

領域略称名：多元質感知  
領域番号：4705

令和2年度科学研究費助成事業  
「新学術領域研究（研究領域提案型）」  
に係る研究成果報告書（研究領域）兼  
事後評価報告書

「多様な質感認識の科学的解明と革新的質感技術の創出」

領域設定期間

平成27年度～令和元年度

令和2年6月

領域代表者 京都大学大学院・情報学研究科・教授・西田 眞也

# 目 次

## **研究組織**

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	公募研究	4

## **研究領域全体に係る事項**

3	交付決定額	9
4	研究領域の目的及び概要	10
5	審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	12
6	研究目的の達成度及び主な成果	14
7	研究発表の状況	19
8	研究組織の連携体制	24
9	研究費の使用状況	25
10	当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	27
11	若手研究者の育成に関する取組実績	28
12	総括班評価者による評価	29

**研究組織**

(令和2年3月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

**1 総括班・総括班以外の計画研究**

研究項目 [1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	15H05914 多様な質感認識の科学的解明と 革新的質感技術の創出	平成27年度 ～ 令和元年度	西田 眞也	京都大学大学院・情報学研究 科・教授	18
Y00 国	15K21742 多様な質感認識の科学的解明と 革新的質感技術の創出	平成27年度 ～ 令和元年度	西田 眞也	京都大学大学院・情報学研究 科・教授	11
A01 計	15H05915 信号変調に基づく視聴触覚の質 感認識機構	平成27年度 ～ 令和元年度	西田 眞也	京都大学大学院・情報学研究 科・教授	4
A01 計	15H05916 質感知覚の神経基盤とその獲得 および変容機構	平成27年度 ～ 令和元年度	小松 英彦	玉川大学・脳科学研究所・ 教授	4
A01 計	15H05917 質感認知に伴う情動惹起の神経 機構	平成27年度 ～ 令和元年度	南本 敬史	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・チームリーダー	3
A01 計	15H05918 コンピュータビジョンで実現す る多様で複雑な質感の認識機構	平成27年度 ～ 令和元年度	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	7
B01 計	15H05919 画像と言語を用いた質感情報表 現のディープラーニング	平成27年度 ～ 令和元年度	岡谷 貴之	東北大学・大学院情報科学 研究科 システム情報科学 専攻・知能ロボティクス 学分野・教授	2
B01 計	15H05920 脳・画像・テキストデータマイニ ングによる質感情報表現の解明	平成27年度 ～ 令和元年度	神谷 之康	株式会社国際電気通信基 礎技術研究所・脳情報研究 所・神経情報学研究室・室 長	1
B01 計	15H05921 視覚系における質感情報表現の 階層的情報変換	平成27年度 ～ 令和元年度	大澤 五住	大阪大学・大学院生命機能 研究科 脳神経工学講座・ 視覚神経科学研究室・教授	3
B01 計	15H05922 物理・知覚・感性の対応付けに基 づく実社会の多様な質感情報表 現	平成27年度 ～ 令和元年度	坂本 真樹	電気通信大学・大学院情報 理工学研究科・総合情報学 専攻・メディア情報学コー ス・教授	2
C01 計	15H05923 触覚的質感の記録再生技術多様 な質感情報表現	平成27年度 ～ 令和元年度	梶本 裕之	電気通信大学・大学院情報 理工学研究科・総合情報学 専攻・准教授	2

C01 計	15H05924 コンピュータグラフィクスによる 質感表現技術	平成 27 年度 ～ 令和元年度	土橋 宜典	北海道大学・大学院情報科学 研究科・准教授	4
C01 計	15H05925 超多自由度照明による実物体の 質感表現編集技術	平成 27 年度 ～ 令和元年度	岩井 大輔	大阪大学・大学院基礎工学 研究科 システム創成専 攻・システム科学領域・准 教授	2
C01 計	15H05926 実社会の多様な質感情報を分析・ 制御・管理する技術	平成 27 年度 ～ 令和元年度	岡嶋 克典	横浜国立大学・大学院環境 情報研究院・教授	3
<b>総括班・総括班以外の計画研究 計 14 件</b>					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 2 公募研究

研究項目 [1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
D01 公	16H01658 質感知覚における輝度ヒストグラム部分情報と空間サイクル数の寄与	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	栗木 一郎	東北大学・電気通信研究所・准教授	1
D01 公	16H01659 フラッシュラグ効果を用いた質感処理過程の同定	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	塩入 諭	東北大学・電気通信研究所・教授	1
D01 公	16H01661 ヒトの触質感はなぜ多彩なのか？～非線形触質感喚起モデル～	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	野々村 美宗	山形大学・理工学研究科・准教授	1
D01 公	16H01663 肌色空間の構築と肌質感認識のマッピングによる解析	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	溝上 陽子	千葉大学・大学院 工学研究院・融合理工学府 創生工学専攻・准教授	1
D01 公	16H01664 (廃止) 質感認知の異文化比較研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	高橋 康介	中京大学・心理学部・准教授	1
D01 公	16H01665 身体や情動に訴えかけるセンシユアルな音響質感メディアの研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	仲谷 正史	慶應義塾大学・環境情報学部・研究員	1
D01 公	16H01669 振幅変調の概念に基づいた聴知覚における質感認識メカニズムの理解	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	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	1
D01 公	16H01671 おいしさをつくりだす神経細胞集団の同定	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	村田 航志	福井大学・医学部・助教	1
D01 公	16H01672 高精度視覚質感記憶の心理学的基盤と神経機構の解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	齋木 潤	京都大学大学院人間・環境学研究科・教授	1
D01 公	16H01673 細胞集団による質感情報の符号化、復号化、皮質表現	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	藤田 一郎	大阪大学・生命機能研究科・教授	1
D01 公	16H01675 ワンショットBRDF計測と質感解析	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	長原 一	大阪大学・データビリティフロンティア機構・教授	1

