

素材の触知覚を構成する 5 種の材質感次元

Five Psychophysical Dimensions of Tactile Perception of Textures/Materials

岡本 正吾, 永野 光, 山田 陽滋 (名古屋大学)

Shogo OKAMOTO, Hikaru NAGANO, and Yoji YAMADA (Nagoya University)

Abstract : We review studies on the structuring of psychophysical dimensions of the tactile perception of textures and materials. Collectively considering related studies on mechanisms of tactile perception, we propose that the tactile perception is composed of 5 dimensions including the perception of 1) macro and 2) micro roughness, 3) hardness/softness, 4) coldness/warmth, and 5) friction (stickiness/moistness).

Key Words: *multi dimensional scaling, factor analysis, principle component analysis*

1. 緒論

人は素材やテクスチャの表面に触れ、それらの材質感を得る。この材質感を表現する情報空間の次元構成が、ハプティクスの研究者らの関心を集め、その構成を特定する試みが多くなされてきた。しかしながら、心理学実験の方法や数理的アプローチ、実験に用いられた素材の差違などが原因で、今日まで統一的な次元構成が報告されるに至っていない。本論文は、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によって、素材やテクスチャの触知覚における共通の材質感次元を見出す。

われわれは触における質感を、素材やテクスチャの表面に触れることにより得られる素材の性質の知覚と捉える。一般に、ものの評価には階層性が認められ、触知覚の質感においてもこれは成り立つ。本論文では、Chen et al. [1, 2] に習い、触の質感は、材質感 (素材の表面粗さや剛性などの物性の知覚: psychophysical layer) および感性的質感 (材質感の結合によって表現され、豪華さや上品さなどの感性に関する質感: affective layer) の階層に別けられるとする。感性的質感はさらに複数の階層から構成される可能性がある。本論文は、前者の材質感を取り扱う。

2. 触知覚の材質感構成に関する研究例

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数理的手法とともに、構成された材質感次元を Table 1 にまとめる。

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。その結果、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 [3, 15]。

Hollins et al. 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 [5]。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 [6]。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。

Tiest et al. 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 [9]。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 et al. 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 [16]。その結果、Rough, Cold, Moist, Hard の 4 次元の材質感次元を示した。

Yoshioka et al. 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 [12]。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。

Lyne et al. は、8 種類のティッシュペーパーを対象に、量

表 1: Reference table of studies on perceptual dimensions of tactile textures

Author	Year	Method	Texture	Dimens. 1	Dimens. 2	Dimens. 3	Dimens. 4	Mod.
Yoshida [3]	1968	FA	25 materials	Heavy, Cold	Smooth, Wet	Hard	Elastic	VH
Lyne [4]	1984	MDS	8 tissues	Soft	Rigid	Uneven		VH
Lyne [4]	1984	MDS	8 tissues	Soft	Rigid	Elastic		H
Hollins [5]	1993	MDS	17 materials	Smooth/Rough	Hard/Soft	Elastic		VH
Hollins [6]	2000	MDS	17 materials	Smooth/Rough	Hard/Soft	Sticky/Slippery		VH
Tamura [7]	2000	FA	15 materials	Hard/Soft Harsh/Smootha	Warm/Cold	Moist		VH
Picard [8]	2003	MDS	24 car seats	Soft/Harsh	Thin/Thick	Relief	Hard	VH
Tiest [9]	2006	MDS	124 materials	Hard/Soft	Smooth/Rough	No named	No named	VH
Tanaka [10]	2006	FA	13 fabrics	Moist	Downy, Warm			VH
Kobayashi [11]	2006	FA	25 fabrics	Bulky	Harsh, Hard	Elastic		H
Kobayashi [11]	2006	FA	25 fabrics	Bulky	Harsh, Hard			VH
Shirado [16]	2007	FA	20 samples	Rough	Cold	Moist	Hard	VH
Yoshioka [12]	2007	MDS	16 surfaces	Rough	Hard	Sticky		VH
Summers [13]	2008	MDS	10 papers	Rough	Stiff			H
Tanno [14]	2010	PCA	12 fabrics	Thin/Thick	Hard/Soft	Clean	Harsh/Smooth	VH

Mod. (Modality) means the types of sensations used in the studies. V, H, and VH are visual, haptic, and visuo-haptic sensations, respectively. FA, PCA and, MDS are the factor analysis, principle component analysis, and multi dimensional scaling, respectively.

