

能動的感覚統合による触知覚認識システム[†]

阪 口 豊*

Haptic Recognition System Based on Sensory Integration and Active Perception

Yutaka SAKAGUCHI*

When perceiving an object by touch, human beings integrate various sensory information with observing the object's surface in appropriate manners, such as rubbing, pushing and picking, according to the proceeding of the recognition. This fact suggests that sensory integration and active perception play essential roles in the haptic recognition process.

In light of such characteristics of haptics, the author constructed a haptic recognition system which discriminated feel of touch in a similar manner to human's. The system is equipped with several sensor devices, including a vibration sensor, a friction sensor and a thermal sensor, and can push and rub the object's surface with several values of force and speed. It integrates information from these sensors iteratively with selecting an appropriate sensor and a measurement condition according to the proceeding of the recognition. The algorithms of sensory integration and of active perception are realized by Bayes inference and by an iterative experimental design based on an information criterion, respectively.

The experimental result shows that the system can discriminate subtle difference in feel of touch: It can discriminate 16 kinds of paper and cloth almost perfectly. It is also proved that the system selects appropriate sensors according to the proceeding of the recognition, that is, the active perception algorithm realizes good recognition accuracy by fewer observations than the random observation algorithm. In addition, it is shown experimentally that the characteristics used in the system well correspond to those human beings utilize in haptic recognition. These results suggest that the constructed system is a faithful model of the human haptic mechanism.

Key Words: haptics, active perception, sensory integration, model of human perceptual mechanism, iterative experimental design

1. はじめに

人間は、手で触れて対象を知覚するとき、皮膚に埋め込まれた種々の感覚受容器からの情報を統合することによって総合的に判断を下す。また、押す、つまむ、擦るといったさまざまな触運動を選択的に行うことにより、対象を理解するのに有効な情報を効率的に収集する^{1)~3)}。このような触覚に関わる能動的な感覚を、単純な

皮膚感覚を表わす狭義の触覚と区別して「触知覚(haptics)」と呼ぶ⁴⁾。このことからわかるように、人間の触知覚過程においては、感覚統合と能動的認識が本質的な役割を担っている⁵⁾。

筆者は、このような触知覚過程の特徴に着目し、対象表面を種々の条件で擦りながら数種類のセンサ情報を統合することによって、人間と類似した方法で対象の質感や手ざわり感を識別する触知覚認識システムを構成した。

本システムは、振動センサ、摩擦センサ、温度センサなどを備えたセンサヘッドを対象に擦り合わせることによって対象表面の状態を観測する。このとき、識別動作の進行に応じて適切な測定条件やセンサを選択しながら、これらのセンサからの情報を統合することによって、

[†] '94 ロボティクス・メカトロニクス講演会で発表(1994・6)

* 電気通信大学大学院情報システム学研究科 調布市調布ヶ丘1-5-1

* Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications, Chofu

(Received June 15, 1994)

(Revised November 2, 1994)

少ない観測回数で対象を効率的に識別する。

触覚センサの研究では、これまで種々の原理に基づいたセンサが提案されてきたが^{9)~11)}、それらの多くは、接触の検出や接触パターンの計測を目的としたものであり、その意味で「触覚」の領域にとどまったものであった。しかし、人間の触知覚過程を模擬するためには、単一の測定原理に基づくセンサではなく、種々の計測原理の下で得られたセンサ情報を能動的に統合するシステムを構成する必要がある。逆に、このようにして構成したシステムが人間と同様の特性をもつことが示されれば、その計測原理において、人間の触知覚メカニズムを明らかにしたと考えることができる。本研究は、人間と類似した特徴を有するセンシングシステムを実際に構成することを通じて、人間の感覚情報処理メカニズムを明らかにしようとするものである。

以下、第2章において、触覚受容器に関わる生理学的知見を手短かにまとめ、触知覚システムを構成する上での要点について考察したのち、第3章で製作したシステムの構成を説明する。第4章では、本システムで用いた能動的認識のアルゴリズムと識別実験の結果について述べる。第5章では、本システムと人間の触知覚メカニズムの類似性について検討するため、本システムで利用した特徴量に基づいて手ざわり感を表現した結果について述べる。最後に、第6章で結論を述べる。

2. 触知覚に関わる感覚受容器の構造と機能

2.1 触覚、温覚受容器の性質

本節では、触知覚において重要な役割を果たしていると考えられる触覚受容器と温覚受容器に関する生理学的知見をまとめる。

触覚受容器には、主なものとして、Merkel細胞、Meissner小体、Pacini小体、Ruffini終末などがある¹⁰⁾。これらの受容器は、皮膚に矩形波状に持続する変形刺激を与えたときの順応の様子から、二つに分類することができる。一つは、刺激のある間応答がほぼ持続するもので、遅順応(SA)型と呼ばれる。もう一つは、刺激の始めと終わりに応答するもので、速順応(RA)型と呼ばれる。

これらはさらに、受容野の大きさによってI型とII型に分けられる。I型の受容器は、ほぼ円形の小さな(直径2~4mm)受容野をもつ。受容野の境界は鮮明で、それをはずれると急激に感度が落ちる。また、受容器の分布密度は、皮膚の部位によって大きく異なり、特に指先での分布密度が高い。たとえば、RAI型の密度は、掌で25個/cm²であるのに対し指先で140個/cm²である。一般に、I型の受容器は鋭いエッジに対して良く反応する。一方、II型の受容器は、受容野の境界が不鮮明で、その感度は

周辺に向かってゆるやかに減少する。分布密度は指先、掌によらず一定であり、全体として密度が低い。RAII型は皮膚の振動によく反応し、特に100~300Hzの振動に対しては、1μm程度の皮膚の変形で十分興奮する。SAII型は皮膚の引っ張りなどに良く反応する。

上述の受容器と対応させると、RAI型はMeissner小体、SAI型はMerkel細胞、RAII型はPacini小体、SAII型はRuffini終末であることがわかっている。これらの機械受容器の特性をTable 1にまとめた。

