

触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向

永野 光^{*1} 岡本 正吾^{*1} 山田 陽滋^{*1}

Research Directions in Structuring of Tactile Dimensions of Material Textures

Hikaru Nagano^{*1}, Shogo Okamoto^{*1}, and Yoji Yamada^{*1}

Abstract – This article describes research directions in the structure of perceptual/tactile dimensions of material textures. We introduce methods of psychological experiments and mathematical approaches for structuring tactile dimensions and summarize such dimensions revealed in previous studies. Furthermore, we discuss the dimensions from the points of view of sensory receptors. Holistically, we suggest that the material textures are composed of at least 5 perceptual dimensions, that are macro and fine roughness, hardness/softness, coldness/warmness, and friction (moistness/dryness, stickiness/slipperiness).

Keywords : Sensory Evaluation, Factor Analysis, Multi Dimensional Scaling, Mechanoreceptor

1. はじめに

物体の触り心地や材質感などの主観的な評価対象は、身のまわりの製品や素材の価値の一部と捉えられている。例えば、インターネット・ショッピングにおいて、商品の材質感を購買者に仮想的に提示することは、実際には目の前にない商品の価値を伝えることになる。また、材質感の提示は、バーチャルリアリティ・システムの臨場感を向上させる。このような技術には、材質感を定量的に表現することが必要とされる。そのためには、材質感を引き起こす物理量を推定するためのセンシング手法や、材質感を人に提示する触覚ディスプレイの開発が必要となる。これらの開発のためには、物体の材質感を表現するための情報はどのようなものであるかを解明する必要がある。

本論文では、凸凹や硬さなど素材表面の物理的性質の知覚を「材質感」、それら材質感を表現する空間の次元を「材質感次元」とそれぞれ定義する。現在、人が知覚している材質感を抽出し、材質感次元を定量的に表現する研究が進められている。これらの研究は、人と人工物間のコミュニケーションをより豊かにするような技術の開発に必要な不可欠だけでなく、人の触覚の原理を解明するという目的も含んでいる。

しかし、これまでに報告されている次元構成には大きなばらつきが見られ、統一的な見解はない。実験方法、数理的処理方法および用いられた試料が異なることが、ばらつきの原因と考えられる。そこで、本論文では、可能な限り多くの研究例を調査し、その結果を俯瞰することで、共通の次元構成を見出すことを目的とする。材質感次元を構成するために用いられる心

理的・数理的手法をまとめると共に、これまでに明らかにされてきた材質感の次元構成を整理する。マルチモーダルな情報である材質感について、視覚のみによって得られる材質感次元の構成に関する研究を紹介し、視覚と触覚によって得られる材質感次元との違いに言及する。また、皮膚の受容器や受容体の生理学的知見から、人が知覚し得る物理的刺激の次元の紹介も合わせ、ハプティクス分野の研究者らに紹介する。

2. 生理学的知見に基づく物理的刺激の次元

触覚は、広い意味として体性感覚と定義されており、皮膚表面において感じる皮膚感覚と、皮下の筋肉などにおいて感じる深部感覚に分類される。本論文が対象とする触覚は、皮膚に物理的刺激が加わることで生じる感覚であり、狭い意味での触覚である皮膚感覚である。この感覚は、主に皮膚に存在する受容器・受容体によって様々な刺激が受容されることで生じる。そこで、物理的刺激と受容器・受容体との関係から、人の感じ得る物理的刺激の次元をまとめる。

皮膚感覚に関する受容器は、表皮、真皮、皮下組織などに分布している [1]。その中には、神経線維の末端が特殊な形をした機械受容器と呼ばれるものと、末端には特定の構造をもたず神経線維の先端が枝分かれして広がっている自由神経終末が存在する。無毛部の機械受容器には、マイスナー小体、メルケル細胞、ルフィニ終末、パチニ小体の4種が存在すると言われていた。これらは、種類によって存在部位が異なり、また物理的刺激に対してそれぞれ異なる反応特性を示すことがわかっている。4種の受容器は、刺激に対する順応や受容野特性によって4種類の機械受容単位に分類される [2]。各機械受容単位は、順応が速く、受容野が狭い機械受容単位である FAI、順応が遅く、受容野

*1: 名古屋大学工学研究科

*1: Nagoya University, Graduate School of Engineering

表1 感覚（物理的刺激）と受容器・受容体，受容単位の関係

Table 1 Relationship between sensation (physical stimuli) and receptor

Sensation (Physical stimuli)		Receptor (Unit)
High-frequency vibration		Pacinian corpuscle (FAII)
Low-frequency vibration		Meissner corpuscle (FAI)
Sustained pressure		Merkel cell (SAI), Ruffini corpuscle (SAII)
Thermal stimulus	Warm	TRPV1, TRPV2, etc.
	Cold	TRPA1, TRPM8, etc.

が狭い SAI, 順応が速く, 受容野が広い FAII, 順応が遅く, 受容野が広い SAII であり, それぞれに 4 種の受容器すなわちマイスナー小体, メルケル細胞, パチニ小体, ルフィニ終末が対応すると言われている。また, 自由神経終末には機械的刺激, 化学的刺激, 熱的刺激に反応するものや, それらの複数に反応するものが存在する。

人が知覚する物理的刺激と, それを受容する受容器・受容体の関係 [1] を Table 1 に示す。受容器・受容体が反応することで人が知覚し得る物理的刺激は, 高周波振動覚, 低周波振動覚, 静的圧覚, 温冷覚の 4 次元からなると考えられる。

振動覚は, 対応する機械受容器の違いから高周波 (200Hz 付近) の振動と, 低周波 (30Hz 付近) の振動の 2 種類の知覚に分かれると考えられる。高周波の振動刺激については, 真皮下層や皮下組織に存在するパチニ小体によって主に受容され, 低周波の振動刺激については, 真皮が表皮層に突き出した乳頭部に主に分布するマイスナー小体によって主に受容される [1]。

静的圧覚については, 表皮の下層部に主に分布するメルケル細胞と, 真皮に主に分布するルフィニ終末が応答する。これらの機械受容器は, 圧力に対する順応が遅いため, 皮膚への持続的な圧力に対し反応する。

温冷刺激については, 温覚もしくは冷覚のみを生じさせる微小領域 (温点・冷点) が皮膚に存在することなどから, 温・冷刺激はそれぞれ異なる受容器によって検出されると考えられてきた。それぞれの刺激に反応する神経線維の存在が永く知られており (cold and warm fiber), 冷刺激に反応する神経は A δ および C 線維であるのに対し, 温刺激の場合は C 線維のみが存在する。痛みを伴うような熱・冷刺激は, いずれも A δ および C 線維の侵害受容器が関与する [1], [3]。これらの刺激を受容する機構として, 近年, 自由神経終末の TRP イオンチャネルの存在が明らかにされてきた。例えば, 約 43 °C 以上の刺激によって活性化する TRPV1 と呼ばれる受容体が存在する。その他, TRPV2, TRPV3, TRPV4 などの受容体が存在する。これらの受容体がそれぞれ異なった温度帯で活性化することで, 人は皮