D01 公	16H01677 (廃止) 多様な感覚による質感認知の発達初期過程	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	山口 真美	中央大学・文学部・心理学専攻・教授	1
D01 公	16H01678 チンパンジーにおける質感知覚・認知の総合的研究:比較認知科学の観点から	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	伊村 知子	新潟国際情報大・情報文化・准教授	1
D01 公	16H01680 (廃止) 触覚の質感を表現するオノマトペの神経基盤	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	北田 亮	生理学研究所・助教	1
D01 公	16H01681 液体粘性知覚の神経メカニズムの解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	眞田 尚久	関西医科大学・生理学第二講座・助教	1
D01 公	16H01682 新奇食品に対する感性的質感知覚の解明 -食用昆虫を例として-	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	和田 有史	立命館大学・理工学部・教授	1
D01 公	16H01683 マーモセット大脳視覚皮質における光沢情報の処理過程	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	宮川 尚久	国立研究開発法人・放射線医学総合研究所・分子イメージング研究センター・分子神経イメージング研究プログラム・主任研究員	1
D01 公	16H01684 顔の質感情報の時間的コーディングの研究	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	菅生 康子	産業技術総合研究所・研究員	1
D01 公	16H01685 咀嚼筋電音フィードバックを用いた食質感知覚メカニズムの解明	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	藤崎 和香	産業技術総合研究所・主任研究員	1
D02 公	16H01662 錯触覚を利用したタッチパネル型多自由度標準触覚デバイス	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	嵯峨 智	筑波大学・システム情報系・情報工学域・准教授	1
D02 公	16H01666 光線制御型エネルギー投影手法による質感プロジェクション基盤技術の構築	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	小泉 直也	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・情報学専攻・助教	1
D02 公	16H01667 高速ビジョン・プロジェクタに基づいた動的質感再現	平成 28 年度 ～ 平成 29 年度	渡辺 義浩	東京大学・情報理工・講師	1

D02 公	16H01668 タッチパネルのためのPseudo-haptics生起手法の確立と質感設計への応用	平成28年度 ～ 平成29年度	鳴海 拓志	東京大学・情報理工・講師	1
D02 公	16H01674 引箔を施した西陣織を題材とした見かけのBRDF操作による革新的な質感編集の研究	平成28年度 ～ 平成29年度	天野 敏之	和歌山大学・システム工学部・システム学科・准教授	1
D02 公	16H01676 多波長・多方向光源による蛍光物体の質感編集	平成28年度 ～ 平成29年度	岡部 孝弘	九州工業大学・大学院情報工学研究院・知能情報工学研究系・教授	1
D01 公	18H04995 広輝度帯域における視覚特性と質感知覚に関する研究	平成30年度 ～ 令和元年度	栗木 一郎	東北大学・電気通信研究所・准教授	1
D01 公	18H04996 「脳ならでは」の質感知覚方略：機械学習との画像特徴依存性の類似性と相違性	平成30年度 ～ 令和元年度	永井 岳大	東京工業大学・大学院工学院・准教授	1
D01 公	18H04998 匂いの質感の神経基盤：ヒト脳波デコーディングによるアプローチ	平成30年度 ～ 令和元年度	岡本 雅子	東京大学・大学院農学生命科学研究科(農学部)・特任准教授	1
D01 公	18H04999 耳鳴の脳活動の解明と質感制御	平成30年度 ～ 令和元年度	高橋 宏知	東京大学・学院情報理工学系研究科・准教授	1
D01 公	18H05000 視覚障害者・盲ろう者に固有な聴覚・触覚での質感のメカニズム解明と提示方法開発	平成30年度 ～ 令和元年度	三浦 貴大	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員	1
D01 公	18H05004 振幅変調の概念に基づいた音声の質感認識メカニズムの理解	平成30年度 ～ 令和元年度	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	1
D01 公	18H05005 神経操作で探るおいしい香りを認識する脳内メカニズム	平成30年度 ～ 令和元年度	村田 航志	福井大学・学術研究院医学系部門・助教	1
D01 公	18H05006 質感記憶の変容とその神経基盤の解明	平成30年度 ～ 令和元年度	齋木 潤	京都大学・人間・環境学研究所・教授	1

D01 公	18H05007 テクスチャー情報を計算する大脳皮質腹側視覚経路における内部機能構造の解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	藤田 一郎	大阪大学・生命機能研究科・教授	1
D01 公	18H05009 物体・素材認知機構の立体覚の観点からの解明と認知症早期診断技術への展開	平成 30 年度 ～ 令和元年度	楊 家家	岡山大学・ヘルスシステム統合科学研究科・助教	1
D01 公	18H05014 質感知覚の獲得過程：知覚環境と感性情報	平成 30 年度 ～ 令和元年度	金沢 創	日本女子大学・人間社会学部・教授	1
D01 公	18H05015 チンパンジーとヒト幼児における物理的・感性的質感知覚	平成 30 年度 ～ 令和元年度	伊村 知子	日本女子大学・人間社会学部・准教授	1
D01 公	18H05016 液体粘性知覚の神経メカニズムの解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	眞田 尚久	関西医科大学・医学部・助教	1
D01 公	18H05017 深層学習と機能的 MRI の融合による聴覚刺激の嗜好の個人差の解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	近添 淳一	生理学研究所・脳機能計測・支援センター・教授	1
D01 公	18H05018 扁桃体からのフィードバックが腹側視覚野の質感表現に及ぼす影響	平成 30 年度 ～ 令和元年度	宮川 尚久	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・主任研究員(任常)	1
D01 公	18H05019 深層ニューラルネットを用いた質感的不協和の神経情報表現の解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	林 隆介	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員	1
D01 公	18H05020 側頭葉前部における顔の質感知覚を支える神経メカニズムの解明	平成 30 年度 ～ 令和元年度	菅生 康子	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員	1
D01 公	18H05021 質感の深層生成学習理論	平成 30 年度 ～ 令和元年度	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	1
D02 公	18H05001 流体状食品のシミュレーションと物性推定	平成 30 年度 ～ 令和元年度	楽 詠瀬	青山学院大学・理工学部・准教授	1