一方、温覚受容器はつぎのような性質をもつ¹¹⁾。温覚と冷覚に対する受容器は別々に存在し、それぞれ温線維と冷線維と呼ばれる。これらの受容器は、一定の皮膚温度に対して一定の大きさの活動を示すほか、皮膚温度が変化すると、それに応じて興奮頻度が上昇あるいは下降する。なお、熱に関係のない刺激に対しては反応しない。

これらの受容器は、一定温度の刺激に対しては、最も反応しやすい温度を中心にしてベル型の反応特性を示す。一方、皮膚温度を急激に変化させると、その後数秒間にわたって過渡的な反応を示し、やがて安定状態に到達する。過渡応答の大きさは、温度変化の大きさによって定まる。逆に、皮膚を元の温度にもどすと、しばらくの間興奮が停止したのち、もとの安定状態に戻る。

2.2 触知覚における感覚受容器の役割

以上で述べた生理学的知見をもとに、触知覚認識システムを構成する上での要点をまとめる。

まず、触覚受容器は大きく分けてつぎの二つの役割を担っていると考えられる。まず、SAIとRAI、RAIIの3種類の受容器は、対象に接触したときの皮膚の局所的変形や、対象表面を擦ったときの皮膚の振動を捉える役割を果たしていると考えられる。一方、SAII型は、皮膚の局所的な振動ではなく、皮膚全体がどちらかの方向に引っ張られたときに生じる歪みを捉えている。いい換えれば、これらの受容器は、対象と接触した部分の「ミクロな変形や振動」と、対象表面と皮膚表面との摩擦による「マクロな変形」の二つの情報を獲得しているといえる。

つぎに、受容器の密度について考えてみると、比較的高密度なRAI型の受容器でさえ、その分布密度は最も高い指先で百数十個/cm²程度である。このことは、触覚受容器が1mm²あたり高々1個程度しかないことを意味

Table 1 Characteristics of mechanical receptors

Type	Receptor	Size of RF	Optimal Stimulus
RAI	Meissner corpuscle	Small	Vibration of 40Hz
SAI	Merkel cell	Small	Sustained pressure
RAII	Pacini corpuscle	Large	Vibration of 100-300Hz
SAII	Ruffini ending	Large	Shear stress

している。にもかかわらず、人間は指先で手ざわりの微妙な差異を知ることができる。このことは、手ざわりの識別が、指を単に対象に押しつけるのではなく、対象に擦り合わせることによって初めて可能になることを考えれば納得できる。すなわち、手ざわり感は、皮膚表面の刺激分布の情報から得られるのではなく、指を動かす際に得られる種々の振動、変形情報を合成することによって得られるものと考えられる。さらに、人間は、微妙な手ざわりの違いを判断する際、対象にかける力を変えたり擦る速度を変えたりするなどして、それぞれの条件の下での感じ方を比較するという戦略をとっている。このことから、触知覚システムを実現するには、

1. 面状に分布した同一のセンサを用いるよりも、振動、摩擦など種々の形態の情報を捉えるセンサを用意すること
2. 接触力やすべり速度など、対象との接触形態を能動的に設定すること

が重要であるといえる。

一方、温覚情報については、皮膚表面の温度変化が対象の比熱や熱伝導度を反映していることから、対象に触れた瞬間の温覚受容器の過渡的応答が対象を識別する上で有用であると考えられる。

ただし、温度変化の大きさは対象の体積、温度などに依存するため、温覚情報は対象の材質を判断する上で絶対的な情報にはなりえない。温度変化の情報は、対象に触れた瞬間に対象の候補を絞り込むという補助的な役割を果たしていると推測される。

ここでは詳しく述べないが、触覚や温覚のほかに、対象を押ししたときの対象の変形の具合いや反力の感覚などもまた、対象を識別する上で有用な情報を提供する。したがって、手ざわり感を得るためには、対象に力を加えつつ対象の変形や反力を計測するメカニズムも有用である。

3. システムの構造

3.1 システムの構成

前章での検討より、人間の触知覚過程を模擬するシステムを構成するためには、以下のメカニズムが必要であると考えられる。

1. 対象表面をさまざまな接触力、速度で擦る機構。
2. 皮膚への接触や圧迫を検出するセンサ。
3. 皮膚表面の振動を捉えるセンサ。
4. 皮膚表面の剪断応力の大きさを捉えるセンサ。
5. 対象に接触したときの皮膚表面の温度変化を捉えるセンサ。
6. 対象を押ししたときの変形を捉える機構。

筆者は、以上の条件を満たすシステムを構成した^{12),13)}。Fig. 1 に製作したシステムの構成を示す。

本システムの計測部分は、ステージ部とセンサヘッド部の二つから構成される (Fig. 2)。ステージ部は対象を載せて上下に移動する台であり、対象はネジによってステージに固定される。ステージ部の中央には、ロードセル (荷重センサ) が取り付けられており、これによって対象表面にかかる力の大きさを監視する。測定の際には、ステージに対象を載せたのち、ロードセルで捉えた力の大きさが定められた値になるように台を引き上げる。また、ステージの下には、ステージ移動量を計測するポテンシオメータが取り付けられている。

センサヘッド部は、左右に移動して対象表面を擦りながら、対象表面の状態を計測する部分である。センサヘッド部はさらに、水平に移動する移動台とセンサを搭載したヘッドから成る (Photo. 1)。

振動センサは、小型マイクロフォンの先端をシリコンゴムで覆ったものであり、対象を擦る際のシリコンゴムの振動をマイクロフォンによって捉える。また、シリコンゴムの中にはサーミスタが埋め込んであり、これによって対象と接触した瞬間のシリコンゴムの温度変化を

