

触感表示・検出のための材質認識機構のモデル化

白土 寛和^{*1} 前野 隆司^{*2}

Modeling of Texture Perception Mechanism for Tactile Display and Sensor

Hirokazu Shirado^{*1} and Takashi Maeno^{*2}

Abstract — It is necessary to ascertain the texture perception mechanism of humans in developing tactile devices that create or detect lifelike texture. In other words, we need to clarify what sort of information (stimulus) has to be combined and applied to the human skin to be recognized as texture of real material. In this paper, the relationship between object surface physicality and texture perception is discussed through multivariate analysis. We often quantified the tactile sense and texture perception through sensory evaluation. From the results, we built a model of the relationship. This model helps derive the tendency toward different types of texture such as metal, wood, plastic, fabric, etc., from object surface physicality; surface roughness, heat transfer property, and modulus of elasticity.

Keywords : Tactile Sense, Texture Perception, Surface, Multivariate Analysis, Sensory Evaluation

1. はじめに

触覚情報は、ヒトが接触した対象の把持や操作、認知を行ううえで必要不可欠である。なかでも「触感」は対象物の微細な表面状態を認知する知覚であり、近年注目されている。対象物表面状態の検出・表示を行う触覚センサ・触覚ディスプレイの開発が盛んに行われている。しかし、実素材の触感をリアルに検出または惹起する装置の開発には至っていない。この原因として、触感における刺激因子およびその組み合わせが明確ではないことが考えられる。

ヒトによる材質認識は、対象物の表面凹凸や弾性、熱伝導性といった物理特性をそれぞれセンシングし、脳内で分析・統合することによって行われている[1]。したがって、材質認識については複数の物理特性の影響を考慮しなければならない。例えば、材質認識における表面温度の影響は伊福部らによって研究されている。熱伝導率の差によって材質識別能力が大きく変わることや表面粗さの認識感度に温度依存性があることから材質の認識には温度が深く関わっていると考えている[2]。また表面粗さや硬軟の知覚に関して、「なぞる」という動的触察をすることによって認識率が向上することが数学的手法を用いて明らかにされている[3]。こうした触感に関する物理特性と材質認識との関係解明は、デバイス開発に限らず多くの分野で必要とされているため、布や木材など触れる対象物別の研究も多くなされている[4]。

以上のように材質認識の研究は物理特性や対象物を限定しなされていきた。しかし触感の表示・検出を目的とした装置を開発するためには、対象を限定せず、用いる物理特性も一般的に計測できるものでなければならない。本研究ではこの点に留意し、表1に示す20種類の試料に対し物理特性計測および官能検査を行う。試料は、種類を限定せず、一般的に触れる機会の多いと思われるものを選定した。その結果を用いて因子分析および重回帰分析を行うことで表面の物理特性と材質認識の関係を明らかにし、触感検出・表示を行う際の指標となり得るモデルを作成する。この際、触感における潜在的な因子の有無が材質認識に与える影響を比較検討する。

2. 対象物表面の物理特性の解析

表1に示した試料の表面粗さ、摩擦特性、熱特性、弾性を測定および解析した。

表1 解析対象とする試料
Table 1 Object samples

種類	試料
布類	綿・ポリエステル・デニム・羊毛フェルト
皮革	バロア・牛革ヌバック・羊皮
紙類	普通紙・ティッシュ
木材	ひのき・バルサ材
金属	銅・アルミニウム・ステンレス(sus304)・洋白(C7521)
樹脂	発泡スチロール・アクリル樹脂・硬質塩化ビニル
ゴム	ポリウレタンゴム・ブチルゴム

*1 慶應義塾大学大学院 理工学研究科

*2 同大学 理工学部

*1 Graduate School of Science and Technology, Keio Univ.

*2 Department of Science and Technology, Keio Univ.