D02 公	18H05002 食品への映像投影による視覚的 質感拡張技術を用いた食知覚・食 行動の制御	平成 30 年度 ～ 令和元年度	鳴海 拓志	東京大学・大学院情報理工 学系研究科・講師	1
D02 公	18H05003 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	平成 30 年度 ～ 令和元年度	渡辺 義浩	東京工業大学・工学院・准 教授	1
D02 公	18H05008 複雑形状に対応した見かけの BRDF 操作による工芸品の質感 編集	平成 30 年度 ～ 令和元年度	天野 敏之	和歌山大学・システム工学 部・教授	1
D02 公	18H05010 電気刺激と静電刺激を併用した 高解像度 MEMS 触覚ディスプ レイの開発	平成 30 年度 ～ 令和元年度	石塚 裕己	大阪大学・基礎工学研究 科・助教	1
D02 公	18H05011 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	平成 30 年度 ～ 令和元年度	岡部 孝弘	九州工業大学・大学院情報 工学研究院・教授	1
D02 公	18H05013 触覚ディスプレイを用いた触感 呈示における逆問題への触覚サ ンプルを用いたアプローチ	平成 30 年度 ～ 令和元年度	三木 則尚	慶應義塾大学・理工学部(矢 上)・教授	1
公募研究 計 50 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

## 研究領域全体に係る事項

### 3 交付決定額

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

## 4 研究領域の目的及び概要

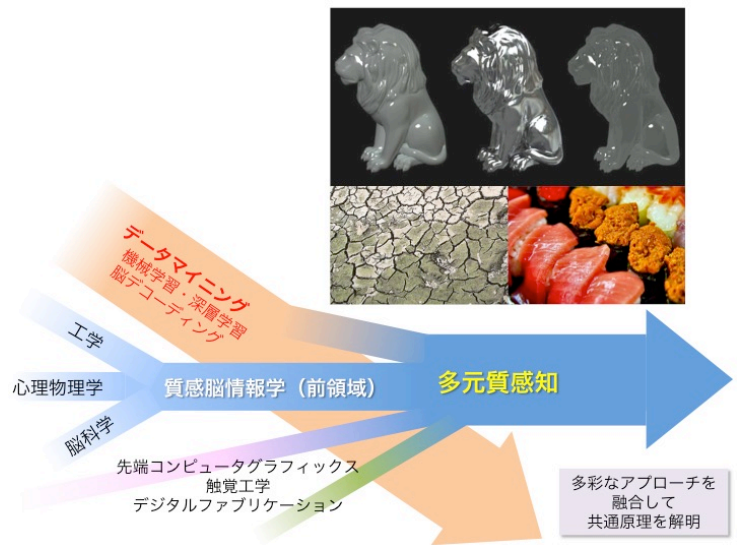
研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

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。



多様な質感（上）と本領域の設計思想（下）

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。

## 5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価結果の所見において指摘を受けた事項があった場合には、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 【審査結果】

〈所見〉12の計画研究の有機的な繋がりを一層促進するための工夫や、各計画研究の連携のさらなる強化が望まれる。

〈留意事項〉本研究領域は、総括班以外に、計画研究が12と多く、かつ、各計画研究に参画する研究者の数も多い。個々の研究者の成果は期待できるものの、領域全体の方向性やまとまりが不明確であり、領域全体としての成果の創出が懸念される。このため、本研究領域の目的達成に向け、領域内の各計画研究の緊密な連携のための方策を更に工夫する必要がある。

緊密な連携のための方策としてテクノロジー・データ・コンセプトの3つの共有を進めた。

テクノロジーの共有とは、メンバーが持っている専門技術をメンバー間で共有することである。マルチマテリアルの3Dプリンタや切削ラピッドプロトタイプングマシンといったデジタルファブリケーション装置は、単に高額なだけではなく、使いこなすのにさまざまなノウハウが必要となる。そこで、担当者がデータ出力のための処理フローを整備し、領域メンバーが相談すれば必要な者が簡単に出力できる体制を確立した。そのほか、反射特性計測装置やプロジェクションマッピング技術、コンピュータグラフィックスやテクスチャ合成/スタイル変換などの工学技術が、心理・脳科学研究で利用できるようにサポートした。また、脳科学研究者間では、DREADD技術の利用を広げた。

データの共有とは、別のアプローチをとるメンバーが同じデータを使って研究することである。複雑かつ多様な質感を研究するには様々な刺激サンプル（実物の素材や画像）が必要になるが、刺激サンプルの準備は容易ではない。実物を集めてくる場合はどういう基準で集めれば良いか判断が難しく、コンピュータグラフィックスを使って条件統制され、かつリアルな画像刺激を作ることは非専門家にはハードルが高い。そのため、共通で利用できる刺激サンプルセットとして、実際の様々な素材を基にした質感素材データベース（DB）と、コンピュータグラフィックス画像に物理的質感属性（光沢など）の心理物理データが紐付いた質感標準課題DBを構築した。これらを領域内で公開し、様々なプロジェクトで利用した。同じ刺激サンプルに対して、物理計測、心理評定や言語記述、心理物理実験データ、fMRIや電極で捉えた脳活動データを紐付けることにより、大局的な視点に立って人間の質感認識の解析が可能となり、様々な工学的な応用にも結び付けることができた。

