

## ヒトの触感認識機構のモデル構築

白土寛和<sup>\*1</sup>, 昆陽雅司<sup>\*2</sup>, 前野隆司<sup>\*3</sup>

### Modeling of Tactile Texture Recognition Mechanism

Hirokazu SHIRADO<sup>\*1</sup>, Masashi KONYO<sup>\*2</sup> and Takashi MAENO<sup>\*3</sup>

<sup>\*1</sup> Sony Corporation, <sup>\*2</sup> Tohoku University  
<sup>\*3</sup> Keio University, School of Integrated Design Engineering  
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8522 Japan

It is necessary to ascertain tactile texture recognition of humans in developing tactile devices that create or detect lifelike texture. Tactile texture has been researched in the field of psychophysics and neuroscience, but its function-structure relationship cannot be still uncertain by their method. In this paper, modeling of tactile texture recognition mechanism by numerical simulation system is discussed. The model is made of two parts; reception part and perception part. Reception model is built by finite element model of human finger and filters emulating mechanoreceptors response properties. Perception model is built by feed forward type of neural network with 3 layers. This network is considered for configuration and module structure of primary somatosensory area. Finally, validity of the total model is confirmed by comparing output data of this model to the result of sensory evaluation.

*Key Words* : Tactile texture, Recognition model, FEM, Neural network

#### 1. 緒 論

ヒトは、物体の表面に触れた際、意識下で“触感”を感じる。ここで、“触感”とは、触覚のうち、“つるつる”や“ざらざら”といった微細な表面状態の触覚を表現する感覚を指すものとする。触感とは、ヒトが人工物を扱う際の使用感や操作感に大きな影響を与える。しかし、従来、触感を設計変数として陽に扱う製品設計はほとんどされていなかった。触感を設計変数として扱うためには触感の定量化が不可欠であるため、触感情報の検出・評価を目的とした触感センサの開発が盛んに行われている<sup>(1)(3)</sup>。しかし、従来の触感センサは素材のテクスチャの違いを詳細に評価するには至っていない。この原因のひとつとして、ヒトの触感認識機構を精度よく表現する触感認識モデルが構築されていないことが挙げられる。

触感評価のための触感認識モデル構築のために、官能評価と多変量解析を用いた心理物理学的手法が多くの研究で用いられている<sup>(4)(5)</sup>。近年、この手法により、粗さや冷温といった異なる質の間のパター

ン認識が可能になりつつある。しかし、本研究で扱うような微細な表面状態の認識の場合、心理物理学的手法により構築されたモデルにより触感を評価することは困難である。その理由として、ヒトが触感認識に至る上での2つの非線形変換<sup>(6)</sup>が考慮されていないことが挙げられる。1つは触対象と皮膚間の物理的インタラクション、もう1つは受容器の発火情報から触感認識に至る脳の認識機構における非線形変換である(図1)。ヒトの受容部と認識部の非線形性をそれぞれ考慮した認識機構のモデルを構築すれば、触感のわずかな違いを評価することができると考えられる。このため、本研究では、ヒトが触感を認識する過程を、ヒト指腹部の受容部と脳内の認知部の2過程に分離し、各過程の非線形性を考慮し

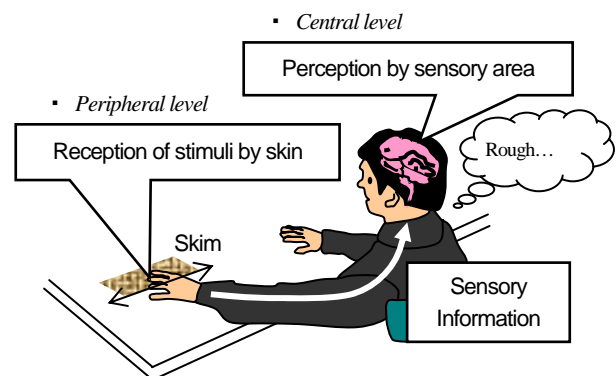


Figure 1 Texture recognition process of human

\*原稿受付 2006年11月16日

<sup>\*1</sup> 慶應義塾大学大学院, [現ソニー (株)]

<sup>\*2</sup> 正員, 東北大学 情報科学研究科.

<sup>\*3</sup> 正員, 慶應義塾大学 理工学部. (〒223-8522 横浜市港北区 日吉 3-14-1)