表2 試料の物理量
Table 2 Physical properties

	中心線平均粗さ (μm)	動摩擦係数	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/(m·K))	伝熱特性値 (W ^{1/2} ·kJ ^{1/2} /(m ² ·K))	縦弾性係数 (MPa)
絹	1.7×10 ³	3.6×10 ⁻¹	3.0×10 ²	4.2×10 ⁻²	4.2×10 ²	1.1×10
ポリエステル	1.0×10 ³	4.0×10 ⁻¹	2.8×10 ²	4.2×10 ⁻²	3.4×10 ²	4.2×10
デニム	1.5×10 ³	3.6×10 ⁻¹	3.3×10 ²	5.5×10 ⁻²	4.2×10 ²	7.2
羊毛フェルト	1.4×10 ⁴	3.4×10 ⁻¹	3.8×10 ²	4.0×10 ⁻²	1.3×10 ³	2.3
ベロア	1.1×10 ⁴	6.2×10 ⁻¹	9.5×10 ²	1.6×10 ⁻¹	2.5×10 ³	7.8×10 ⁻¹
ヌバック	1.9×10 ³	4.1×10 ⁻¹	9.5×10 ²	1.6×10 ⁻¹	8.5×10 ²	5.4×10
羊皮	9.7×10 ²	8.4×10 ⁻¹	9.5×10 ²	1.6×10 ⁻¹	8.8×10 ²	7.7×10 ⁻¹
紙	4.0×10 ²	3.1×10 ⁻¹	9.0×10 ²	6.0×10 ⁻²	3.3×10 ²	4.5×10 ³
ティッシュ	2.5×10 ³	3.1×10 ⁻¹	2.9×10 ²	3.7×10 ⁻²	4.7×10 ²	1.5×10
ひのき	1.1×10 ³	4.1×10 ⁻¹	3.8×10 ²	9.5×10 ⁻²	4.0×10 ²	9.0×10 ³
パルサ材	1.9×10 ³	3.7×10 ⁻¹	1.3×10 ²	7.0×10 ⁻²	3.0×10 ²	3.7×10 ³
銅	6.4×10	1.4	8.9×10 ³	4.0×10 ²	8.9×10 ²	1.3×10 ⁵
アルミニウム	8.5×10	1.6	2.7×10 ³	2.4×10 ²	6.1×10 ²	7.1×10 ⁴
ステンレス	7.5×10	2.1	7.9×10 ³	1.6×10	1.1×10 ³	1.5×10 ⁵
洋白	9.0×10	1.0	8.7×10 ³	3.6×10	8.9×10 ²	1.2×10 ⁵
発泡スチロール	2.1×10 ³	9.3×10 ⁻¹	2.9×10	3.8×10 ⁻²	2.4×10 ²	2.2×10 ³
アクリル	1.7×10	1.6	1.2×10 ³	2.1×10 ⁻¹	1.8×10 ²	3.0×10 ³
硬質塩化ビニル	2.6×10	2.0	1.4×10 ³	1.6×10 ⁻¹	2.7×10 ²	3.4×10 ³
ポリウレタンゴム	4.6×10 ³	1.0	1.2×10 ³	1.5×10 ⁻¹	2.4×10 ³	1.3×10 ²
ブチルゴム	1.2×10 ²	1.3	9.2×10 ²	1.3×10 ⁻¹	3.9×10 ²	6.9×10

2.1 表面粗さ

試料の表面粗さの計測には深度測定顕微鏡(VK-9500, キーエンス(株)製)を用いた。観察測定範囲を 1350μm×1012μm とし、それぞれ 1.31μm 間隔で試料表面の高さを測定した。測定したデータから中心線平均粗さを算出し、その値を表面粗さの物性値とした。

2.2 摩擦特性

ひずみゲージを用いた自作の装置によって、それぞれの試料をなぞるときの力を水平・垂直方向に分離して測定し、その比率から動摩擦係数を算出した。

2.3 热特性

热特性として、文献[5]を参考に、密度 ρ 、比熱 c 、热伝導率 k のデータを得た。またヒトの温覚に影響を与える物理特性を伝熱方程式より算出した。指腹部と触対象を準無限固体と仮定し、それらが自由表面で接触するとした場合、知覚する表面温度 T_s は、

$$T_s = \frac{(k\rho c)_A^{1/2} T_{Ai} + (k\rho c)_B^{1/2} T_{Bi}}{(k\rho c)_A^{1/2} + (k\rho c)_B^{1/2}} \quad (1)$$