コンセプトの共有とは、理論や考え方を異分野間で融合することである。関連分野でも少し離れると考え方が違うことが良くある。サイエンスとエンジニアリングの違いはもとより、視覚・触覚・聴覚・嗅覚で研究発想が異なるし、コンピュータビジョンとコンピュータグラフィックスでも異なる。しかし、解決すべき問題はしばしば相同であり、異分野のアイデアが問題解決のヒントを与えてくれることがある。このため、年2回、3日間ほぼ缶詰で班会議を行い、密な研究交流から相互の理解を進めた。班会議以外でも、いくつかのテーマについて分野横断的に議論するSpecial Interest Groupの会合を開催するとともに、毎月1回の頻度でWebinarを開催した。また、深層学習を領域内の工学・心理物理・脳科学研究をつなぐキーコンセプトと考え、深層学習を使った脳の情報処理のモデリングで世界をリードする研究者の招聘、班会議での特別セッション、などを通してコンセプトの共有化を促進した。その結果、異分野間の相互理解が高まり、多くの領域内共同研究が生まれた。班会議では異なる分野の研究者が共通のテーマについて熱心に議論する姿があちこちで見られ、ゲストで参加された先生方からは、真の異分野融合が進んでいるとの声が多く聞かれた。

〈留意事項〉人の多様性を理解する戦略についても不明確であるため、さらなる検討が必要である。

計画班研究では多様性を生む経験の効果に関して、触覚経験によって視覚系の素材に関する脳内表象が変化することを明らかにした。さらに、より直接的に質感認識の多様性を検討するため、質感の国際的異文化比較、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、高齢者や高次脳機能障害者の質感認識、類人猿の質感知覚などといったテーマに関して、計画班のみならず公募班を活用して研究を進めた。

〈留意事項〉 3D プリンター等を利用した検証など、一部の方法論の妥当性には留意しつつ、研究の進展に応じて方法論を常に議論し、必要に応じて見直すことが必要である。

3Dプリンタ (Stratasys Objet 260 Connex3) は領域内で活発に利用した。当初予定されていたデジタルアプリケーション関連の研究のみならず、心理・脳科学研究でも活躍した。半透明物体に関するコンピュータビジョン、ナチュラル触覚テクスチャ知覚など、高精度マルチマテリアルの特性をフルに活かした研究も行った。プリンタを管理した岩井班を除き、6つの計画班と7つの公募班に対して計718の3D物体の提供を行った。また、現行最高スペックの装置を購入したことによって、アプリケーションの最先端技術の限界や課題を質感研究の観点からあぶり出すことができた。

【中間評価】 評価結果：A+

〈留意事項〉 研究項目 D01-14 公募研究が廃止とされているが全体計画に支障は生じないか、説明が必要である。

代表研究者の北田の海外大学への異動により制度上廃止となったが、北田は班友として領域メンバーに残った。計画されていた研究 (計画班の梶本班、坂本班との共同研究) は順調に進み、成果の一部は国際誌に発表された (Kitada et al., 2019, *NeuroImage*)。さらに、第Ⅱ期公募班に楊を加え、触覚質感の神経基盤の研究を継続した。また、別の二つの公募班 (山口、高橋) がほかの新学術領域の立ち上がりに伴い二年目途中で廃止になったが、彼女らも班友として領域との研究交流を継続した。乳幼児質感知覚 (山口担当) に関しては関連テーマで第Ⅱ期の公募研究の採択を行った。高橋が担当していた国際的な質感比較は、少し異なる切り口から坂本班で進めた。このように、全体計画には大きな支障は生じなかった。

〈留意事項〉 計画研究の自律分散的な組織運営は利点でもあるが、更に全体を俯瞰した統合的な視座も同時に共有することが望ましい。コンセプトの共有に関して、解決すべき問題や異分野のアイデアの取り込みなどは戦略的に議論し、領域全体の方向性を常に意識し、これまで以上に領域内の共同研究等を推し進めることが必要である。質感工学の分野を確立するためには、産業界の協力も必要となるだろう。

領域全体の研究をさらに統一的なものとするための、以下の3つの戦略を立てた。(1) 質感データベースをさらに活用し、共通データを媒介とした研究成果の融合を図る。(2) 研究成果の産業貢献の形を目に見えるものにするために、質感の扱い方を取りまとめた質感レシピを作成するとともに、質感量 (光沢量) の標準化のため質感原器およびそれに基づいた共通の単位の作成を試みる。(3) 領域の成果を社会にアピールするために、特定の物体 (具体的には食品や皮膚の人工サンプル) の質感を様々なアプローチで分析し、統一的な視点から領域の様々な成果を可視化する。コロナウイルス問題で計画に遅れが生じているものの、終了領域活動の中で、これらの結果を発表していく予定である。

## 6 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、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

(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ほかに明らかにし、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。実世界の触覚刺激を完全に記録・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しても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(サル)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ュ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。

A0-3 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、物体表層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の間の階層的な同一性を見出した。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

