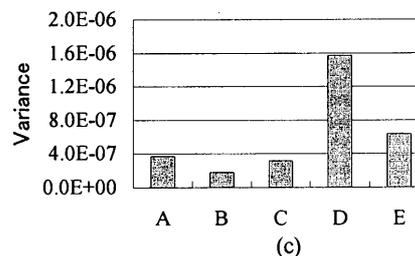
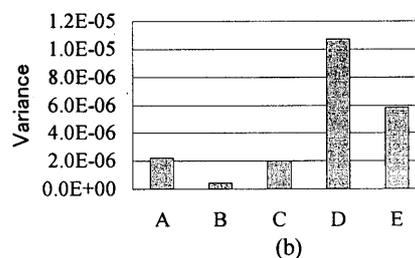
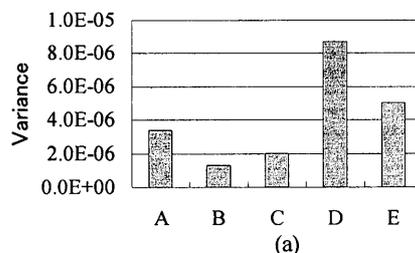


Fig. 11 Variance V_7 of signal g_7 for experimental conditions (a), (b) and (c). A, Newspaper; B, superfine paper; C, tracing paper; D, paper towel; E, toilet paper.

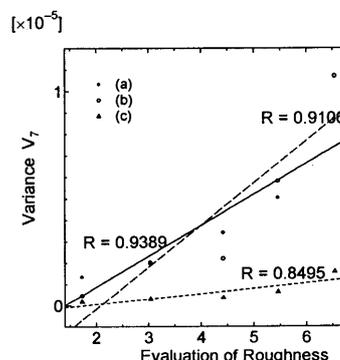


Fig. 12 Variance V_7 of Fig.11 vs. score on roughness given in Fig.2(b).

6 結言

本研究は、高精度かつ微小力で把持可能な二本指機構を製作し、その先端に PVDF フィルムを受感材料とする触覚センサを装着し、物体を把持するあるいは把持し擦るという触動作を実現させ、ヒトの柔らかさおよび粗さに対する手触り感とセンサ出力との対応を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) 5種類の紙を用いてヒトの手触り感の調査を行い、柔らかさと粗さの手触り感を数値にて表わした。

(2) 二本指機構で対象物をステップ力で把持した時に得られるセンサ出力の分散値は、ヒトの柔らかさに対する手触り感との強い相関関係を有することを確認した。

(3) 二本指機構で精密研磨紙表面を掃引し、得られた信号のウェーブレット解析より、信号成分 g_7 の分散値 V_7 が粗さ評価のための最適なパラメータであることを確認した。

(4) 5種類の紙を対象物として掃引実験を行い、得られた g_7 分散値 V_7 はヒトの粗さに対する手触り感と強い相関関係を有することを確認した。

以上により、PVDF 触覚センサを有する二本指機構を代替指として用いることで、ヒトの触覚感覚を代行評価できることを確認した。

(2003年9月26日受付)

参考文献

- [1] P.Dario and Gbuttazzo, An anthropomorphic robot finger for investigating artificial tactile perception, *International Journal of Robotics Research*, Vol.6, pp.25-48, 1987.
- [2] H.R.Nicholls and M.H.Lee, A survey of robot tactile sensing technology, *International Journal of Robotics Research*, Vol.8, pp.3-30, 1989.
- [3] S Chonan, Z W Jiang and M Koseki, Soft-handling gripper driven by piezoceramic bimorph strips, *Smart Materials and Structures*, Vol.5, pp.407-414, 1996.
- [4] 石川正俊, アクティブセンシングとロボットハンド, 日本ロボット学会誌, Vol.11, pp.938-942, 1993.
- [5] Makoto Shimojo, Shigeru Sato, Yoshikazu Seki and Akihiko Takahash, A system for simultaneous measuring grasping posture and pressure distribution, *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.831-836, 1995.
- [6] 田中真美, 長南征二, 江鐘偉, 中島英貴, 触覚感性の計測, 日本機械学会論文集(C編), Vol.65, pp.114-120, 1999.
- [7] M. Tanaka, Measurement and valuation of touch sensation, *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.12, pp.53-58, 2002.
- [8] Gábor Harsányi, *POLYMER FILMS in SENSOR APPLICATIONS*, Technomic publishing Company Inc., p.97, 1995.
- [9] 田中真美, 古林満之, 棚橋善克, 長南征二, 前立腺癌及び肥大症判別用能動駆動センサの開発, 日本機械学会論文集(C編), Vol.67, pp.1032-1037, 2001.
- [10] Mami Tanaka, Development of tactile sensor for monitoring skin conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.108, pp.253-256, 2001.
- [11] 東山篤規, ほか, 触覚と痛み, プレーン出版, p.73, 2000.
- [12] 榊原 進, ウェーブレットビギナーズガイド, 東京電機大学出版局, pp.11-16, 1997.