膚における熱さや温かさを感じる。また, 冷覚としては, 17 °C 以下の刺激に反応する TRPA1 や, TRPM8 が存在する [4]。自由神経終末は, 痛みや痒みにも関係する。激しい痛みを伴う刺激が材質感に関与するとは考えにくい, 弱い痛みや痒みは材質感の知覚に寄与する可能性がある。また, 先述のメルケル細胞およびルフィニ終末は皮膚の温度低下にも反応し [3], [5], 冷たい物をより重く感じるという錯覚現象に寄与しているのではないかとされている。なお, TRP イオンチャネルは, 自由神経終末だけでなく, 皮膚の最外層にあたる表皮角化細胞にも存在し, TRPV4 が皮膚の温度に反応し, 皮膚からの水分蒸発量が調節されるなど, 温度センサとしての役割を持つことが報告されている [6]。

以上のように, 受容器・受容体が検出し得る物理的刺激の次元は少なくとも 4 種類存在する。しかし, これらの物理的刺激の次元が, そのまま材質感次元になるわけではない。これらの刺激の時空間的な合成により, 人が感じる材質感次元は決定される。

3. 材質感次元の構成に用いられる手法

素材のテクスチャを構成する材質感次元の抽出は次のような手順で行われる。まず, さまざまな素材に対し, 人が感じる材質感や主観的距離を, 定量的な主観データとして取得する。そして, 得られた主観データに対し数理的な処理を行い, 材質感を構成する潜在的な因子を抽出する。本節は, 主観データの取得方法および数理的処理方法をそれぞれまとめる。また, これまでの研究において使用された実績のある, 主観データの取得方法と数理的処理方法の組み合わせを Table 2 に示す。実績の多い組み合わせは○で, 可能であるが実績の少ない組み合わせは△で, それぞれ表す。

3.1 主観データの取得方法

主観データの取得方法の例として, SD 法, 一対比較法, 量的推定法, グループ分類法を紹介する。SD 法は, 粗さや柔らかさなどの変量ごとに主観データを取得する方法である。この手法により得られた主観データは, 因子分析や主成分分析などの数理的処理に用いることを前提としている。量的推定法, 一対比較法およびグループ分類法は, 個々の変量は考慮せず, 刺激間の総合的な主観的距離を取得する方法である。これらの手法により得られた主観データは, 多次元尺度構成法に適用することを前提としている。

SD 法 (Semantic differential method)

SD 法では, 参加者は, 「粗い-滑らか」など対立する形容詞対で構成された評価項目を用いて, 一つずつ提示される刺激の印象を尺度上に評定する。評価の尺度としては, 5 段階や 7 段階の尺度が多く用いら

表2 主観データの取得方法と数理的処理方法の組み合わせ

Table 2 Combination of mathematical methods and experimental methods for structuring perceptual dimensions

	FA・PCA	MDS
SD method	○	△
Paired comparison method		△
Magnitude estimation		△
Free sorting task		△

れる。この結果に対し、多変量解析を行うことで、テクスチャの材質感を構成する次元を抽出する。SD法は、[7]～[24]などの多くの研究で用いられた実績がある。SD法に用いる評価項目として、「ざらざら-すべすべ」など触覚に関する擬音語、擬態語を用いる場合もある[10],[11],[20]。例外的な用法として、早川らは、評価語であるオノマトペ自体をSD法を用いて分類し、得られた評価語の分布により試料の分類を行った[23]。

しかし、SD法では、参加者は形容詞対を用いて刺激を評価するために、形容詞対で表されない側面について評価を得られないという短所が存在する。また、評価項目を増やすことで、参加者の負担が大きくなり、信頼性のある評価が得られなくなる可能性も考慮しなくてはならない。

一対比較法 (Paired comparison method)

一対比較法では、参加者に、すべての刺激の中から選択された刺激対を呈示し、一定の判断基準に従って評価させる。代表的な一対比較法には、Thurstonの一対比較法と、Scheffeの一対比較法が存在する。Thurstonの一対比較法では、参加者は一定の選択基準に従って一方を強制的に選択する。Thurstonの一対比較法を用いて刺激間の主観的距離が評価された実績はない。これは、Thurstonの一対比較法を用いた場合、十分な信頼性を得るため、一つの刺激対に対し数十回の回答が必要とされ、全体の試行回数が大幅に増加するためと考えられる。Scheffeの一対比較法では、参加者は何段階かの形容詞尺度に従って刺激間の主観的距離を評価する。Scheffeの一対比較法によって得られたデータを基に、刺激間の非類似度を求め、数理的な解析に用いた実例はある[25]～[27]。

量的推定法 (Magnitude estimation)

質感次元の構成に用いられる量的推定法には、比率判断法とビジュアル・アナログ尺度の2種類がある。比率判断法では、参加者に、すべての刺激の中から選択された刺激対を呈示し、相対的な刺激間の非類似度を推定させる。ビジュアル・アナログ尺度では、参加者に、刺激対を呈示し、両端に評価基準が記された直線上で、刺激間の非類似度を推定させる。例えば、左

端に「よく似ている」、右端に「全く似ていない」と表記した直線を用いた場合、参加者は、左端からの距離を、提示された刺激間の非類似度として、直線上に印を付ける。材質感次元の構成に用いる刺激間の非類似度を取得するため、比率判断法を用いた研究例[28]、ビジュアル・アナログ尺度を用いた研究例[29]～[31]がそれぞれ報告されている。

グループ分類法 (Free sorting task)

グループ分類法では、参加者は、全ての刺激を同時に呈示され、刺激の類似度に従ってグループ分けを行う。分類されたグループより刺激間の非類似度を取得する方法として、次の一例がある。同じグループに属する刺激対に対する非類似度を0とし、異なるグループに属する刺激対に対する非類似度を1とする。グループ分類法によって取得された刺激間の非類似度を用いて材質感次元を構成した実績がある[32],[33]。

3.2 主観データの数理的処理方法

因子分析 (Factor Analysis: FA)

因子分析とは、取得された多変量データの中から、変数間の相互依存の強さを分析し、潜在的な因子を抽出する方法である。因子分析では、まず初めに、変数間の関係の強さを表す相関係数を求める。そして、その値を基に、変数の数よりも少なく、できるだけ少数で元の多変量データを表現する共通因子を求める。

この方法は、SD法を用いて得られた主観データに対し使用されることが多い。このとき、 n 個の刺激に対して、 p 種類の形容詞対を用いて評価された主観データ x_i は、 m 個の共通因子 f_i と因子負荷量 A の線形結合に独自因子 e_i が加えられたモデルとして、次のように表される。

$$x_i = A f_i + e_i \quad (i = 1, \dots, n). \quad (1)$$

$p \times 1$ $p \times m$ $m \times 1$ $p \times 1$

m 個の共通因子のそれぞれが、独立した材質感次元とみなされる。また、主成分分析 (Principal Component Analysis: PCA) を用いて次元を構成した研究もある[12],[20],[22],[23]。この方法は、厳密には因子分析とは異なった手法であるが、主観データが因子によって縮約的に構成される点は同じである。

多次元尺度構成法 (Multi Dimensional Scaling: MDS)