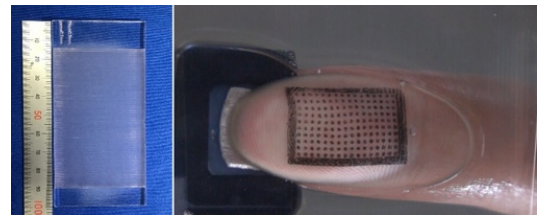
hierarchy score (BHスコア) を考案し、29種類の異なる構造を持つDNNと脳との類似性を比較した。その結果、各DNNのBHスコアと物体認識精度は負に相関するという意外な結果が得られた。これは、高い物体認識精度を実現するAIとしての工夫が、脳の情報処理と乖離していることを示唆している。

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。

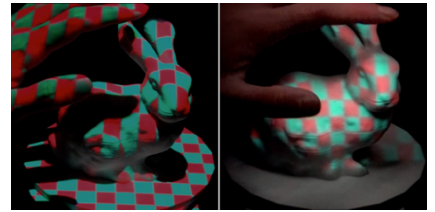
#### ■項目C「質感イノベーション」(質感認識の科学的理解に基づく質感創成技術の開発)

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を視覚的に隠消する技術を開発し、マーカ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、コモンマーマ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のFST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ともに、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。

## 7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和2年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に\*印を付すこと。

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, Kingdom 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，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<sup>§</sup>, Miyakawa N<sup>§</sup>(<sup>§</sup>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, Punpongson 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*, 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

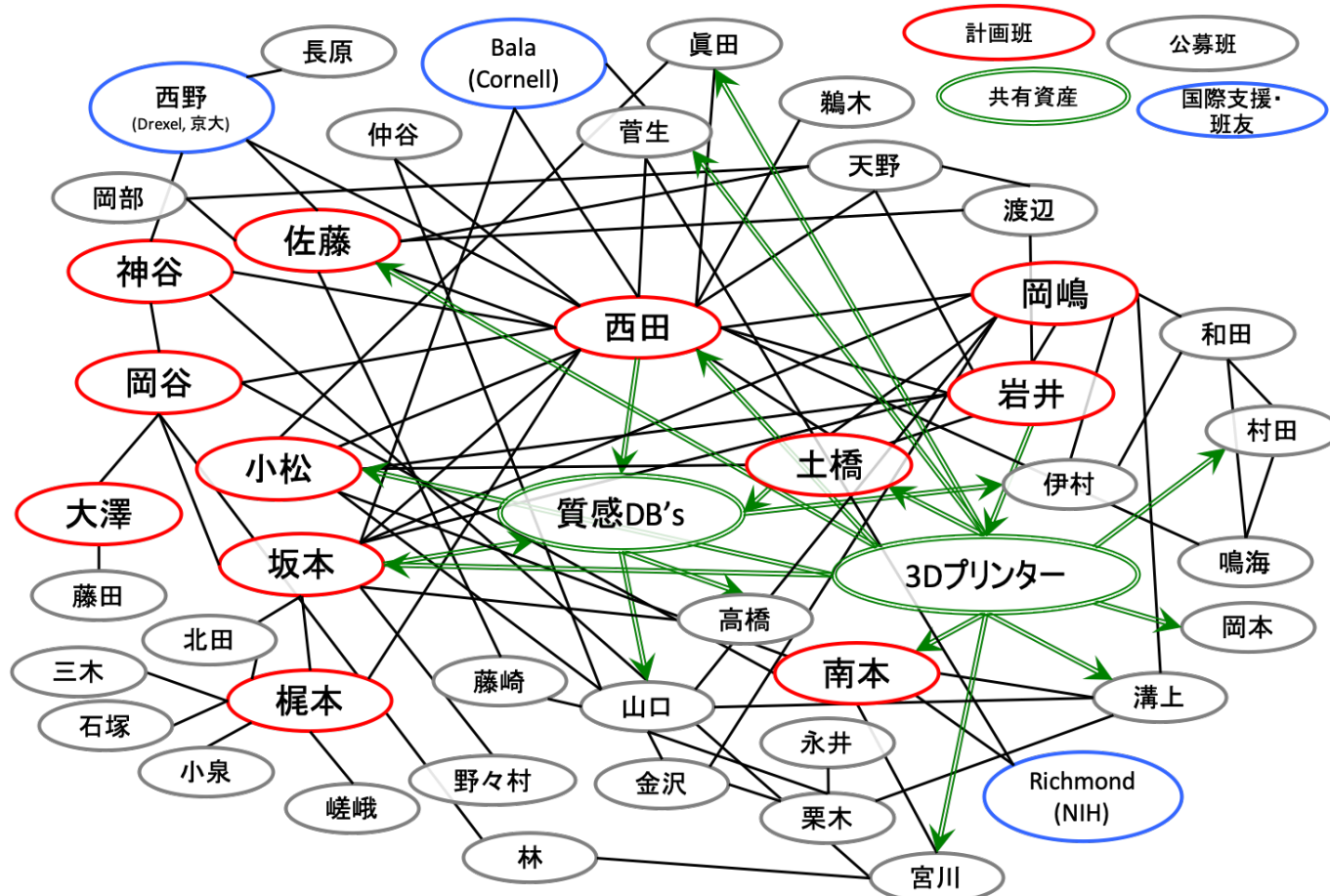
1. “Reality varied by visions: Requirements of immersive VR contents for people with low vision,” \*Miura T, Izumi T, Onishi J, Matsuo M & Sakajiri M, *Journal of Technology and Person with Disabilities*, 査読有, 8 (in press)
2. “Relationship between contributions of temporal amplitude envelope of speech 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, Nomiyama 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 29<sup>th</sup> (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)
  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 Ca<sup>2+</sup> 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)