と表される[6]。ここで T_{Ai} は指の初期温度、 T_{Bi} は対象物の初期温度である。本研究では、算出した物理量 $(k\rho c)^{1/2}$ を伝熱特性値と呼び、その値を热特性の物性値として用いることとした。

2.4 弹性

金属や樹脂については文献[7][8]より、布類や皮革については引張試験より、それぞれの縦弾性係数の値

表3 物理特性の因子分析結果

Table 3 Factor analysis results of physicality

	因子1	因子2	因子3
伝熱特性値*	0.77	0.43	0.25
熱伝導率*	0.74	0.40	0.30
密度*	0.72	0.42	0.12
中心線平均粗さ*	-0.35	-0.71	-0.21
動摩擦係数	0.46	0.67	0.17
縦弾性係数*	0.40	0.54	0.43
固有値	5.21	0.77	0.59
累積寄与率	0.74	0.85	0.94

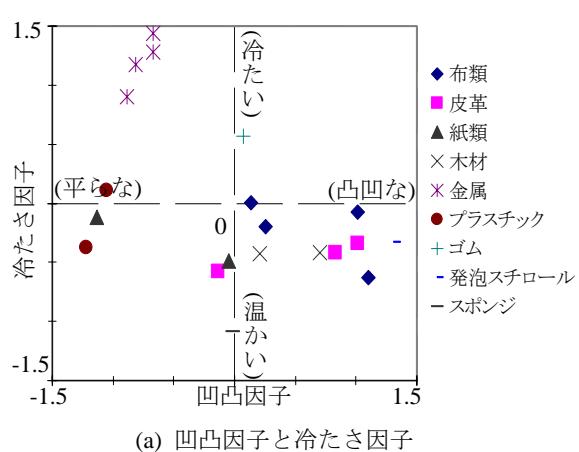
*は対数変換値

を得た。ただし、布類や皮革の縦弾性係数は、なぞり運動時の最大垂直荷重以下での領域で線形近似することによって算出した。なぞり運動時の垂直荷重の最大値は、2.2 節の計測結果より 0.2 N とした。

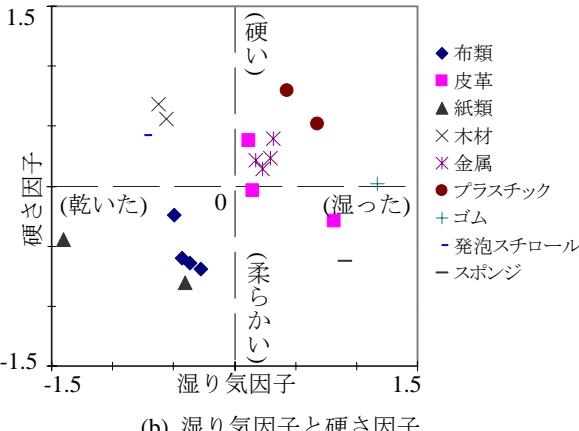
得られた物理量の値を表2に示す。表2に示した物理量の値に対して正規化した後、因子分析を行った。これは3章で述べる官能評価の結果との重回帰分析をする際、重回帰式の説明変数間で相関が大きい場合に生じる多重共線性の問題を回避するためである。その結果を表3に示す。ただし物理特性の値は4.2 節で述べる理由により対数変換した。3因子での累積寄与率が 0.94 であることから、9割以上の表面状態を表3に示す3つの因子で説明できると考えられる。

表 4 触感の評価項目に対する因子分析の結果
Fig.4 Factor analysis results about evaluations of tactile perception