多次元尺度構成法とは、観察された事柄間の類似性を表すデータに基づき、それらの関係を最も良く保持するように、事柄を多次元空間に位置づける方法である。類似性を表すデータとして、主に複数の刺激間の主観的な距離が用いられる。そのため、多変量データとして、量的推定法、一対比較法およびグループ分類法によって得られた非類似度が用いられることがある。その他、SD法によって得られた多変量データから、刺激間の主観的な距離が計算された例がある[7],[8]。

MDS では、 n 個の事柄について、事柄 j と k の間の類似性データ $E = (e_{jk})$ が与えられたとき、事柄を r 次元空間に位置づけると、事柄の座標ベクトル $Y = (y_j \in R^r)$ は、

$$Q = - \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n e_{jk} \|y_j - y_k\|^2 \quad (2)$$

を最大化する Y によって定められる。

4. 触覚的テクスチャの材質感構成

4.1 材質感次元の抽出に関する研究例

触覚的テクスチャの材質感次元を構成した研究例について、対象とされた試料や用いられた手法とともに、構成された材質感次元を Table 3 にまとめる。研究例には、次のような 2 種類が存在する。1 つ目は、広範囲のカテゴリより選ばれた素材群から材質感次元を構成した例である。これらの研究は、素材に対する材質感が、一般的にどのような次元で構成されるのかを調査することを目的としている。2 つ目は、あるカテゴリに限定された素材の材質感次元を構成した例である。これらの研究は、特定分野の製品において、素材の材質感を設計することを目的としている。

まず、幅広い素材の材質感が、一般的にどのような材質感次元で構成されるのかを調査した研究例をまとめる。実験に用いられる試料は、金属材料から繊維材料まで多岐に渡る。

Yoshida は、銀やアルミニウムなどの金属や、ビニールやナイロン、シルク、リネンなどを含む 25 種類の試料に対して、SD 法を用いて参加者の主観データを取得し、その結果に対し因子分析を行い、材質感次元を構成した。材質感次元の特徴は、第 1 次元が Heavy, Cold, 第 2 次元が Smooth, Wet, 第 3 次元が Hard, 第 4 次元が Elastic となった。また、Yoshida は、SD 法によって得られた主観データより、試料間の非類似度を計算し、MDS を適用した。MDS の結果より得られた材質感次元は明確な特徴付けは行われていない [7]。

Hollins らは、紙やプラスチック、ベルベットなど 17 種類の試料を対象に、ビジュアル・アナログ尺度を用いて試料間の非類似度を取得した。その結果に対し MDS を適用し、材質感次元を構成した。また、SD 法を用いて試料に対する主観データも計測することで、MDS によって得られた次元を SD 法で用いた形容詞対によって説明した。多次元空間は、Smooth/Rough, Hard/Soft, Elastic の 3 次元によって構成された [30]。しかし、その後の研究で、材質感次元は Smooth/Rough, Hard/Soft, Sticky/Slippery の 3 次元構造である可能性を述べた [31]。また、表面の粗さの知覚について、皮膚表面における振動に基づく微細な粗さの知覚と、空

間分布する情報に基づくマクロな粗さの知覚に分けることができると主張した。

田村らは、アルミやジュラルミンなどの金属やゴム、ひのきなど 15 種類の試料を対象に、SD 法を用いて参加者の主観データを取得した。その結果に対し因子分析を適用し、材質感次元を 3 次元で構成した [18]。構成された次元は、第 1 次元が Hard/Soft や Harsh/Smooth と強い相関があり、第 2 次元は Warm/Cold などの評価項目に対し強い相関を示す。第 3 次元については、明確な特徴付けはされなかったが、Moist とやや強い相関を示している。

Tiest らは、木材やガラス、紙、ゴムなど 124 種類の試料を対象に、類似度に関するグループ分けを行い、その結果を非類似度に換算した。得られた非類似度に対し、MDS を適用することで材質感次元を構成した [32]。その結果、材質感次元として、4 次元空間が構成された。構成された次元のうち、第 1、第 2 次元はそれぞれ、Hard/Soft, Smooth/Rough となり、他の 2 つの次元について、明確な特徴付けは行われなかった。

Shirado らは、金属や繊維材料、木材など 20 種類の試料に対し、SD 法を用いて参加者の主観データを取得し、その結果に対し因子分析を適用し、材質感次元を構成した [11]。その結果、Rough, Cold, Moist, Hard の 4 次元の材質感次元を示した。

Yoshioka らは、紙やゴム、スエードなど 16 種類の試料に対し、量的推定法を用いて試料間の非類似度を測定し、その結果に対し MDS を用いることで材質感次元を構成した [28]。構成された材質感次元は、Rough, Hard, Sticky によって代表される 3 次元と報告されている。

次に、産業的に利用するなどの目的を持って、ティッシュペーパーや、カーシート用素材、建築物の内装材など、限定されたカテゴリ内の素材に対する材質感次元を構成した研究例をまとめる。

Lyne らは、8 種類のティッシュペーパーを対象に、量的推定法を用いて、対象間の非類似度を評価した [29]。実験では、参加者は視覚と触覚を併用し対象を評価した。その結果に対し、MDS を適用し材質感次元を構成した。構成された材質感次元は、Soft, Rigid, Uneven によって代表される 3 次元であった。また、Lyne らは、参加者の視覚的な評価を排除し、触覚のみによる非類似度も調査した。その結果に対し、MDS を用いて構成された材質感次元は、Soft, Rigid, Elastic の 3 次元となった。Lyne らは、Soft と Rigid は直交する次元ではなく、互いに干渉した次元であることを指摘している。

Picard らは、24 種類のカーシート用素材に対し、グループ分類法を用いて、非類似度を取得し、その結

表 3 材質感次元の参照表

Table 3 Reference table of textural dimensions

Author	Year	Method	Texture	Dimens. 1	Dimens. 2	Dimens. 3	Dimens. 4	Dimens. 5	Modality
M. Yoshida [7]	1968	FA	25 materials	Heavy, Cold	Smooth, Wet	Hard	Elastic		Visuo-Haptic
M.B. Lyne et al. [29]	1984	MDS	8 tissues	Soft	Rigid	Uneven			Visuo-Haptic
M.B. Lyne et al. [29]	1984	MDS	8 tissues	Soft	Rigid	Elastic			Haptic-Only
M. Hollins et al. [30]	1993	MDS	17 materials	Smooth/Rough	Hard/Soft	Elastic			Haptic-Only
M. Hollins et al. [31]	2000	MDS	17 materials	Smooth/Rough	Hard/Soft	Sticky /Slippery			Haptic-Only
K. Tamura et al. [18]	2000	FA	15 materials	Hard/Soft Harsh/Smooth	Warm/Cold	Moist			Haptic-Only
D. Picard et al. [33]	2003	MDS	24 car seat materials	Soft/Harsh	Thin/Thick	Relief (Uneven)	Hard		Haptic-Only
H. Shirado et al. [11]	2005	FA	20 samples	Rough	Cold	Moist	Hard		Haptic-Only
W.M.B. Tiest et al. [32]	2006	MDS	124 materials	Hard/Soft	Smooth/Rough	No named	No named		Visuo-Haptic
Y. Tanaka et al. [10]	2006	FA	13 fabrics	Moist	Downy, Warm				Haptic-Only
S. Kobayashi [21]	2006	FA	25 fabrics	Bulky	Harsh, Hard	Elastic			Haptic-Only
S. Kobayashi [21]	2006	FA	25 fabrics	Bulky	Harsh, Hard				Visuo-Haptic
T. Yoshioka et al. [28]	2007	MDS	16 surfaces	Rough	Hard	Sticky			Haptic-Only
I.R. Summers et al. [34]	2009	MDS	10 papers	Rough	Stiff				Haptic-Only
M. Tanno et al. [22]	2010	PCA	12 fabrics	Thin/Thick	Hard/Soft	Clean /Dirty	Harsh /Smooth		Visuo-Haptic
H. Nagano et al. [24]	2010	FA	24 samples	Glossless, Rough, Dry	Comfortable, Elegant	Cold, Dark	Complex	Uneven	Visual-Only