## 8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。



図に領域内の班間連携状況を示したマップを示す。連携でコアとなる共有資産や、国際活動支援で連携のハブとなった海外研究者も含めて示す。

共有資産として購入したマルチマテリアルの3Dプリンタは、岩井班分担の日浦が管理し、領域内で利用できる体制を整え、14班の研究に貢献した。領域内連携のもう一つのコアとなる共有資産が、坂本班、西田班、土橋班が中心となって構築したデータベース（質感素材DB、質感標準課題DB）であり、様々な神経生理実験、心理実験、機械学習実験の刺激として用いられた。また、小松班の素材刺激や岡嶋班・和田班が作成した野菜鮮度変化画像を使って、鈴木（西田班分担）が臨床実験を、伊村班がチンパンジーの実験を行った。

班間の技術支援も盛んで、菅生班はサルに提示する顔画像の質感を操作するために柳井（西田班分担）のスタイル変換や国際活動支援で協力関係にあるBala教授（Cornell大）の画像変換アルゴリズムを利用した。触覚に関しては、梶本班が中心となって触覚関連班の間の領域連携を進め、嵯峨班・北田班・西田班の装置開発のサポートを行った。

直接の共同研究という形にならなくても、領域内の情報交換によりさまざまなシナジー効果が生まれている。たとえば、西田班・岩井班・岡嶋班・天野班・渡辺班・鳴海班は、様々な形でプロジェクションマッピングによる実物体の見かけの編集技術を進化させ、領域の中心的な技術群を形成した。西田班が表面の濡れの知覚特性を心理物理学的に研究し、佐藤班はこの現象の物理過程を解析したという例もある。さらに、領域内の議論で神経科学から機械学習への関心が高まり、深層学習と神経情報処理の関係を追求する研究が多くの班で進められるようになった。

## 9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況、研究費の使用状況や効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

### ■総括班

#### 【物品費】

・H27年度にマルチマテリアル3Dプリンタ（Stratasys Objet 260 Connex 3、本体価格2800万円）、および材料となる紫外線硬化樹脂（300万円）を購入し、広島市立大学に納入した（平成31年度に担当者の異動により兵庫県立大学に移設）。H28年度以降は年間保守費や材料（紫外線硬化樹脂）の追加購入などで、1700万円を支出している。

・そのほか、H28年度に画像データベース作成を目的とした標準光源装置（X-rite Spectralight）を購入した。また、日本画特有の質感を解明するために天然岩絵の具セットを購入し、佐藤班と坂本班で分析を進めている。R1年度には、各班の成果を評価する目的で、食品サンプルや人工皮膚（バイオスキン）を購入した。

#### 【旅費】

・班会議や質感のつどいへのアドバイザー・学術調査官の旅費を支出した。  
・H28年度に神経科学会の質感関連シンポジウムを企画し、J. McDermott（MIT）を招聘した。また、脳と心のメカニズム第17回冬のワークショップの主催団体の一つとして、S. Bensmaia（Chicago大学）、D. Yamins（Stanford大学）を特別講演者として招聘した。彼らは別のセミナーも開催し、その模様は班員にインターネットを通じて中継した。また、H29年度の日本神経科学学会のシンポジウムにM. Costagli（Imago7）を招聘した。

#### 【人件費】

・事務局（阪大）の事務アシスタント費用を支出した。R1年度は代表者の異動に伴い、京都大学でも事務の一部を担当するようになり、そのためのアシスタント費用も支出した。

#### 【その他】

・第1回（2016年1月広島）、第2回（2016年6月宮崎）、第3回（2017年3月東京）、第4回（2017年6-7月仙台）、第5回（2018年3月東京）、第6回（2018年6月札幌）、第7回（2019年3月兵庫）、第8回（2019年9月浜松）の班会議の開催費用（会場費など）として620万円支出した。

・ニューズレターを3号発行（2016年10月、2018年3月、2020年3月）し、印刷配布するとともにホームページで公開した。

・質感のつどい（<http://www.shitsukan.jp/tsudoi/index.html>）を支援するため、第1回（2015年11月東京）、第2回（2016年11月千葉）、第3回（2017年11月大阪）、第4回（2018年11月神奈川）、第5回（2019年12月京都）の公開フォーラムの開催費用（会場費など）として100万円支出した。

・領域ホームページ（<http://shitsukan.jp>）の作成、およびサーバー運営に50万円/年支出した。

・領域内のインターネット会議やWebinarのためにGoToMeetingを契約し、10万円/年支出した。

・2017年7月に行われたアジア太平洋視覚会議のサテライトイベントRoom Escape at 2017 APCVの主催者の一つとなり、会場費など40万円を支出した。

・2019年10月に東京藝術大学で行われた展覧会「ヒトは描くときに何をみているか」を共催し、会場費など42万円を支出した。

#### 【最終年度予算の繰越】

・新型コロナウイルス感染症流行により、2020年3月に予定されていた最後の班会議が延期になり、班会議開催のための予算60万円をR2年度に繰り越した。

#### ■国際活動支援基金

各班からの共同研究計画を総括班内に作った支援班委員が審査し、承認された提計画を支援した。各班のおもな支出は以下の通り。

・西田班は、フランスINRIAのPascal Barla博士との共同研究のため、研究員を2度現地に派遣し、旅費および滞在費用として総計210万円を支出した。

・南本班は、アメリカ国立衛生研究所(NIH)のBarry Richmond博士らとの質感刺激の価値判断の神経メカニズムに関する共同研究において、同博士らを複数回日本に招聘し、また研究員をNIHに派遣して技術研修するために1040万円を支出した。

・佐藤班は、Drexler大学との共同研究、Simon Fraser大学との共同研究、Australian National Universityとの共同研究、MITやコーネル大学学生NIIでの滞在研究のサポートの用途で940万円を支出した。

