

機関番号：14301

領域設定期間：平成27年度～令和元年度

領域番号：4705

研究領域名（和文）多様な質感認識の科学的解明と革新的質感技術の創出

研究領域名（英文）Understanding human recognition of material properties for innovation in SHITSUKAN science and technology

領域代表者

西田 眞也（NISHIDA, SHINYA）

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：20396162

交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）810,900,000円

研究成果の概要：人間は五感を通じた多様な質感の知覚を通して、外界に存在する事物の物理的な性質・素材・状態、さらには感性的価値など、生存に不可欠な情報を得ている。このような質感を認識する人間および機械の情報処理を、心理物理学・脳神経科学・情報工学の密接な連携により、多角的に解明した。また、さまざまな革新的な質感の再生・編集技術を開発し、産業応用も視野に入れた質感の学際的な学問領域を確立した。

研究分野：人間情報学

キーワード：質感 情報工学 認知科学 神経科学 感性情報学

1. 研究開始当初の背景

質感認識とは脳による物体の本性の解読である。人間は五感を通じた多様な質感の知覚を通して、外界に存在する事物の物理的な性質・素材・状態、さらには美醜・好み・快不快といった感性的価値など、生存に不可欠な情報を得ている。このような質感を生み出す情報は複雑な高次元情報として感覚入力に埋め込まれており、人間は容易にその情報を読み解くことができるが、その仕組みの科学的解明は未だ端緒にすぎたばかりである。さらに質感の理解は、感覚情報の表現と認識の技術に革新を生むことが期待され、産業界からの注目も高まっている。平成22-26年度新学術領域研究「質感脳情報学」によって世界に先駆けて生まれた学際的な質感研究を更に発展させる必要がある。

2. 研究の目的

「質感脳情報学」において未解明であった実世界の多様な質感を認識する人間の情報処理の仕組みを明らかにする。従来の理論検証型アプローチにデータ駆動型アプローチを組み合わせ、視覚以外の感覚モダリティや言語にも視野を広げる。さらに、質感認識の科学的理解に基づき、革新的な質感の再生・編集技術を生み出し、産業応用も視野に入れた質感の学際的な学問領域を確立する。

3. 研究の方法

心理物理学・脳神経科学・情報工学の密接な連携により、研究を進めた。項目A「質感メカニズム」は、理論検証型アプローチを基本に、視覚・聴覚・触覚の様々な質感認識に関して、理論的な考察に基づいた機械認識手法を考案するとともに、質感に対する人間や動物の反応を心理学や脳神経科学的手法を用いて分析し、質感の脳内情報処理を明らかにした。項目B「質感マイニング」は、データ駆動型アプローチを用いて、統計的機械学習と高度な脳情報解析技術を融合した新しい質感研究パラダイムを確立し、実社会の多様な質感情報の掘り起こし（マイニング）を

行った。項目C「質感イノベーション」では、人工現実、コンピュータグラフィックス、触覚工学、色彩工学などの多彩な技術分野を集結し、多様で高度な質感を人工的に再現し、編集する技術を開発した。さらに、これらの計画班を補強するさまざまな研究を項目Dの公募班で行った。

4. 研究の成果

(1) A01-1 西田班：人間の視・聴・触覚の多様な質感を生み出す変調情報とそれを抽出する脳情報処理機構を同定するとともに、革新的な質感技術を開発した。まず視覚に関して、低次の画像統計量に基づいて物体表面の濡れなどを推定するメカニズムを解明した^[1]。臨床研究において、認知症と質感認知の関係を明らかにした^[2]。聴覚に関して、環境音や音声の処理に最適化された深層ニューラルネットワーク（DNN）が聴覚系の神経細胞と同様な特性を持つことなどを明らかにした^[3]。触覚に関して、テクスチャ判断に高次画像特徴量が利用されないことなどを明らかにした。質感技術に関して、深層学習を用いた食事画像に対する質感変換技術を進歩させた。プロジェクションマッピングによる質感操作技術を発展させ、ステレオ眼鏡無しで見たときに画像ボケを生じない2D/3Dコンパチブルの両眼立体視法を開発した。