果に対し、MDSを適用し材質感次元を構成した[33]。得られた材質感次元は、Soft/Harsh, Thin/Thick, Relief (Uneven), Hardの4種の次元によって構成された。

Tanakaらは、木綿やシルク、サテンなど13種類の布を対象に、SD法を用いて参加者の主観データを取得し、因子分析によって材質感次元を構成した[10]。材質感次元の特徴は、第1次元がMoist、第2次元がDowny, Warmとなった。

小林らは、シルクやリネン、コットンなど25種類の繊維素材を対象に、触覚のみ、視覚のみ、触覚・視覚併用の3条件で、SD法を用いて参加者の主観データを取得し、その結果に対し因子分析を適用し材質感次元を構成した[21]。構成された材質感次元は、触覚のみの場合、かさ高性(Bulky)、平滑性と剛軟性(Harsh, Hard)、腰(Elastic)を表す3次元構造であり、触覚・視覚併用の場合および視覚のみの場合、かさ高性、平滑性と剛軟性の2次元構造であった。

Summersらは、紙幣に用いられる木綿製の上質紙10種類を対象に、非類似度を取得し、その結果に対しMDSを適用し材質感次元を構成した[34]。提示される三つの試料の内、二つは同じ素材であり、一つが異なる素材という条件で、参加者は異なると感じた素材を選択した。この際の正答率から、素材間の非類似度が計算された。実験では、参加者は視覚を遮断し、触

覚のみによって対象を評価した。構成された材質感次元は、第1次元がRough、第2次元がStiffであった。

丹野らは、綿、ナイロンおよびポリエステルなど12種類の布を対象として、「かたい」、「さらさら」などの風合いの評価に適した16単語による評価を行い、その結果に対し主成分分析を適用することで、布の風合いを表す材質感次元を構成した[22]。得られた次元は、Thin/Thick, Hard/Soft, Clean/Dirty, Harsh/Smoothによって表される4次元であった。風合いとは、手触りに関する布の評価であり、Kawabataらによって摩擦係数などの物理量に基づき布の風合いを評価するシステムが開発されている[35]。

4.2 5種の材質感次元

以上の関連研究において、布、紙、金属などの幅広いカテゴリのテクスチャを構成する次元として、粗い/滑らかな(Rough/Smooth)、硬い/柔らかい(Hard/Soft)、冷たい/温かい(Cold/Warm)という次元が多く見られ、これらの次元が安定して抽出される材質感次元である考えられる。また、凸凹した(Uneven, Bulky)というマクロな粗さを表す次元も報告されている[21],[24],[29],[33]。このうち、3例[21],[24],[33]でマイクロな粗さである粗い/滑らかな(Rough/Smooth)と、マクロな粗さ(Uneven, Bulky)が独立に抽出されている。そこで、マイクロな粗さである粗い/滑らかな

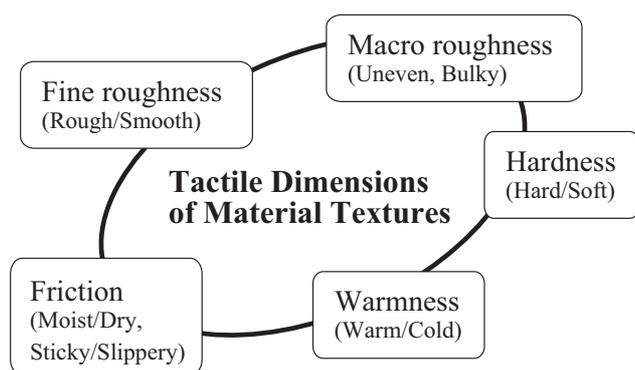


図1 触覚的テクスチャの材質感次元
Fig. 1 Tactile dimensions of material textures

(Rough/Smooth) と、マクロな粗さ (Uneven, Bulky) を別々の次元と捉える。さらに、いくつかの研究例では、湿った/乾いた (Moist/Dry) [10], [11], [18], つっぱる/滑る (Sticky/Slippery) [28], [31] という次元が報告されている。Sticky/Slippery および Moist/Dry は、Chen によると、摩擦の影響が大きいながらも、材質の弾性および表面粗さと共に複合的に決定づけられるとの実験結果を報告している [36], [37]。加えて、これまでの研究では、Sticky/Slippery および Moist/Dry の次元が独立に抽出されたことがないという事実を重んじると、これらが同一の材質感次元に由来すると考えることが良さそうである。本論文では、これらを総じて、Frictional 次元と呼ぶ。摩擦感 (Frictional) と粗さ感 (Rough/Smooth) の違いについては、これらの間には相関があると主張する研究者がいる [38], [39] 一方、試料を触る際に潤滑剤を用いて摩擦を変化させた場合でも、知覚する粗さ感には変化がないと報告した研究例 [40] も存在する。Rough/Smooth と、Sticky/Slippery もしくは Moist/Dry が異なる次元として抽出される例 [11], [18], [28], [31] も少なくないことから、本論文では Rough/Smooth および Frictional を異なる次元として捉える。以上より、5つの次元 (Rough, Hard, Cold, Uneven, Frictional) を触覚テクスチャの材質感を構成する次元としてまとめる。5つの材質感次元を図1に示す。ただし、これらの次元が単一の調査で同時に抽出された報告はなく、次元の構成に用いる試料や、材質感の表現に用いる評価語などの実験条件を調整することで、5次元が同時に抽出されることを確認することは、今後の課題となるだろう。

特定分野の素材に対する質感次元を構成した研究例では、性能の優劣や良し悪しにつながるような評価語が質感の表現に用いられることがある。それによって、質感を構成する次元にも、性能の優劣や良し悪しにつながるような次元が抽出される例が存在する。例えば、阿部らは、17種類のスギの圧縮材を対象にして、SD