評価項目	因子1	因子2	因子3	因子4	独立因子	因子1	因子2	因子3	因子4
すべすべした - ざらざらした	-0.81	0.31	0.10	0.19	0.20	ざらざらした			
凸凹な - 平らな	0.78	-0.38	-0.22	-0.16	0.17	凸凹な			
きめの粗い - きめの細かい	0.76	-0.38	-0.16	-0.07	0.25	きめの粗い			
ちくちくする - ちくちくしない	0.67	-0.28	-0.21	-0.11	0.42	ちくちくする			
滑らかな - 引っかかる	-0.67	0.10	-0.13	0.09	0.52	引っかかる			
ヒヤッとした - ヒヤッとしたない	-0.33	0.82	0.20	0.09	0.18	ヒヤッとした			
温かい - 冷たい	0.40	-0.74	-0.24	-0.14	0.21	冷たい			
重厚な - 軽薄な	-0.27	0.56	0.32	0.22	0.46	重厚な			
しっとりした - 乾いた	-0.06	0.11	0.78	-0.02	0.37	しっとりした			
ぬるぬるした - さらさらした	-0.03	0.17	0.72	0.07	0.45	ぬるぬるした			
硬い - 柔らかい	-0.49	0.54	0.12	0.68	0.01	硬い			
弾力性のある - 弾力性のない	0.46	-0.43	0.09	-0.31	0.50	弾力性のない			
固有値	6.38	1.69	0.91	0.56		凹凸因子	冷たさ因子	湿り気因子	硬さ因子
累積寄与率	0.53	0.67	0.75	0.79					



(a) 凹凸因子と冷たさ因子



(b) 湿り気因子と硬さ因子

Fig. 1 Factor score space of tactile perception

3. 触感の統計解析

SD 法(Semantic Differential Method)を用いた官能評価により触感を定量化した。被験者は 20 代前半の男女 30 人とし、表 1 に示した 20 種類の試料を指先でなぞることによって、12 種の評価項目(温かい/冷たい、硬い/柔らかい、ヒヤッとした/しない、すべすべ

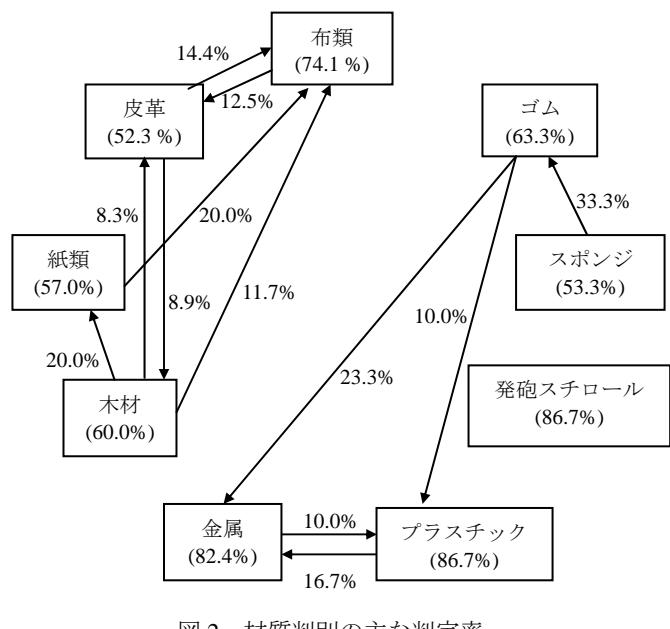


図 2 材質判別の主な判定率
Fig. 2 Rate of material determination

した/しない、ちくちくする/しない、ぬるぬるした/さらさらした、重厚な/軽薄な、滑らかな/引っかかる、弾力性のある/ない、しっとりした/乾いた、きめの粗い/細かい、凸凹な/平らな)を 7 段階で評価させた。評価項目について、他の研究[3][9]を参考にし、かつ 6 人の被験者を用いて「触感」から連想される形容語を集め、予備実験より整理・選定した。また各試料について 9 つの選択肢(布類、皮革、木材、金属、紙類、プラスチック、発泡スチロール、ゴム、スポンジ)による材質の判定をさせた。視覚効果を防ぐため、試料を目に触れさせず、試料は不規則に呈示した。評価基準の変動を防ぐため、基準試料(ひのき)を用意し、隨時比較して評価させた。実験は温度、湿度ともに一定に保たれた実験室で行い、試料は実験室内に 24 時間放置して室温と同程度にした。

