

領域略称名：深奥質感

領域番号：20A401

令和5年度
科学研究費助成事業「学術変革領域研究（A）」
に係る中間評価報告書

「実世界の奥深い質感情報の分析と生成」

領域設定期間

令和2年度～令和6年度

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

目 次

研究組織

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	総括班・総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者	3
3	公募研究	7

研究領域全体に係る事項

4	研究領域の目的及び概要	13
5	審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	15
6	研究の進展状況及び主な成果	17
7	研究発表の状況	37
8	研究組織の連携体制	42
9	若手研究者の育成に係る取組状況	43
10	アウトリーチ活動に係る取組状況	
11	研究費の使用状況・計画	45
12	今後の研究領域の推進方策	46
13	総括班評価者による評価	48

研究組織

(令和5年6月末現在。ただし完了又は廃止した研究課題は完了・廃止時現在。)

1 総括班及び総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数[2]
X00 総	20H05950 実世界の奥深い質感情報の分析と生成	西田 眞也	京都大学大学院情報学研究科・教授	3
A01-1 計	20H05951 実体・非実体深奥質感の計算機視覚の実現	西野 恒	京都大学大学院・情報学研究科・教授	3
A01-2 計	20H05952 深奥質感のマルチモーダル深層モデルの確立	岡谷 貴之	東北大学・情報科学研究科・教授	3
A01-3 計	20H05953 アートに含まれる質感情報の情報学的解析	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	4
B01-1 計	20H05954 3次元質感の脳内表現の解明	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・脳情報研究所・室長	2
B01-2 計	20H05955 質感から価値への脳内変換機構の解明	南本 敬史	量子科学技術研究開発機構・脳機能イメージング研究部・グループリーダー	4
B01-3 計	20H05956 脳損傷者における深奥質感認知の解明と質感技術の臨床応用	鈴木 匡子	東北大学大学院医学系研究科・教授	2
B01-4 計	20H05957 視覚・聴覚・触覚・言語情報からの深奥質感認識の統一的理解	西田 眞也	京都大学大学院情報学研究科・教授	5
C01-1 計	20H05958 人間機械融合視覚による質感認識能力拡張	岩井 大輔	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	2
C01-2 計	20H05959 深奥質感がもたらす現実と虚構の融合	渡辺 義浩	東京工業大学・工学院・准教授	1
C01-3 計	20H05960 実体の質感情報を引き出すフィジカルメディアの設計と表現実践	寛 康明	東京大学大学院・情報学環・教授	2
総括班及び総括班以外の計画研究 計 10 件 (廃止を含む)				

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究

[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 総括班及び総括班以外の計画研究の研究代表者・研究分担者

研究項目：A01-1

研究課題名：実体・非実体深奥質感の計算機視覚の実現

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	西野 恒	京都大学大学院・情報学研究科・教授	研究計画全般の実施
分担	鄭 銀強	東京大学・次世代知能科学研究センター・准教授	実体深奥質感の研究分担
分担	延原 章平	京都大学大学院・情報学研究科・准教授	非実体深奥質感の研究分担
合計 3 名			

研究項目：A01-2

研究課題名：深奥質感のマルチモーダル深層モデルの確立

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	岡谷 貴之	東北大学・情報科学研究科・教授	研究の統括と理論構築、アーキテクチャの開発並びに実験結果の分析
分担	鈴木 潤	東北大学・データ駆動科学・AI教育研究センター・教授	データセット作成および特徴空間分析のための実験実施と結果分析
分担	菅沼 雅徳	東北大学・情報科学研究科・助教	アーキテクチャ設計と実験実施及び結果の分析
合計 3 名			

研究項目：A01-3

研究課題名：アートに含まれる質感情報の情報学的解析

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	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	研究総括、質感特徴量解析
分担	佐藤 洋一	東京大学・生産技術研究所・教授	質感知覚行動解析
分担	平 諭一郎	東京藝術大学・未来創造継承センター・准教授	芸術作品解析、検証サンプル作成
分担	日浦 慎作	兵庫県立大学・工学研究科・教授	反射計測、質感解析アルゴリズムの開発

合計 4 名

研究項目 : B01-1

研究課題名 : 3次元質感の脳内表現の解明

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	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・脳情報研究所・室長	研究総括、脳計測、モデリング、デコーディング
分担	土橋 宜典	北海道大学大学院情報科学研究院・メディアネットワーク部門・教授	CG技術の開発
合計 2 名			

