
多様な質感認識の科学的解明と革新的質感技術の創出

領域略称名：多元質感知

領域番号：4705

平成27年度～令和元年度
科学研究費助成事業（科学研究費補助金）
（新学術領域研究（研究領域提案型））
研究成果報告書

令和5年6月

領域代表者 京都大学・情報学研究科・教授・西田 眞也

はしがき

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。多元質感知領域では、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。

研究組織

計画研究

領域代表者 西田 眞也 (京都大学大学院・情報学研究科・教授)

(総括班)

研究代表者 西田 眞也 (京都大学大学院・情報学研究科・教授)

研究分担者 岩井 大輔 (大阪大学・基礎工学研究科・准教授)

研究分担者 日浦 慎作 (兵庫県立大学・工学研究科・教授)

研究分担者 中内 茂樹 (豊橋技術科学大学・工学系研究科・教授)

研究分担者 佐藤 いまり (国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・教授)

連携研究者 小松 英彦 (玉川大学・脳科学研究所・教授)

連携研究者 大澤 五住 (大阪大学・生命機能研究科・教授)

連携研究者 岡谷 貴之 (東北大学・情報科学研究科・教授)

連携研究者 南本 敬史 (国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所脳機能イメージング研究部・グループリーダー)

連携研究者 本吉 勇 (東京大学・総合文化研究科・准教授)

連携研究者 岡嶋 克典 (横浜国立大学・環境情報研究院・教授)

連携研究者 土橋 宜典 (北海道大学・情報科学研究科・准教授)

連携研究者 本田 学 (国立精神・神経医療研究センター・神経研究所疾病研究第七部・部長)

連携研究者 堀内 隆彦 (千葉大学・融合科学研究科・教授)

連携研究者 神谷 之康 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・研究室長)

連携研究者 佐藤 洋一 (東京大学・生産技術研究所・教授)

連携研究者 坂本 真樹 (電気通信大学・情報理工学研究科・教授)

連携研究者 梶本 裕之 (電気通信大学・情報理工学研究科・教授)

(国際活動支援班)

研究代表者 西田 眞也 (京都大学大学院・情報学研究科・教授)

研究分担者 岩井 大輔 (大阪大学・基礎工学研究科・准教授)

研究分担者 中内 茂樹 (豊橋技術科学大学・工学系研究科・教授)

研究分担者 南本 敬史 (国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所脳機能イメージング研究部・グループリーダー)

研究分担者 岡嶋 克典 (横浜国立大学・環境情報研究院・教授)

研究分担者 土橋 宜典 (北海道大学・情報科学研究科・准教授)

研究分担者 佐藤 いまり (国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・教授)

研究分担者 堀内 隆彦 (千葉大学・融合科学研究科・教授)
研究分担者 神谷 之康 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・研究室長)
研究分担者 佐藤 洋一 (東京大学・生産技術研究所・教授)
研究分担者 坂本 真樹 (電気通信大学・情報理工学研究科・教授)
研究分担者 梶本 裕之 (電気通信大学・情報理工学研究科・教授)

(A01-1 班)

研究代表者 西田 眞也 (京都大学大学院・情報学研究科・教授)
研究分担者 古川 茂人 (日本電信電話株式会社・NTT コミュニケーション科学基礎研究所・上席特別研究員)
研究分担者 鈴木 匡子 (東北大学・医学系研究科, ・教授)
研究分担者 柳井 啓司 (電気通信大学・情報理工学研究科・准教授)

(A01-2 班)

研究代表者 小松 英彦 (玉川大学・脳科学研究所・教授)
研究分担者 郷田 直一 (生理学研究所・システム脳科学研究領域・助教)
研究分担者 本吉 勇 (東京大学・大学院総合文化研究科・教授)
研究分担者 下川 丈明 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・主任研究員)

(A01-3 班)

研究代表者 南本 敬史 (国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所脳機能イメージング研究部・グループリーダー)
研究分担者 本田 学 (国立精神・神経医療研究センター・神経研究所疾病研究第七部・部長)
研究分担者 鯉田 孝和 (豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・准教授)

(A01-4 班)

研究代表者 佐藤 いまり (国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・教授)
研究分担者 向川 康博 (奈良先端科学技術大学院大学, 先端科学技術研究科, 教授)
研究分担者 佐藤 洋一 (東京大学・生産技術研究所・教授)
研究分担者 鄭 銀強 (国立情報学研究所・コンテンツ科学研究系・准教授)
研究分担者 西野 恒 (京都大学・情報学研究科・教授)
研究分担者 平 諭一郎 (東京藝術大学・学内共同利用施設等・准教授)
研究分担者 久保 尋之 (奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教)

(B01-1 班)

研究代表者 岡谷 貴之 (東北大学・情報科学研究科・教授)
研究分担者 川崎 圭祐 (新潟大学・医歯学系・准教授)
研究分担者 山口 光太 (東北大学・情報科学研究科・助教)

(B01-2 班)

研究代表者 神谷 之康 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・研究室長)

(B01-3 班)

研究代表者 大澤 五住 (大阪大学・生命機能研究科・教授)
研究分担者 佐々木 耕太 (大阪大学・生命機能研究科・助教)
研究分担者 田村 弘 (大阪大学・生命機能研究科・准教授)

(B01-4 班)

研究代表者 坂本 真樹 (電気通信大学・情報理工学研究科・教授)
研究分担者 中内 茂樹 (豊橋技術科学大学・工学系研究科・教授)

(C01-1 班)

研究代表者 梶本 裕之 (電気通信大学・情報理工学研究科・教授)
研究分担者 岡本 正吾 (名古屋大学・工学研究科・准教授)

(C01-2 班)

研究代表者 土橋 宜典 (北海道大学・情報科学研究科・准教授)
研究分担者 井尻 敬 (芝浦工業大学・工学部・准教授)
研究分担者 岡部 誠 (静岡大学・工学部・准教授)
研究分担者 岩崎 慶 (和歌山大学・システム工学部・准教授)
研究分担者 藤堂 英樹 (中央学院大学・現代教養学部・助教)

(C01-3 班)

研究代表者 岩井 大輔 (大阪大学・基礎工学研究科・准教授)
研究分担者 日浦 慎作 (兵庫県立大学・工学研究科・教授)

(C01-4 班)

研究代表者 岡嶋 克典 (横浜国立大学・環境情報研究院・教授)
研究分担者 堀内 隆彦 (千葉大学・融合科学研究科・教授)
研究分担者 富永 昌二 (長野大学・企業情報学部・研究員)

公募研究

(D01 班、前期)

研究代表者 栗木 一郎 (東北大学・電気通信研究所・准教授)
研究代表者 塩入 諭 (東北大学・電気通信研究所・教授)
研究代表者 野々村 美宗 (山形大学・理工学研究科・准教授)
研究代表者 溝上 陽子 (千葉大学・工学研究院・融合理工学府・准教授)
研究代表者 高橋 康介 (中京大学・心理学部・准教授)
研究代表者 仲谷 正史 (慶應義塾大学・環境情報学部・研究員)
研究代表者 鶴木 祐史 (北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授)
研究代表者 村田 航志 (福井大学・医学部・助教)
研究代表者 齋木 潤 (京都大学大学院人間・環境学研究科・教授)
研究代表者 藤田 一郎 (大阪大学・生命機能研究科・教授)
研究代表者 長原 一 (大阪大学・データビリティフロンティア機構・教授)

研究代表者 山口 真美 (中央大学・文学部・教授)
研究代表者 伊村 知子 (新潟国際情報大・情報文化・准教授)
研究代表者 北田 亮 (生理学研究所・助教)
研究代表者 眞田 尚久 (関西医科大学・生理学第二講座・助教)
研究代表者 和田 有史 (立命館大学・理工学部・教授)
研究代表者 宮川 尚久 (国立研究開発法人・放射線医学総合研究所・主任研究員)
研究代表者 菅生 康子 (産業技術総合研究所・研究員)
研究代表者 藤崎 和香 (産業技術総合研究所・主任研究員)