SD 法によって得られた結果を標準正規分布に従

い正規化した。正規化した評価値より因子分析を行い、触感の潜在的な因子を4つ抽出した。因子分析の結果を表4に示す。表4に示すように、因子それぞれを、「凹凸因子」、「冷たさ因子」、「湿り気因子」、「硬さ因子」と名づけた。抽出した因子によって試料別の因子得点を算出した。図1に触感の因子得点空間の一例を示す。因子得点空間から、試料間における触感の特徴を捉えることができる。例えば、図1より、金属とプラスチックは凹凸因子の得点がほぼ同じ値であるが、冷たさ因子の得点は大きく異なる。つまり、金属とプラスチックは、冷温感のみ触感が異なることがわかる。このほかにも、布類と皮革では、乾湿感以外は似た触感を与えることや、発泡スチロールは木材に近い触感を与えることがわかった。材質判定によって得られた材質認識の主な判定率を図2に示す。図2において、矢印上の値が誤解率、()内の値は正解率である。例えば、木材を触って木材と認識した率は60.0%であり、布類と認識した率は11.7%である。この結果より、因子得点空間内で近接した材質間の誤答率が高いことがわかる。したがって、ヒトの材質認識機構をモデル化する上で触感因子を考慮する必要があると考えられる。このため、4章において、触感因子の有無が材質認識に及ぼす影響について統計解析した結果を述べる。

4. 材質認識機構の解析

ヒトは対象物に触れ、そこから得た触感を分析することによって、触った対象の材質を認識すると考えられる[1]。したがって、本章では、2, 3章より得られた試料表面の物理量、触感の因子得点、材質認識の判定率を多変量解析することで、材質認識機構のモデルを構築する。また、材質認識機構における触感因子の必要性を検討する。

4.1 物理特性と触感の多変量解析

まず、各物理特性と各触感因子との関係を調べるために、相関係数を算出した。精神物理学者であるFechnerは「知覚認識は対象の物理量そのものではなく対数変換した物理量を知覚することによって行われている」と述べている[10]。この知見より、比率を除く物理特性を常用対数に変換した結果、相関は向上した。一例として、中心線平均粗さと各触感因子の相関係数の大きさを対数変換前後で比較したグラフを図3に示す。図3より、中心線平均粗さの値を対数変換した場合には、すべての因子との相関が向上することがわかる。したがって、ヒトが触感を認識する際にも、物理量を対数変換して認識していると考えられる。表5に、物理特性の対数変換値と触感の因子得点の相関係数を示す。99.0, 99.9%信頼区間において有意と判定された係数を薄い灰色および濃い灰色で示す。

次に、各触感因子に対する物理特性の影響を調べ

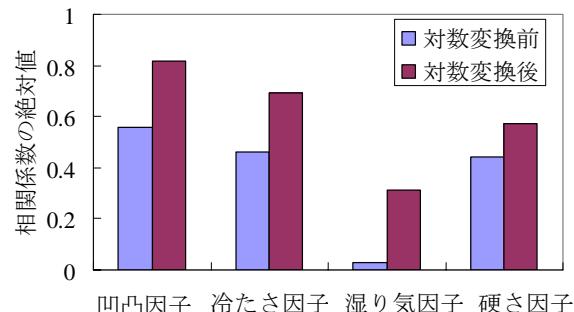


図3 中心線平均粗さと各触感因子との相関

Fig.3 Correlation between roughness and each tactile factors

表5 物理特性と触感因子の相関係数

Table 5 Correlation coefficients between physicality and tactile factor

	触感の潜在的な因子			
	凹凸	冷たさ	湿り気	硬さ
中心線平均粗さ*	0.82	-0.69	-0.31	-0.57
動摩擦係数	-0.62	0.56	0.60	0.53
密度*	-0.69	0.66	0.52	0.17
熱伝導率*	-0.51	0.86	0.33	0.32
伝熱特性値*	-0.59	0.83	0.43	0.28
縦弾性係数*	-0.59	0.67	-0.03	0.56

*は対数変換値

るため、重回帰分析を行った。ただし、多重共線性の問題を回避するため、表3に示した因子分析の結果より、説明変数を中心線平均粗さ、伝熱特性値、縦弾性係数の3変数に限定した。ここで、触感呈示および検出装置のためのモデル構築を行う際、計測可能な物理特性を用いる必要があるため、因子ではなく最も相関が少ない物理特性を用いた。その結果、95.0%信頼区間で全ての重回帰式が有意判定された。結果の一例として、凹凸因子に関する重回帰式は、

$$\begin{aligned}
 (\text{凹凸因子}) = & 0.60 \times (\text{中心線平均粗さ}^*) \\
 & -0.13 \times (\text{伝熱特性値}^*) \\
 & +0.02 \times (\text{縦弾性係数}^*)
 \end{aligned}$$