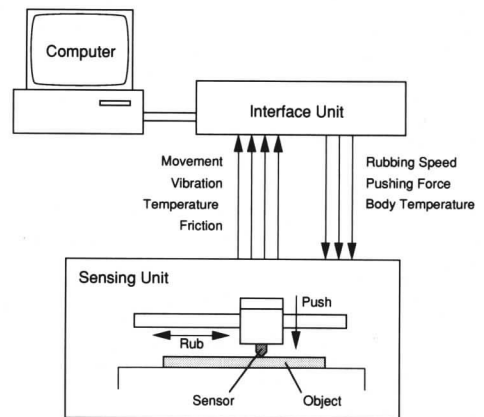


Fig. 1 Schematic structure of constructed system

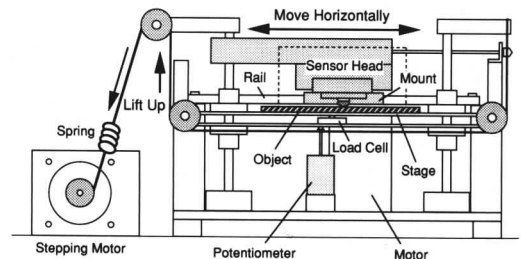


Fig. 2 Structure of sensing unit

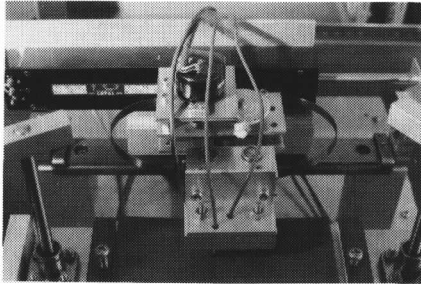


Photo. 1 Sensor head

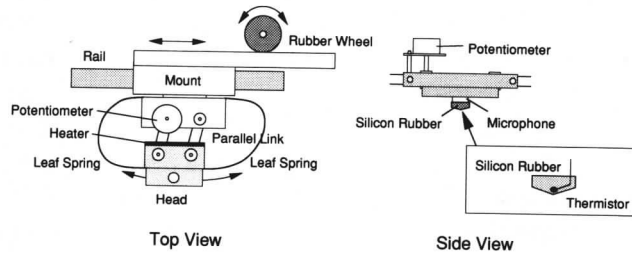


Fig. 3 Structure of sensor head

捉える (Fig. 3).

振動センサを固定しているアルミ製框体には小型セラミックヒータが取り付けられており、その発熱量を調節してシリコンゴムの温度をほぼ一定に保つ。框体を介して加熱するのは、熱容量を大きくすることによって、対象に接触した際のシリコンゴム先端以外の温度変化を小さく抑えるためである。

ヘッドは、移動台を中心にして回転するように、移動台に対して平行リンクで支持されている。さらに、ヘッドは板バネによって移動台に結合されており、その位置が中心位置に復元するような力が常に働くようになっている。このような機構により、センサ先端が対象表面に接触して擦られるときに、センサ先端と対象表面との間のマクロな摩擦力の大きさをヘッドの回転角として捉えることができる。すなわち、このセンサは摩擦による皮膚の変形を捉える SAI 型受容器に対応する。

センサヘッド部を水平移動させる部分は、回転モータの軸にゴム車輪を巻き、これを介して移動台を運動させるようになっている。移動台が動く際の振動を抑えるため、移動台はベアリングを用いた直動台に固定してある。モータはパルス幅変調方式によって駆動し、パルス幅を変化させることによって運動速度を変化させる。なお、ヘッドの運動は一方向に限られているため、表面テクスチャに異方性のある対象は扱えない。

具体的な計測方法については、次章であらためて説明する。

4. 識別実験

4.1 能動的認識のアルゴリズム

まず、本システムで用いた能動的認識のアルゴリズム¹⁴⁾について述べる。

アルゴリズムを定式化するため、Fig. 4 のような抽象的なモデルを考える。図に示したように、このモデルは、外界から情報を受け取り局所的な情報処理(特徴抽出)を加える感覚器と、感覚器からの情報を統合して対象の「内

部像」(システム内部の表現)を構成する認識部から構成される。このモデルにおいて、各感覚器は、物理的なセンサではなく一つの観測行為に対応するものであり、その出力は「対象をある方法で観測したときに得られる信号」にあたる。したがって、一つのセンサをいろいろな形で利用する場合は、個々の利用法をそれぞれ一つの感覚器と考える。認識部は感覚器の中から一つを選択し、そこから得た情報を逐次統合していくものとする。

いま、対象の状態(あるいは種類)を x 、状態 x に対応する内部表現を ξ と表わす。また、 ξ の集合 E (以下内部状態空間と呼ぶ)を考え、各要素 ξ に対して時刻 t における確率 $\pi_t(\xi)$ を割り当てる。この確率は t 回観測時点で対象が状態 ξ にある確からしさを表わす量であり、この分布が内部像の実体である。一方、感覚器 s ($=1, 2, \dots, S$) が出力する値(観測値) $y(s)$ の集合を Y_s と表わす。また、対象が状態 ξ にあるとき、感覚器 s が信号 $y(s)$ を出力する条件付き確率を $p_s(y(s)|\xi)$ と表わす。条件付き確率の値はすでに得られているとする。また、任意の二つの感覚器 s_1, s_2 に対して次式が成立する、

$$p_{s_1, s_2}(y(s_1), y(s_2)|\xi) = p_{s_1}(y(s_1)|\xi) p_{s_2}(y(s_2)|\xi) \quad (1)$$

すなわち、感覚器の信号の間には交互作用がないと仮定する。

さて、時刻 t に感覚器 s を選択した結果、信号 $y_t(s)$ が得られたとすると、観測後の内部状態分布 $\pi_t(\xi; y_t(s))$ は、Bayes の定理によって、

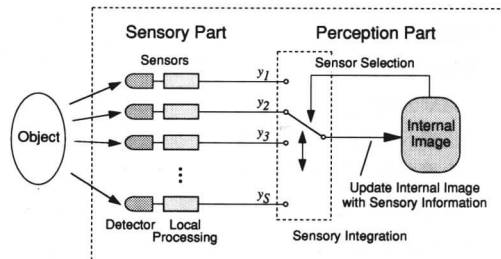


Fig. 4 Mathematical model for active perception

$$\pi_t(\xi; y_t(s)) = \frac{p_s(y_t(s)|\xi)}{\sum_{\xi \in \Xi} p_s(y_t(s)|\xi) \pi_{t-1}(\xi)} \pi_{t-1}(\xi) \quad (2)$$