研究項目 : B01-2

研究課題名 : 質感から価値への脳内変換機構の解明

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	南本 敬史	量子科学技術研究開発機構・脳機能イメージング研究部・グループリーダー	研究統括/質感-価値変換の並列処理機構の 解明価値統合・変調処理の解明
分担	小松 英彦	玉川大学・脳科学研究所・特別研究員	質感-価値変換の並列処理機構の解明
分担	網田 英敏	京都大学・ヒト行動進化研究センター・特定助教	価値統合・変調処理の解明
分担	村田 航志	福井大学・学術研究院医学系部門・助教	価値統合・変調処理の解明
合計 4 名			

研究項目 : B01-3

研究課題名 : 脳損傷者における深奥質感認知の解明と質感技術の臨床応用

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	鈴木 匡子	東北大学大学院医学系研究科・教授	研究統括/脳損傷者における深奥質感認知の障害とその神経基盤の解明 質感技術の臨床応用
分担	中内 茂樹	豊橋技術科学大学・工学研究科・教授	深奥質感認知の評価方法の開発 健常人における深奥質感認知のメカニズムの解明
合計 2 名			

研究項目：B01-4**研究課題名：視覚・聴覚・触覚・言語情報からの深奥質感認識の統一的理解**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	西田 眞也	京都大学・大学院情報学研究科・教授	研究総括／視覚・触覚的深奥質感認識メカニズムの解明
分担	梶本 裕之	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授	触覚的深奥質感認識のメカニズムの解明および再現技術の開発
分担	坂本 真樹	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授/副学長	マルチモーダルおよび言語的深奥質感の解析
分担	堀内 隆彦	千葉大学・大学院工学研究院・教授	視覚的深奥質感認識のメカニズムの解明および再現技術の開発
分担	上村 卓也	NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・研究員	聴覚的深奥質感認識のメカニズムの解明
合計 5 名			

研究項目：C01-1**研究課題名：人間機械融合視覚による質感認識能力拡張**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	岩井 大輔	大阪大学・基礎工学研究科・准教授	研究全体の統括、質感変調眼鏡の開発・評価、および、プロジェクションマッピングを用いた質感編集を担当
分担	伊藤 勇太	東京大学・大学院情報学環・特任准教授	質感提示のための光学シースルー型頭部搭載ディスプレイの開発・評価
合計 2 名			

研究項目：C01-2**研究課題名：深奥質感がもたらす現実と虚構の融合**

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	渡辺 義浩	東京工業大学・工学院・准教授	研究全体の統括、深奥質感に資する高速プロジェクション技術の研究開発を担当
合計 1 名			

研究項目：C01-3

研究課題名：実体の質感情報を引き出すフィジカルメディアの設計と表現実践

代表／ 分担	研究者氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担
代表	笥 康明	東京大学大学院・情報学環・ 教授	研究統括／実体群質感メディアとツールキットの開発
分担	仲谷 正史	慶應義塾大学・環境情報学 部・准教授	実体群質感評価フレームワークとツールキットの開発
合計 2 名			

3 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]
D01-1 公	21H05795 外界を定位させる高臨場立体振動ディスプレイの実現	令和3年度 ～ 令和4年度	昆陽 雅司	東北大学・大学院情報科学研究科・准教授	1
D01-2 公	21H05798 投影光を用いた実物体の形状・反射特性制御による現実拡張型質感操作技術	令和3年度 ～ 令和4年度	平木 剛史	筑波大学・図書館情報メディア系・助教	1
D01-3 公	21H05809 ものづくり現場の非破壊検査における匠の技の科学的理解と視覚増強への応用展開	令和3年度 ～ 令和4年度	河野 行雄	中央大学理工学部・電気電子情報通信工学科・教授	1
D01-4 公	21H05812 質感と形状の分離による奥深質感画像分析・生成のためのマルチモーダル深層学習モデル	令和3年度 ～ 令和4年度	柳井 啓司	電気通信大学大学院・情報理工学研究科・教授	1
D01-5 公	21H05819 肌と肌が合うときの特異的な接触現象が生む心地よい触感の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	岡本 正吾	東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授	1
D01-6 公	21H05822 人工知能と逆相関法を用いた絵画芸術作品の魅力を決める画像特徴の定量的検証	令和3年度 ～ 令和4年度	内藤 智之	大阪大学大学院・医学系研究科・講師	1
D01-7 公	21H05825 光線場の計測と投影による現実を超える質感への操作	令和3年度 ～ 令和4年度	天野 敏之	和歌山大学大学院・システム工学研究科・教授	1
D01-8 公	21H05826 コンピュータグラフィクスによる質感表現の深化	令和3年度 ～ 令和4年度	岩崎 慶	和歌山大学・システム工学部・准教授	1
D01-9 公	21H05828 食品風味の深奥質感を解き明かす呈味・香り・食感の可視化・デジタル化技術の構築	令和3年度 ～ 令和4年度	田中 充	九州大学大学院農学研究院・食料化学工学講座・准教授	1
D01-10 公	21H0583 視覚障害者・晴眼者が質感体験を共有できるインクルーシブ質感提示法の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	三浦 貴大	産業技術総合研究所・人間拡張研究センター・主任研究員	1
D02-1 公	21H05796 物体の実在感（リアリティ）と知覚的ノイズの関係	令和3年度 ～ 令和4年度	栗木 一郎	埼玉大学大学院・理工学研究科・教授	1

