Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

バイオメカニズム学会誌, Vol. 12, No. 1 (1988)

解　説

皮膚感覚センサによる対象物の認識

川嶋稔夫*

1. はじめに

半導体や計算機などの工学技術が発達する一方、生体機能の解析が進んだ結果、従来困難と考えられていた感覚機能の代行技術が可能になってきた。たとえば視覚代行装置オプタコンの場合、文字パタンをCCD素子で入力し、パタンの濃淡を振動に変換して皮膚から伝達することで盲人が文字を読み取ることができるようになった。また触知ボコーダや超音波歩行補助装置などは耳や目の機能を部分的に代行し、障害者のコミュニケーションや日常活動に利用されている。

これらの場合と同様に、何らかの原因で皮膚感覚の機能が利用できないときには皮膚感覚の代行が必要になる場合がある。例えば、上肢の切断や頸椎の損傷を電動義手やFESなどで機能代行する場合、皮膚感覚をふくめた体性感覚の代行も同時に行なうことが望ましい。

ここで感覚代行を、1) 対象となる情報の検出 2) 情報の質の変換 3) 代替感覚への刺激 という図式で捉えるならば、皮膚感覚の感覚代行技術の前半はロボット工学の分野における「触覚センサ」の研究に重複する部分が多いことがわかる。本解説の目的は皮膚感覚による対象物の認識を感覚代行する際に必要な 1) と 2) の技術を紹介することにある。

本稿ではまず、生理学的、心理学的立場から皮膚感覚における対象物認識のしくみを概観する。つぎに現在までに開発されてきた皮膚感覚センサを紹介し、その特徴を比較する。最後に皮膚感覚センサを使って対象物の認識を行なうための情報処理アルゴリズムについての研究成果の紹介をおこなうことにする。

昭和62年11月4日受付
*北海道大学工学部情報工学科
〒060 札幌市北区北13条西8丁目

2. 皮膚感覚による対象物認識の生理・心理学的側面

生理学的レベルでみると皮膚感覚の系統は異なったモダリティを対象とする複数の受容器群から構成されている[1] (表1)。機械的刺激に関しては順応速度や受容野面積の異なる4種類の受容器が反応し、温度刺激に対しては温覚、冷覚受容器が反応する。痛覚に対しては侵害受容器が応答する。ただし、それぞれの皮膚感覚受容器が対象物の認識にどのような役割を果たしているかは明かではない。岩村ら[2]は体性感覚野に対象物の形の違い(丸と四角)や柔軟性(硬いものと軟らかいもの)に反応する特徴抽出ニューロンが存在することを確認しており、触覚系ではいくつかの特徴やモダリティの異なる情報が組み合わさっているものと考えられる。

表1　皮膚感覚受容器の種類

受容器タイプ		特　　徴
機械受容器	RAI	順応速く高密度
	RAII	順応速く低密度
	SAI	順応遅く高密度
	SAII	順応遅く低密度
温度	温線維	温度上昇に反応
	冷線維	温度低下に反応
侵害受容器		侵害刺激に反応

心理学者のKlanztkyらは皮膚感覚を使った確認実験を行い、どのような皮膚感覚情報が対象物の認識に有効であるかを実験心理学的に調べている[3]。それによると皮膚感覚で平面的に作った線画図形やドットパターンの認識を行なうのは非常に難しいけれども、立体的形状の認識や日用品の識別はかなり正確に識別できるということ

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

である。さらにKrantz[4]の実験では 1) 柔軟性 2) 表面の粗さ 3) 大きさ 4) 温度 5) 角張り具合い の5つの要素が対象物の触知に重要であることが示されている。これらの事実から、ヒトの皮膚感覚では対象物のおおざっぱな形状と材質感の情報 (texture) とによって認識が行われていると考えられる。

Taylorは皮膚感覚系の概念的モデルを図1のように表現した[5]。このモデルでは 1) 対象物の表面に触れたときの関節や腱の受容器の応答と 2) 皮膚と対象物の干渉によって生ずるひずみや振動、温度変化に対する皮膚感覚受容器の応答の組合せが表面触を決定するものと解釈している。