と与えられる。このように、観測を行うごとに内部状態分布を更新することによって、種々の感覚器からの情報を統合して対象の内部像を組み上げていくことができる。

つぎに、いかなる感覚器を選択すれば内部像の構成が速やかに進行するかについて考える。ここでは、内部像構成の進み具合を表わす評価基準として、内部状態空間のエントロピーを採用し、エントロピーの値が小さいほど内部像の構成が進んでいると考えることにする。なお、この基準は内部像のいわば「確信度」を表わすものであって、「正確さ」を表わすものではない(内部像が対象の真の状態と一致していなくとも、エントロピーは小さくなり得る)。

ここで、内部像の構成を速やかに進める方法として、観測後のエントロピーが最も小さくなるような感覚器を選択することを考える。いま、仮に時刻 t に感覚器 s を選択した結果信号 $y_t(s)$ が得られたとすると、観測後のエントロピー $H_t(y_t(s))$ は、(2)式で求められる $\pi_t(\xi; y_t(s))$ を用いて、

$$H_t(y_t(s)) = - \sum_{\xi \in \Xi} \pi_t(\xi; y_t(s)) \log \pi_t(\xi; y_t(s)) \quad (3)$$

と表わされる。しかし、 $y_t(s)$ の値は、実際に観測を行ってみない限り知ることができないので、ここでは、代わりに観測後のエントロピーの期待値 $H_t(s)$ を求める。

$$H_t(s) = \sum_{y(s) \in Y_s} P(y(s)) H_t(y(s)) \\ = \sum_{y(s) \in Y_s} p_s(y(s)|\xi) \pi_{t-1}(\xi) H_t(y(s)) \quad (4)$$

内部像の形成を速やかに進めるためには、この値が最も小さくなるような感覚器を選択することが、少なくとも平均評価では最適であると考えられる。あるいは、観測によるエントロピーの減少量の期待値 $I_t(s)$ を基準にとり、これが最大値をとる感覚器を選択することにしても同じことである。

$$I_t(s) = H_{t-1} - H_t(y(s)) \\ = \sum_{\xi \in \Xi} \pi_{t-1}(\xi) \\ \times \sum_{y(s) \in Y_s} p_s(y(s)|\xi) \log \frac{p_s(y(s)|\xi)}{\sum_{\xi \in \Xi} p_s(y(s)|\xi) \pi_{t-1}(\xi)} \quad (5)$$

この量は、情報理論において相互情報量と呼ばれるものである¹⁵⁾。

このように、能動的認識のアルゴリズムは、「相互情報量基準に基づく逐次実験計画」として実現することができる。なお、感覚器の評価基準として、相互情報量のほ

かに対称化ダイバージェンス (J -divergence)

$$J_t(s) = \sum_{\xi_1, \xi_2 \in \Xi} \pi_t(\xi_1) \pi_t(\xi_2) \sum_{y(s) \in Y_s} (p_s(y(s)|\xi_1) - p_s(y(s)|\xi_2)) \log \frac{p_s(y(s)|\xi_1)}{p_s(y(s)|\xi_2)} \quad (6)$$

などの確率分布間距離を用いることもできる¹⁶⁾。

以上の議論からわかるように、このアルゴリズムの下では、内部状態分布 $\pi_t(\xi)$ に応じて感覚器の評価基準が変化し、その結果選択される感覚器が変化する。したがって、観測を繰り返して対象の内部像が形成されるに従って、それに応じた適切な感覚器が選択されることになる。また、対象の集合 Ξ や初期状態分布 $\pi_0(\xi)$ に先験的知識を反映させることも可能である。

以上の手続きをまとめると、以下のようになる。

1. 内部状態空間に初期分布を与える。初期分布には先験的知識を反映させることができるが、一般に一様分布を与えればよい。
2. すべての感覚器について相互情報量(あるいは確率分布間距離)を計算し、その値が最大値をとる感覚器を選択する。
3. 選択したセンサを用いて対象を観測し、観測データを用いて内部状態分布を更新する。
4. 更新した結果、内部状態空間のエントロピーが定められた値以下になれば、観測を終了し、その時点で確率が最大の対象を識別結果として出力する。そうでない場合は、2.へ戻る。

4.2 対象の計測と特徴量の抽出

本節では、実験での具体的な手順と識別に利用した特徴量について説明する。

実験では、あらかじめ、Table 2 に示したなぞり速度3種類、接触力3種類を設定して計9種類の測定を行ったのち、オフラインで識別処理を行った。

測定の具体的な手順は以下のとおりである。

まず、測定対象をステージの上に固定した後、規定の接触力に達するまでステージを引き上げる。この間に、センサの先端部が対象に接触するが、接触した瞬間はマイクロフォンの信号から知ることができる。そして、接触した瞬間から規定の接触力に達するまでにステージが移動した量から、規定の力をかけたときの対象(およびシリコンゴム)の変形量を知る。また、接触した瞬間からの温度センサ出力の変化を測定することによって、シリコ

Table 2 Experimental conditions

Speed		Force	
S	33 mm/s	1	0.23 N
M	43 mm/s	2	0.32 N
F	60 mm/s	3	0.46 N
(error)	1.5 mm/s	(error)	0.04 N

ングムの温度変化の大きさを知る。

続いて、センサヘッドを左右に動かす。このとき、シリコンゴムが対象表面と擦れ合う際の振動をマイクロフォンによって観測するとともに、センサ先端と対象表面のマクロな摩擦の大きさをヘッド回転角として捉える。