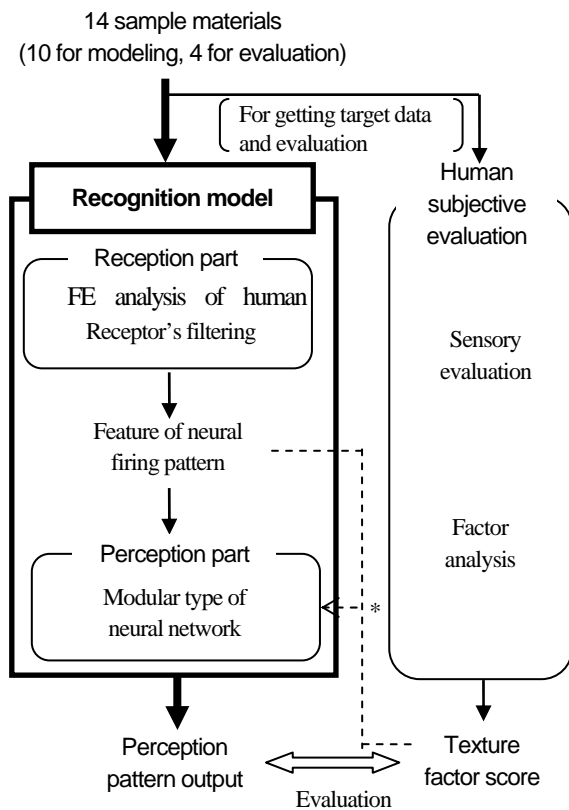
E-mail: maeno@mech.keio.ac.jp

たヒト触感認識機構のモデルを構築することを目的とする。すなわち、有限要素解析を特徴量抽出に用いるとともに中間層分離型ニューラルネットワークをパターン認識に用いる触感認識機構のモデルを提案する。

## 2. 触感認識モデルの概要

ヒトの触感<sup>6)</sup>は、複数の異なる質の刺激の知覚により構成されている。なかでも、本研究では、機械刺激に関する感覚に着目しモデル化を行う。ヒトは、機械刺激により、粗さや滑らかさに関する多様な触感を認識する。刺激を限定する理由は、対象とする質を限定しないとモデル化が困難であるためである。解剖学的研究<sup>7)</sup>により、ヒトは熱刺激および弾性刺激を機械刺激とは異なる系によって知覚していることが示されている。したがって、他の刺激の認識モデルは、本研究のモデルとは独立に構築でき、後に本モデルと統合できると考えられる。

触感認識モデル構築手順の概略図を図2に示す。触感認識モデルとは、ヒトが指で様々な対象物の上を触察した際に、どのような触感を感じるか、という過程をモデル化するものである。本研究では、触感認識モデルは、図2の左側に示したように、ヒト指モデルが対象物データ上を移動し受容器の発火分



\*: Used for building perception model

Figure 2 Outline for modeling texture perception and evaluation process

布を出力する受容モデルと、受容器の発火分布の特徴量を入力とし触感因子を出力とする脳内の触感認識モデルから成るものとする。図2の右側は、右側に示した触感認識モデルの妥当性を検証するための官能評価実験の手順を表す。

触感認識モデルの構築手順は以下の通りである。

1. 触対象の選定を行う (3章) .
2. 図2の右に示した、官能評価および多変量解析による触感因子の抽出を行う (4章) . 触感因子は認知モデルの出力でもあり、最後に本モデルの評価の際に用いる。
3. 図2左上の受容部のモデル、すなわち、有限要素解析およびフィルタリングにより受容器の発火分布の特徴量を得る過程を構築する (5章) .
4. 図2左下に示すように、モデル構築用とした10種の試料における受容器発火分布の特徴量を入力とし、触感因子を出力として、中間層を分離したニューラルネットワークを用いた認知部のモデルを構築する (6章) .
5. 構築した認知モデルに対し、評価用とした4種の試料における特徴量を入力し、モデルからの出力値と官能評価の結果を比較することで、本認識モデルを評価する (6章) . すなわち、本ニューラルネットワークの解が官能評価実験結果と良く一致することから、本認識モデルにより、ヒトの触感評価と同等の解を得られることを示す。

## 3. 触対象の選定および物性計測

図2の右側に示した触感認識モデル構築のために用いる実素材としては、剛体と仮定でき、かつ多様な触感を呈示できることを考慮し、加工紙を中心に14種類の素材を選定した。このうち、10種類をモデル構築用、4種類をモデル評価用とした。

選定した試料に関して、キーエンス製デジタルマイクロスコープVHX-200を用いて、試料表面の

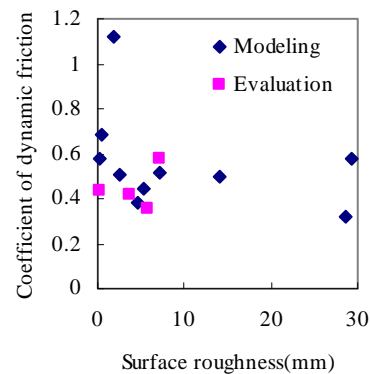


Figure 3 Physical property of selected samples

24.8mm の区間の高さを 2.21 $\mu$ m 間隔で測定した。測定した高さデータに対し、測定時のノイズを除くため、8 点移動平均によりフィルタリングを行った。フィルタリングした各試料の高さデータを基に、算術平均粗さを算出した。また、従来研究<sup>8)</sup>と同様の 2 軸力センサにより、各試料を示指でなぞった際の接線力および法線力を計測し、両者の比より動摩擦係数およびその標準偏差を算出した。固定具を用いて示指を XY ステージに接続することにより、押込み量 0.5mm、移動速度 40mm/s の条件下で計測を行った。図 3 に、算出した 14 種の触対象の算術平均粗さと動摩擦係数を示す。図 3 より、モデル構築用および評価用の対象物はある程度の間隔を保って分布していることがわかる。