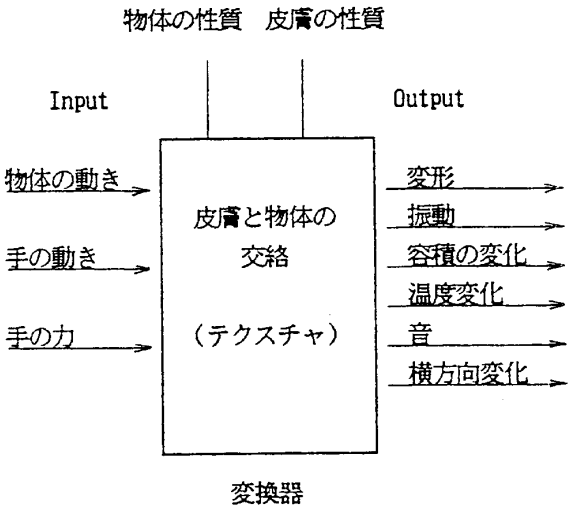


図1　Taylorの触覚モデル[5]

厳密な認識メカニズムはこれからの研究を待たねばならないが、少なくとも複数の感覚モダリティが関与しており、形状情報に加えて材質感情報も重要な役割を果たしていることは間違いないであろう。表2に皮膚感覚と視覚における対象物の認識を比較してまとめておく。

表2　皮膚感覚と視覚における対象物の認識

皮膚感覚	視覚
接触的	非接触的
局所的	全体的
離散的	連続的
複数モダリティ	単一モダリティ

3. 皮膚感覚のハードウエア

3.1 形状認識のための皮膚感覚センサ

ロボットハンドへの応用を目指した皮膚感覚センサ[6][7]の多くは分布圧の測定を目的としている。接触面の分布圧から接触位置や力の方向対象物の局所的形状を求め把握に役立てている。

最も試作例が多いのは感圧導電性ゴムを使ったセンサである。この方式は、高分子材料 (主としてゴム) にカーボンや金属の粒子を分散させて導電性をもたせたものを膜状にし、加圧抵抗変化を測定して圧力を求めるものである[8]。二次元アレイ電極[9] やくし型電極[10] (図2) を用いると二次元センサアレイを構成することができるが、アレイの各素子を分離して測定するためには電流の回り込みを防ぐ測定回路が必要である。感圧導電層に抵抗層を重ね合わせたセンサの圧力重心を求める[11]方式も提案されている。

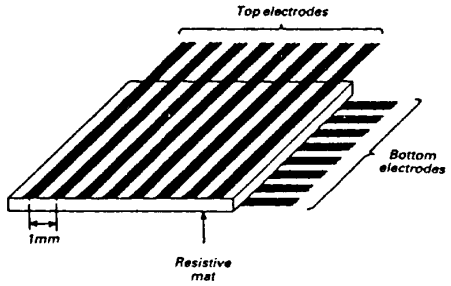


図2　感圧導電性ゴムを用いた分布圧センサ[10]

光学的手法による圧力分布センサも多数の方式が提案されるようになった。基本的にはどれもセンサ接触時の物理的変形を光学的に測定する方法で、ピンをたてて光路をさえぎるもの[12]や、ゴム製の突起パタンの接触面積の変化を利用するもの[13]、光ファィバーを利用したもの[14]などが試みられている。比較的開発例が多いのは突起を多数構成した白色ゴムを透明板を重ね合わせたときに、透明板に側方から入射した光線が接触面で散乱する性質を利用したもので、下方からCCD撮像素子[15][16]やフォトトランジスタ[13]、Optic－RAM[17]などで圧力分布パタンを測定する。突起形状としてはピラミッド形や円錐型が適しているようであ