マイクロフォンで捉えた信号は、サンプリング周期 500 Hz で計算機に取り込み、窓時間幅を 128 ms として Hanning フィルタをかけた後、64 点 FFT によって周波数解析を行った。周波数解析の結果を低周波数成分 (0-86 Hz)、中周波数成分 (94-164 Hz)、高周波数成分 (172-250 Hz) の三つの成分に分解し、このうち中周波数成分、高周波数成分のパワーを計算した。低周波数成分は、材質間の変化が少なかったため、識別処理には用いなかった。

測定した信号をもとに計算した 43 種類の特微量の中から、実験で取り扱った 46 種類の材質について比較的大きな差が現れるものを 16 種類抽出した。抽出した特微量とその特微量を得るための測定条件を示す (Table 3)。表において、測定条件欄に示した記号 (S, M, F および 1, 2, 3) は Table 2 に示した条件に対応している。実験では、これらの特微量を「感覚器」として選択する形で識別動作を進めた。

識別実験を行う前に、あらかじめ各材質に対して 10 回ずつ測定を行い、そのデータを用いて各特微量の平均値と分散を推定した。また、観測値は正規分布に従うものとして相互情報量、あるいは対称化ダイバージェンスを計算し、前節で述べたアルゴリズムを用いて識別動作を進めた。また、観測後の内部状態空間のエントロピーが 0.1 以下になった時点で最大確率を示す内部状態をもって識別結果とした。

Table 3 Characteristics used at experiments

No.	Characteristic	Conditions		See 5.1
		Speed	Force	
1	High Freq. Compo. of Vibration	S	2	a
2	High Freq. Compo. of Vibration	S	3	
3	Middle Freq. Compo. of Vibration	S	1	c
4	Middle Freq. Compo. of Vibration	S	2	b
5	Middle Freq. Compo. of Vibration	M	2	d
6	Middle Freq. Compo. of Vibration	F	3	
7	Freq. of Angle Rotation	F	1	
8	Freq. of Angle Rotation	F	2	e
9	Amplitude of Angle Rotation	S	2	
10	Amplitude of Angle Rotation	M	1	
11	Amplitude of Angle Rotation	M	3	f
12	Amplitude of Angle Rotation	F	3	g
13	Slope of Temperature Change	-	1	
14	Slope of Temperature Change	-	2	
15	Slope of Temperature Change	-	3	h
16	Deformation	-	2	

4.3 実験結果

まず、識別すべき材料として、Table 4 に示した 20 種類の材質を設定したときの結果を示す。なお、試料は、それぞれほぼ 10 cm 四方のものを用意した。

Fig. 5 に、感覚器評価基準として相互情報量を用いたときの認識過程の例を示す。これは、試験試料として発泡スチロール (SF) と木材 (WD 1) を提示したときの結果である。図からわかるように、初期状態では特微量 15 (温度変化速度) が最も情報をもたらすものとして選択された。SF を対象とした場合、この特微量を選択して内部状態分布を更新すると、分布は図に示したように変化した。続いて特微量 2 (高周波成分) を選択して分布を更新したところ、エントロピーは十分に減少し、識別結果として

Table 4 Material samples

Name	Material	Name	Material
AL	Aluminum Plate	RB2	Rubber (NBR)
TL	Ceramic Tile	PP1	Paper (Plain)
CR	Cork Plate	PP2	Paper (Coated)
PL	Vinyl Resin	LT1	Leather (Cow)
AC	Acrylic Resin	LT2	Leather (Chrome)
SF	Styrene Foam	LT3	Leather (Suede)
SP	Sponge	LT4	Leather (Suede)
WD1	Wood (Cherry)	CL1	Cloth 1
WD2	Wood (keyaki)	CL2	Cloth 2
RB1	Rubber (Plain)	CL3	Cloth 3

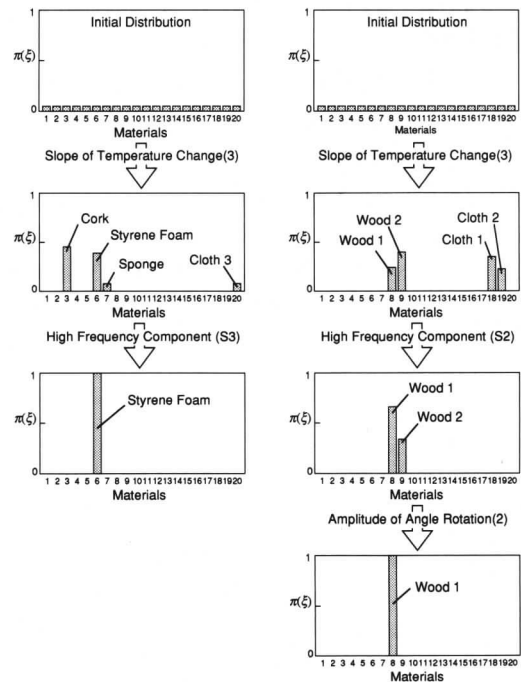


Fig. 5 Example of recognition process 1

SFが得られた。対象としてWD1を与えたときも、同様にして3回の観測を行った結果、正しい識別結果が得られた。

Fig. 6は、対象の集合をAC, PL, SF, SP, CL1, CR, LT1, WD1の8種類に限定したときの結果である。この場合は、先の場合と異なり、初期状態で特徴量2(高周波成分)が選択された。このように、識別すべき対象の母集団が異なるとそれに応じて選択される特徴量が変化する点に、能動的認識の特徴が現れている。

Fig. 7に、センサをランダムに選択した場合、センサを相互情報量基準に基づいて選択した場合、および対称化ダイバージェンス基準に基づいて選択した場合について、各材質について10回ずつ識別実験を行ったときの認識率と識別までに要した平均観測回数を示す。図からわかるように、材質識別実験では、すべての観測アルゴリズムに対して識別率は100%であった。観測回数については、能動的認識のアルゴリズムを用いた場合、ランダムに観測を行う場合に比べて約2回少なくなることがわかった。