(D02 班、前期)

研究代表者 嵯峨 智 (筑波大学・システム情報系情報工学域・准教授)
研究代表者 小泉 直也 (電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教)
研究代表者 渡辺 義浩 (東京大学・情報理工・講師)
研究代表者 鳴海 拓志 (東京大学・情報理工・講師)
研究代表者 天野 敏之 (和歌山大学・システム工学部・准教授)
研究代表者 岡部 孝弘 (九州工業大学・情報工学研究院・教授)

(D01 班、後期)

研究代表者 栗木 一郎 (東北大学・電気通信研究所・准教授)
研究代表者 永井 岳大 (東京工業大学・大学院工学院・准教授)
研究代表者 岡本 雅子 (東京大学・大学院農学生命科学研究科・特任准教授)
研究代表者 高橋 宏知 (東京大学・情報理工学系研究科・准教授)
研究代表者 三浦 貴大 (産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員)
研究代表者 鶴木 祐史 (北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授)
研究代表者 村田 航志 (福井大学・学術研究院医学系部門・助教)
研究代表者 齋木 潤 (京都大学・人間・環境学研究科・教授)
研究代表者 藤田 一郎 (大阪大学・生命機能研究科・教授)
研究代表者 楊 家家 (岡山大学・ヘルスシステム統合科学研究科・助教)
研究代表者 金沢 創 (日本女子大学・人間社会学部・教授)
研究代表者 伊村 知子 (日本女子大学・人間社会学部・准教授)
研究代表者 眞田 尚久 (関西医科大学・医学部・助教)
研究代表者 近添 淳一 (生理学研究所・脳機能計測・支援センター・教授)
研究代表者 宮川 尚久 (量子科学技術研究開発機構・放射線医学総合研究所脳機能イメージング研究部・主任研究員)
研究代表者 林 隆介 (産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員)
研究代表者 菅生 康子 (産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員)
研究代表者 細谷 晴夫 (株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・主任研究員)

(D02 班、後期)

研究代表者 楽 詠瀬 (青山学院大学・理工学部・准教授)
研究代表者 鳴海 拓志 (東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師)
研究代表者 渡辺 義浩 (東京工業大学・工学院・准教授)

研究代表者 天野 敏之 (和歌山大学・システム工学部・教授)
研究代表者 石塚 裕己 (大阪大学・基礎工学研究科・助教)
研究代表者 岡部 孝弘 (九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授)
研究代表者 三木 則尚 (慶應義塾大学・理工学部・教授)

交付決定額（配分額）

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 27 年度	266,890,000 円	205,300,000 円	61,590,000 円
平成 28 年度	205,530,000 円	158,100,000 円	47,430,000 円
平成 29 年度	224,250,000 円	172,500,000 円	51,750,000 円
平成 30 年度	195,260,000 円	150,200,000 円	45,060,000 円
令和元年度	188,240,000 円	144,800,000 円	43,440,000 円
合計	1,054,170,000 円	810,900,000 円	243,270,000 円

研究発表

A01-1(計画・西田) 雑誌論文 54 件(査読有 44 件、査読無 10 件)、重要国際会議 9 件

1. “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)
2. “Image statistics for material perception,” Nishida S, 査読有, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 30, 94–99 (2019)
3. “Self-supervised difference detection for weakly-supervised semantic segmentation,” Shimoda W & Yanai K, *IEEE International Conference on Computer Vision*, 査読有, (2019)
4. “Material and shape perception based on two types of intensity gradient information,” *Sawayama M & Nishida S, *PLoS Computational Biology*, 査読有, 14(4), e1006061 (2018)
5. “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)
6. “Hiding of phase-based stereo disparity for ghost-free viewing without glasses,” *Fukiage T, Kawabe T & Nishida S, *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2017)*, 査読有, 36(4): 147, (2017)
7. “Visual wetness perception based on image color statistics,” *Sawayama M, Adelson EH & Nishida S, *Journal of Vision*, 査読有, 17(5):7, 1-24, (2017)

A01-2(計画・小松) 雑誌論文 21 件(査読有 18 件、査読無 3 件)

1. “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)
2. “Co-circularity opponency in visual texture,” *Sato H, Kingdam FAA, Motoyoshi I, *Scientific Reports*, 査読有, 9: 1403, (2019)
3. “Neural mechanisms of material perception: Quest on Shitsukan,” *Komatsu H, Goda N, *Neuroscience*, 査読有, 392, 329-347, (2018)
4. “Dependence of behavioral performance on material category in an object grasping task with monkeys,” Yokoi I, Tachibana A, Minamimoto T, Goda N, *Komatsu H, *Journal of Neurophysiology*, 査読有, 120(2), 553-563, (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. 「質感の科学 —知覚・認知メカニズムと分析・表現の技術—」小松英彦編、小松英彦・西田真也・本吉勇・澤山正貴・渡邊淳司・藤崎和香・大沢五住・本田学・日浦慎作・佐藤いまり・中内茂樹・岡谷貴之・岩井大輔・坂本真樹・岡本正吾著, 査読無, 朝倉書店, (2016)

A01-3(計画・南本) 雑誌論文 43 件(査読有 43 件、査読無 0 件)

1. “Deschloroclozapine, a potent and selective chemogenetic actuator enables rapid neuronal and behavioral modulations in mice and monkeys,” Nagai Y[§], Miyakawa N[§] (§筆頭共著者), 他 28 名 & *Minamimoto T, *Nature Neuroscience* 査読有, (in press)
2. “Macaques exhibit implicit gaze bias anticipating others’ false-belief-driven actions via the medial prefrontal cortex,” Hayashi T, Akikawa R, Kawasaki K, Egawa J, Minamimoto T, Kobayashi K, Kato

- S, Hori Y, Nagai Y, Iijima A, Someya T & *Hasegawa I, *Cell Reports*. 査読有, 30:4433-4449. (2020)
3. “Signaling incentive and drive in the primate ventral pallidum for motivational control of goal-directed action,” Fujimoto A, Hori Y, Nagai Y, Kikuchi E, Oyama K, Suhara T, *Minamimoto T, *Journal of Neuroscience*, 査読有, 39:1793-1804 (2019)
 4. “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)
 5. “Chemogenetic disconnection of monkey orbitofrontal and rhinal cortex reversibly disrupts reward value,” Eldridge MA, Lerchner W, Saunders RC, Kaneko H, Krausz KW, Gonzalez FJ, Ji B, Higuchi M, Minamimoto T, *Richmond BJ, *Nature Neuroscience*, 査読有, 19: 37-39 (2016)

A01-4(計画・佐藤) 雑誌論文 18 件(査読有 17 件、査読無 1 件)重要国際会議 4 件

1. “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*, 査読有, DOI: 10.1109/TPAMI.2020.2973986. (2020)
2. “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)
3. “Practical BRDF Reconstruction using Reliable Regions in Geometry from Multi-View Stereo,” Ono T, *Kubo H, Tanaka K, Funatomi T & Mukaigawa Y, *Computational Visual Media*, 査読有, DOI: 0.1007/s41095-019-0150-3 (2019)
4. “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)
5. “Deeply Learned Filter Response Functions for Hyperspectral Reconstruction,” Nie S, Gu L, Zheng Y, Lam A, Ono N & Sato I, *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2018)*, 査読有, 4767-4776, DOI: 10.1109/CVPR.2018.00501, (2018)

B01-1(計画・岡谷) 雑誌論文 4 件(査読有 2 件、査読無 2 件)重要国際会議 18 件

1. “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)
2. “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)
3. “Dual Residual Networks Leveraging the Potential of Paired Operations for Image Restoration,” *Liu X, Suganuma M, Sun Z, Okatani T, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2019)*, 査読有, 7007-7016, (2018)