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

る。また、黒色ゴムを使い光の減衰量をCTの原理を使って測定する方法(図3)[18]も提案されておりセンサの薄さと柔軟性が改善されている。

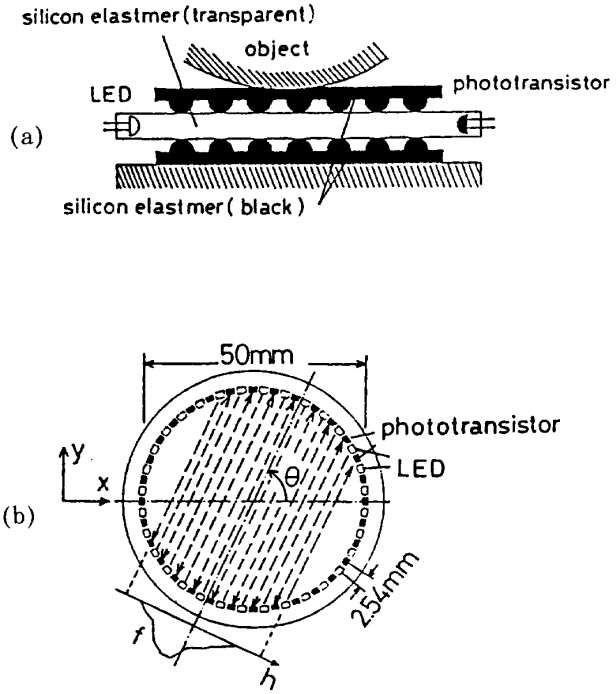


図3　光学式分布圧センサ[18]
(a) 断面図　(b) 上面図

集積回路技術の応用も活発である。Raibartらは集積回路の上に感圧導電性ゴムを重ね合わせて、チップ上でセンサ出力のフィルタリングや畳み込み演算を行わせると同時にシリアル化信号で情報伝送することを試みた[19]。また、シリコンウェファーに深いエッチングを行いトランスデューサを構成する研究も進んでおり、3軸方向の力を検出するセンサ(図4)[20]をはじめいくつかのセンサが開発されている。集積回路型のセンサは米国では大学中心に開発が進められているのに対し、国内ではいまのところメーカー中心なので、大学での集積回路開発設備の充実が望まれる。

圧電性高分子の表面に二次元アレイ電極を構成し、変形時のひずみによって生じた電荷を測定する方法[21]も触覚センサへの応用が検討されている。ただし付随する焦電性のため温度変化によっても電荷が発生するのがひとつの問題点で、この点については3.2で触れる。他にも磁気抵抗効果を測定する方法[22]電気容量を測定する方法[23]、超音

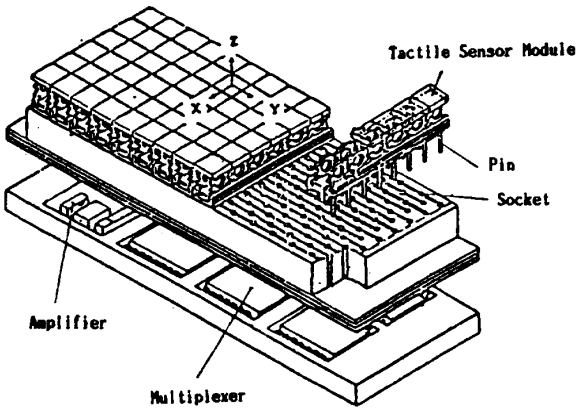


図4　シリコンウェファによる触覚センサ[20]

波の伝播時間から皮膚表面の変形を測定する方法[24]などが提案されている。

これらのセンサを感覚代行の立場から評価するとセンサの薄さや柔軟性など装着上の問題が残されているものの、感度や分解能については水準に達するものが現われつつあるといえる。

3.2　材質感認識のための皮膚感覚センサ

対象物の材質の認識には柔軟性、表面の粗さ、温度応答などが重要なので、これらを皮膚感覚センサで検出する試みがなされている。

対象物の柔軟性を求める方法としては指先の変位量と変形に必要な力の関係からばね常数に相当する値を推定する方法[25]が報告されており、ロボットハンドや電動義手のトルクセンサやエンコーダから求めることができる。

表面の粗さや温度変化の測定は従来から測定方法が確立されているが、皮膚感覚センサへの利用を目指して開発された例はきわめて少ない。Pattersonらは PVDF の表面に指紋を模擬したパタンを構成し対象物の凸凹を測定した[26]。Darioら[27]や伊藤ら[28]は高分子圧電フィルムを使って材質感センサを検出するための複合皮膚感覚センサを試みている。Darioは圧電フィルムを2層構造(図5)にして上層と下層の出力の時間遅れ特性から表面粗さの信号成分と温度変化の成分を分離することが可能であるとしている。伊藤らはバイモルフ構造の圧電フィルムから出力の位相成分も考慮して信号を分離する方法を提案して

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

いる。温度センサの場合表面から数百ミクロンでも離れてしまうと正確な温度特性を測ることがむずかしいので、できるだけ表面に近いところにセンサを埋め込むことがポイントになる。