と表される。この重回帰式より、凹凸因子には中心線平均粗さが大きく影響することがわかる。また、伝熱特性値もある程度影響している。

以上の結果と表5に示す相関係数の結果において、縦弾性係数と凹凸・冷たさ因子との関係において違いが生じた。その要因として、相関係数とは異なり、重回帰分析においては他の説明変数の影響が生じたためだと考えられる。

4.2 触感と材質認識の多変量解析

4.1節と同様、材質の判定率と触感の因子得点の関係を調べるために、各試料に対して多変量解析を行った。重回帰式の目的変数は、3章で述べた材質の判定率とした。皮革、発泡スチロール、ゴム以外の材質の重回帰式は、95.0%信頼区間で有意と判定され

た。以上の重回帰分析より、材質認識における各触感因子の影響を定式化した。例えば、金属およびプラスチックに関する重回帰式は、それぞれ

$$\begin{aligned}
 \text{(金属)} &= -0.05 \times (\text{凹凸因子}) \\
 &\quad + 0.38 \times (\text{冷たさ因子}) \\
 &\quad + 0.02 \times (\text{湿り気因子}) \\
 &\quad + 0.03 \times (\text{硬さ因子}) \\
 &\quad + 0.18 \\
 (\text{プラスチック}) &= -0.19 \times (\text{凹凸因子}) \\
 &\quad - 0.10 \times (\text{冷たさ因子}) \\
 &\quad + 0.12 \times (\text{湿り気因子}) \\
 &\quad + 0.20 \times (\text{硬さ因子}) \\
 &\quad + 0.13
 \end{aligned}$$

と表される。これらの重回帰式より、ヒトは金属を「冷たい」という触感によって、プラスチックを「硬く、平らで、湿っている」という触感によって認識していると考えられる。

4.3 触感因子の必要性の検討

触感因子の有無が材質認識に及ぼす影響を調べるために、触感因子を介さず、物理量と材質の判定率との重回帰分析を行った。そのF値の結果と、触感因子を介した場合の結果を図4に示す。図4より95.0%信頼区間で有意と判定される材質が触感因子を介さない場合には3つであるのに対し、触感因子を介した場合には6つである。すなわちヒトは対象表面の物理特性から直接材質を認識しているのではなく、物理特性から得られた触感を分析することによって材質を判定していると考えられる。また、数種の材質が触感因子を介した場合に有意判定されなかつた原因として、同材質間の試料で触感が大きく異なることや試料数が少なかつたことが考えられる。

4.4 材質認識機構のモデル化

以上の解析結果より、図5に示す触感認識機構のモデルを構築した。ただし重回帰式のF値が小さい皮革、発泡スチロール、ゴムは材質の種類から除いた。図5より、ヒトは、対象表面の物理量から惹起

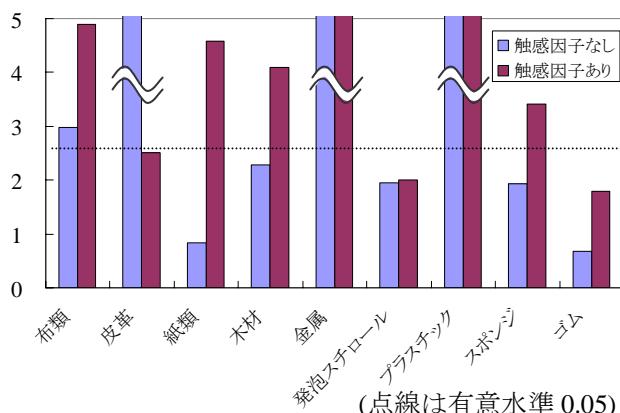


図4 触感因子の有無による重回帰式のF値の比較

Fig. 4 Comparison of F-values by multiple linear formula with or without tactile factors

する触感によって様々な材質を認識していることがわかる。具体的な例として布類の認識過程について述べる。まずヒトは中心線平均粗さ、伝熱特性値、縦弾性係数という物理特性を有する表面状態を対数間隔で知覚する。つぎにそれらを組み合わせて、粗さ感、乾湿感、硬軟感を認識する。そして硬軟感を基軸として分析することによって布類と材質判定すると考えられる。