#### 4. 触感評価の定量化

ヒトは、物体表面をなぞって触感を認識するとき、サラサラ、ゴツゴツといった言葉によりその触感を表現することができる。このため、言葉による表現を触感認識の出力として捉えるべきである。しかし、言葉による表現は定性的であるため、そのままでは触感評価構造の把握に用いることが困難である。また、言葉は多様で意味が直交していない場合があるため、言葉をそのまま用いると脳内認識構造を体系的にモデル化することができない。そこで、触感を表す因子を認知モデルの出力値とするために、官能評価実験および因子分析によりヒトの触感評価機構を定量化する<sup>9)</sup>。

4.1 官能評価実験 SD 法 (Semantic differential method) を用いた官能評価によりヒトの触感評価機

構を定量化した。被験者は男女 30 人とし、14 種の試料を示指でなぞらせることにより、13 種の評価項目を 5 段階で評価させた。13 種の評価項目は、温かい、ひんやり、サラサラ、ゴツゴツ、ツルツル、しっとり、スベスベ、ザラザラ、キュッキュツ、チクチク、ポコポコ、ジャリジャリ、カサカサである。これらは、直感的に評価できることを基準に、予備実験により選定した。上記の評価項目は、適当な反意語を選定できないため、単極尺度を用いた。視覚効果を防ぐため、被験者には試料を見せず、試料は不規則な順序で呈示した。温度および湿度一定の環境下で実験を行い、試料は室内に 24 時間以上放置し、室温と同程度にしてから用いた。SD 法により得た結果を、被験者間で平均化し、試料間の分布を標準正規分布とみなし、標準化した<sup>10)</sup>。

4.2 因子分析 標準化した評価値を用いて因子分析を行い、本研究に用いた試料の触感を表す 3 つの因子を抽出した。推定方法は最尤推定法、因子回転は直交回転であるバリマックス回転を用いた。因子分析の結果を表 1 に示す。各因子をそれぞれ「粗さ因子」、「凹凸因子」、「滑らか因子」と名付けた。表 1 より、3 つの累積寄与率が 0.96 であり、全ての固有値が 1 以上であることがわかる。すなわち、この 3 因子によって、表 1 に示した試料の触感を 9 割程度特徴付けることができる。抽出した因子によって試料別の因子得点を算出した。算出した因子得点の出力値および評価値を用いて 6 章で述べる認識モデルを構築する。

#### 5 受容特性の特微量抽出

本研究では、ヒト指腹部の有限要素モデルおよび受容器の時刻歴応答を模倣したフィルタにより触感の受容モデルを構築する。

受容モデルの概要は以下の通りである。まず、ヒト指腹部の有限要素解析により、受容器配置位置のひずみエネルギーの時空間分布を算出する。各受容器配置位置のひずみエネルギーはその受容器のインパルス発射頻度と相関関係にある<sup>11)</sup>。有限要素解析より算出したひずみエネルギーに受容器の応答特性と同等のフィルタ特性を持つ伝達関数を畳み込み積分することにより、受容器のフィルタ特性を考慮する。フィルタリングしたひずみエネルギーより、脳に伝達される情報と相関があると考えられる特微量を抽出する。

5.1 ヒト指腹部の有限要素解析 従来、微小突起の認識システムに有限要素解析を用いた研究はある<sup>12)</sup>が、触感のような微細な感覚に適応した例はない。このため、本研究では、以前筆者らが構築したヒト指腹部の 2 次元有限要素モデル<sup>13)</sup>を改良して用いることとする。筆者らは、ヒト指腹部皮膚の特徴であ

Table 1 Result of factor analysis of tactile texture evaluation

	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Independent factor
chiku-chiku	0.93	0.33	-0.09	0.02
shittori	-0.87	-0.13	-0.29	0.14
jyari-jyari	0.85	0.47	-0.12	0.04
kasa-kasa	0.85	0.19	0.45	0.04
tsuru-tsuru	-0.78	-0.56	-0.05	0.07
zara-zara	0.75	0.60	-0.05	0.07
kyyu-kyyu	-0.69	-0.50	-0.50	0.03
boko-boko	0.27	0.96	-0.03	0.01
gotsu-gotsu	0.30	0.95	-0.08	0.01
sara-sara	0.21	-0.01	0.98	0.01
sube-sube	-0.41	-0.39	0.80	0.03
warm	0.49	0.54	0.57	0.14
cool	-0.47	-0.57	-0.52	0.18
Eigenvalue	8.60	2.65	1.18	
Comulative contributing rates	0.66	0.87	0.96	

る楕円型、3層の弾性構造、真皮乳頭、指紋などをモデル化した有限要素モデルを用いて、滑りや突起検出の際の各受容器や指紋の役割を明らかにしてきた。しかし、従来のモデルでは、指紋表面の形状が微視的には実際の指紋とは異なることや、表面の要素が触対象のピッチに対し大きいことにより、微細な表面粗さを有する対象との接触解析を行うことは困難であった。このため、本研究では、計測した指紋形状<sup>(14)</sup>を用いるとともに、要素サイズの小さい2層の角質層をモデル化することによって、詳細な表面形状を有する対象物との接触解析が可能な指断面モデルを構築した。図4に、構築した有限要素モデルを示す。ヒトの角質層の正確な弾性係数は知られていないため、本研究では、モルモットの計測結果<sup>(15)</sup>を参考に、角質外層の縦弾性係数を表皮の6倍の0.816MPa、角質内層の縦弾性係数を表皮の3倍の0.408MPaと仮定した。なお、ヒトの角質層の縦弾性係数の個人差は大きいことが知られており、上述の値は個人差の範囲内に十分収まっているものと考えられる。角質層を2層とした理由は、指紋内部の接触法線反力が接触中央部と接触両端に分離するのを