(2) A01-2 小松班：質感情報の脳視覚野神経活動における表現と質感知覚との関係を解明した^[4]。質感認識における経験の効果に関するマカクザルのfMRIにより、下側頭皮質後部領域の質感表現が素材の視触覚経験を経てはじめて形成されることを見出した^[5]。光沢を持つ物体画像から3次元形状を復元する計算モデルが人の知覚と類似の性質を示すことを見出した^[6]。画像統計量と感性的質感認知の関係を検討し、人間は少数の画像統計量に基づき素早く特定の表面質感を心地よい・気持ち悪いと評価していることを見出した。



(3) A0-3 南本班：感性的質感認知における脳の基本的作動原理を明らかにした。サルを対象に化学遺伝学的手法を駆使し、視覚に基づく価値判断に高次視覚野→嗅周野→前頭眼窩皮質→吻内側尾状核→腹側淡蒼球の神経連絡が必須であることを示し^[7,8]、視覚刺激の価値情報表現を明らかにした。さらに化学遺伝学で用いる新規薬剤を創出^[9]、脳回路を画像化して操作する新技術を開発することでサル脳の複数の神経回路を選択的かつ可逆的に阻害できることを実証した。

(4) A01-4 佐藤班：微細構造を持つ物体の複雑な質感を光学的・空間的特徴量によりモデル化し、物体表面・内部の光の反射や散乱のパターンと人間の質感知覚との関係を解明した。直接反射・相互反射を分離する技術を開発し、双方の組み合わせにより質感操作が可能なことを示した。プロジェクタ・カメラシステムを用いて物体表面内の光の拡散や散乱による伝搬過程の可視化も実現した^[10]。水という媒質を通して観察することで、物体表面の反射特性に依存しない頑健な形状推定手法を提案した^[11]。物体が水に濡れたときの光学的な変化の解明とモデル化にも取り組んだ^[12]。芸術における質感表現の解明にも取り組んだ。

(5) B01-1 岡谷班：深層学習を用いた物体表面の質感の画像認識システムの構築と、そこに形成される質感表現の分析を行った。視覚認識可能な質感概念のマイニング手法を開発するとともに^[13]、質感認識の困難さの解決に取り組んだ。そして、画像理解のタスクなどに適用可能な、DNNのアーキテクチャを構築し^[14]、画像と言語のマルチモーダルタスクにトランスフォーマーを適用する、今のトレンドを作るとともに、画像と言語の複数の異なるタスクを一つのネットワークで学習する、いわゆるマルチタスク学習の成功に至った^[15]。

(6) B01-2 神谷班：データマイニング的手法により、質感脳情報表現を発見するアプローチを創出した。画像を見ているときの脳活動パターンからその画像のDNN特徴を予測する方法を開発し、脳とDNNの間の階層的相同性を見出した^[16]。脳活動から予測したDNN特徴量を利用して、見ている画像を再構成する方法を構築し、テクスチャや材質画像を再構成することにも成功した^[17]。

(7) B01-3 大澤班：並列かつ階層的な構造を持つ視覚系における質感にかかわる情報処理過程を、神経細胞レベルで統一的な刺激を使用し、事前仮説に依存しない分析法を用いて、背側系と腹側系の両方を解析した。また、DNNの基本オペレーションでもある情報プーリングに注目し、ネコの初期視覚野において、空間領域のみならず空間周波数領域や方位領域においてもプーリングが行われていることを見出した^[18]。さらに、理論的および実験的な解析により、空間および空間周波数領域におけるプーリングが両眼立体視において奥行きを含む空間情報の精細な表現に役

だっていることを明らかにした^[19]。

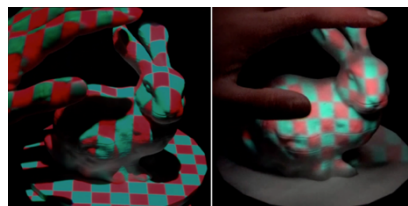
(8) B01-4 坂本班：物理特徴・心理物理実験による知覚表現データ・言語による主観評価データを蓄積し、観察者プロフィールを対応付けて質感 DB を構築した。質感測定のための実験環境を整備し、素材サンプル（和室素材、紙、布、木、合成樹脂）を収集し、その物理量（表面形状・熱伝導率・硬度・水分量など）・知覚特性（SD 法）・言語表現（オノマトペ）の特徴を視覚・触覚・聴覚実験により調べ、質感素材 DB を構築した。また大量の素材画像セットに対して、質感表現に関係する評定とオノマトペ表現を収集し、両者の相関関係を見出すとともに、深層学習で画像と音韻を結び付ける試みも行った。オノマトペを使った心理実験で、触覚質感^[20]や質感の個人差^[21]も解明した。