法を用いて参加者の主観データを取得し、その結果に対し因子分析を適用し質感次元を構成した [19]。実験は、触覚のみによる場合と、視覚と触覚を併用した場合の2通りで行われた。得られた材質感次元は、触覚のみによる場合、鮮度感次元、なじみ感次元、量感次元、落ち着き感次元の4次元であった。視覚と触覚をあわせた場合では、構成される材質感次元は、品質感次元、落ち着き感次元、なじみ感次元、鮮度感次元の4次元であった。また、阿部らは、材料に対して馴染みのある参加者と、そうでない参加者の2通りの条件で実験を行った。構成された質感次元には、共通な次元が多く見られたが、参加者によって寄与率が異なった次元も見られた。Chen によると、これらの感性的な次元は、上述の材質感次元の結合によって表され、材質感次元とは階層の異なる次元であると主張している [36], [37]。本論文も、これに習い、なじみ感やおちつき感などは、素材の物理的性質の主観的表現である材質感とは区別する。

4.3 各材質感次元の知覚メカニズム

材質感の知覚メカニズムは未解明な部分も多く残されているが、精力的に研究されている。ここでは、上記の材質感次元ごとに物理情報との関係性を紹介する。また、材質感情報の脳内での分析・統合プロセスの解明を目的として、材質感の知覚と脳活動の関係を調査する研究 [41], [42] も行われている。

Roughness/Smoothness (Macro & Fine)

表面粗さの知覚メカニズムは、その粗さの程度に応じて異なることが知られている。多くの研究者らが、グレーティングと呼ばれる格子状の試料を用いてその研究を行っており、試料表面の波長が数百マイクロメートルから1mmの前後では、知覚メカニズムが異なることが指摘されている。表面粗さおよび波長の大きな試料の知覚では、メルケル細胞の活動の空間分布が粗さ知覚に支配的に影響することが神経生理学的研究により指摘されている (Macro Roughness) [43]~[45]。また、指と試料表面の相対運動により生じる皮膚振動の時間的情報は、波長の大きなグレーティングの粗さ知覚への寄与は小さい [46], [47]。一方で、グレーティングの表面波長が小さくなるにつれ、この時間的情報の知覚への寄与が大きくなる (Fine Roughness) [48], [49]。この場合、皮膚の振動周波数帯域から考えると、高周波帯域に選択的に応答するマイスナー小体およびパチニ小体が、細かな粗さの知覚に関連すると考えられている。

Friction

摩擦は力の情報であるため、自己受容感覚に分類されることもあるが、指腹の皮膚を通して知覚される情報でもある。摩擦の知覚メカニズムには不明な点が多

いが、触察時に生じる摩擦振動が素材の表面摩擦の知覚に寄与するという説 [51], [52] や、指腹のせん断変形の大きさが摩擦力の知覚に関連する [53] という報告がある。前者の場合、知覚に関与する受容器はマイスナー小体およびパチニ小体であると予想される。後者の場合、動的な指腹のせん断変形にはどのクラスの機械受容器も応答し得ることが知られている [54], [55]。いずれにせよ、さらなる知覚メカニズムの解明には、これからの神経生理学的研究が待たれる。

Warmness/Coldness

素材認識における熱伝導特性の重要性は古くから、Katz (1925) により指摘されていた [56]。材質感としての温冷は、テクスチャと皮膚の間の熱伝導 [11], [37], [57] に起因すると言われている。したがって、テクスチャに触れた際の指腹の温度変化および履歴から、人は材質の特徴を知覚していることが予想される。

Hardness/Softness

素材の硬軟は、素材の弾性係数やバネ定数に起因するため力の情報であると捉えられるが、摩擦同様に指腹皮膚の知覚への寄与も大きい [58]。指が素材に触れた際の素材の硬軟の知覚メカニズムとしては、指腹と素材の接触面積・圧力分布の関与が指摘されている [59], [60]。しかしながら、それらの瞬間的な情報か、それとも時刻歴情報が知覚に寄与するのかなど、未解明な部分も多い。

以上の材質感の知覚メカニズムのさらなる解明は、日用品の素材や表面加工の選択指針、触覚ディスプレイの設計などの、工学的便益につながる。また、これらの研究の将来の進捗によっては、本論文で述べた以外の材質感次元の構成があり得る。

実素材の知覚メカニズムの研究

上記の知覚メカニズムの研究に用いられる試料は、調査用に用意される場合がほとんどである。しかしながら、日用品の素材の触感は、上記の材質感の知覚メカニズムよりもさらに複雑な物理現象の結果である。例えば、織布の触感の場合、織布および繊維の機械的・熱的性質と、それらの触感を関連づける多くの成果が報告されている (e.g., [35], [50], [61], [62])。多くの文献によると、織布の表面粗さ・摩擦係数・引張強さ・伸び・厚さ・質量などが、織布の触感を特徴づける物理量として注目されており、これらの物理量と織布の粗さ感・硬軟感などの関連が多変量解析的手法によって調査されている。織布の触感の官能評価に度々用いられる特徴的な形容詞であるのが、Thick/Thin である [61], [63], [64]。Thick/Thin は、主観的には Heavy/Light および Bulky/Not bulky に近い上、織布の曲げ剛性、厚さや質量との関連が大きく [63]~ [65]、上記 5 種の次元の合成によって記述される可能

性がある。

5. 視覚的テクスチャの材質感次元

5.1 視覚的テクスチャの材質感次元に関する研究例

人が知覚する材質感とは、触覚のみに決定されるのではなく、視覚や聴覚といった異なるモダリティにおいても成立する。また、それぞれのモダリティによって知覚された情報がまとまり、材質感が構成される。人が日常的に素材に接する環境では、まず初めに視覚によって素材の情報を得て、実際に触れることで触覚情報も取得する。このように、特に触覚と視覚が材質感の知覚にとって重要と思われる。本節では、視覚によるテクスチャの材質感次元に関する研究を紹介し、視覚と触覚における次元構成の違いに言及する。その他、聴覚と触覚の関係性 [66], [67] や、食感など、幅広いモダリティでの研究が盛んに行われている。食感に関する研究例については文献 [56] を参照されたい。なお、素材の材質感を視覚によって評価し、材質感次元を構成した研究は、槇らによってまとめられている [68]。

北浦らは、サテンやガラス、ビニールレザーなど、22 種類の建築用内装材に対し、SD 法による評価を行い、その結果に対し因子分析を適用し、質感を構成する 5 つの次元を求めた [13]。構成する次元はそれぞれ、Lightness (明るい、陽気な)、Attractiveness (豪華な、きばつな)、Roughness (ざらざらした)、Softness (柔らかい)、Evaluation (落ち着いた、感じの良い) と特徴付けられた。

大野らは、コルクやタイルなどの 15 種類の素材を対象として、SD 法を用いて主観データを取得した [14]。その結果に因子分析を適用することで、視覚に関する質感次元を構成した。得られた質感次元は 5 次元であり、第 1 次元を「気持ちのよい」などの評価性次元、第 2 次元を「つるつる」などの視覚的次元、第 3 次元を「やわらかい」などの触覚的次元、第 4 次元を「洋風の」などの様式に関する次元と名付けた。

武藤らは、石やレンガなどの建築壁面材料の画像 98 枚を対象に、SD 法を用いて主観データを取得し、その結果に因子分析を適用することで、視覚によって得られる質感の次元を構成した [15]。構成された質感次元は、派手さ、美しさ、暖かさ、自然さの 4 次元である。

岡島らは、タイルやコンクリートなど、10 種類の建築仕上げ材料を対象に、視覚によって、評価される素材の材質感次元を構成した [16]。SD 法を用いて得られた刺激に対する参加者の主観評価データは、因子分析を用いて処理され、4 種の次元が求められた。得られた材質感次元はそれぞれ、Bright/Dull, Warm/Cold, Hard/Soft, Harsh/Smooth である。

北村らは、コルクやビニールシートなどの住宅用内

装材 21 種類を対象として、SD 法を用いて刺激を評価し、その結果に対し因子分析を行うことで、Pleasantness (好きな, 落ち着いた), Potency (ごてごてした, 変化に富んだ), Modernity (モダンな, 華やかな) の 3 次元によって質感を構成した [17].