4. “Automatic Attribute Discovery with Neural Activations,” *Vittayakorn S, Umeda T, Murasaki K, Sudo K, Okatani T, Yamaguchi K, *Proc. European Conference on Computer Vision*, 査読有, 252-268, (2016)
5. “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)

B01-2(計画・神谷) 雑誌論文 11 件(査読有 11 件、査読無 0 件)

1. “Characterization of deep neural network features by decodability from human brain activity,” Horikawa T, Aoki SC, Tsukamoto M & *Kamitani Y, *Scientific Data*, 査読有, 6, 190012, (2019)
2. “Deep image reconstruction from human brain activity,” Shen G, Horikawa T, Majima K & *Kamitani Y, *PLOS Computational Biology*, 査読有, 15, 1006633, (2019)
3. “End-to-end deep image reconstruction from human brain activity,” Shen G, Dwivedi K, Majima K, Horikawa T & *Kamitani Y, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 査読有, 13, 21, (2019)
4. “Sharpening of Hierarchical Visual Feature Representations of Blurred Images,” Abdelhack M & *Kamitani Y, *eNeuro*, 査読有, 5, ENEURO 0443-17.2018, (2018)
5. “Generic decoding of seen and imagined objects using hierarchical visual feature,” Horikawa T & *Kamitani Y, *Nature Communications*, 査読有, 8:1503, (2017)

B01-3(計画・大澤) 雑誌論文 13 件(査読有 9 件、査読無 4 件) 重要国際会議 1 件

1. “Switch from ambient to focal processing mode explains the dynamics of free viewing eye movements,” *Ito J, Yamane Y, Suzuki M, Maldonado P, Fujita I, Tamura H & Grün S, *Scientific Reports*, 査読有, 7:1082, 1-14, (2017)
2. “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)
3. “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, pp.1-19, (2016)
4. “Supranormal orientation selectivity of visual neurons in orientation-restricted animals,” Sasaki KS, Kimura R, Ninomiya T, Tabuchi Y, Tanaka H, Fukui M, Asada YC, Arai T, Inagaki M, Nakzono T, Baba M, Kato D, Nishimoto S, Sanada TM, Tani T, Imamura K, Tanaka S & *Ohzawa I, *Scientific Reports*, 査読有, 5: 16712, 1-12, (2015)

B01-4(計画・坂本) 雑誌論文 35 件(査読有 20 件、査読無 15 件)

- 1 “Visualizing Individual Perceptual Differences Using Intuitive Word-Based Input,” *Sakamoto M & Watanabe J, *Frontiers in Psychology*, 査読有, 10(1108), 1-8, (2019)
- 2 “Redefining A in RGBA: Towards a Standard for Graphical 3D Printing,” Urban P, Tanksale T, Brunton A, Vu B & *Nakauchi S, *ACM Transactions on Graphics*, 査読有, 38(3), Article 21, (2019)
- 3 “Pupil Constriction in the Glare Illusion Modulates the Steady-State Visual Evoked Potentials,” Suzuki Y, Minami T & *Nakauchi S, *Neuroscience*, 査読有, 416, 221-228, (2019)
- 4 “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)

C01-1(計画・梶本) 雑誌論文 37 件(査読有 35 件、査読無 2 件) 重要国際会議 10 件

1. “Phase difference between normal and shear forces during tactile exploration represents textural features,” Hasegawa H, *Okamoto S & Yamada Y, *IEEE Transactions on Haptics*, 査読有, 13(1), 11-17 (2019)
2. “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)
3. “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 (2019) (国際活動支援に関する成果)
4. “Perceived hardness through actual and virtual damped natural vibrations,” Higashi K, *Okamoto S & Yamada Y, *IEEE Transactions on Haptics*, 査読有, 11(4), 646-651 (2018)
5. “Modeling Semantically Multilayered Affective and Psychophysical Responses Toward Tactile Textures,” Nagano H, *Okamoto S & Yamada Y, *IEEE Transactions on Haptics*, 査読有, 11(4), 568-578 (2018)

C01-2(計画・土橋) 雑誌論文 27 件(査読有 26 件、査読無 1 件)

1. “Resampling-aware Weighting Functions for Bidirectional Path Tracing using Multiple Light Sub-paths,” *Nabata K, Iwasaki K & Dobashi Y, *ACM Transactions on Graphics*, 査読有, Vol. 39, No. 2, Article 15 (2019)
2. “Image-based translucency transfer through correlation analysis over multi-scale spatial color distribution,” *Todo H, Yatagawa T, Sawayama M, Dobashi Y & Kakimoto M, *The Visual Computer*, 査読有, 35:811–822 (2019)
3. “Example-based turbulence style transfer,” *Sato S, Dobashi Y, Kim T & Nishita T, *ACM Transactions on Graphics*, 査読有, Vol. 37, No. 4, Article 84 (2018)
4. “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)
5. “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)

C01-3(計画・岩井) 雑誌論文 24 件(査読有 24 件、査読無 0 件) 重要国際会議 3 件

1. “FibAR: Embedding Optical Fibers in 3D Printed Objects for Active Markers in Dynamic Projection Mapping,” Tone D, *Iwai D, Hiura S & Sato K, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 査読有, 26(5), 2030-2040, (2020)
2. “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)
3. “Simultaneous Projection and Positioning of Laser Projector Pixels,” Kitajima Y, *Iwai D & Sato K, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 査読有, 23(11), 2419-2429, (2017)
4. “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)

5. “Inter-reflection Compensation of Immersive Projection Display by Spatio-Temporal Screen Reflectance Modulation,” *Takeda S, Iwai D & Sato K, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 査読有, 22(4), 1424-1431, (2016)

C01-4(計画・岡嶋) 雑誌論文 51 件(査読有 48 件、査読無 3 件) 重要国際会議 4 件

1. “A quantitative analysis of the contribution of melanopsin to brightness perception,” *Yamakawa M, Tsujimura S & Okajima K, *Scientific Reports*, 9, 査読有, Article number: 7568 (2019)
2. “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)
3. “プロジェクト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)
4. “AR food changer using deep learning and cross-modal effects,” Ueda J & Okajima K, *IEEE AIVR2019*, 査読有, IEEE Catalog No. CFP19O53-ART, 110-117 (2019)
5. “Eating with our eyes: From visual hunger to digital satiation,” *Spence C, Okajima K, Cheok AD, Petit O & Michel C, *Brain and Cognition*, 査読有, 110, 53-63 (2016)

D01, D02 公募班 雑誌論文 234 件(査読有 200 件、査読無 34 件) 重要国際会議 16 件

1. “Reality varied by visions: Requirements of immersive VR contents for people with low vision,” *Miura T, Izumi T, Onishi J, Matsuo M & Sakajiri M, *Journal of Technology and Person with Disabilities*, 査読有, 8 (in press)
2. “Relationship between contributions of temporal amplitude envelope of speech and modulation transfer function in room acoustics to perception of noise-vocoded speech,” *Unoki M & Zhu Z, *Acoustical Science and Technology*, 査読有, 41(1), 233-244 (2020)
3. “Proximal Binaural Sound Can Induce Subjective Frisson,” Honda S, Ishikawa Y, Konno R, Imai E, Nomiya N, Sakurada K, Koumura T, Kondo HM, Frukawa S, *Fujii S & *Nakatani M, *Frontiers in Psychology*, 査読有, 11, 369-10. (2020)
4. “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)
5. “Reflectance and Shape Estimation with a Light Field Camera under Natural Illumination,” *Ngo TT, Nagahara H, Nishino K, Taniguchi R & Yagi Y, *International Journal of Computer Vision*, 査読有, 127:1707-1722 (2019)
6. “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)
7. “Opposing roles of dopamine receptor D1- and D2-expressing neurons of the anteromedial olfactory tubercle in acquisition of place preference,” *Murata K, Kinoshita T, Fukazawa Y, Kobayashi K, Yamanaka A, Hikida T, Manabe H & Yamaguchi M, *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 査読有, 13 Article 50 (2019)