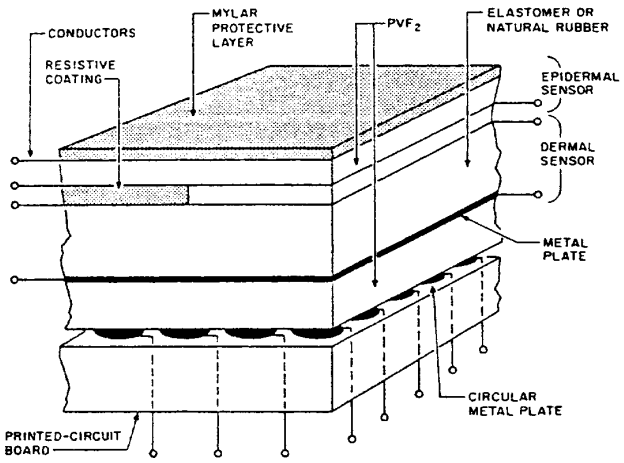


図5　高分子圧電フィルムを用いた複合触覚センサ[27)]

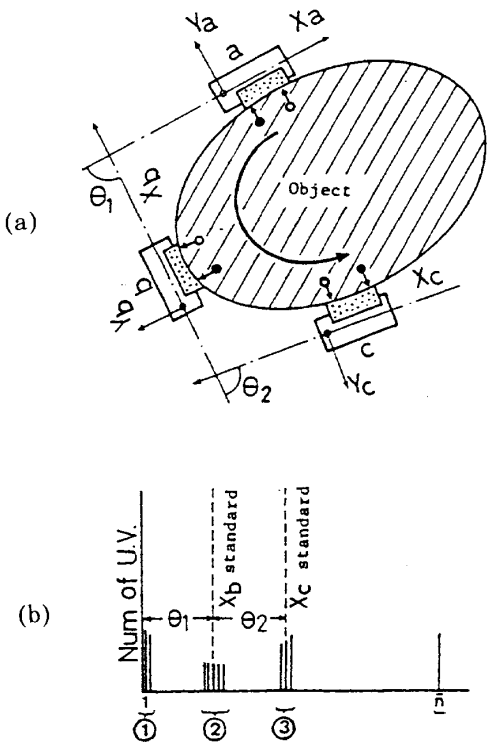


図6　UVD (単位ベクトル分布) 表現による[29)]形状の記述
(a) センサ配置　(b) UVD 表現

4. 対象物の認識のソフトウェア

4.1　形状の認識

形状測定用の圧力分布センサは対象物の部分的形状情報を与えてくれる。そこで視覚と同様に、入力データと形状データベース比較することによって対象物の認識を行なうことができる。ただし、皮膚感覚では対象物の部分形状情報が疎らに得られるだけなので、視覚の認識手法をそのまま適用することはできない。ここでは、皮膚感覚センサを用いて対象物の断面形状を2次元的に分析する方法、3次元的に分析する方法を紹介する。

1) 2次元断面形状の認識

センサが同一平面状にあり対象物の断面を認識すればよい場合、問題を2次元的に扱うことができる。尾崎らは物体の断面形状をUVDとよばれる離散的角度分布で表現して、モデルとのマッチングを行う方法を提案した (図6)[29)]。この例では対象物の部分的形状が何箇所か与えられるので、部分的に隠された輪郭線図形の認識問題と等価に扱うことができる。Gastonらは接触点の位置、エッジ間の角度などを拘束条件として、対応するモデルを解釈木 (interpretation tree) 上で絞りこんでゆく方法を提案している[30)]。

2) 3次元形状の認識

センサが同一平面上ではなく任意の方向から対象物をつかんでいる場合は2次元的マッチング方法は適用できない。Grimsonらは解釈木の手法を用いて多面体の認識を試みた[31)]。一致性の判定条件はセンサが接触しているエッジ間の距離や法線ベクトルのなす角度などの幾何学的拘束条件に基づいて行なう。中村らも類似の拘束条件 (表3) を用いて3次元形状の認識を試みている[32)]。

表3　多面体の要素間の幾何学的拘束条件[32)]