防ぐためである<sup>(16)</sup>。対象となる試料のモデルとしては、3章で述べた高さデータの計測値を用い、表面の凹凸パターンを表現した2次元剛体モデルを作成した。

本研究では、まず触対象モデルをヒト指モデルに0.125秒間に0.5mm垂直に押し込み、次の0.875秒間、速度40mm/sの横なぞり運動を行う合計1秒間の接触解析を行った。解析の時間ステップは、0.2ミリ秒とした。拘束条件の履歴は摩擦測定履歴と一致させた。また、接触状態を実際の現象と一致させるために、摩擦特性の同定を行った。摩擦力は凝着項と掘り起こし項に分けられる<sup>(17)</sup>。有限要素解析において、凝着項は、動摩擦係数として予め設定できるが、掘り起こし項は設定できない。指のような弾性体と表面凹凸のある対象との接触は、掘り起こし項が摩擦力に大きな影響を及ぼす。そのため、本研究では、有限要素解析で触対象モデルに加わる力から算出した動摩擦係数と、図3に示した実際の動摩擦係数とを一致させるよう凝着項を設定することにより、摩擦特性を同定した。解析結果と測定した動摩擦係数との誤差は15%以下であった。

図4に示した各受容器配置位置におけるひずみエネルギーの時空間分布を算出した。一例として、ある試料の計算結果を図5に示す。図5より、各受容器配置位置において受容器ごとに特徴的な受容特性が見られることがわかる。例えば、表面に配置されたSA I、FA Iの配置位置において、ひずみエネルギーは、対象の凹凸や接触面積、接触圧に応じている。一方、深部のFA IIのひずみエネルギーは、指全体の微小な振動挙動に応じている。各受容器はその配置位置により、機械刺激の情報を分解し、受容の役割を分担していると考えられる。この役割分担は、各受容器の応答特性によりさらに明確になることが判明した。次節にて詳細を述べる。

**5.2 受容器フィルタリング** Freemanらの研究により、ヒト皮膚無毛部に存在する触覚受容器は、固有の周波数応答特性を有していることが明らかにされている<sup>(18)</sup>。また、筆者らの解析により、皮膚の弾

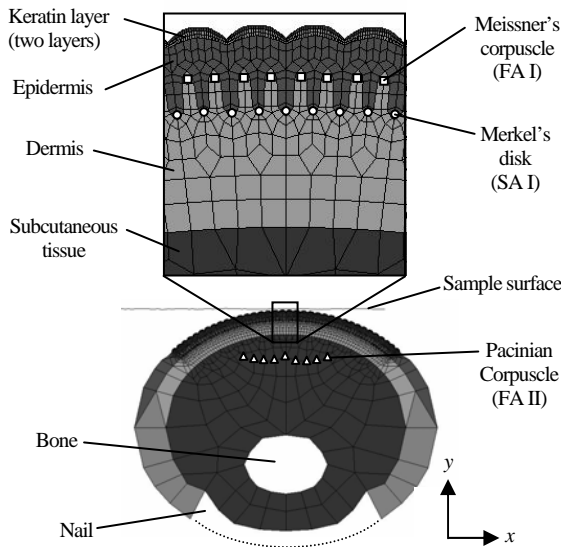


Figure 4 Finite element model of human finger

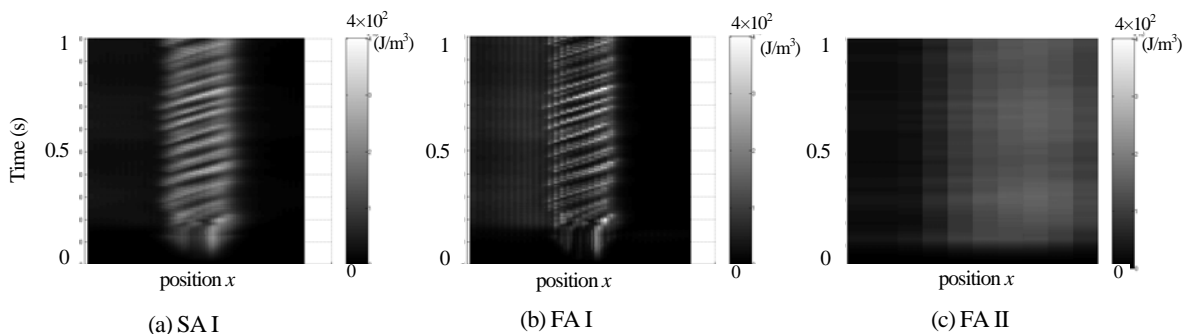


Figure 5 Time-space distribution of strain energy calculated by FE analysis

性構造による周波数特性の変化はほとんどないことが明らかにされている<sup>(19)</sup>。したがって、有限要素解により得られたひずみエネルギーの時空間分布に対し、受容器の応答特性を模倣した信号処理を行うことにより、実際を受容情報に近づけることができる。このため、生理学的知見をもとに、各受容器の時刻歴応答を模倣したフィルタを作成した。受容器別のフィルタ関数の特性を表2に示す。フィルタ特性としては、比較的線形位相に近い位相特性を持つベッセル特性を用いた。例えば、マイスナー小体(FA I)の伝達関数  $H_{mei}(s)$  は、