8. “Mixing sauces: a viscosity blending model for shear thinning fluids,” Nagasawa K, Suzuki T, Seto R, Okada M & *Yue Y, *ACM Transactions on Graphics* 38(4) (Proc. of SIGGRAPH 2019), 査読有, 95:1-95:17 (2019)
9. “Fundamental Perceptual Characterization of an Integrated Tactile Display with Electro-vibration and Electrical Stimuli,” Komurasaki S, Kajimoto H & *Ishizuka H, *Micromachines*, 査読有, 10(5):13 pages (2019)
10. “Reflective and fluorescent separation under narrow-band illumination,” Koyamatsu K, Hidaka D, Okabe T & Lensch H, *Proceedings of CVPR*, 査読有, 7577-7585 (2019)
11. “Representation of spatial feature of complex motion in areas MT and FST,” Sanada TM, *Asia-Pacific Conference on Vision*, Osaka, July 29th (2019)
12. “Neural coding of facial images with different skin textures in the temporal lobe of macaque monkeys,” Hayashi K, 他14名 & *Sugase-Miyamoto Y, *Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society*, Niigata, Japan, 7.25-28, (2019)
13. “Crossmodal association of auditory and visual material properties in infants,” *Ujiie Y, Yamashita W, Fujisaki W, Kanazawa S & Yamaguchi MK, *Scientific Reports*, 査読有, 8: 9301 (2018)
14. “Constancy of visual working memory of glossiness under real-world illuminations,” *Tsuda H & *Saiki J, *Journal of Vision*, 査読有, 18(8):14, 1–16 (2018)
15. “Relative contributions of low- and high-luminance components to material perception,” Nagai T, Hosaka Y, Sato T & Kuriki I, *Journal of Vision*, 査読有, 18(13), 6, 1-19. (2018)
16. “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 ～天ぷらを例題として～,” 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)
17. “プロジェクションマッピングを用いた質感の提示と編集,” 天野敏之, *日本画像学会誌*, 査読無, 57 (2), 214–224 (2018)
18. “Mapping stimulus feature selectivity in macaque V1 by two-photon Ca²⁺ imaging: encoding-model analysis of fluorescence responses to natural movies,” Ikezoe K, Amano M, Nishimoto S & *Fujita I, *NeuroImage*, 査読有, 180(Part A), 312-323 (2018)
19. “Representation of Glossy Material Surface in Ventral Superior Temporal Sulcal Area of Common Marmosets,” *Miyakawa N, Banno T, Abe H, Tani T, Suzuki W & *Ichinohe N, *Frontiers in Neural Circuits*, 査読有, 11 (17), 1-15 (2017)
20. “Taste of breath: the temporal order of taste and smell synchronized with breathing as a determinant for taste and olfactory integration,” Kakutani Y, Narumi T, Kobayakawa T, Kawai T, Kusakabe Y, Kunieda S & *Wada Y, *Scientific Reports*, 査読有, 7:8922 (2017)
21. “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)

産業財産権

A01-1 (計画・西田)

[特許(国内)] 画像生成装置、画像生成方法、データ構造、およびプログラム

発明者名 吹上大樹、西田真也、河邊隆寛

権利者名 日本電信電話株式会社

産業財産権番号 特願 2017-089682 特開 2018-056983

出願年月日 2017-4-28

[特許(国内)] 映像生成装置、映像生成方法、およびプログラム

発明者名 吹上大樹、西田真也、河邊隆寛

権利者名 日本電信電話株式会社

産業財産権番号 特願 2016-185085 特開 2018-050216

出願年月日 2016-09-23

[特許(国内)] 画像スタイル変換装置、画像スタイル変換方法および画像スタイル変換プログラム

発明者名 柳井啓司

権利者名 国立大学法人電気通信大学

産業財産権番号 特願 2017-024688

出願年月日 2017-02-14

A01-3 (計画・南本)

[特許(国内)] 人工受容体に結合する新規化合物、人工受容体のイメージング方法、アゴニストまたはアンタゴニスト、治療薬、コンパニオン診断薬、神経細胞のイメージング方法

発明者名 南本敬史・永井裕司・季斌・宮川尚久・樋口真人・須原哲也

権利者名 量子科学技術研究開発機構

産業財産権番号 特願 2018-118210

出願年月日 2018-6-21

[特許(国内)] プローブ刺入デバイス、プローブ刺入デバイスの挿入方法、及び電気信号取得方法

発明者名 鯉田孝和、澤畑博人、河野剛士、山際翔太、櫻井省花子

権利者名 豊橋技術科学大学

産業財産権番号 特願 2018-091400

出願年月日 2018-5-10

[特許(国内)] 電極及びその用途

発明者名 澤畑博人、鯉田孝和

権利者名 豊橋技術科学大学

産業財産権番号 特願 2017-241054

出願年月日 2017-12-15

A01-4 (計画・佐藤)

[特許(国内)] 形状測定装置、形状測定方法、形状測定プログラム及び内視鏡システム

発明者名 西野、延原、川原、Kuo、村井

権利者名 国立大学法人京都大学

産業財産権番号 特願 2019-188208

出願年月日 2019-10-11

[特許(国内)] 画像処理装置及び方法

発明者名 シジエ、リン、鄭、佐藤、ラム、小野

権利者名 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構

産業財産権番号 特願 2019-110453 特開 2019-220176

出願年月日 2019-6-13 (優先権 2018-6-15)

B01-4 (計画・坂本)

[特許(国内)] 学習装置、空間制御装置、学習プログラムおよび空間制御プログラム

発明者名 坂本真樹、山形浩一

権利者名 国立大学法人電気通信大学

産業財産権番号 特願 2019-107162

出願年月日 2019-6-7

[特許(国外)] 質感表現評価装置、質感表現評価方法、質感表現評価プログラムおよび質感表現回答シート

発明者名 坂本真樹

権利者名 国立大学法人電気通信大学

産業財産権番号 PCT/JP2017/03788

出願年月日 2017-10-19

[特許(国内)] 情報処理システム、情報処理方法及びプログラム

発明者名 坂本真樹

権利者名 国立大学法人電気通信大学

産業財産権番号 特願 2017-193211

出願年月日 2017-10-3

[特許(国内)] 情報処理システム、情報処理方法及びプログラム

発明者名 坂本真樹、川嶋卓也、権眞煥

権利者名 国立大学法人電気通信大学

産業財産権番号 特願 2017-182215

出願年月日 2017-9-22

[特許(国内)] 情報処理システム、情報処理方法及びプログラム

発明者名 坂本真樹

権利者名 国立大学法人電気通信大学
産業財産権番号 特願 2017-141858
出願年月日 2017-7-21

[特許(国内)] 深層学習による質感を表す音象徴語を生成する技術

発明者名 坂本真樹, 川嶋卓也, 権眞煥
権利者名 国立大学法人電気通信大学
産業財産権番号 特願 2017-100317
出願年月日 2017-4-28

[特許(国内)] 質感表現評価装置, 質感表現評価方法, 質感表現評価プログラムおよび質感表現回答シート

発明者名 坂本真樹
権利者名 国立大学法人電気通信大学
産業財産権番号 特願 2016-207213
出願年月日 2016-10-21

[特許(国外)] 音象徴語・物理特徴情報提供装置, 音象徴語・物理特徴情報提供方法および音象徴語・物理特徴情報提供プログラム

発明者名 坂本真樹, 鍵谷龍樹
権利者名 国立大学法人電気通信大学
産業財産権番号 PCT/JP2016/075849
出願年月日 2016-09-02

[特許(国内)] 音象徴語・パーソナリティ情報提供装置, 音象徴語・パーソナリティ情報提供方法および音象徴語・パーソナリティ情報提供プログラム

発明者名 坂本真樹, 草場祐亮
権利者名 国立大学法人電気通信大学
産業財産権番号 特願 2016-152911
出願年月日 2016-08-03

[特許(国内)] コミュニケーション支援装置, コミュニケーション支援方法およびコミュニケーション支援プログラム

発明者名 坂本真樹, 土斐崎龍一, 鈴木航平, 玉田燿, 平松由美
権利者名 国立大学法人電気通信大学
産業財産権番号 特願 2016-143763
出願年月日 2016-07-21