的推定法を用いて、対象間の非類似度を評価した [4]。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 et al. は、参加者の視覚の影響を排除し、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。彼らは、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 et al. 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、その結果に対し、MDS を適用し材質感次元を構成した [8]。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 et al. 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 と報告された。

Summers et al. 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 [13]。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。

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 [7]。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した。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 とやや強い相関が示された。

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 [11]。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/剛軟性の 2 次元構造であった。

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 [14]。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。

3. 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材質感次元として、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るため、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 [11, 4, 8]。このうち 2 例では [11, 8], ミ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、ミ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) は別々の次元に由来すると捉える。このことは、マクロな粗

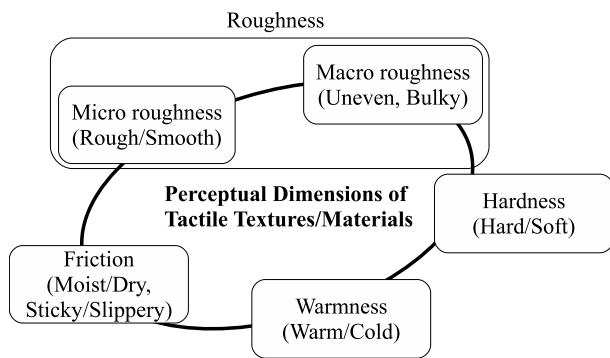


図 1: Five dimensions of tactile perception for material/texture

さとミクロナ粗さで知覚のメカニズムが異なる (Sec. 4. にて後述) ことから考えても妥当である。

いくつかの研究例では、湿った/乾いた (Moist/Dry) [7, 16, 10], つっぱる/滑る (Sticky/Slippery) [6, 12] という次元が報告されている。Sticky/Slippery および Moist/Dry は、Chen et al. 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 [1, 2]。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 [17, 18] 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、知覚される粗さ感には変化がないと報告した研究例 [19] 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 [7, 6, 16, 12] 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、マクロな粗さ感・ミクロナ粗さ感・温冷感・硬軟感・摩擦感 (乾湿・粘り/滑り) 5 種の次元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。これら材質感次元を Fig. 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、今後の課題である。

4. 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。

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、グレーティングス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 1 mm 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) [20, 21, 22]。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スの粗さ知覚への寄与は小さい [23, 24]。一方で、グレーティングス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) [25, 26]。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 [27, 28] 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 [29] 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。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。材質感としての温冷は、テクスチャと皮膚の間の熱伝導 [30, 16, 2] 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その履歴から、人は材質の温冷特性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 [31]。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および面内の圧力分布の関与が指摘されている [32, 33]。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によって、本論文で述べた以外の材質感次元の構成があり得る。

5. 結論

本論文では、人が素材やテクスチャを触った際に得る質感のうち、物性の知覚である材質感を構成する空間の次元に焦点を当てた。これまでの研究例を調査したところ、材質感次元は 5 種類存在すると考えることが合理的であり、それらは、マクロな粗さ感・ミクロナ粗さ感・温冷感・硬軟感・摩擦感 (乾湿・粘り/滑り) である。