	頂　点	稜　線	平　面
頂点	2点間距離	垂線の長さ	垂線の長さ
稜線		距離と角度	角度
平面			角度

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

4.2　材質感の認識

材質間の認識はセンサ出力を適当な評価尺度に変換して行なうことが多い。尺度は材質感の物理的性質を反映するように選ばれる。

1) 柔軟性の認識

谷江らは図7に示すような装置を用いて対象物をつかんだとき、その硬さを次のような式で評価した[25]。

$$H_d = \frac{X - X'}{\ell - \ell'} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\ell}$$

ここで X= X1 + X2 とし、握るまえの値を X, ℓ 握ったあとを X', ℓ' で表している。他の研究例でも力と変位の関係を利用して硬さを判別している。ただしこれらの方法では対象物の形状が未知の場合や、2種以上の材質が重なっている場合に正しい推定は難しい。ひとつの解決方法としては分布圧センサの圧力パタンの変化を調べる方法が考えられる。硬い材質は片当りしやすいのに対し、軟らかい材質は片当りしにくい性質をパタン計測するのである。

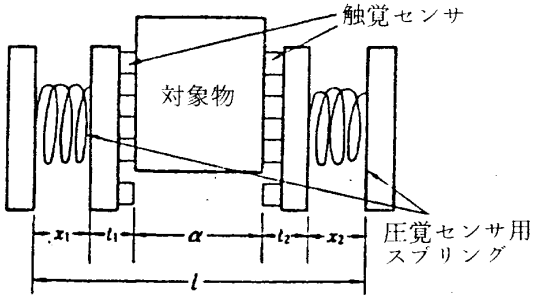


図7　硬さ判定センサ[25]

2) 表面粗さと温度特性の認識

Patterson らは PVDF センサを対象物と擦り合わせたときの振動データをスペクトラム分析し表面粗さの状態を分類した[26]。一方、対象物をなぞったときの振動エネルギーの時間的変動量を粗さの評価値として表した例[33]もある。

温度特性についてはセンサを予熱しておき対象物に接触したときの温度変化の速度を用いて材質の識別を試みた例[33]があり、変化速度の大小が「タオルと真ちゅう板」のような材質の熱的特性の違いを表すと考えられている。

5. おわりに

皮膚感覚センサによる対象物の認識をテーマとして生理心理的研究と工学的研究を紹介してきた。本特集のテーマが四肢の感覚代行であるにもかかわらず皮膚感覚センサの技術紹介が中心になってしまったことはお許しいただきたい。

本稿で紹介してきたロボット用皮膚感覚センサや認識ソフトウェアについては、生体に近い機能をめざして現在も活発に研究が進められている。我々は、これらの研究成果を感覚代行用に応用するために装着方式などの改善をはかるとともに、対象物の認識結果や処理後の情報をどのようにして利用者に提示するかという問題を解決していかなければならない。

義肢や FES などの基幹技術は着実に進歩しており、対象物の認識を含めた感覚代行が必要となる日はそう遠くないであろう。将来、感覚代行技術によって「ポケットの中に手を入れ硬貨を取り出す」というような日常的動作が可能になることを目標に研究を進めていく必要があると思う。

参考文献

1) 岩村吉晃：ヒト触覚受容器の構造と特性，日本ロボット学会誌，2 (5), 438–444 (1984)
2) 岩村吉晃：体性感覚野の階層構造，科学，53 (4), 214–220 (1983)
3) Klatzky, R., Lederman, S. J. & Metzger, V. A. : Identifying objects by touch : An "expert system", Perception & Psychophysics, 37 (4), 299–302 (1985)
4) Krantz, M. : Haptic recognition of objects in children, Journal of Genetic Psychology, 120, 121–133 (1972)
5) Taylor, M. M., Lederman, S. J. & Gibson, R. H. : Tactual perception of texture, In Handbook of Perception, vol. 3, Academic Press 1973. (野呂影勇：表面粗さの感覚情報処理，精密機械 42 (12), 1109–1113 (1976) より引用)

NII-Electronic Library Service

Society of Biomechanisms Japan (SOBIM)