[特許(国内)] 音象徴語・味覚印象情報提供装置, 音象徴語・味覚印象情報提供方法および音象徴語・味覚印象情報提供プログラム

発明者名 坂本真樹, 鈴木航平
権利者名 国立大学法人電気通信大学

産業財産権番号 特願 2016-101475

出願年月日 2016-05-20

[特許 (国外)] 音象徴語の感覚関連性分布図生成装置

発明者名 坂本真樹

権利者名 電気通信大学

産業財産権番号 PCT/JP2015/071708

出願年月日 2015-07-30

[特許 (国内)] 音象徴語・物理特徴情報提供装置, 音象徴語・物理特徴情報提供方法および音象徴語・物理特徴情報提供プログラム

発明者名 坂本真樹

権利者名 電気通信大学

産業財産権番号 特願 2015-178379

出願年月日 2015-09-10

C01-1 (計画・梶本)

[特許 (国内)] 触覚提示装置

発明者名 梶本裕之

権利者名 電気通信大学

産業財産権番号 特願 2019-074229 特開 2020-173546

出願年月日 2019-4-9

[特許 (国内)] 測定装置、測定方法および測定プログラム

発明者名 亀岡 嵩幸, 高橋哲史, ヤエム ヴィボル, 梶本裕之

権利者名 電気通信大学

産業財産権番号 特願 2017-044911

出願年月日 2017-03-09

D02 (公募・天野)

[特許 (国内)] 画像処理装置及び方法、画像処理プログラム、並びに投影装置

発明者名 天野敏之, 佐藤いまり, 西山裕人

権利者名 大学共同利用機関法人情報・システム研究機構, 西山裕人

産業財産権番号 特願 2016-152202

出願年月日 2016-08-02

研究成果

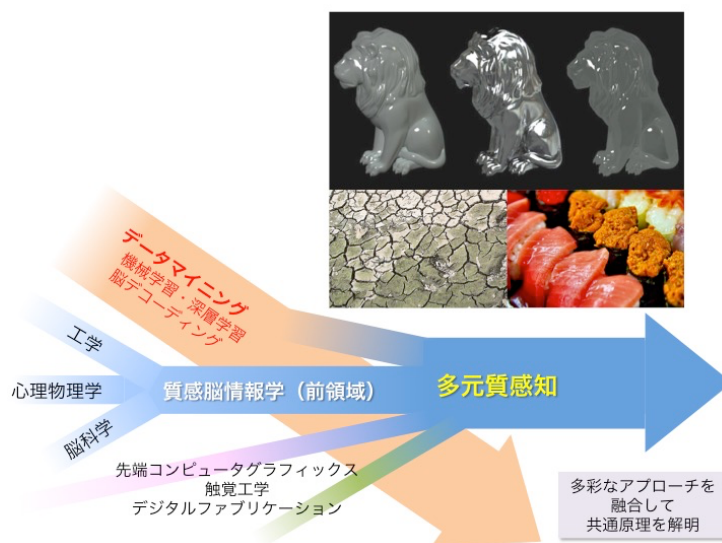
研究領域の目的及び概要

質感認識とは脳による物体の本性の解読である。視覚は光そのものを見ているわけではなく、光のパターンを解読してその向こう側にある世界を認識している。われわれは瞬時に、眼前にある物体の物性（例：光沢感）、材質（例：陶器、金属）、状態（例：乾燥）、感性的価値（例：美味しそう）、といった性質を解読することができる（右図上）。触覚や聴覚といったほかの感覚モダリティも、皮膚変形や音から「もの」の本性を解読する質感プロセッサである。質感認識はそれ自身が基本的な人間の能力であるとともに、物体認識・価値評価・行動選択・身体運動制御といった人間のさまざまな活動で重要な役割を果たしており、その解明は人間の感覚情報処理の科学的理解に不可欠である。さらに質感の理解は、情報の表現と認識の技術に革新を生む。情報伝達やものづくりにおいて質感を意のままに制御することが可能となり、人間のように質感を認識して適切に環境と相互作用するロボットを構築することも可能になる。

しかし、質感認知は難しい多くの問題を含んでおり、それが質感の科学的理解を妨げる要因になってきた。たとえば、物体表面の光の反射や散乱のパターンが視覚的質感の大きな手がかりとなるが、それは非常に複雑な物理的なプロセスを含んでいる。高次元の反射特性をそのまま脳が表現しているとも考えられない。物体の形状や照明環境が未知な状況では、反射や散乱の高次元のパラメータを推定することは原理的にほとんど不可能と考えられる。にもかかわらず、人間は光沢や透明などの表面特質をうまく知覚できている。このような質感認識が持つ謎を解決するためには、工学、心理物理学および脳神経科学といった幅広い分野の研究者が集まり、最新の知見を持ち寄り、分野の壁を越えて多方面から研究する必要がある。

領域代表者らの研究グループは、1990年代後半から心理物理学をコンピュータグラフィックスやコンピュータビジョンと融合する新しい形の視覚的質感の研究に着手し、その一つの成果として、光沢知覚に単純な画像統計量（輝度ヒストグラムの歪度）が利用されていることを発見した（Motoyoshi, Nishida, Sharan & Adelson, 2007, *Nature*）。この研究をひとつの契機として全世界的に質感研究への関心が高まり、分野横断的な質感研究の流れが全世界的に生まれた。たとえば日本では、2010年にスタートした新学術領域研究「質感脳情報学」が、国内の工学・心理学・脳神経科学者から成る質感研究コミュニティを作り上げ、国際的な質感研究をリードする体制を整えた。産業界でも質感がキーワードとなり、質感研究への期待はますます高まっている。

このように順調に成長してきた質感の科学だが、そのさらなる発展のためにはこの研究課題の持つ本質的な困難性を克服する必要がある。それは現実世界の質感がもつ多様性と複雑性である。まず、質感に関わる物理的情報は多様で複雑である。最も研究が進んでいる光学的な視



多様な質感（上）と本領域の設計思想（下）

覚的質感においても、これまでに解明が進んでいる均質表面の微細構造に依存する表面反射特性は質感の一部しか説明できない。肌や食物などの自然物の質感を理解するためには様々なスケールの表面構造と質感の関係を理解することが不可欠である。聴覚では、音響信号の高精細な伝達・再生技術が進歩している一方で、微細な時間構造から音の質感を認識するメカニズムに関する理解はあまり進んでいない。触覚では、タッチパネル端末の普及などにより、多様で複雑な質感を伝えることができる触覚ディスプレイへの社会の期待がますます高まっている中で、指先に感じるものの質感を再現する方法論の確立が喫緊の課題となっている。また、質感の脳内表現は多様で複雑である。人間は一つの感覚入力からさまざまな質感を同時に読みとることができる。言葉として列挙できる質感は膨大にある上に、言葉で表すことが困難な質感もある。それぞれの質感は独立では無く、他の質感と密接に結びついている。おそらく、脳内には複雑な質感概念ネットワークが構成されている。その全体像を解明するためには、これまでの理論検証型のアプローチに加えて、巨視的な視点に立ったデータ駆動型の質感研究パラダイムの導入および開発が必要である。近年発展が著しいディープラーニングを含む統計的機械学習と高度な脳情報解析技術を融合することにより、多様で複雑な質感の情報処理の理解を飛躍的に進めることが期待できる。さらに、近年多くの企業が質感に関心を寄せているが、個々の企業が扱う現場の質感は極めて多様で複雑なものである。さまざまな現実的な問題に挑戦していく中で、多様な質感を客観的な方法にもとづいて扱うことができる一般性を持つ学問的枠組みを構築していく必要がある。