・坂本班は、音象徴語を用いた質感評価に対する英国University of Lincolnなどとの国際比較研究を遂行するために100万円を支出した。

・梶本班は、英国University of Londonに大学院生を派遣し、米国MITに研究代表者を派遣する等共同研究も進め、200万円を支出した。

・土橋班は、Stanford大学での滞在研究(土橋, 3カ月)、Northumbria大学への研究員派遣(土橋・大学院生, 1カ月)、スイス連邦工科大学への訪問(土橋, 岩崎)を行った。また、ピクサーのTed Kim博士、California大学Davis校のNelson Max博士、スイス連邦工科大学のWenzel Jakob博士の短期招聘を行い、760万円を支出した。

・岩井班は、米国MIT(渡航回数: 4)および中国Microsoft Research Asia(同1)への若手研究者の派遣のため、200万円を支出した。

・岡嶋班は、Oxford大学のCharles Spence教授らと進める食品の質感認知に関するクロスモーダル研究を遂行するために、390万円を主に旅費として支出した。また分担研究者の富永が行った米国IS&T Electronic Imagingとの連携を進める活動をサポートするために主に旅費と会議参加費として350万円を支出した。

・上記の国際活動支援の対象となった研究者を中心に招待した国際シンポジウムを2019年12月に開催した。会場費、研究者の招聘費用、運営費などで330万円を支出した。

#### 【基金の研究期間の延長】

佐藤班の研究において、国際チームでの反射解析の共同研究に対して、12月末に海外から共同研究者を招聘、提案手法の検証実験を行い、その成果を国際会議に投稿することを予定していた。新型コロナウイルスの影響により、渡航ビザの発給の遅延ならびに航空便の確保が難しくなり、研究者の招聘ならびに予定した実験を行うことができなかった。また、岡嶋班においても、同様の理由で、Oxford大学との共同研究が滞った。このため、基金の研究期間を令和2年度まで延長した。

## 10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①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すもの」、「②当該領域の各段階発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

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리케이션、コンピュータグラフィックスなど様々な分野のワールドリーダー達が、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研究に関する文章「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。

## 11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和2年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域には、入れ替わりはありながら常時200名近いメンバーがいたが、その約4割が40歳未満の研究員であった。そこには2名の計画班代表（岩井、梶本）と、11名の公募班代表（仲谷、村田、伊村、眞田、小泉、渡辺、宮川、永井、三浦、楊、楽）も含まれる（採択時年齢）。

若手研究者の育成のため、国際活動支援基金などを利用して、海外の共同研究機関への派遣を行った。たとえば梶本班は、ロンドン大学へ学生を派遣し、新しい触覚提示装置についてのノウハウを習得した。土橋班はノーザンプリア大学に学生を派遣、西田班はINRIAへ若手研究者を派遣、南本班はNIHに若手研究員を派遣、岩井班はMITおよびMicrosoft Asiaに若手研究者を派遣した。

若手メンバー達は、班会議やセミナーを通して、日頃参加している学会では聞けない分野の最先端の研究に接することができた。今後の質感研究を支え、または新しい分野を開拓していく彼らにとって、これは有意義な機会となった。班会議の口頭発表は、通常班代表や分担者が担当するが、若手研究者にとっては領域メンバーに自らの存在をアピールする良い機会であると考え、第3回の班会議では研究代表者以外の若手研究者が登壇する深層学習のスペシャルセッションを企画した。

若手研究者の自律的な組織として若手の会を起ち上げ、領域内の異分野の若手研究者同士のネットワーク構築の促進を図った。領域内の研究者発表を昼休みに配信するwebinarを月に1回行ったが、若手の会のメンバーが中心に運営を行った。

領域外に質感研究コミュニティを作るための集まりである「質感のつどい」では、次世代の質感研究を担う若手を多数実行委員に迎え、将来のプロジェクト運営の予行演習ともなってもらいたいとの考えに立ち、運営の多くを任せている。

領域に関連する学会発表で、数多くの学生・若手研究者が発表賞を受賞した。その数は135件に及んだ。就職に関しては49件の常勤研究職への就職、45件の非常勤研究職へ就職が報告されている。また、雇用していた外国人ポスドクがマリーキュリー財団のグラントの獲得に成功した。

## 12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

### 江島義道（京都大学名誉教授・元京都工芸繊維大学学長）

本領域は、「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を目標とした。この目標を達成するため、下記に示す研究項目を掲げ、心理物理学、情報工学、脳神経科学分野の研究者が連携して、研究を推進した。領域全体としての方向性にまとまりを持たせるため、「メンバーの保有している技術」、「質感素材及び質感標準課題データベース」及び「理論・考え方」を共有する方策を取った。全体の研究をさらに統一的なものとするために新たに設定した作業は、コロナウィルス問題で計画に遅れが生じた（終了領域活動の中で実施予定である）が、当初設定していた目標は、すべて達成した。

研究項目 A 「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）

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）

研究項目 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）

研究項目 D（公募班）

5年間の研究の結果、心理物理に関しては、A「質感メカニズム」を主軸とした研究を進め、「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」、及び「高齢者や高次脳機能障害者の質感知覚の特性」明らかにした。また、D（公募班）においては、「質感認識特性の輝度・時間依存性」、「肌色空間の特性」、「質感認識の乳幼児発達過程」、「質感の記憶表象メカニズム」「音声の質感（個人性・感情・緊張感）に影響を与える音響特性」、及び「食べ物の質感特性」を明らかにした。これらは、本領域が目指した現実世界の質感の持つ多様性と複雑性の解明に資するものである。一部には、研究途次のものもあるが、ほとんどが、高い水準の研究成果を得ている。これらは、質感研究の新しい領域を切り開くもので、高く評価できる。