Rao らは、レンガや大理石などの素材の画像 56 種類を対象に、SD 法を用いて主観データを取得した [8]. その結果より試料間の非類似度を計算し、MDS を適用した。MDS の結果より得られた質感次元はそれぞれ、Regular/Irregular, High contrast/Low contrast, Fine/Coarse と報告された。

Cho らは、木やプラスチックなど、素材の画像 60 種類を対象に、一対比較法を用いて対象間の非類似度を測定し、得られた結果に対し MDS を適用し質感の次元を構成した [25]. 構成された質感次元はそれぞれ、Coarse, Regular, Contrasting, Light と報告された。

Lee らは、綿やシルクなど、36 種類の織物に対し、SD 法を用いて主観データを取得し、その結果に対し因子分析を適用し材質感次元を構成した [9]. 構成された材質感次元は 3 次元であり、それぞれは、Voluminous and Warm, Glossy, Fine と表された。また、Lee らは、実素材と、画像として表示される素材の、2 通りの材質感次元を構成しており、両者の材質感次元に違いがあることを示した。

Nagano らは、人工的に成型した 24 種類の粘土試料に対し、SD 法を用いて参加者の主観データを取得し、それらに因子分析を適用することで、質感次元を構成する 5 つの次元を抽出した [24]. 抽出された次元はそれぞれ、Glossless-Rough-Dry, Comfortable-Elegant, Cold-Dark, Complex, Uneven となった。この研究は、人が感じる「触れてみたさ」に注目したため、参加者は試料に触れず質感を評価した。

素材が、建築材料や内装材料である場合、実験参加者が、その品質の良し悪しを判断するため、得られる質感次元には清潔さや美しさという感性的な質感次元が含まれることがある。また、自然さやモダンさなど、認知過程を要すると思われる次元が抽出されるのも視覚に特徴的である。先にも述べた通り、Chen らによると、これらの次元は、粗さ感や硬軟感などの心理物理的材質感次元よりも一段階感性的なレイヤに位置する [36], [37]. また、触覚によるテクスチャの評価では、表面の粗さや凹凸などが素材認識に大きな寄与を示すのに対し、視覚による評価では、明るさや表面の規則性などが素材認識に大きな寄与を示す傾向がある [9], [13], [16].

5.2 視覚と触覚による材質感次元の違い

視覚による材質感次元と触覚による材質感次元には、共通点と相違点がそれぞれ見られた。共通点としては、

粗さ/滑らかさ、硬さ/柔らかさ、暖かさ/冷たさの次元がある。相違点としては、視覚に特徴的な明るさや表面の規則性の次元や、認知過程を要すると思われる自然さなどの次元がある。明るさ、派手さなど表面の光沢と相関を持つような材質感次元は、視覚における実験では多く報告され、視覚・触覚を併用した実験でもいくつか報告された。

先にも述べた通り、小林らは、触覚のみ、視覚のみ、触覚・視覚併用の 3 条件で、素材の材質感次元を構成した。その結果、触覚のみの場合、かさ高性 (Bulky), 平滑性と剛軟性 (Harsh, Hard), 腰 (Elastic) を表す 3 次元構造であるのに対し、視覚のみの場合および触覚・視覚併用の場合、かさ高性、平滑性と剛軟性の 2 次元構造となった。このことから、視覚テクスチャの次元構造と、視覚と触覚併用のときの次元構成が似ており、材質感が視覚に依存していると報告している [21]. 一方、Yoshida は、触覚と視覚を併用した場合と視覚のみを用いた場合、実物を見せずコンセプトのみによる場合の 3 種類の材質感次元を構成した。得られた材質感次元は、それぞれが明確な特徴付けは行われていない。しかし、すべての方法で得られた材質感次元が非常に類似した構成であると報告している [26].

以上の研究例より、触覚における材質感次元の構造と、視覚における材質感次元の構造には違いがあることがわかった。しかし、触覚と視覚の材質感次元がどのように組み合わせることで、複合的な材質感次元が構成されるのかは明らかではない。このように、マルチモーダルな情報である材質感の追究には、触覚や視覚などの複数のモダリティとの関係を明らかにする必要がある。

また、本論文では、人が指で素材に触れた際の材質感について議論してきたが、同じ触覚でも、衣服のように素材を体に身につける場合の材質感次元は、これまで論じてきた次元構成とは異なるかもしれない。同じ素材であっても、素材に接する人の振る舞いに応じて次元構成が異なる可能性を追究することが望まれる。

6. まとめ

本論文では、これまで統一的な見解のなかった材質感次元の構成に関し、共通性を見出すことを目的とし、関連研究を調査した。そして、まず、人間の皮膚の機械受容器・受容体という生理学的知見に基づく物理的刺激の次元に着目し、人が知覚し得る物理的刺激の次元が少なくとも、高周波振動覚、低周波振動覚、静的圧覚、温冷覚の 4 次元存在するとした。つぎに、材質感次元の構成に用いられる手法をまとめ、触覚的テクスチャの材質感次元の抽出を試みた研究事例を調査した。その結果、触

覚的テクスチャにおいては、粗い/滑らかな (Fine roughness/Smoothness), 硬い/柔らかい (Hardness/Softness), 冷たい/温かい (Coldness/Warmness), 凸凹した (Macro roughness), 摩擦 (Friction: Moistness/Dryness, Stickiness/Slipperiness) の5つの材質感次元が主要な次元として見出された。さらに、本論文では、視覚的テクスチャの材質感次元についても関連研究を調査し、視覚的テクスチャに特徴的な、明るさや表面の規則性などの次元が存在するなど、触覚に基づく材質感次元との差異に言及した。