(9) C01-1 梶本班：触感の構成要素を解明するために指先に与えられる時空間的触覚パターンを記録・再現し、その知見を援用しながらタッチパネルへの触覚提示システムを開発した。記録に関しては、指先皮膚が凹凸テクスチャ面上を移動した際に生じる皮膚の垂直水平変位を、新規に開発した高速・高精度のトラッキングシステムで測定した。提示に関しては、まず新たに高時間・空間解像度の触覚提示を熱駆動方式により実現した^[22]。さらにタッチパネルへの応用が可能な触覚提示技術として指腹に機械的振動刺激と摩擦刺激の両方を提示可能な装置を開発し、従来の触覚提示技術と比べてより本物らしいテクスチャを提示できることを確認した^[23]。



(10) C01-2 土橋班：コンピュータグラフィックス（CG）を用いた質感の再現、解析および編集のための基盤技術を開発した。実計測に基づく質感の再現手法^[24]、ビデオなど 2 次元映像における質感の編集^[25]、デジタルファブリケーションによる実物の質感編集手法^[26]を開発した。

(11) C01-3 岩井班：プロジェクタ等の多自由度照明とデジタルファブリケーションとを組み合わせるアプローチを提唱し、実物体上での質感再現・編集における技術的課題を解決した。実物体上に位置ずれなく映像投影する技術^[27]や、投影対象に近接・接触しても影の生じにくいプロジェクタ^[28]を提案した。



(12) C01-4 岡嶋班：実社会に満ち溢れている多様な質感情報を多角的かつ系統的に分析し、その質感生起メカニズムを定式化・モデル化することで質感を任意に制御し、生成・出力を精緻に管理できる総合的かつ実用的な質感工学体系を構築した^[29]。また、食品の色や質感のリアルタイム変換を可能にする拡張現実感システムの開発とクロスモーダル効果の定量化を推進した^[30]。

(13) D01 公募班（神経科学）：宮川班は、コモンマーモセットの側頭視覚皮質の上側頭溝底部腹側領域に光沢素材（に選択的な応答を示す神経細胞集団がクラスター状に固まって存在することを発見した。北田班は、梶本班、坂本班の協力を得て、触覚的柔らかさに関わる神経活動を同定した^[31]。村田班は、マウスの食行動に関わる嗅覚神経回路の解析を進めた。

(14) D01 公募班（心理・行動）：栗木班は輝度に注目して質感認識特性を明らかにした。伊村班と山口班は岡嶋班や和田班と共同で、チンパンジーや乳児が野菜の表面の「鮮度」の違いを輝度分布などの視覚手がかりから区別できることを示した^[32,33]。齋木班は、質感の記憶表象が時間とともに変化することを示した。鶴木班は、音声の質感に影響を与える音響特性を同定した。和田班は食べ物の質感の研究を進め、高橋班は質感認知の異文化比較研究を立ち上げた。

(15) D02 公募班（情報工学）：鳴海班は、VR 技術を駆使して食感の操作を試みた^[34]。渡辺班は、高速プロジェクションを用いた質感と形状を再現するハイパーリアルディスプレイを開発した。天野班は、プロジェクションマッピング技術による質感編集技術を発展させた。岡部班は、マルチスペクトルイメージングによる透明・半透明物体のモデリングと質感編集を実現した。野々村班は坂本班と協力して触覚的しっとり感の物理原因と特定した^[35]。

5. 主な発表論文等（受賞等を含む） 研究代表者；研究分担者；*Corresponding author

[1] “Image statistics for material perception,” Nishida S, 査読有, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 30, 94–99 (2019)

[2] “Visual texture agnosia in dementia with Lewy bodies and Alzheimer's disease,” *Oishi Y, Imamura