このような背景の中で、本領域では、深層学習などの最先端の情報工学に心理物理学や脳神経科学を融合し、多彩なアプローチの中から、「もの」の物性・表面特性・材質を読み取る感覚能力としての人間の質感情報処理を科学的に解明し、その成果を利用して革新的で実用的な質感技術を創出することを目指す。項目A「質感メカニズム」では、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質感の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物理学および脳神経科学的手法を用いて多角的に分析し、質感の脳内情報処理を明らかにする。各研究においては特定の質感にターゲットを絞り、理論検証型アプローチに基づいた解析を行う。一方、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、項目Aの戦略では捉えることが容易ではない複雑で多様な質感認識の全体的構造に迫る。データマイニングに用いられる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するとともに、実社会の多様な質感情報の掘り起こし（マイニング）を行う。項目C「質感イノベーション」では、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する。項目AおよびBとの連携のもと、単に物理的な再現を目指すのではなく、人間が質感を読み取る原理の理解に基づいた質感表現技術を確立する。また、その成果技術を項目AおよびBにフィードバックすることで、新しい質感認識研究を可能とする。さらに、A-C項目横断的なチームを編成し、本領域と産業界などの実社会をつなぐ学問体系を構築する。

本領域の研究により、脳科学的には、質感情報処理の解明が飛躍的に進むのみならず、従来の単純な知覚処理の枠組みではとらえられない感覚情報処理の理解が深まることが期待される。脳機能パズルのミッシングピースが埋まることで、物体認識・価値評価・行動選択・身体運動制御といった関連分野研究への波及効果も生む。さらに、最新のデータ工学と結びついた巨視的なデータ駆動型脳研究を、理論検証型の脳機能研究や微視的な神経生理研究と有機的に融合することにより、国内のシステム神経科学の競争力を高めることができる。工学的には、複雑で多様な質感の再現や機械認識、質感計測技術、質感編集技術、触覚ディスプレイ技術などの

先端技術が進歩する。コンピュータビジョン、コンピュータグラフィックス、色彩工学、触覚工学など、工学の中でも日頃さまざまな研究コミュニティに分かれて活動している研究者が質感という共通のテーマで連携し、さらに最先端の脳科学にも接することで、幅広いシナジー効果が期待できる。そして、学際的な質感研究コミュニティと、「質感科学」・「質感工学」という学問体系が確立することにより、質感の高度な制御を求めている国内のものづくり産業を持続的にサポートする体制が構築される。

研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか

本領域の目標は、最先端の情報工学、心理物理学、脳神経科学を融合し、「もの」の本性を読み取る感覚能力としての人間の質感情報処理を科学的に解明し、その成果を利用して革新的で実用的な質感技術を創出することであった。全体として、当初に設定していた目標のほとんどを達成した。

まず、項目 A「質感メカニズム」の目的は、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質感の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物理学および脳神経科学的手法を用いて多角的に分析し、質感の脳内情報処理を明らかにすることであった。さまざまな質感をターゲットに、おもに理論検証型アプローチに基づいた解析を行うことを基本戦略とした。5年間の研究の結果、まず心理物理学に関しては、光沢感・粘性感・濡れ感・細かさ・心地よさといった視覚質感知覚に用いられる画像特徴、表面質感不変に幾何学形状を知覚する原理、聴覚素材判断の特性、触覚質感認識の基本メカニズムなどが明らかとなった。高齢者や高次脳機能障害者の質感知覚の特性も分かってきた。神経科学的には、光沢や素材の視覚系における神経表現とその経験による変容、聴覚質感処理の階層構造、感覚入力に基づく価値判断・情動誘起の神経ネットワーク構造などが明らかになった。情報工学的には、実在物体の複雑な質感のモデル化に成功し、直接・間接反射成分の分離と質感操作や濡れの推定などの技術が大きく進歩した。アートにおける質感表現の情報学的理解も進んだ。画像処理やプロジェクションマッピングなどを使った質感操作技術も大きく発展した。

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、データマイニングに用いられる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するとともに、実社会の多様な質感情報の掘り起こし（マイニング）を行うことを目的とした。まず、大量の質感データに対して深層学習を使って人工的な質感認識システムを作るというミッションに関しては一応の成功を修めたが、当初に想定していた手法の限界もしだいに明らかになり、それが新しい手法の開発につながった。深層学習によって獲得された人工神経回路の構造と、脳機能イメージングからデコーディングして得られたヒトの脳内質感表現との対応関係を利用して、革新的かつ汎用性の高い脳情報デコーディング技術を完成させた。さらに、データ駆動型分析手法を用いたサル電気生理実験で、生体神経回路と人工神経回路の計算アルゴリズムの類似性を、神経レベルで明らかにした。また、実社会の多様な場面から質感情報の掘り起こしを行い、物理測定量-知覚特性-言語表現を結び付ける質感データベースを構築した。

項目 C「質感イノベーション」では、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することを目指した。実世界の触感刺激を完全に記録・再現できるシステムを実現するという目的に対して、革新的な技術の開発に成功した。コンピュータグラフィックスを用いて物

体の複雑構造に基づく材質感を再現することや、デジタルファブリケーションとコンピュータショナルフォトグラフィを融合させて実物素材と見分けのつかない高度な質感を再現するという目的に向かって、様々な基礎技術を生み出した。さらに、人間の質感知覚の特性を利用して、人間にとって満足できる質感を再現、編集、制御する技術を数多く開発した。

項目Dの公募班では、計画研究を補強するさまざまな研究が行われた。まず、D01「質感認識の科学的解明」では、計画班の研究が視覚に偏重しているという点を補う形で、様々なモダリティの質感認識の心理・神経メカニズムの研究が行われた。また、質感認識の多様性を検討するという観点から、質感の異文化比較、食習慣の違いの感性的質感への影響、乳児や幼児の質感知覚の発達、類人猿の質感知覚などといったテーマで研究が進んだ。一方、D02「革新的質感技術の創出」では、とくにプロジェクターを使った拡張現実技術に関して研究が進展し、計画班の関連研究とも融合して、領域を代表する質感技術となった。今後の進展が期待される触覚技術に関する様々なアプローチが競い合うかたちとなった。

(2) 本研究領域により得られた成果

■研究項目 A01「質感メカニズム」(理論検証型アプローチによる質感情報処理の理解)

A01-1の西田班では、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し、革新的な質感技術を開発することを目指した。視覚に関しては、低次画像統計量に基づく物体表面の濡れおよび極細構造の知覚や、表面反射と形状の独立推定メカニズムなどを解明した。液体粘性推定を学習した結果人間に近い反応特性を示すようになった人工神経回路の内部表象を分析して、人間の粘性知覚の計算原理を推定した。質感認識の臨床研究においては、局所脳損傷の患者の研究から左後頭葉底面を含む神経回路が質感認識の要であること、レビー小体型認知症やアルツハイマー型認知症で視覚性質感認知が低下すること、などを明らかにした。タブレット端末を使った心理物理実験環境を開発し、インターネットを使った大規模実験を行い、質感認知の標準観測者データベースを作成した。これを領域メンバーに公開し10班の研究で利用された。聴覚に関しては、環境の残響特性が質感判断に与える影響を明らかにした。また、環境音や音声のデータベースを用い、そ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を明らかにした。触覚に関しては、同時に提示された振動周波数や刺激部位が異なる触覚振動情報が統合されることや、触覚テクスチャ判断に高次画像特徴量が利用されないことを明らかにした。革新的な質感技術に関しては、深層学習を用いた質感変換技術を進歩させ、とくに食事画像の変換に関して画期的なアプリケーションを実現した。また、プロジェクションマッピングによる錯覚的質感操作技術を発展させるとともに、ステレオ眼鏡無しで見たときに画像ボケを生じないまったく新しい2D/3Dコンパチブルの両眼立体視法を開発した。