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] 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*, vol. 30, pp. 4299–4310, 2009.
- [2] X. Chen, F. Shao, C. Barnes, T. Childs, and B. Henson, "Exploring relationships between touch perception and surface physical properties," *International Journal of Design*, vol. 3, no. 2, pp. 67–76, 2009.
- [3] M. Yoshida, "Dimensions of tactual impressions (1)," *Japanese Psychological Research*, vol. 10, no. 3, pp. 123–137, 1968.
- [4] M. B. Lyne, A. Whiteman, and D. C. Donderi, "Multidimensional scaling of tissue quality," *Pulp and Paper Canada*, vol. 85, no. 10, pp. 43–50, 1984.
- [5] M. Hollins, R. Faldowski, S. Rao, and F. Young, "Perceptual dimensions of tactile surface texture: A multidimensional scaling analysis," *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 54, no. 6, pp. 697–705, 1993.
- [6] M. Hollins, S. Bensmaïa, K. Karlöf, and F. Young, "Individual differences in perceptual space for tactile textures: Evidence from multidimensional scaling," *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 62, no. 8, pp. 1534–1544, 2000.
- [7] 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*, p. 709, 2000.
- [8] D. Picard, C. Dacremont, D. Valentin, and A. Giboreau, "Perceptual dimensions of tactile textures," *Acta Psychologica*, vol. 114, no. 2, pp. 165–184, 2003.
- [9] 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*, vol. 121, no. 1, pp. 1–20, 2006.
- [10] Y. Tanaka, M. Tanaka, and S. Chonan, "Development of a sensor system for measuring tactile sensation," *Proceedings of the 2006 IEEE Sensors*, pp. 554–557, 2006.
- [11] 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*, vol. 10, no. 1, pp. 25–28, 2006.
- [12] 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*, vol. 24, no. 1–2, pp. 53–70, 2007.
- [13] I. R. Summers, R. J. Irwin, A. C. Brady, and M. Grunwald (Ed.), "Haptic discrimination of paper," *Human Haptic Perception: Basics and Applications 1st Edition*, pp. 525–535, 2008.
- [14] 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*, vol. 27, pp. 643–648, 2010.
- [15] M. Yoshida, "Dimensions of tactual impressions (2)," *Japanese Psychological Research*, vol. 10, no. 4, pp. 157–173, 1968.
- [16] H. Shirado and T. Maeno, "Modeling of human texture perception for tactile displays and sensors," *Proceedings of the 2005 World Haptics Conference*, pp. 629–630, 2005.
- [17] 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*, vol. 144, no. 2, pp. 211–223, 2002.
- [18] 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*, vol. 202, no. 1, pp. 33–43, 2010.
- [19] M. M. Taylor and S. J. Lederman, "Tactile roughness of grooved surfaces: A model and the effect of friction," *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 17, no. 1, pp. 23–36, 1975.
- [20] 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*, vol. 10, no. 12, pp. 3823–3836, 1990.
- [21] 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*, vol. 17, no. 19, pp. 7480–7489, 1997.
- [22] 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*, vol. 21, no. 17, pp. 6905–6916, 2001.
- [23] 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*, vol. 132, no. 3, pp. 351–361, 2000.
- [24] S. Lederman, "Tactile roughness of grooved surfaces: The touching process and effects of macro- and microsurface structure," *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 16, no. 2, pp. 385–395, 1974.
- [25] M. Hollins and S. R. Rinser, "Evidence for the duplex theory of tactile texture perception," *Attention, Perception & Psychophysics*, vol. 62, no. 4, pp. 695–705, 2000.
- [26] C. J. Cascio and K. Sathian, "Temporal cues contribute to tactile perception of roughness," *Journal of Neuroscience*, vol. 21, no. 14, pp. 5289–5296, 2001.
- [27] M. Konyo, H. Yamada, S. Okamoto, and S. Tadokoro, "Alternative display of friction represented by tactile stimulation without tangential force," *Proceedings of EuroHaptics 2008*, pp. 619–629, 2008.
- [28] Y. Nonomura, T. Fujii, Y. Arashi, T. Miura, and T. Maeno, K. Tashiro, Y. Kamikawa, and R. Monchi, "Tactile impression and friction of water on human skin," *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, vol. 69, pp. 264–267, 2009.
- [29] W. R. Provancher and N. D. Sylvester, "Fingerpad skin stretch increases the perception of virtual friction," *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 2, no. 4, pp. 212–223, 2009.
- [30] 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*, vol. 30, no. 1, pp. T13–T22, 1977.
- [31] W. M. B. Tiest and A. M. L. Kappers, "Kinaesthetic and cutaneous contributions to the perception of compressibility," *Proceedings of the EuroHaptics 2008*, pp. 255–264, 2008.
- [32] A. Bicchi, E. P. Schillingo, and D. De Rossi, "Haptic discrimination of softness in teleoperation: the role of the contact area spread rate," *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 496–504, 2000.
- [33] 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*, pp. 78–82, 2001.