図5に示したモデルから、重回帰分析より得られた重回帰式を用いて実際の物理特性と材質認識の関係を定式化した。物理特性と触感因子および触感因子と材質認識の重回帰式より、物理特性と材質認識との関係は、

$$\begin{pmatrix} Z_{\text{fabric}} \\ Z_{\text{paper}} \\ Z_{\text{wood}} \\ Z_{\text{metal}} \\ Z_{\text{plastic}} \\ Z_{\text{sponge}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.019 & -0.095 & 0.071 \\ 0.006 & -0.086 & 0.030 \\ 0.022 & -0.132 & 0.056 \\ -0.129 & 0.213 & 0.015 \\ -0.212 & 0.008 & -0.016 \\ 0.007 & 0.001 & -0.037 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \log_{10} x_1 \\ \log_{10} x_2 \\ \log_{10} x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.080 \\ 0.111 \\ 0.046 \\ 0.234 \\ 0.748 \\ 0.126 \end{pmatrix} \quad (2)$$

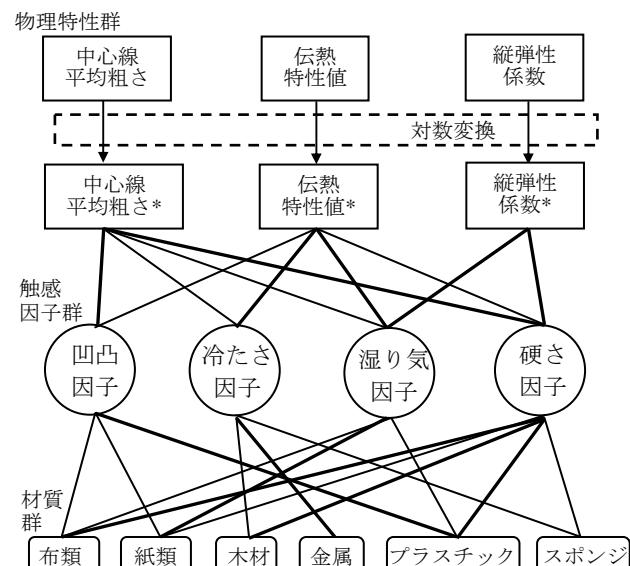


図5 材質認識モデル

Fig. 5 Texture perception model

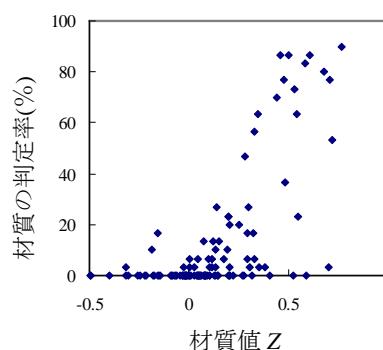


図6 材質値と材質の判定率の関係

Fig. 6 Relationship between texture property and rate of material determination

と表される。ここで、 x_1 は中心線平均粗さ(μm)、 x_2 は伝熱特性値($\text{kJ}/\text{m}^2/(\text{Ks})^{1/2}$)、 x_3 は縦弾性係数(MPa)である。式(2)における Z 値は、3 章で述べた材質の判定率を基にした、その材質の認識しやすさを示す指標とする。表 2 の物理量および式(2)を用いて算出した材質値と 3 章における材質判定実験の結果との関係を図 6 に示す。図 6 において Z 値が約 0.4 以上で材質の判定率が向上していることがわかる。すなわち、 Z 値が約 0.4 以上であれば、ヒトはその材質と認識する可能性が高いと考えられる。したがって材質値は、特定の材質感の呈示・検出を目的とした装置を製作する際の指標となり得る。例として、図 7 に、物理特性空間と金属の Z 値が 0.4 になる境界を示す。図 7 において、実際に金属である 4 つの試料は金属の材質値 0.4 以上の領域内に存在する、また金属への誤解率の比較的大きかった 2 つのプラスチック試料は境界面付近に存在する。したがって、触対象の中心線平均粗さ、伝熱特性値、縦弾性係数による座標が図 7 に示す領域内にあれば、ヒトはその対象を金属であると認識すると考えられる。