$$H_{mei}(s) = \frac{\alpha B_w}{s^2 + w_0^2 + B_w} \quad (1)$$

と表される。ここで、 $w_0$  は中心周波数、 $B_w$  は帯域幅、 $\alpha$  はゲインである。各受容器フィルタの伝達関数  $H(s)$  を部分分数分解した後、逆ラプラス変換し、 $h(t)$  を算出した。有限要素解析より算出したひずみエネルギーの時空間分布を  $f(x, t)$  とし、以下に示す畳み込み積分より、フィルタリングしたひずみエネルギー  $f^*(x, t)$  を算出した。ただし、受容器間の比較を行うため、畳み込み積分の値を標準化した。

$$f^*(x, t) = \frac{\sum_{\tau=0}^T f(x, t-\tau)h(\tau)}{\sum_{\tau=0}^T |h(\tau)|} \quad (2)$$

Table 2 Filter characteristic of tactile receptors

Receptor	SA I	FA I	FA II
Type	Low-pass	Band-pass	Band-pass
Order	1st	1st	2nd
Central frequency	-	40Hz	250Hz
Band pass frequency	50Hz	70Hz	120Hz
Gain	0.04	0.1	10

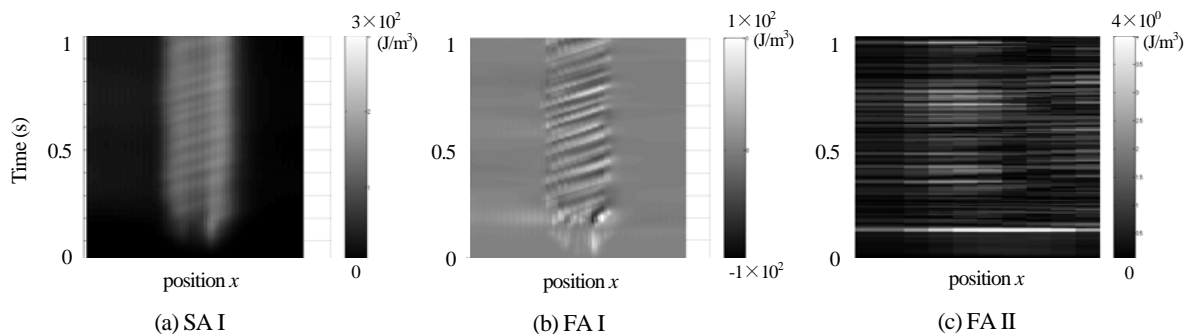


Figure 6 Estimated firing pattern of mechanoreceptors obtained after filtering FE results

ここで、 $T$  はサンプル時間を示す。一例として、図5と同じ試料における、ひずみエネルギーをフィルタリングした後の時空間分布を図6に示す。この図はそれぞれの触覚受容器の発火頻度の予測値を表す。ただし、図6のバーレンジの値は図5とは異なり、また、受容器の種類ごとに異なる。図6より、それぞれの受容器の触感受容における役割が図5に比べより明確になったことがみてとれる。図5と図6を受容器ごとに比較する。

- メルケル小体(SA I)のひずみエネルギー分布は、50Hz までのローパスフィルタをかけることによって、凹凸情報がなまった。このため、図(a)の黒い部分が非接触、薄い部分が接触とみなせるパターンとなった。すなわち、接触の有無をより明確に認識しうるようなパターンになった。
- マイスナー小体(FA I)では、バンドパスフィルタをかけることにより、接触情報が除去され、図(b)の左下から右上に向かう斜線のパターンがより明確になった。このため、マイスナー小体では、本パターンを利用して対象の凹凸パターンを検出していると考えられる。
- パチニ小体(PC)では、高周波数域のバンドパスフィルタにより、100Hz 前後の振動が左右の白い筋として顕著に見てとれる。また、垂直押し込みから水平移動へ運動の方向が切り替わる0.125秒でパルス的にひずみエネルギーが大きくなっている。

すなわち、メルケル小体は接触圧や低周波数の凹凸、マイスナー小体は粗さパターン、パチニ小体は高周波数の粗さや固着・滑り情報、運動の変化を検出しているといえる。これらの結果は、従来の知見<sup>(20)</sup>とよく一致する。

**5.3 特徴量の抽出** フィルタリング後のひずみエネルギーの時間分布は、各受容器のインパルス発射確率と一定の相関があると考えられる。また、脳の認識における最小単位は、ニューラルネットワークの大きさとアクションポテンシャルの伝達速度より、約0.1秒と推察されている<sup>(21)</sup>。したがって、本研究

では、選定した全ての試料に対し、定常状態における、フィルタリング後のひずみエネルギーの 0.1 秒間の積分値  $F(x, k)$  を 0.2 ミリ秒ずつ算出した。ここで、本研究における定常状態とは、加速の影響を無視できる 0.5 秒から 1 秒間の状態を表すものとする。算出方法を次に示す。

$$F(x, k) = \sum_{t=0.02k}^{0.1+0.02k} f^*(x, t) \quad (k = 0 \sim N) \quad (3)$$