A01-2の小松班は、質感情報が大脳視覚野の神経細胞の活動にどのように表現され、それらの活動がどのように質感知覚と関係しているかを解明することを目指した。まず、質感認識における経験の効果に関してマカクザルでfMRIの実験を行い、下側頭皮質後部領域にみられる質感の脳内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(南本班との共同研究)。また実物把持課題を行うサル(マカクザル)の行動の詳細な解析の結果、素材により触り方が異なることを明らかにした。マカクザルの下側頭皮質の光沢選択性領域の活動を微小電気刺激とムシモル注入で人工的に操作した時に、光沢識別に影響が生じることを明らかにした。物体認識を学習した深層畳み込みニ



ユーラルネットワークの特徴表現と質感との関係を調べ、素材質感と光沢感が違う階層で表現されていることを見出した。また光沢を持つ物体画像から「画像方位」と「上下方向の輝度極性」の2つの画像特徴量を用いて3次元形状を復元することができる計算モデルの構築に成功した。このアルゴリズムはヒトの知覚と類似の性質を持つことも示された。さらに、画像統計量と感性的質感認知の関係を心理物理学的に検討し、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。この結果は材質の認知とは別に画像統計量から直接情動関連情報を処理する経路が存在する可能性を示唆している。この可能性を脳波計測により更に検証したところ、視覚野よりも先に頭頂葉前部で不快さに関連した素早い電位が生じることが見出された。

A01-3の南本班は、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することを目指した。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→腹側淡蒼球という神経連絡が必須の役割を果たすことを示し、また吻内側尾状核と腹側淡蒼球における視覚刺激の価値情報表現を明らかにした。加えて、化学遺伝学で用いる新規薬剤を創出し、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に阻害できることを実証し、領域内に技術提供を行った。またこの技術を用い、価値に基づいて柔軟に行動を選択する場面における前頭眼窩皮質と視床・線条体それぞれへの神経伝達の機能的意義を明らかにした。さらに前頭眼窩皮質は聴覚刺激に伴うサルの情動反応に必須の役割を果たすことを明らかにするとともに、この機能が視床MD核、扁桃核、海馬、島皮質を含む機能ネットワークに関わる可能性を見出した。これらは、国際活動支援基金に基づく米国NIMHとの共同研究の成果である。

A01-4の佐藤班は、微細構造を持つ実在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することを目指した。相互反射や内部散乱などの間接反射では、物体表面あるいは物体内部で発生する光の反射数に応じて物体色の彩度が高くなるという光学現象を実験により確認し、この光学現象に基づき、対象物体の直接反射、間接反射を1枚の分光画像より分離する技術を開発した。また、動的なシーンにも対応できる技術として、高周波照明下で撮像された1枚のRGB画像を用いて直接反射・相互反射を分離する技術を開発し、直接反射と相互反射の組み合わせにより質感操作が可能であることを示した。さらに、プロジェクタ・カメラシステムを用いた撮像により、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。近赤外波長域における反射特性にも着目し、RGB（可視）とNIR（近赤外）の画像を用いて、陰影と反射特性を推定するアルゴリズムを開発した。対象物体の幾何構造の推定に関しては、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せずに安定に幾何形状を推定する手法を提案した。従来手法では難しかった透明物体、強い鏡面反射が観察される物体に関しても提案手法により幾何形状が安定に推定できることを確認した。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。芸術における質感表現の解明にも取り組み、デッサン画における質感表現の機械学習により、写真からデッサン画を生成するアルゴリズムの開発に取り組んだ。その成果を東京藝術大学で展示、広く紹介した。

■研究項目B「質感マイニング」（データ駆動型アプローチによる質感情報処理の理解）

B01-1の岡谷班は、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理解を目指した。当初計画した研究を進める中で、視覚認識可能な質感概念のマイニング手法の開発などの成果を得るとともに、質感認識の困難さ—人の認知内容が不明瞭であるため教師データを得ることが難しいこと、質感形容語が多様であることで教師デ

ータの大規模化が困難であること、質感の形容語の多義性による文脈依存性---を改めて明確化するに至った。これらの解決のため、画像理解のタスク、Visual Question Answering (VQA)などに適用可能な、DNNのアーキテクチャを構築した。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。

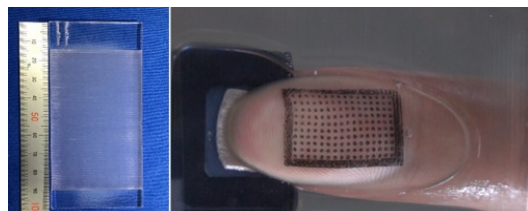
B01-2の神谷班は、大規模脳・画像・テキストデータを用いたデータマイニング的手法により、人間の脳の質感情報表現を発見するアプローチの創出を目指した。ヒトが画像を見ているときの脳活動パターンからその画像のDNN特徴を予測（脳からDNNへの変換）する方法を開発し、脳とDNNの間の階層的相同性を見出した。各ユニットのデコード精度を被験者間で比較すると相関係数0.7程度の比較的高い相関があることがわかった。これは、DNNに含まれる多数のユニットのうち、少なくとも一部は、被験者によらず、脳と強い関連があることを示唆している。また、脳活動から予測したDNN特徴量を利用して、見ている画像を再構成する方法を開発し、テクスチャや材質に関する画像をそれを見たときの脳活動だけから再構成することに成功した。DNNと脳との間の階層的な情報表現の類似性を定量化するbrain hierarchy score (BHスコア)を考案し、29種類の異なる構造を持つDNNと脳との類似性を比較した。その結果、各DNNのBHスコアと物体認識精度は負に相関するという意外な結果が得られた。これは、高い物体認識精度を実現するAIとしての工夫が、脳の情報処理と乖離していることを示唆している。

B01-3の大澤班は、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解析した。事前仮説に依存しない分析法を開発し、背側系と腹側系の両方を統一的手法で扱った。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最初の単純型細胞および複雑型細胞が次の段階の細胞に統合される時に、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。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。

B01-4の坂本班では、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を構築することを目指した。このようなDBは、質感認知モデルの構築や実社会で役立つ質感工学の確立には不可欠である。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2000枚に及ぶ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。

■項目C「質感イノベーション」（質感認識の科学的理解に基づく質感創成技術の開発）

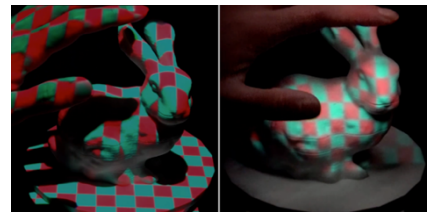
C01-1の梶本班は、触感の構成要素を解明するために指先に与えられる時空間的触覚パターンを完全に記録・再現し、その知見を援用しながらタッチパネルへの触覚提示システムを開発することを目的にしている。指先皮膚が凹凸テクスチャ面上を移動した際に生じる皮膚の垂直水平変位を、高速かつ高精度でトラッキングできるシステムを新たに開発し、細かなテクスチャでは皮膚は全体として同時に駆動されるが、粗いテクスチャでは皮膚は部位ごとに時間差をもって駆動されること、凹凸形状情報は皮膚垂直変位に主に含まれることなどを明



らかにした。さらに接触力の解析により、法線方向とせん断方向の接触力の波のずれ（位相差）にテクスチャの情報が多く含まれていることを明らかにした。触覚提示に関しては、まず新たにシンプルな原理に基づく高時間・空間解像度の触覚提示を熱駆動方式により実現した。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呈示可能な装置を開発し、従来の触覚呈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、低周波振動により柔らかい触感を感じるという現象を発見した。