Fig. 7には、対象の集合を16種の紙質、および16種の

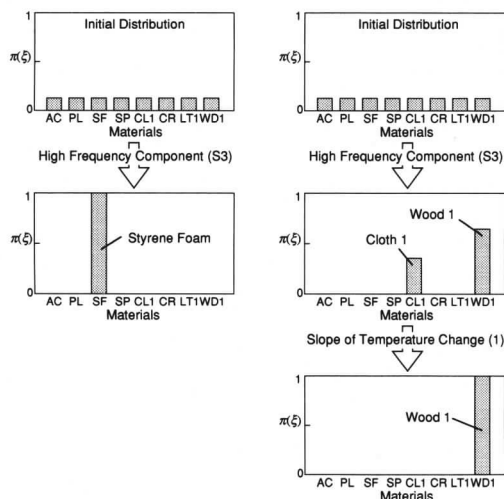


Fig. 6 Example of recognition process 2

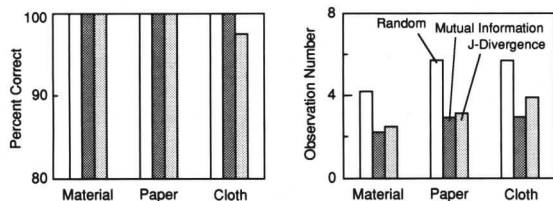


Fig. 7 System performance

布質としたときの識別率、観測回数もあわせて示した。紙質の試料としては、画用紙、コピー用紙、コート紙、デザイン紙などを、布質の試料としては、川端¹⁷⁾による風合い標準試料(紳士夏服用生地)を用いた。紙質や布質の試料の中には互いに微妙な差しかないものも含まれており、数人の被験者に対して実験した限りにおいて人間が容易に識別できる(触れただけですぐにどれであるかわかる)ようなものではないことを述べておく、図に示したように、材質識別の場合に比べて観測回数は増加するものの、紙質、布質識別の場合も識別率はほぼ100%に保たれていることがわかる。また、材質識別の場合と同様に、能動的認識のアルゴリズムを用いることによって観測回数が減少することが確かめられた。

以上の実験結果から、本システムによって普通の人間が識別できる程度の手ざわり感を識別できることが示された。また、識別過程において特徴量を能動的に選択することによって、効率的な識別が実現されることが示された。

4.4 考 察

認識過程に関して考察すべき問題として、対象のカテゴリ分類が挙げられる。人間が対象を識別するとき、対象の集合が大きな場合は、まず大まかな分類をしたのちに細かな識別をするというように、段階を踏んで認識動作を進めることが多い。本システムも、このような識別戦略をとるように拡張することができる。

そのためには、識別対象をいくつかのカテゴリに分類し、生成されたカテゴリの集合を対象の集合と考えた上で上述のアルゴリズムを適用すればよい。そして、カテゴリの数が絞られた時点で、そのカテゴリに属する対象の集合をあらためて対象の集合と考え、再び同じアルゴリズムを適用する。同じことを繰り返すことによって、本アルゴリズムを階層的なカテゴリ構造をもった識別問題に対して適用することができる。なお、対象をカテゴリに分類するには、天下りの的にカテゴリを指定する方法や、条件付き確率 $P(\xi | y(s))$ の距離に基づいて対象をグループ分けする方法が考えられる。

このような段階的な識別を行うことによって、

1. 内部状態空間の要素数を減らすことができるので、感覚器選択基準に要する計算量を減らすことができる
 2. カテゴリ間の識別とカテゴリ内での識別とは、識別に有効な特徴量が異なる可能性が高いので、能動的認識の利点を生かすことができる
- といった利点が生じる。

5. 触知覚感の表現

5.1 特徴量の組合せによる手ざわり感の表現

前章では、構成したシステムが人間とほぼ同様の識別能力をもつことを示したが、つぎに、本システムのメカニズムが人間の触知覚メカニズムと類似しているかどうかを検証するため、本システムで用いている特徴量が、人間が手ざわりを知覚する際に利用する特徴に対応しているかを調べる実験を行った。

具体的には、識別実験で用いた 16 個の特徴量の中から選択される頻度の高い 8 個 (Table 3 の右列参照) を選び、それらの組合せによって対象を表現し、それが人間の感覚と対応しているかどうかを調べた。対象の表現する方法として、ここでは Fig. 8 に示したレーダーチャートを用いた。このチャートの各軸において、円の半径の中心は平均値を表わし、円周上および円の中心は、標準偏差を σ としたとき 2σ の値に対応している。なお、ここで選択した特徴量を用いて主成分分析を行った結果、多くの材質が第 1 主軸と第 2 主軸からなる平面上で分離されたことから、ここで選択した特徴量は材質を区別して表現するのに十分なだけの情報を含んでいるものと思われる。

Fig. 9 に種々の材質に対するチャートを示す。以下に示すように、このチャートの各軸は、人間が手ざわりを知覚する際に利用する特徴によく対応している。

たとえば、スポンジや発泡スチロールのように触れたときに暖かい感じがするものは、すべて h 軸 (温度変化速度) 上で小さな値を示しており、逆にアルミニウムのように冷たい感じがするものは、 h 軸上で大きな値を示している。また、スポンジやスエード皮のように、擦ったときに指の皮膚が引っ張られる感じのするものは、 f, g 軸 (回転角振幅) の値が大きくなる。発泡スチロールやカーペット地のように、擦ったときにカサカサしたりシャリシャリしたりするものは、 a 軸 (高周波成分) の値が大きくなる。また、ざらざらした感じのするものは、