### 横矢直和（奈良先端科学技術大学院大学・学長）

本領域は、2010～2014年に実施された新学術領域研究「質感脳情報学」の成果をもとに新展開を図る後継プロジェクトであり、全体として、研究の深化とともに、情報科学、心理物理学、脳神経科学等からなる学際的な質感研究コミュニティの拡大と産業応用を含む学問体系の確立が着実に進んでいると判断する。

本領域での質感研究は、「人間の質感情報処理機構の解明」と「実用化可能な質感技術の創出」が両輪となっている。前者では従来からの理論検証型アプローチに加えて深層学習等を用いるデータ駆動型アプローチに挑戦しており、後者では質感の工学的な再現・編集技術の開発を目指している。両者は成果の相互フィードバックを行うとともに、領域内で横断的な研究チームを編成し共同研究を実施しており、後期には異分野融合研究に係る成果の国際誌発表が有意に増加している（特に情報工学と心理学・神経科学の融合分野）。

本領域の設定期間を通しての領域全体での研究成果発表は活発であり、評価者の専門に近いコンピュータビジョン、コンピュータグラフィクス、バーチャルリアリティ等を中心としたメディア工学分野の研究項目においては質の高い成果が創出されている。特に、トップジャーナル（IEEE Trans.、ACM Trans. など）や最難関国際会議（ICCV、CVPR、ECCV、ACM SIGGRAPHなど）での発表が多数あり、当該分野における我が国の国際的なビジビリティ向上に大いに貢献している。また、各種イベント

等での領域の研究成果に基づく一般の人を対象としたアウトリーチ活動も本領域らしい取組として高く評価できる。

領域内での共有資産（3Dプリンタ、質感DB（質感素材DB、質感標準課題DB））を介した連携が効果的に機能している。このような研究インフラを活用した班内・領域内での共同研究が開始され、後期には論文発表等の形での具体的な成果が創出されている。質感DBは現在、領域内で公開されているが、今後は、質感研究コミュニティの拡大・底上げのために領域外への一般公開を期待したい。

若手研究者の育成に関して、当初から若手の会を立ち上げ、若手研究者が自主的・自立的に分野横断的研究を立案する環境を整備するとともに、国際活動支援の一環として若手研究者の海外派遣を実施し国際展開力の強化を図るなど、様々な取組が行われている。これらが若手研究者の常勤研究職ポストの獲得に繋がっていくものと思われる。

### 河野憲二（京都大学名誉教授）

「多元質感知」領域は、2010～14年度に実施された新学術領域「質感脳情報学」で築いた「質感コミュニティ」を基盤に、近年急速な発展が見られるデータ駆動型研究パラダイム、深層学習を含む統計的機械学習、高度な脳情報解析技術を取り入れ、新しい研究組織を編成することで社会的な期待・要求が高まってきた「質感」研究の新たな展開を目指してスタートした。そのため、知覚心理学、神経科学、情報科学、映像工学など、今までにない多彩な研究基盤のグループが集結し「質感」研究分野の開拓・確立・発展を目指し研究を進めた。その過程で、相互の交流・連携・インタラクションを産み、複数のアプローチを組み合わせた研究が実施され、シナジー効果による研究の大きな発展が見られた。神経科学を主軸とした研究での主だった成果を見てみると、「小松グループ」は、神経細胞の活動による質感情報の表現のあり方と、その質感知覚と関係に注目して研究を進め、サル下側頭皮質の光沢選択性ニューロンの記録部位を電気刺激することで、光沢の知覚が変化することを示した。この成果は、当該部位のニューロン活動が質感の知覚形成に直接的な因果関係を持つことを示したもので、質感の神経機構を知る上で重要な発見である。また、サルの fMRI の実験により、物体の質感を形成する2つの大きな要素である視覚と触覚の情報が、経験を経て下側頭皮質後部領域に統合されることを明らかにした研究は、触覚と視覚という異なるモダリティの感覚を経験が結びつけることを脳の活動として示したという点で、異分野の研究を包括し、そのシナジー効果を求めるこの領域の方向性がポジティブに示された優れた成果である。「南本グループ」が開発した、人工受容体(DREADD)を導入し、化学遺伝学的手法を用いることで神経細胞の活動を一過性に抑制させることを可能とした技術は、脳の局所の活動を一過性に变化させ、その機能を調べる手法として、質感研究のみならず、他の神経科学研究にも受け入れられ、その進捗に大いに貢献している。「大澤グループ」では、視覚情報処理を特定の仮説やモデルにとらわれず、データ駆動型アプローチを用いることで、生体内情報処理と深層学習との関連により深い理解が可能であることを示した。この成果は生物学と工学・情報学の研究者をまとめあげたこの領域の成果を象徴するものである。脳と深層学習の間の相同性の理解については、「神谷グループ」の大規模脳・画像・テキストデータを用いたデータマイニング的アプローチの貢献も大きい。

これらの研究には、領域内での共同研究や積極的な情報交換が大きな役割を果たし、共同資産として購入し「岩井グループ日浦ら」が運用している3Dプリンタや、「坂本グループ」らが構築した質感データベース等が有効に利用されている。この研究領域には開始当時から若手研究者の参加が多く、様々な分野の対象に異なるアプローチから取り組む経験豊富な研究者や若手同士との盛んな交流も彼らのキャリアアップに大きな影響を与えることができた。この領域への社会的な期待・要求の高まりは、多くのアウトリーチ活動や「質感のつどい」への多数の参加者からも見て取ることができる。

以上より、本研究は「新学術領域研究（研究領域提案型）」に相応しいものであったと評価できる。