D02-2 公	21H05800 呼吸による認知の揺らぎが与える質感への影響	令和3年度 ～ 令和4年度	國松 淳	筑波大学・医学医療系・助教	1
D02-3 公	21H05805 国際比較による顔の色・質感認識メカニズムの探究	令和3年度 ～ 令和4年度	溝上 陽子	千葉大学大学院・工学研究院・教授	1
D02-4 公	21H05807 身体運動の誘発に関わる音楽の質感とその神経基盤	令和3年度 ～ 令和4年度	白松 知世	東京大学大学院・情報理工学系研究科・助教	1
D02-5 公	21H05808 ヒトの脳における多様な匂いの表象の時空間的解明	令和3年度 ～ 令和4年度	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	1
D02-6 公	21H05810 心理物理学・生理学的時間特性に基づく物質的/感性的質感間の階層構造モデリング	令和3年度 ～ 令和4年度	永井 岳大	東京工業大学・工学院・准教授	1
D02-7 公	21H05813 選好注視と脳活動に基づく深奥質感の研究	令和3年度 ～ 令和4年度	川寄 圭祐	新潟大学・医学部・第一生理学・准教授	1
D02-8 公	21H05816 アンビエント音響としての謡曲における幽玄の理解	令和3年度 ～ 令和4年度	木谷 俊介	北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教	1
D02-9 公	21H05817 おいしさから紐解く快情動への身体反応とその神経機構	令和3年度 ～ 令和4年度	村田 航志	福井大学・学術研究院医学系部門・助教	1
D02-10 公	21H05820 分光計算に基づく色素濃度による色変化と色覚特性	令和3年度 ～ 令和4年度	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	1
D02-11 公	21H05823 モノの性質を深く知る身体動作：工芸における身体技法の現場計測による検討	令和3年度 ～ 令和4年度	野中 哲士	神戸大学・大学院人間発達環境学研究科・教授	1
D02-12 公	21H05827 心地よい触感を生み出すヒトの多階層な脳内神経機構の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	楊 家家	岡山大学・学術研究院ヘルスシステム統合科学学域・研究准教授	1
D02-13 公	21H05829 質感運動知覚に寄与する神経基盤の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	眞田 尚久	岩手県立大学・ソフトウェア情報学部・准教授	1
D02-14 公	21H05830 目視できない末梢静脈血管路を選定する熟練看護師の触診技術の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	渡邊 順子	静岡県立大学・看護学部・特任教授／副学長	1