ここで、 $N$  は定常状態におけるステップ数である。次に、

$$C = \frac{\sum_{x=X_1}^{X_2} \sum_{k=0}^N F(x, k)}{(X_2 - X_1 + 1)N} \quad (4)$$

として、時空間方向の平均値を算出した。ここで、 $X_1, X_2$  は指モデルの接触範囲を示す。本研究では、以上より算出された積分値  $C$  を特徴量として、6 章で述べる認識モデルの入力値として用いる。すなわち、3 つの受容器の特徴量より、3 次元の特徴量ベクトル、

$$\text{Input} = \begin{pmatrix} C_{mer} \\ C_{mei} \\ C_{PC} \end{pmatrix} \quad (5)$$

を、3 章で述べた構築用、評価用合わせて 14 種類の各試料に対して算出し、認識モデルの入力ベクトルとした。

## 6 脳内認識機構のモデル化

大脳皮質感覚野における認識機構の解明は、視覚野において特に進んでいる。視覚認識の要は、視覚野の階層性およびモジュール性にあることが明らかにされつつある<sup>(22)</sup>。触感を認識する体性感覚野も、視覚野と同様の構造を有していることが解剖学的に明らかにされている<sup>(7)</sup>。本研究では、触感の認識が階層性・モジュール性を有する情報処理によって行われると仮定し、4, 5 章の結果を用いて認識機構のモデル化を行う。また、有限要素解析を用いた特徴量抽出法の有効性を検証するための比較対象として、従来の触感評価<sup>(2)</sup>に用いられてきた物性、算術平均粗さ、動摩擦係数およびその標準偏差を標準化したものを入力値としたモデルも構築する。

**6.1 モデル構築** 本研究では、4 章の因子分析により求めた 3 つの因子を、ヒトはそれぞれ独立したモジュールにより認識すると仮定する。モジュール別に中間層を独立させた 3 層のフィードフォワード型ニューラルネットワークにより、認識モデルを構築する。図 7 に概要を示す。上記のモデルのモジュ

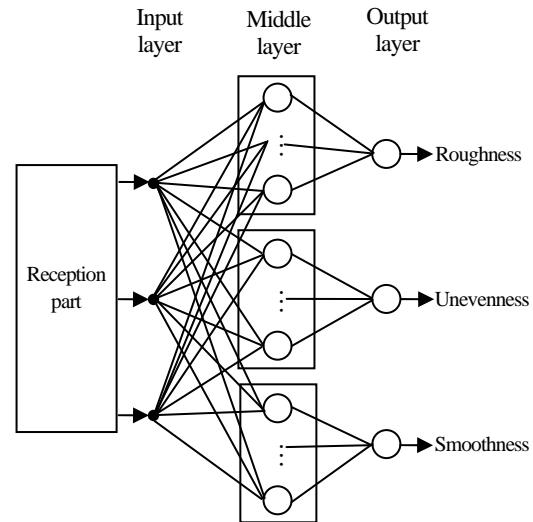


Figure 7 Perception part by modular type of neural network

Table 3 Characteristic of perception models

	Regression model	Normal NN model	Modular NN model
Nonlinearity	×	○	○
Modularity	○	×	○

Table 4 Element number of middle layer in each neural network model

Input	Normal NN model	Modular NN model		
		Roughness	Unevenness	Smoothness
Strain energy	11	3	6	6
Physical property	17	10	2	10

ール性および非線形性の有効性を示すための比較対象として、重回帰分析を行うとともに、一般的な中間層一体型のニューラルネットワークによるモデルも構築した。各モデルの比較を表 3 に示す。表 3 より、中間層分離型ニューラルネットワークが有効であることが予想される。4 章で述べた各触感因子の因子得点を各モデルの出力の目標値とし、誤差逆伝播法<sup>(23)</sup>を用いたニューラルネットワークの学習を行った。すなわち、予め適当に重みを設定し、モデル構築用の 10 種の試料における 3 つの受容特性の特徴量を入力値、3 つの因子得点を目標値、出力値と目標値の差の二乗を評価値として、学習を行った。過学習を考慮し、評価値が 0.01 以下になるまで各結合の重みを更新した。粗さモジュール、凹凸モジュール、滑らかさモジュールの中間層の素子数は、それぞれ 3, 6, 6 とした。中間層の素子数は、少ない学習データで精度のよい推定を行うことができる 1 つ抜き法<sup>(24)</sup> (Leave-one-out method)により決定した。比較する他のモデルにおいても同様の方法で中間層