謝辞

本研究は文部科学省科学技術研究費/学術研究助成基金(課題番号 22800030, 23135514)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] K.E. Barrett, S.M. Barman, S. Boitano and H.L. Brooks: Ganong's Review of Medical Physiology 23rd Edition; McGraw-Hill Medical, US, (2009,7)
- [2] 岩村吉晃: タッチ; 医学書院, 東京 (2001)
- [3] 大山正他編: 新編感覚・知覚心理学ハンドブック; 誠信書房, 東京 (1994)
- [4] 富永真琴: 温度受容の分子機構: TRP チャネル温度センサー; 日本薬理学雑誌, 124(4), 219-227(2004.10)
- [5] R. J. Schepers and M. Ringkamp: Thermoreceptors and Thermosensitive Afferents; Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 34, 177-184(2010)
- [6] M. Denda M. M. Tsutsumi: Roles of Transient Receptor Potential Proteins (TRPs) in Epidermal Keratinocytes; Advances in Experimental Medicine and Biology, 704, 847-860(2011)
- [7] M. Yoshida: Dimensions of Tactual Impressions (1); Japanese Psychological Research, 10(3), 123-137(1968)
- [8] A.R. Rao and G.L. Lohse: Towards a Texture Naming System: Identifying Relevant Dimensions of Texture; Vision Research, 36(11), 1649-1669(1996)
- [9] W. Lee, and M. Sato: Visual Perception of Texture of Textiles; Color Research & Application, 26(6), 469-477(2001)
- [10] Y. Tanaka, M. Tanaka and S. Chonan: Development of a Sensor System for Measuring Tactile Sensation; Proc. IEEE Sensors, 554-557(2006)
- [11] H. Shirado and T. Maeno: Modeling of Human Texture Perception for Tactile Displays and Sensors; Proc. World Haptics Conference, 629-630(2005)
- [12] T. Matsuoka, H. Kanai, H. Tsuji, T. Shinya and T. Nishimatsu: Predicting Texture Image of Covering Fabric for Car Seat by Physical Properties; Journal of Textile Engineering, 54(3), 63-74(2008)
- [13] 北浦かほる: 内装材のテクスチャの空間効果分析のための一考察: 試験片, 室内透視図, 室空間における心理量の分析; 日本建築学会論文報告集, 241, 153-164(1976.3)
- [14] 大野隆造, 茶谷正洋: テクスチャの視覚に関する研究(その13・素材感の構造); 日本建築学会大会学術講演梗概集, 52, 561-562(1977.10)
- [15] 武藤浩, 楨実, 中村芳樹, 乾正雄: 街路景観評価に与えるテクスチャの影響(その1 テクスチャの印象評価); 日本建築学会大会学術講演梗概集 D, 37-38(1989.10)
- [16] 岡島達雄, 若山滋, 塩谷まさみ, 渡辺達夫: 距離による

- 建築仕上げ材料の「見えの変化」と心理効果; 日本建築学会構造系論文報告集, 401, 1-10(1989.7)
- [17] 北村薫子, 久保博子, 磯田憲生, 梁瀬度子: 内装材のテクスチャーが視環境評価に及ぼす影響: 第1報 試験片による実験; 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1919-1920(1994.9)
- [18] 田村和也, 小山紀, 山田宏道: 材料認識時における人間触覚の感性評価に関する研究; 機械力学・計測制御講演論文集, 2000, 709(2000.9)
- [19] 阿部眞理, 増山英太郎: スギ圧縮材と17種類の木材の感覚特性: 家具・建具づくりのためのスギ圧縮材の開発(4); デザイン学研究, 51(4), 45-54(2004.11)
- [20] 渡辺信一, 尾崎功一, 山崎友麻, 山本純雄: 触覚による粒子群の認識と言語評価; 精密工学会誌論文集, 71(11), 1421-1425(2005.11)
- [21] 小林茂雄: 触れる世界: 繊維素材の触感における触覚と視覚の相互作用について; 日本官能評価学会誌, 10(1), 25-28(2006.4)
- [22] 丹野匡貴, 伊藤紀子, 阪田真己子: 布の風合いを表す感性語と視覚・触覚との関連; 日本認知科学会第27回大会発表論文集, 27, 643-648(2010.9)
- [23] 早川智彦, 松井茂, 渡邊淳司: オノマトペを利用した触り心地の分類手法; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 15(3), 487-490(2010.9)
- [24] H. Nagano, S. Okamoto and Y. Yamada: What Appeals to Human Touch? Effects of Tactual Factors and Predictability of Textures on Affinity to Textures; Proc. World Haptics Conference, 203-208(2011)
- [25] R.Y. Cho, V. Yang and P.E. Hallett: Reliability and Dimensionality of Judgments of Visually Textured Materials; Attention, Perception & Psychophysics, 62(4), 735-752(2000)
- [26] M. Yoshida: Dimensions of Tactual Impressions (2); Japanese Psychological Research, 10(4), 157-173(1968)
- [27] 齊藤幸子: 感覚的表面粗さ測定における多次元尺度構成; 精密機械, 42(504), 1114-1120(1976.12)
- [28] T. Yoshioka, S.J. Bensmaïa, J.C. Craig, and S.S. Hsiao: Texture Perception through Direct and Indirect Touch: An Analysis of Perceptual Space for Tactile Textures in Two Modes of Exploration; Somatosensory and Motor Research, 24(1-2), 53-70(2007)
- [29] M.B. Lyne, A. Whiteman, and D.C. Donderi: Multi-dimensional Scaling of Tissue Quality; Pulp and Paper Canada, 85(10), 43-50(1984)
- [30] M. Hollins, R. Faldowski, S. Rao, and F. Young: Perceptual Dimensions of Tactile Surface Texture: A Multidimensional Scaling Analysis; Attention, Perception & Psychophysics, 54(6), 697-705(1993)
- [31] M. Hollins, S. Bensmaïa, K. Karlof, and F. Young: Individual Differences in Perceptual Space for Tactile Textures: Evidence from Multidimensional Scaling; Attention, Perception & Psychophysics, 62(8), 1534-1544(2000)
- [32] W.M.B. Tiest and A.M.L. Kappers: Analysis of Haptic Perception of Materials by Multidimensional Scaling and Physical Measurements of Roughness and Compressibility; Acta Psychologica, 121(1), 1-20(2006)
- [33] D. Picard, C. Dacremont, D. Valentin, and A. Giboreau: Perceptual Dimensions of Tactile Textures; Acta Psychologica, 114(2), 165-184(2003.10)
- [34] I.R. Summers, R.J. Irwin, A.C. Brady, and M. Grunwald(Ed.): 'Haptic Discrimination of Paper' in Human Haptic Perception: Basics and Applications 1st Edition; Birkhauser, Basel, 525-535(2008.11)
- [35] S. Kawabata and M. Niwa: Fabric Performance in Clothing and Clothing Manufacture; Journal of the Textile Institute, 80(1), 19-50(1989)