6) 木下源一郎：触覚センサの開発現状，日本ロボット学会誌，2 (5), 46–53 (1984)
7) 谷江和雄：触覚センサ，応用物理，54 (4), 373–379 (1985)
8) Stojiljkovic, Z. & Clot, J. : Integrated behavior of artificial skin, IEEE Trans. BME–24 (4), 396–399 (1977)
9) van Brussel, H. & Belien, H. : A high resolution tactile sensor for part recognition, Proc. 6th RoViSeC, 49–59 (1986)
10) Robertson, B. E. & Walkden, A. J. : Tactile sensor system for robotics, Proc. 3rd RoViSeC, 327–332 (1983)
11) 石川，下条：感圧導電性ゴムを用いた2次元分布荷重の中心位置の測定方法，計測自動制御学会論文集，18 (7), 730–735 (1982)
12) Rebman, J. & Morris, K. A. : A tactile sensor with electrooptical transduction, Proc. 3rd RoViSeC, 327–332 (1983)
13) Tanie, K., Komoriya, K., Kaneko, M., Tachi, S. & Fujikawa, A. : A high resolution tactile sensor, Proc. 4th RoViSeC, 251–260 (1984)
14) Schneiter, J. L., & Sheridan, T. B. : An optical tactile sensor for manipulators, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, 1 (1), 65–71 (1984)
15) Mott, D. H., Lee, D. H. & Nicholls : An experimental very-high-resolution tactile sensor array, Proc. 4th RoViSeC, 241–250 (1984)
16) Begej, S : An optical tactile array sensor, SPIE, 521 Intelligent Robots and Computer Vison, 271–280 (1984)
17) King, A. A. : Tactile sensing array based on forming and detecting an optical image, Sensors and actuators, 8, 49–63 (1985)
18) 川嶋，青木：CTの原理を応用した光学式二次元分布圧力センサ，電子通信学会論文誌，J69-C (12), 1536–1543 (1986)
19) Raibert, M. H. & Tanner, J. E. : A VLSI tactile array sensor, Robotics Research, 1 (3), 417–425 (1982)
20) 小林，篠倉，鴛沢：3分力検出型触覚センサ，第4回センシングフォーラム資料，39–43 (1987)
21) 山崎，西田，宮崎，有本：圧電フィルムを用いたマトリクス触覚センサの開発，第25回計測自動制御学会学術講演会予稿集，JB 29–3 (1986)
22) Vranish, J. M. : Magnetoresistive skin for robots, Robot sensors vol.2 (Ed. Pugh, A.), 99–111 (1986)
23) Boie, R. A. : Capacitive impedance readout tactile image sensor, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics, 370–378 (1984)
24) Grahn, A. R. & Astle, L. : Robotic ultrasonic force sensor arrays, Robot sensors vol. 2 (Ed. Pugh, A.), 297–315 (1986)
25) 谷江：硬さ認識アルゴリズム，計測と制御，14 (3), 268–274 (1975)
26) Patterson, R. W. & Nevill, G. E. : The induced vibration touch sensor, Robotica, 4, 27–31 (1986)
27) Dario, P. & De Rossi, D. : Tactile sensors and the gripping challenge, IEEE Spectrum, August, 46–52 (1985)
28) 伊藤，川嶋，青木：高分子圧電フィルムによる複合触覚センサ，電気関係学会62年度北海道支部大会予稿集，110 (1987)
29) Ozaki, H., Waku, S., Mohri, A. & Takata, M. : Pattern recognition of a grasped object by unit-vector distribution, IEEE Trans. SMC-12 (3), 315–324 (1982)
30) Gaston, P. C. & Lozano-Perez, T. : Tactile recognition and Localization using object models : the case of polyhedra on a plane, IEEE Trans. PAMI-6 (3), 257–265 (1984)
31) Grimson, W. E. L & Lozano-Perez, T. : Modelbased recognition and localization from sparse range or tactile data, Int. J. Robotic Research, 3–35 (1984)
32) 中村，川嶋，青木：触覚情報に基づく物体の認識，第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集(1987)
33) 川嶋，青木：ヒトの皮膚感覚特性に基づく材質感センサの設計，第4回センシングフォーラム資料，45–49 (1987)

川嶋稔夫 昭和57年北海道大学大学院修士課程修了，昭和57年国立苫小牧高専助手。昭和59年より北大工学部助手。現在情報工学科に所属。触覚センサの開発，皮膚感覚による材質感情報の伝達に関する研究に従事。電子情報通信学会，日本ロボット学会等の会員。

NII-Electronic Library Service