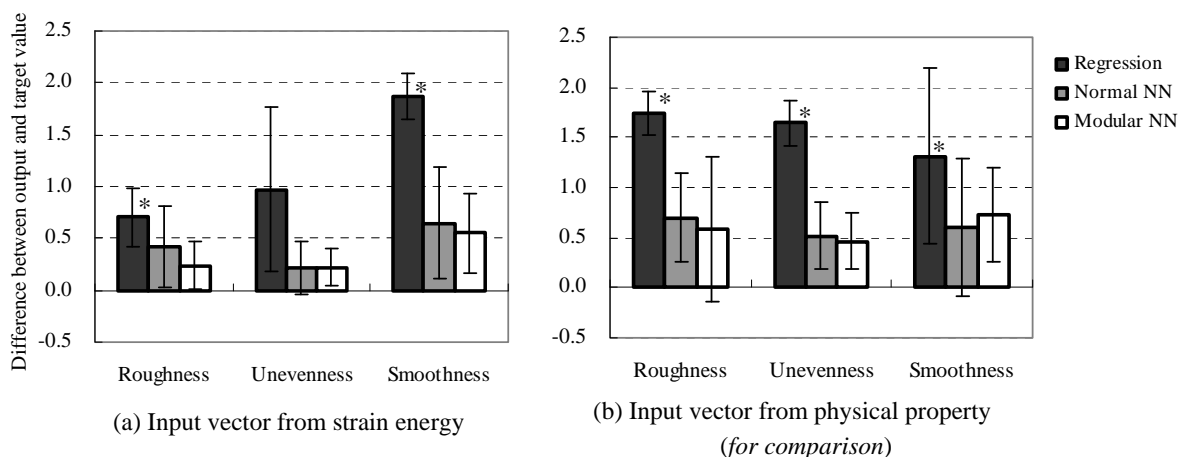


Figure 8 Average difference between target value and output value from each perception model  
 (\*: No significant data within 90.0% confidence interval)

の素子数を決定した。結果を表4に示す。

**6.2 評価** 構築したモデルに評価用の試料4種の受容特性の特徴量を入力し、出力値を算出した。モデルの出力値と4章にて前述した官能評価により求めた因子得点との差を算出した。評価用試料間で平均値を求め、各認識モデルの評価値とした。結果を図8に示す。ここで、因子得点は標準化しているため(4章参照)、その値の範囲は標準正規分布に従っている。また、図8内のバーは評価試料間の標準偏差を示す。重回帰式のモデルでは、凹凸因子以外の因子において、90.0%信頼区間にて有意判定されなかった。すなわち、線形和である重回帰式では、本研究で対象とした刺激範囲において、触感認識モデルを構築できない。図8では、参考データとして、有意ではない重回帰式を用いた評価値に\*を付けて示す。認識モデルの評価値が小さいほど、ヒトの感性に近い、精度のよい認識モデルであると考えられる。図8より、ひずみエネルギーから算出した入力値と分離型ニューラルネットワークを用いた認識モデルの各因子の評価値が最小であることがわかる。すなわち、本研究で提案する手法の優位が示されたといえる。詳細な検証を6.2.1項および6.2.2項にて述べる。

**6.2.1 FEMを用いた特徴量抽出法の有効性** 前述した物性を入力値とした場合と比較することにより、本研究で提案するひずみエネルギーの積分値を特徴量とした手法の有効性を検証する。図8の(a)と(b)を比較することにより、ひずみエネルギーの積分値を特徴量とした方が、総じて評価値が小さく、認識システムとして優れていることがわかる。また、表4より、物性を入力値とした場合、中間素子数が概ね多くなることがわかる。これは、皮膚の弾性挙動を介した後のひずみエネルギーを特徴量とした場合に比べ、触対象の物性から受容器の発火に至る過程の非線形性が強いことに起因すると考えられる。

**6.2.2 中間層分離型ニューラルネットワークの有効性** 図8(a)において、中間層分離型のニューラルネットワークによる評価値が、重回帰分析や中間層一体型のニューラルネットワークより小さいことがわかる。すなわち、非線形性、モジュール性を考慮することにより、推定精度のよいモデルが構築されたと考えられる。また、学習回数も、分離型の方が少なかった。したがって、中間層をモジュール化したモデルにより、情報処理の精度および計算速度が向上することが明らかになった。この結果、体性感覚野の情報処理においても、視覚と同様の階層性、モジュール性が存在していることが示唆される。

**6.2.3 本触感認識モデルの評価と改良点** 図8において、本提案手法の認識モデルの各因子の評価値が最小となっていることから、本触感認識モデルは、ヒトの触感認識に最も類似したパターン認識を行えると考えられる。しかし、中間層一体型と分離型の分散はいずれも大きいため、両者の統計的差異は得られていない。このため、より多くの評価用データを用いることにより、本認識モデルの統計的有意性を確認することは今後の課題である。また、滑らかさのモジュールでは評価値が大きく認識が不十分であると考えられるため、この点の改良は今後の課題である。滑らかさに関する触感は、より細微な摩擦現象が関与することが明らかにされている<sup>(25)</sup>。また、本モデルでは、各触感因子を全て独立のモジュールと仮定したが、モジュール間に階層性があることも考えられる。したがって、より正確に摩擦現象を再現する有限要素モデルの構築やモジュール間の階層化を行うことにより精度の向上が可能であると考えられる。

## 7 結論

本研究では、ヒトの触感認識機構のモデルを構築した。まず、ヒト指腹部の受容部と脳内の認知部の

2 過程に分離し、ヒトの触感認識機構のモデルを構築した。受容部は有限要素解析およびフィルタリングによって、認知部は中間層分離型ニューラルネットワークによってモデル化した。次に、モデルの計算結果を官能評価の結果と比較し、構築したモデルは触感認識過程を精度よく推定していることを明らかにした。また、モデル構築に当たり、以下の点が重要であることを明らかにした。