- T, Shimomura T & Suzuki K, *Cortex*, 査読有, 103, 277–290 (2018)
- [3] “Cascaded Tuning to Amplitude Modulation for Natural Sound Recognition,” *Koumura T, Terashima H & Furukawa S, *Journal of Neuroscience*, 査読有, 39(28): 5517–5533 (2019)
- [4] “Neural mechanisms of material perception: Quest on Shitsukan”, *Komatsu H & Goda N, *Neuroscience*, 査読有, 392, 329-347, (2018)
- [5] “Crossmodal association of visual and haptic material properties of objects in the monkey ventral visual cortex,” *Goda N, Yokoi I, Tachibana A, Minamimoto T & Komatsu H, *Current Biology*, 査読有, 26(7):928-934, (2016)
- [6] “Computational model for human 3D shape perception from a single specular image,” *Shimokawa T, Nishio N, Sato M, Kawato M & Komatsu H, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 査読有, 13, 10, (2019)
- [7] “Chemogenetic disconnection of monkey orbitofrontal and rhinal cortex reversibly disrupts reward value,” Eldridge MA, Lechner W, Minamimoto T & *Richmond BJ, *Nature Neuroscience*, 査読有, 19: 37-39 (2016)
- [8] “PET imaging-guided chemogenetic silencing reveals a critical role of primate rostromedial caudate in reward evaluation,” Nagai Y, Kikuchi E, Lerchner W, Inoue KI, Ji B, Eldridge MAG, Kaneko H, Kimura Y, Oh-Nishi A, Hori Y, Kato Y, Hirabayashi T, Fujimoto A, Kumata K, Zhang MR, Aoki I, Suhara T, Higuchi M, Takada M, Richmond BJ & *Minamimoto T, *Nature Communications*, 査読有, 7: 13605, (2016)
- [9] “Deschloroclozapine, a potent and selective chemogenetic actuator enables rapid neuronal and behavioral modulations in mice and monkeys,” Nagai Y[§], Miyakawa N[§] (§co-first authors), Takuwa H, Hori Y, Oyama K, Ji B, Takahashi M, Huang XP, Slocum S, DiBerto JF, Xiong Y, Urushihata T, Hirabayashi T, Fujimoto F, Mimura K, English JG, Liu J, Inoue K, Kumata K, Seki C, Ono M, Shimojo M, Zhang MR, Tomita Y, Suhara T, Takada M, Higuchi M, Jin J, Roth BL & *Minamimoto T, *Nature Neuroscience* 査読有, (in press)
- [10] “Programmable Non-Epipolar Indirect Light Transport: Capture and Analysis,” Kubo H, Jayasuriya S, Iwaguchi T, Funatomi T, Mukaigawa Y & Narasimhan S, *IEEE Transactions on Visualization and Computer*, 査読有, DOI: 10.1109/TVCG.2019.2946812 (2019)
- [11] “Depth Sensing by Near-Infrared Light Absorption in Water,” Asano Y, Zheng Y, Nishino K & Sato I, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 査読有, DOI: 10.1109/TPAMI.2020.2973986. (2020)
- [12] “Estimation of Wetness and Color from a Single Multispectral Image,” Okawa H, Shimano M, Asano Y, Bise R, Nishino K & Sato I, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, 査読有, DOI:10.1109/TPAMI.2019.2903496 (2019)
- [13] “Integrating Deep Features for Material Recognition,” *Zhang Y, Ozay M, Liu X & Okatani T, *Proc. International Conference on Pattern Recognition*, 査読有, 3697-3702, (2016)
- [14] “Improved Fusion of Visual and Language Representations by Dense Symmetric Co-Attention for Visual Question Answering,” *Nguyen DK & Okatani T, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2019)*, 査読有, 6087-6096, (2018)
- [15] “Multi-task Learning of Hierarchical Vision-Language Representation,” *Nguyen DK & Okatani T, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2019)*, 査読有, 10492-10501, (2019)
- [16] “Generic decoding of seen and imagined objects using hierarchical visual feature,” Horikawa T & *Kamitani Y, *Nature Communications*, 査読有, 8:1503, (2017)
- [17] “Deep image reconstruction from human brain activity,” Shen G, Horikawa T, Majima K & *Kamitani Y, *PLOS Computational Biology*, 査読有, 15, 1006633, (2019)
- [18] “Subspace mapping of the three-dimensional spectral receptive field of macaque MT neurons,” Inagaki M, Sasaki KS, Hashimoto H & *Ohzawa I, *Journal of Neurophysiology*, 査読有, 112: 784-795, (2016)
- [19] “Effects of generalized pooling on binocular disparity selectivity of neurons in the early visual cortex,”