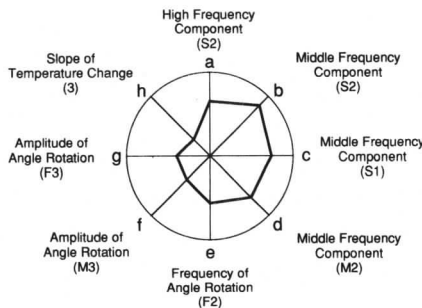


Fig. 8 Representation of haptic feeling

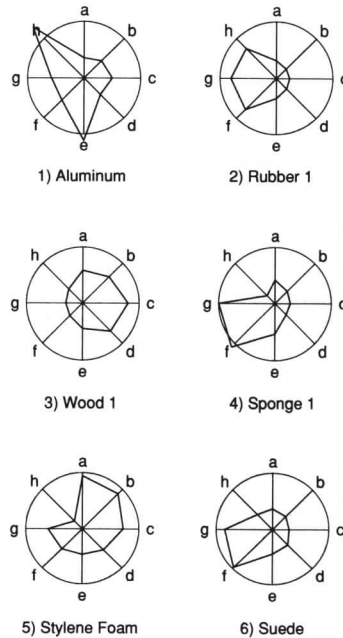


Fig. 9 Representation for some materials

一般に b, c, d 軸 (中周波成分) 上で大きな値を示す。また、 e 軸 (回転角振動数) は、皮膚に密着する感じのするものに対して大きな値を示す。

このように、構成したチャートは人間の感じる「手ざわり特徴」によく対応している。このことは、逆に、製作したシステムが人間が利用するのと同じ情報を捉えていることを意味しており、本システムのメカニズムや計測原理が人間の触知覚のそれらとよく対応していることを示唆している。

5.2 触知覚感の類似性

つぎに、二つの対象を特徴量の組合せによって表現したとき、それらの表現の類似性が人間の判断する類似性と対応しているかを調べるため、8次元の特徴空間において計算した距離と人間の主観に基づく類似度を比較する実験を行った。

まず、システム表現の類似性は、以下のように定義される距離を用いて評価した。すなわち、試験試料の i 番目の特徴量を f_i^* 、 k 番目の標準試料の i 番目の特徴量の平均値を $f_i^{(k)}$ 、共分散行列を $D^{(k)}$ と表わしたとき、

$$\text{dist}_a(k) = \sqrt{\sum_{i,j=1}^8 (f_i^* - f_i^{(k)}) [D^{(k)}]_{ij}^{-1} (f_j^* - f_j^{(k)})} \quad (7)$$

$$\text{dist}_b(k) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 \frac{(f_i^* - f_i^{(k)})^2}{D_{ii}^{(k)}}} \quad (8)$$

として、2種類の距離を定義する。定義からわかるように、 dist_a は、標準試料に関する共分散行列を用いて正規

化した距離であり, $dist_b$ は, 各特徴量の間に相関がないとき ($D_{ij}=0$ for $i \neq j$) の $dist_a$ と一致する.

ここで定義した距離はいずれも対称でなく, また三角不等式を満たさないので, 厳密な意味での「距離」ではない. これらは, 未知の試料から得られた特徴量が標準試料の特徴量の平均値からどれくらい離れているかを, 標準試料ごとの特徴量分布の広がりを考えて測った量である. したがって, これらは, 未知試料の各標準試料に対する類似度を与えるもので, 任意の二試料間の類似度を与えるものではないことに注意が必要である.

一方, 人間の判断する類似性については, つぎのような実験を行うことによって調べた.

1. 被験者を椅子に座らせ, 目隠しを施す.
2. 机上に標準試料と試験試料を並べる.
3. 標準試料をすべて1度ずつ触らせる. これは標準試料の範囲をあらかじめ知らせるためである. なお, 試料に触る際は, 左右いずれの手のいずれの指を使ってもよいとした.
4. 試験試料を触らせる.
5. 試験試料とすべての標準試料を自由に触らせ, 試験試料に最もよく似た標準試料の一つを選ばせる. なお, 判断に迷う場合には, 二つ以上の標準試料を回答してもよいとした.

なお, 実験を繰り返すと, 指先の感覚が麻痺して正確な判別ができなくなるので, 感覚の麻痺を感じた場合には適宜休息をいれるようにした.

紙質と布質を試料として実験を行った結果を Table 5 に示す. この表は, 4 種類の未知の試験試料(1,2,3,4)を3人の被験者 (α, β, γ) に提示し, それぞれが10種類の標準試料(A, B, ..., J) のどれと最も近いかを答えさせた結果と, 上の二つの方法で計算した距離がそれぞれ小さな標準試料を表わしたものである. 表で, かっこ内の数字は計算した距離の大きさを表わす.

この表からわかるように, 二つの距離を比較すると, $dist_b$ のほうが, $dist_a$ に比べて人間の感覚の類似性とよく一致している. このことは, 人間が複数の観測行為によって得た情報を組み合わせて一度に比較しているのではなく, 各観測行為で得られた情報を逐次足し合せて判断を下していることを示唆している. この結果の意味については, 次節で考察する.

5.3 考 察

被験者になって実際に手ざわりを比較してみると, 人間が手ざわりの類似性を判断する際には, 何か一つの手ざわり特徴に注意を集中し, その特徴に関して対象を比較していることに気づく. また, 被験者の1人は, 実験中に「これは, こちらよりさらさらしている点で似てい

Table 5 Similarity judgements by human subjects and by constructed system

		a. Paper Discrimination				
Sample		1	2	3	4	
Subject	α	A, H, I	B, A	H, A, F	H, F	
	β	A, H	B, A	H, F	H, F, A	
	γ	A	B	H, A, F	H, A	
System	a	1	A (8.2)	J (16.0)	F (8.9)	A (16.6)
		2	F (12.6)	A (19.4)	E (12.8)	D (20.2)
		3	E (13.2)	E (23.0)	G (13.1)	J (23.5)
	b	1	A (4.4)	B (8.2)	F (5.5)	H (5.7)
		2	D (5.2)	A (8.5)	G (7.8)	D (7.4)
		3	H, J (6.7)	J (12.2)	D (10.3)	J (7.8)

		b. Cloth Discrimination				
Sample		1	2	3	4	
Subject	α	B, C	B, A	E, D, H	I, D	
	β	B, C	B, A	F, D	D, I, J	
	γ	B, H	B, A	I, H, E	C, D, I	
System	a	1	C (50.5)	A (7.7)	E (8.2)	J (5.5)
		2	A (59.3)	C (14.5)	D (12.8)	F (9.3)
		3	F (128.0)	J (15.3)	J (15.6)	D (11.0)
	b	1	C (36.2)	A (4.9)	E (4.5)	I (3.5)
		2	A (49.1)	B (6.2)	F (7.9)	J (4.2)
		3	B (61.3)	C (8.7)	H (8.7)	D (6.7)

るが, 毛羽立っている感じがする点で違う」と報告している. これらの事実は, 人間が手ざわりを比較する際に, 複数の特徴量を組み合わせて一度に判断を下すのではなく, いくつかの特徴量を軸として設定し, その軸上での違いを順次比較することによって判断を下していることを示唆している. 人間が判断を下すときにどのような特徴量に重きを置いているかについては未検討であるが, 距離を計算する際の重み付け方法を検討することによって, 人間の感覚をよりよく反映した表現が構成できるものと思われる. また, このような試みは, 手ざわりの規格化などの研究へ発展させることも考えられる^{17)~19)}.