- ・ 指の有限要素モデルによりモデルと物体のインタラクションを再現し、各受容器配置位置のひずみエネルギーを特徴量とすること
- ・ モジュール性を考慮したニューラルネットワークを構築すること

構築した触感評価システムにより、従来識別できなかった触感のわずかな違いも評価することができる。また、本モデルを用いて刺激と評価の関係を明らかにすることにより、触覚センサや触覚ディスプレイの開発への示唆を得ることができる。さらに、本モデルをリアルタイム認識システムへ発展させることにより、ロボットのような知能機械の体性感覚認識機構への応用も期待できる。より生理反応に近い受容特性の特徴量抽出法の構築や冷温覚や弾性といった他の感覚との統合、触感評価のロバスト性を考慮した認識モデル構築などは今後の課題である。

**謝辞** 本研究の一部は21世紀COEプログラム「知能化から生命化へのシステムデザイン」の援助により行われた。記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) H. Shirado, T. Maeno, Touch: Tactile Sense of Human and Robot, *Surface* (in Japanese), Vol. 41, No. 5 (2003), pp. 1-8
- 2) S. Kawabata, The feeling: Development of the Objective Evaluation of Fabric Hand, *The society of rubber industry Japan*, Vol. 63, No. 3 (1990), pp. 158-164
- 3) M. Tanaka, Development of Tactile Sensor for Monitoring Skin Condition, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 108 (2001), pp. 253-256
- 4) M. Hollins et al., Perceptual dimensions of tactile surface texture: A multidimensional scaling analysis, *Perception & Psychophysics*, Vol. 54, No.6 (1993), pp. 697-705
- 5) H. Shirado, T. Maeno, Modeling of Texture Perception Mechanism for Tactile Display and Sensor, *Virtual Reality Society of Japan*, Vol. 9, No. 3 (2004), pp. 235-240
- 6) M. M. Taylor et. al., *Tactile perception of texture*, In *Handbook of Perception III*, (1974), pp. 251-272, Academic Press
- 7) Y. Iwamura, *Touch*, (2001), pp. 56-90, 218-228, Igaku syoin
- 8) H. Shirado et al., Development of Artificial Skin Having Human Skin-like Texture (Realization and Evaluation of Human Skin-like Texture by Emulating Surface Shape Pattern and Elastic Structure), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 73, No. 726 (2007), pp. 179-184
- 9) E. Masuyama, *Sensory Evaluation* (in Japanese), (1989), pp. 12-49, Kakiuchi Syuppan
- 10) Y. Nakamori, *Sensory data analysis* (in Japanese), (2000), Morikita Syuppan
- 11) K. Kobayashi, T. Maeno, Relationship between the Structure of Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors. 2nd Report. Method of Dynamic Contact Analysis and Results for contact between the Finger and Plane Plate, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 64, No. 628 (1998), pp. 4798-4805
- 12) M. Ooka et al., A Tactile Recognition System Mimicking Human Mechanism for Recognizing Surface Unevenness, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 69, No. 682 (2003), pp. 1719-1725
- 13) T. Maeno et al., Relationship between Structure of Finger Tissue and Location of Tactile Receptors, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 63, No. 607 (1997), pp. 881-888
- 14) T. Maeno et al., Analysis on Geometry of Human Epidermal Ridges, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 701, (2005), pp. 245-250
- 15) Y. Matsumoto et al., Uniaxial tensile of horny layer, epidermis and deimis of guinea pigs, *Proceedings of Japan Mechanical Engineering Congress 2003*, Vol. V (2003), pp. 39-40
- 16) M. Konyo, T. Maeno, Development of the Detailed Finite Element Model of the Human Finger for Evaluation of Fine Texture Tactile Feelings, *JSME 18<sup>th</sup> Computational Mechanics Conference*, (2005), OS-27A 2702
- 17) J. Holling, *Tribology*, (1984), pp. 142-167, Kindaikagakusya
- 18) A. Freeman, K. O. Johnson, A model accounting for effects of vibratory amplitude on responses of cutaneous mechanoreceptors in macaque monkey, *J. Physiol.*, No. 323 (1982), pp. 43-64
- 19) M. Konyo et al., Condition for Presenting Static Pressure Sensation by Low Frequency Vibratory Stimulation, *Proceedings of the 11th Robotics Symposia*, pp. 179-185, (2006)
- 20) A. Higashiyama et al., *Tactile Sense and Pain* (in Japanese), (2000), pp. 67-82, Brain syuppan
- 21) K. Mogi, *Brain and Quaria*, (1997), pp. 131-133, Nikkei Science
- 22) M. Kawato, *Computational theory of brain*, (1991), pp. 303-386, Sangyo tosyo
- 23) I. Kumazawa, *Learning and Neural Network*, (1998), pp. 51-75, Morikita syuppan
- 24) K. Ishii et al., *Pattern Recognition*, (1998), pp.68-71, Ohmsha
- 25) Y. Kamikawa et al., Relationship between Tribological Characteristics and Perceived Texture when Humans touch Artificial Skin with/without Lubricants, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol 73, No. 730 (2007), pp. 1827-1833