- [36] X. Chen, C. J. Barnes, T. H. C. Childs, B. Henson, and F. Shao: Materials' Tactile Testing and Characterisation for Consumer Products' Affective Packaging Design; *Materials and Design*, 30, 4299–4310(2009)
- [37] X. Chen, F. Shao, C. Barnes, T. Childs, and B. Henson: Exploring Relationships between Touch Perception and Surface Physical Properties; *International Journal of Design*, 3(2), 67–76(2009)
- [38] A. M. Smith, C. E. Chapman, M. Deslandes, J. S. Langlais, and M. P. Thibodeau: Role of Friction and Tangential Force Variation in the Subjective Scaling of Tactile Roughness; *Experimental Brain Research*, 144(2), 211–223(2002)
- [39] A. M. Smith and G. Basile: Roughness of Simulated Surfaces Examined with a Haptic Tool: Effects of Spatial Period, Friction, and Resistance Amplitude; *Experimental Brain Research*, 202(1), 33–43(2010)
- [40] M. M. Taylor and S. J. Lederman: Tactile Roughness of Grooved Surfaces: A Model and the Effect of Friction: *Attention, Perception & Psychophysics*, 17(1), 23–36(1975)
- [41] Y. Koda, M. Taniguchi, Y. Kamitani, and N. Saiwaki: f-MRI Study of Brain Activation in Tactile Feeling; Human Interface and the Management of Information. Designing Information Environments. *Lecture Notes in Computer Science*, 5617, 534–542(2009)
- [42] C. Hiramatsu, N. Goda, and H. Komatsu: Transformation from image-based to perceptual representation of materials along the human ventral visual pathway; *Neuroimage*, 57(2), 482–494(2011)
- [43] C. E. Connor, S. S. Hsiao, J. R. Phillips, and K. O. Johnson: Tactile Roughness: Neural Codes that Account for Psychophysical Magnitude Estimates; *Journal of Neuroscience*, 10(12), 3823–3836(1990)
- [44] D. T. Blake, S. S. Hsiao, and K. O. Johnson: Neural Coding Mechanisms in Tactile Pattern Recognition: the Relative Contributions of Slowly and Rapidly Adapting Mechanoreceptors to Perceived Roughness; *Journal of Neuroscience*, 17(19), 7480–7489(1997)
- [45] T. Yoshioka, B. Gibb, A. K. Dorsch, S. S. Hsiao, and K. O. Johnson: Neural Coding Mechanisms Underlying Perceived Roughness of Finely Textured Surfaces; *Journal of Neuroscience*, 21(17), 6905–6916(2001)
- [46] E. M. Meftah, L. Belingard, and C. E. Chapman: Relative Effects of the Spatial and Temporal Characteristics of Scanned Surfaces on Human Perception of Tactile Roughness Using Passive Touch; *Experimental Brain Research*, 132(3), 351–61(2000)
- [47] S. Lederman: Tactile Roughness of Grooved Surfaces: The Touching Process and Effects of Macro- and Microsurface Structure; *Attention, Perception & Psychophysics*, 16(2), 385–395(1974)
- [48] M. Hollins and S. R. Rinser: Evidence for the Duplex Theory of Tactile Texture Perception; *Attention, Perception & Psychophysics*, 62(4), 695–705(2000)
- [49] C. J. Cascio and K. Sathian: Temporal Cues Contribute to Tactile Perception of Roughness; *Journal of Neuroscience*, 21(14), 5289–5296(2001)
- [50] J. F. Fuzek: Some Factors Affecting the Comfort Assessment of Knit T-Shirts; *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 20(2), 254–259(1981)
- [51] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, and S. Tadokoro: Alternative Display of Friction Represented by Tactile Stimulation without Tangential Force; *Proceedings of EuroHaptics 2008*, 619–629(2008)
- [52] Y. Nonomura, T. Fujii, Y. Arashi, T. Miura, T. Maeno, K. Tashiro, Y. Kamikawa, and R. Monchi: Tactile Impression and Friction of Water on Human Skin; *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 69, 264–267(2009)
- [53] W. R. Provancher and N. D. Sylvester: Fingerpad Skin Stretch Increases the Perception of Virtual Friction; *IEEE Transactions on Haptics*, 2(4), 212–223(2009)
- [54] G. Westling and R. S. Johansson: Responses in Glabrous Skin Mechanoreceptors during Precision Grip in Humans; *Experimental Brain Research*, 66, 128–140(1987)
- [55] I. Birznieks, P. Jenmalm, A. W. Goodwin, and R. S. Johansson: Encoding of Direction of Fingertip Forces by Human Tactile Afferents; *Journal of Neuroscience*, 20(20), 8222–8237(2001)
- [56] 日科技連官能検査委員会: 官能検査ハンドブック; 日科技連出版社, 東京, 171–175(1973)
- [57] 川端季雄, 赤木陽子: 衣服用布の冷温感と熱吸収特性との関係について; *繊維機械学会誌*, 30(1), T13–T22(1977)
- [58] W. M. B. Tiest and A. M. L. Kappers: Kinaesthetic and Cutaneous Contributions to the Perception of Compressibility; *Proceedings of EuroHaptics 2008*, 255–264(2008)
- [59] A. Bicchi, E. P. Schilingo, and D. De Rossi: Haptic Discrimination of Softness in Teleoperation: the Role of the Contact Area Spread Rate; *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 16(5), 496–504(2000)
- [60] K. Fujita and H. Ohmori: A New Softness Display Interface by Dynamic Fingertip Contact Area Control; *Proceedings of the 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 78–82(2001)
- [61] V. Sülar and A. Okur: Objective Evaluation of Fabric Handle by Simple Measurement Methods; *Textile Research Journal*, 78(10), 856–868(2008)
- [62] P. Radhakrishnaiah, S. Tejatanalart, and A. P. S. Sawhney: Handle and Comfort Properties of Woven Fabrics Made from Random Blend and Cotton-Covered Cotton/Polyester Yarns; *Textile Research Journal*, 63(10), 573–579(1993)
- [63] C. J. Kim and K. Piromthamsiri: Sensory and Physical Hand Properties of Inherently Flame-Retardant Sleepwear Fabrics; *Textile Research Journal*, 54(1), 61–68(1984)
- [64] G. Winakor and C. J. Kim: Fabric Hand: Tactile Sensory Assessment; *Textile Research Journal*, 50(10), 601–610(1980)
- [65] P. Chen, R. L. Barker, G. W. Smith, and B. Scruggs: Handle of Weft Knit Fabrics; *Textile Research Journal*, 62(4), 200–211(1992)
- [66] Y. Suzuki and J. Gyoba: Effects of Sounds on Tactile Roughness Depend on the Congruency between Modalities; *Proc. World Haptics Conference*, 150–153(2009)
- [67] S. C. Kim, K. U. Kyung, and D. S. Kwon: The Effect of Sound on Haptic Perception; *Proc. World Haptics Conference*, 354–360(2007)
- [68] 槇究, 赤松摩耶, 佐竹明子: 素材表面感の次元について; *日本建築学会環境系論文集*, 614, 17–23(2007.4)

(2011年3月7日)

[著者紹介]

永野 光



2010年名古屋大学工学部機械航空工学科卒業。現在名古屋大学大学院工学研究科マイクロナノシステム工学専攻博士課程前期課程、ハプティクスに関する研究に従事。

岡本 正吾 (正会員)



2010年東北大学大学院情報科学研究科博士課程後期3年の課程修了。同年より名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻助教、現在に至る。ハプティクスに関する研究に従事。博士(情報科学)。

山田 陽滋



1983年名古屋大学工学研究科修士課程修了。同年より豊田工業大学助手、1993年助教授。2004年産業総合技術研究所知能システム部門安全知能研究グループグループ長、2008年より名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻教授、現在に至る。人間共存型ロボットの安全知能化研究に従事。工学博士。