C01-2の土橋班は、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することを目指した。質感の再現に関して、実計測に基づく形状と質感の精密な再現やCG画像の効率的な計算手法を開発し、高精細なCG映像を効率的に生成することを可能とした。次に、質感の解析に関して、質感認知のための画像DBの作成を行った。また、イラストなどの抽象化された画像における質感の解析を行った。これらにより、ヒトの質感認知の解明に貢献した。また、質感の編集に関しては、画像やビデオなど2次元映像における質感の編集、布や流体など3次元情報としての質感編集、また、デジタルファブリケーションを応用した実物の質感編集手法を開発した。これらにより、対象の質感を編集し、目的の質感を表現することが可能となった。以上の他、音や影など、多様な質感表現に関する研究も進めた。

C01-3の岩井班は、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・編集における従来の技術的制約をどこまで解決するのかを明らかにしようとした。具体的には、実物体上に位置ずれなく映像投影するために必要な光学マーカーを視覚的に隠消する技術を開発し、マーカーによる投影画質劣化を解決できることを示した。投影面反射率の動的空間変調を実現し、投影光の相互反射による画質劣化を抑制できることを示した。透明物体を出力可能なマルチマテリアル3Dプリンタ（領域内共有資産）を用い、投影対象形状に合わせて自由曲面レンズを作成することで非平面投影時の解像度低下を抑制できることを示した。また、同プリンタを用いて投影対象に光ファイバを埋め込んでアクティブマーカーとして利用することで、動的プロジェクションマッピングにおける投影範囲の制約を軽減できることを示した。さらに、広方向から映像投射できる新規なプロジェクタ照明を提案し、投影対象に近接したり触れたりしても、投影光の影の生じにくい自然な質感編集が可能となることを示した。



C01-4の岡嶋班では、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・出力等を管理する総合的な質感工学体系を構築した。具体的には、質感簡易測定装置の開発、光沢の検出モデル開発と制御、ipRGCの光沢感・蛍光感・色覚への関与の発見と明るさ感の定式化、質感の経時変化、ロボットアームを用いた多視点同時質感計測システムの開発と応用、視覚的質感の環境／デバイス依存性の検討、質感表現のための量子化手法の開発、プロジェクタによる金色表示法の開発、複雑な物理特性を有する蛍光物体の質感計測・解析など、質感工学のための基礎的知見を蓄積するとともに、質感を工学的に取り扱うための各種手法を提案・開発した。また領域内共同研究として乳児やチンパンジーの鮮度認知特性を明らかにするとともに、国際支援活動において食品の色や質感のリアルタイム変換を可能にするHMD型ならびに投影型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。

■研究項目 D01, D02 （公募班、一部を抜粋）

【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（ガラスおよび金属）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。藤田班は、2光子カルシウムイメージングと大域イメージングの同時適用手法を開発し、テクスチャの脳内表現の解析を進めた。眞田班は、液体が持つような複雑なオプティカルフローを処理する仕組みがサル野にある可能性を示した。菅生班は、サルの側頭皮質の顔応答性ニューロンの活動に、顔の質感変化の影響を確認した。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。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。

【心理・行動】視覚に関して、栗木班は輝度、永井班は時間に注目して質感認識特性を明らかにした。溝上班は肌色空間の特性を解明した。伊村班は、岡嶋班・和田班と共同で、チンパンジーも野菜の表面の「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すと同時に、山口班・金沢班とともに質感認識の乳幼児発達過程を明らかにしつつある。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（個人性・感情・緊張感）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。

【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。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、嵯峨班、石塚班、三木班、三浦班は各々の工夫で触覚ディスプレイの機能を向上させた。

当該学問分野及び関連学問分野への貢献

本領域は、認知神経科学、心理学、情報工学の分野において国内の第一線で活躍する研究者が、質感という共通のテーマの下に集まった研究プロジェクトである。サイエンスとエンジニアリング、基礎研究と応用研究、認識技術（コンピュータビジョンなど）と生成技術（コンピュータグラフィックス、拡張現実など）、異種モダリティ（視覚、聴覚、触覚、質感）など、違った背景の研究が融合し、まさに既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指したプロジェクトとなった。班会議などの領域イベントは、日頃の学会活動ではなかなか聞けない近接分野の最新動向も把握できる絶好の場となった。前領域の「質感脳情報学」からの積み重ねもあり、異分野間の相互理解も深まり、各人が自分の専門領域に立脚しながらも、より広い視点に立って質感関連テーマを考えることができるようになった。実際、班会議にスポットで参加したゲストからは、領域内で異分野間融合が進んでいることに対する高い評価の声を何度も頂いている。領域内で進んだ情報科学と神経科学の融合の流れに沿って古川（西田班分担）らが深層学習を使って聴覚神経系の構造に新たな解釈を与えるなど、領域内の関連知識を吸収して自分の専門分野の研究を発展させた例は数多い。また、2019年12月に京都で開催された国際シンポジウム“Past, Present and Future of Shitsukan Science and Technologies”において、国際活動支援班でサポートした研究者を中心に海外から10名を招待したが、心理物理学、神経科学、触覚工学、デジタルファブリケーション、コンピュータグラフィックスなど様々な分野の世界リーダー達が、自分たちの研究が「質感」というキーワードでつながっていることに気づき、この学際的な集まりの意義を高く評価してくれた。その直後に、招待講演者の一人であるOxford大学のC. Spence教授は、“Shitsukan – the Multisensory Perception of Quality”というタイトルのレビュー論文を出している。このよ

うに、質感という深淵かつ曖昧な日本語が広い意味の情報学研究の発展に大きな役割を果たしてきたし、その役割は今後も広がっていくだろう。

領域外の学術界においても、質感研究への注目は高まり、様々な雑誌で質感の特集が組まれた（” Perception of Material Properties” Vision Research (2015)、「質感と感性の認知科学」基礎心理学研究 (2017)、「Imaging Today 特集：質感」日本画像学会誌(2018)、「質感研究の最前線」映像情報メディア学会誌(2019)）。人工現実技術の最高峰の国際会議 IEEE VR2019 では、領域代表者の西田がキーノート講演を行うとともに、チュートリアルにおいて領域の中心的な成果であるプロジェクションマッピングを使った AR 技術を世界の研究者にアピールした。2018 年には計画班の小松が質感認知の脳機構研究により日本神経科学学会時実利彦賞を受賞するなど、領域メンバーの学会での受賞総数は 152、国際学会における招待講演 108、基調講演 22 に及んだ。

産業貢献に関しては、多くのメンバーが、企業向けの講演会、企業との共同研究、企業のアドバイザーといった形で、質感研究のノウハウを産業界に提供した。企業との共同研究の件数はのべ 200 件だった。領域メンバー自ら質感関連技術で起業した例もある。また、質感に興味を持っている領域メンバー以外の研究者・非研究者との交流を目的に、2015 年に「質感のつどい」という組織を設立し、毎年 1 回のペースで、講演会と研究発表の機会を設けている。この会には、多くの企業から参加や発表が行われ、企業交流の重要な基盤となっている。佐藤班は、企業と共同研究で分光蛍光マイクロスコープを開発し、天野班が民間企業と共同で日本橋三越本店天女像にプロジェクションマッピングによる質感演出を行ったような例もある。企業・一般向けのセミナーは 126 件行っている。

質感サイエンスとアートとの融合も進んだ。東京藝術大学との共同研究では、西田班の作った変幻灯が絵画作品に新しい表現を与え、佐藤班の研究に基づいてデッサンの質感解析・生成に関する展示も行われた。神谷班も、現代美術家ピエール・ユイグの作品“Umwelt”のための映像を提供した。

我々の質感研究は教育の現場にも影響を与えている。坂本班のオノマトペに関する文章「AI で言葉と向き合う」が、小学 6 年生の国語教科書に最近掲載された。岩井班のプロジェクションマッピングに関する研究成果が「子供の科学」に掲載された。小中高校生向けのセミナーは 13 件行っている。

また、領域関連の活動が国内外のメディアに 200 件以上取り上げられたことは、我々の質感研究に対する一般社会の関心の高さを示している。