5. まとめ

本研究では、微細な表面状態を認識する材質感の認識機構を解析した。すなわち、触感因子の因子得点と対象表面の物理量や材質の判定率の間の多変量解析を行った。その結果、材質感認識機構の全体像をモデル化した。以下に得られた知見を述べる。

- 「触感」から連想される評価は、粗さ感、冷温感、乾湿感、硬軟感に関する 4 つの潜在的な因子に集約される
- 触感の潜在的な因子は、表面粗さ、熱特性、弾性の 3 つの物理量によって特徴付けられる
- ヒトは、触感の潜在的な因子の情報を複合させ

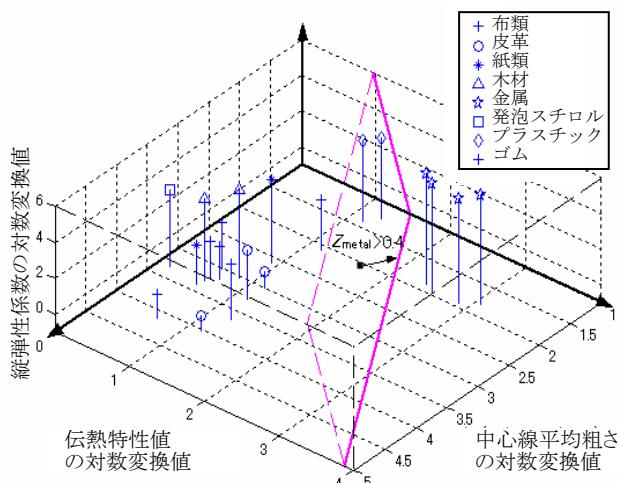


図 7 金属の材質値と物理特性の関係

Fig. 7 Relationship between physicality and metal texture property

ることによって、複数の材質を認識する

- 対象表面の物理特性と材質認識との関係は、触感の潜在的な因子を介することで定式化して表すことができる

なお、モデル細部の解析や触感に対する環境の影響の考慮は今後の課題である。

本研究の一部は、文部科学省平成 15 年度 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」によることを記し、謝意を表す。

参考文献

- [1] 岩村、タッチ、医学書院、初版、pp. 148-161, 2001
- [2] 重村、伊福部ほか、触感ディスプレイのための基礎研究—温度による受容特性および触感の変化—、ヒューマンインターフェイスシンポジウム 2000, pp.215-218, 2000
- [3] 西松、鳥羽ほか、能動的運動による材質判別評価について、感性工学研究論文集, vol.1, no.1, pp.39-44, 2001
- [4] 宮下、河村ほか、擦動型触覚センサによるテクスチャの識別、機械力学・計測制御講演会論文集, vol.A, pp.269-272, 1996
- [5] 日本機械学会、伝熱工学資料、日本機械学会、第 4 版, pp.30-31, 312-322, 1986
- [6] Frank,P.I. , David,P.D.W., Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley & Sons, 3rd ed, pp.259-262, 1990
- [7] 幡野、工業材料便覧、日刊工業新聞社、初版, p.605, pp.744-783, 1981
- [8] 日本規格協会、非金属材料データブック、平文社、第 2 版, pp.3-11, p.35, 367, 588, 1985
- [9] 昆陽、田所ほか、ICPF アクチュエータを用いた触感ディスプレイの研究 第 3 報：触感の量量化、日本ロボット学会学術講演会, pp.963-964, 2000
- [10] 大山、今井、和氣編：新編 感覚・知覚心理学ハンドブック、誠信書房、第 3 版, p.56, 1994

(2004 年 4 月 12 日受付)

[著者紹介]

白土 寛和 (非会員)

2004 年慶應義塾大学理工学部機械工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科総合デザイン工学専攻に入学、現在に至る。



前野 隆司 (正会員)

1984 年東京工業大学工学部機械工学科卒業、86 年同大学機械工学専攻修士課程修了。同年キヤノン(株)勤務。95 年慶應義塾大学理工学部機械工学科専任教師、99 年同助教授、現在に至る。専門はロボティクス、アクチュエータ・センサ工学。(工学博士)