最後に, 本システムの限界と今後の発展の方向について述べる.

本システムで捉えることのできない情報として「湿り感」が挙げられる. 人間は, 指先の汗を介して対象の湿り具合を感じとっているようである. 通常の材質識別において湿り感が重要な意味をもつことは少ないと考えられるが, 生地 of 識別などにおいては, 吸水性などに関わる感覚を表わす上で有用な特徴であると思われる.

本システムのもう一つの限界は, 反力の感覚である. 特に, 対象を「つまむ」ことによって得られる情報, あるいは対象に指を押しつけて表面と垂直方向に力を加えたときの反力から得られる情報は, 本システムでは得ることができない. しかし, このような情報は, トルク制御が可能なロボットハンドを用いることによって計測することができるので, 本システムのセンサヘッドをその

ようなロボットハンドに装着することによって、人間の触知覚メカニズムをより忠実な形で模擬することができると考えられる。

6. む す び

種々のセンサ情報を能動的に統合することによって、対象の手ざわり感、質感を識別するシステムを構成した。実験の結果から、構成したシステムが少ない観測回数によって微妙な手ざわり感の違いを識別できることが示された。このような性能は、触知覚における感覚統合と能動的認識に着目し、その過程を忠実に模擬したシステムを構成することによって実現できたものと考えられる。

さらに、本システムで利用した特徴量の組合せによって対象の手ざわり感を表現する実験を行った結果、これらの特徴量が、人間が手ざわり識別に利用する特徴によく対応していることが示された。このことから、本システムのメカニズムが人間の触知覚メカニズムと原理的に一致しているという示唆が得られた。

本研究を進めるにあたり御指導、御援助を頂いた東京大学工学部の中野馨教授に感謝の意を表す。また、システムの実装にあたり御協力を頂いた東京大学工学部の黒川朋也氏((現)NKK)、住友謙一氏((現)日本興業銀行)にもあわせて謝意を表したい。なお、本研究の一部は、科学技術振興調整費「センサフュージョン」によって行われた。

参 考 文 献

- 1) J. J. Gibson: Observation on Active Touch, *Psychological Review*, **69**, 477/490 (1962)
- 2) 岩村吉晃: つまむ一指の運動と触覚, *Japanese Journal of Sports Sciences*, **6-10**, 612/616 (1987)
- 3) S. J. Lederman and R. Klatzky: Hand Movements: A Window into Haptic Object Recognition, *Cognitive Psychology*, **19**, 342/368 (1987)
- 4) J. J. Gibson: The Senses Considered as Perceptual Systems, Houghton Mifflin (1966)
- 5) 阪口 豊: 触知覚における感覚統合と能動的認識, *電子情報通信学会誌*, **76-11**, 1222/1227 (1993)
- 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) 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の位置の検出方法, *計測自動制御学会論文集*, **18-7**, 730/735 (1982)
- 8) 伊福部達: 材質感の認識センサ, *センサ技術*, **4-1**, 31/33 (1984)
- 9) H. Shinoda, M. Uehara and S. Ando: A Tactile Sensor Using Three-dimensional Structure, *Proceedings of 1993 IEEE International Conference of Robotics and Automation*, 435/441 (1993)
- 10) 岩村吉晃: 触覚受容器の構造と特性, *日本ロボット学会誌*, **2-5**, 54/60 (1984)
- 11) R. F. Schmidt: Somatovisceral Sensibility, Schmidt, R. F., Editor, *Fundamentals of Sensory Physiology*, 81/125, Springer Verlag (1981)
- 12) 黒川, 阪口, 中野: 意図的触覚センシングシステム, 第31回 SICE 学術講演会予稿集, 671/672 (1992)
- 13) Y. Sakaguchi and K. Nakano: Haptic Recognition System with Sensory Integration and Attentional Perception, *Proceedings of 1994 IEEE International Conference on Multisensor-Integration and Fusion in Interigent Systems*, 288/295 (1994)
- 14) 阪口, 中野: 能動的認識の数理モデル, 第6回生体・生理工学シンポジウム論文集, 373/376 (1991)
- 15) 有本 卓: 確率・情報・エントロピー, 森北出版 (1980)
- 16) 滝山竜三: 距離の概念の導入によるボタン認識系の評価法, *九大工学集報*, **37**, 318/324 (1965)
- 17) 川端季雄: 風合い評価の標準化と解析, *日本繊維機械学会* (1980)
- 18) 住友, 阪口, 中野: 触知覚感の定量化に関する研究, 32回 SICE 学術講演会予稿集, 33/34 (1993)
- 19) 小野, 一條, 宮口, 荒木: ロボットによるハンドバリエーションに関する一考察(摩擦振動の積極的利用による識別の可能性), 第2回ダイナミクスに関するオーディオ・ビジュアルシンポジウム講演論文集, 47/50 (1993)

[著 者 紹 介]

阪 口 豊 (正会員)



1988年、東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年同大学工学部助手、94年同講師を経て、同年電気通信大学大学院情報システム学研究科助教授、現在に至る。生体情報工学、特に、感覚情報処理、学習認識、情報表現のメカニズムに関する研究に従事(博士(工学))。