- Kato D, Baba M, Sasaki KS & *Ohzawa I, *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 査読有, 371: 20150266, 1-19, (2016)
- [20] “Bouba/Kiki in Touch: Associations Between Tactile Perceptual Qualities and Japanese Phonemes,” *Sakamoto M & Watanabe J, *Frontiers in Psychology*, 査読有, 9(295), 1-12. (2018)
- [21] “Visualizing Individual Perceptual Differences Using Intuitive Word-Based Input,” *Sakamoto M & Watanabe J, *Frontiers in Psychology*, 査読有, 10(1108), 1-8. (2019)
- [22] “Wearable Tactile Display Based on Thermal Expansion of Nichrome Wire,” *Kajimoto H & Jones L, *IEEE Transactions on Haptics*, 査読有, 12(3), 257-268 (2018)
- [23] “Tactile texture display with vibrotactile and electrostatic friction stimuli mixed at appropriate ratio presents better roughness textures,” Ito K, *Okamoto S, Yamada Y & Kajimoto H, *ACM Transactions on Applied Perception*, 査読有, 16(4), 20, (2019)
- [24] “Digitization of natural objects with micro CT and photographs,” *Ijiri T, Todo H, Hirabayashi A, Kohiyama K & Dobashi Y, *PLoS ONE*, 査読有, 13(4): e0195852. (2018)
- [25] “Image-based translucency transfer through correlation analysis over multi-scale spatial color distribution,” *Todo H, Yatagawa T, Sawayama M, Dobashi Y & Kajimoto M, *The Visual Computer*, 査読有, 35:811–822 (2019)
- [26] “Fabricating Reflectors for Displaying Multiple Images,” *Sakurai K, Dobashi Y, Iwasaki K & Nishita T, *ACM Transactions on Graphics*, 査読有, Vol. 37, No. 4, Article 158 (2018)
- [27] “Fabricating Diminishable Visual Markers for Geometric Registration in Projection Mapping,” Asayama H, *Iwai D & Sato K, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 査読有, 24(2), 1091-1102, (2017)
- [28] “Shadowless Projector: Suppressing Shadows in Projection Mapping with Micro Mirror Array Plate,” Hiratani K & *Iwai D, Punpongsanon P, Sato K, *Proceedings of IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces*, 査読有, 1309-1310, (2019)
- [29] “プロジェクタカメラ系における反射面の事前知識を用いたオンライン反射色推定,” 西澤昌宏, 岡嶋克典, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, J102-A(8), 227-235 (2019)
- [30] “Eating with our eyes: From visual hunger to digital satiation,” *Spence C, Okajima K, Cheek AD, Petit O & Michel C, *Brain and Cognition*, 査読有, 110, 53-63 (2016)
- [31] “Brain networks underlying tactile softness perception: a functional magnetic resonance imaging study,” *Kitada R, Doizaki R, Kwon J, Nakagawa E, Kajimoto H, Sakamoto M & Sadato N, *NeuroImage*, 査読有, 197:156-166 (2019)
- [32] “Chimpanzees can visually perceive differences in the freshness of foods,” *Imura T, Masuda T, Wada Y, Tomonaga M & Okajima K, *Scientific Reports*, 査読有, 6, 34685, (2016)
- [33] “Infant can visually differentiate the fresh and degraded foods: evidence from fresh cabbage preference,” *Yang J, Okajima K, Kanazawa S & Yamaguchi MK, *Frontiers in Psychology*, 査読有, 10 Article 1553 (2019)
- [34] “食卓へのプロジェクションマッピングによる食の知覚と認知の変容 ～天ぶらを例題として～,” 鳴海拓志, 松尾宇人, 櫻井翔, 谷川智洋, 廣瀬通孝, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 査読有, 23(2), 65-74 (2018) (日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞)
- [35] “Physical origin of a complicated tactile sensation: ‘Shittori feel’,” Kikegawa, K, Kuhara R, Jinhwan K, Sakamoto M, Tsuchiya T, Nagatani N & *Nonomura Y, *Royal Society Open Science*, 査読有, 6(7): 190039 (2019)

ホームページ等

- (1) 多元質感知ホームページ <http://www.shitsukan.jp/ISST/>
- (2) 研究成果 (ニュースレター等) <http://shitsukan.jp/ISST/achievements/index.html>
- (3) 質感のつどい <http://www.shitsukan.jp/tsudoi/>
- (4) 国際シンポジウム "Past, Present and Future of Shitsukan Science and Technologies"
2019年12月5～6日 京都大学医学部創立百周年記念施設 芝蘭会館
<http://shitsukan.jp/ISST/activity/2019.html#a330>