D02-15 公	21H05831 視覚質感から海馬空間表象への脳内 変換機構の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	北西 卓磨	東京大学大学院・総合文化 研究科・准教授	1
D02-16 公	21H05832 多次元感覚情報から価値への変換様 式と神経機構	令和3年度 ～ 令和4年度	鮫島 和行	玉川大学・脳科学研究所・教 授	1
D02-17 公	21H05833 匂いが多次元的価値を獲得する神経 回路機構の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	眞部 寛之	同志社大学・研究開発推進 機構・准教授	1
D02-18 公	21H05834 内受容感覚依存的な情動を伴う質感 の神経メカニズムの解明	令和3年度 ～ 令和4年度	安田 正治	関西医科大学・医学部・講師	1
D02-19 公	21H05836 (令和4年度 採択後辞 退) 化学遺伝学操作による情動的質感認 知の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	宮川 尚久	量子科学技術研究開発機 構・量子医科学研究所 脳 機能イメージング研究部・ 主任研究員	1
D02-20 公	21H05837 自閉スペクトラム症児の感覚処理特 性評価研究から探る深奥質感認識個 人差の解明	令和3年度 ～ 令和4年度	熊崎 博一	長崎大学・医歯薬学総合研 究科・教授	1
D01-11 公	23H04327 外界を定位させる立体振動ディス プレイの質感の探求	令和5年度 ～ 令和6年度	昆陽 雅司	東北大学大学院・情報科学 研究科・准教授	1
D01-12 公	23H04328 ワイヤレス電力伝送を用いた実素 材の色彩・形状・触感の制御による 質感操作技術	令和5年度 ～ 令和6年度	平木 剛史	クラスター・メタバース研 究所・シニアリサーチサイ エンティスト	1
D01-13 公	23H04333 非接触触覚刺激を用いたクロスモ ーダル効果による毛並み触感の提 示	令和5年度 ～ 令和6年度	伴 祐樹	東京大学大学院・新領域創 成科学研究科・特任講師	1
D01-14 公	23H04343 内受容感覚に基づく深奥肌質感操 作	令和5年度 ～ 令和6年度	渡辺 哲陽	金沢大学・理工研究域・教 授	1
D01-15 公	23H04344 質感認識メカニズムに基づく異常 音検知の理解	令和5年度 ～ 令和6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
D01-16 公	23H04354 光線場の計測と投影によって投影 対象の素材を置き換える質感操作	令和5年度 ～ 令和6年度	天野 敏之	和歌山大学大学院・システ ム工学研究科・教授	1

D01-17 公	23H04356 味・香り・食感デジタル化技術を駆使した食の深奥質感の評価・予測への挑戦	令和5年度 ～ 令和6年度	田中 充	九州大学大学院農学研究院・生命機能科学部門・准教授	1
D01-18 公	23H04357 データ駆動能動光線空間による質感機械認識	令和5年度 ～ 令和6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
D01-19 公	23H04360 やわらかさ知覚原理の新仮説：硬い表面をやわらかく感じさせる低周波摩擦変動	令和5年度 ～ 令和6年度	岡本 正吾	東京都立大学・情報科学域・准教授	1
D02-21 公	23H04329 質感認知に呼吸が影響を与える神経メカニズム	令和5年度 ～ 令和6年度	國松 淳	筑波大学・医学医療系・助教	1
D02-22 公	23H04330 彩色によるリアリティとその限界の脳内メカニズム	令和5年度 ～ 令和6年度	栗木 一郎	埼玉大学大学院・理工学研究科・教授	1
D02-23 公	23H04332 国際コミュニケーションと顔質感認識	令和5年度 ～ 令和6年度	溝上 陽子	千葉大学大学院・工学研究院・教授	1
D02-24 公	23H04331 画像機器に潜む深奥質感の獲得・生成・知覚の関係解明	令和5年度 ～ 令和6年度	田中 緑	千葉大学・大学院国際学術研究院・助教	1
D02-25 公	23H04336 経験を通じた音楽の質感知覚と誘発運動の獲得過程	令和5年度 ～ 令和6年度	白松 知世	東京大学大学院・情報理工学系研究科・助教	1
D02-26 公	21H05831 視覚質感から海馬-嗅内野空間表象への脳内変換機構の解明	令和5年度 ～ 令和6年度	北西 卓磨	東京大学・大学院総合文化研究科・准教授	1
D02-27 公	23H04335 ヒトの脳における初期の匂い表象の解明ー末梢入力および行動との関係	令和5年度 ～ 令和6年度	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	1
D02-28 公	23H04337 深層学習と脳波から見る感性的質感生起における物質的質感の役割	令和5年度 ～ 令和6年度	永井 岳大	東京工業大学・工学院・准教授	1
D02-29 公	23H04341 脳活動と行動指標に基づく画像生成による質感認知の神経基盤の解明	令和5年度 ～ 令和6年度	川寄 圭祐	新潟大学・医学部・准教授	1

D02-30 公	23H04342 音の生得的/後天的情動価値を符号化する神経回路の解明	令和5年度 ～ 令和6年度	伊藤 哲史	富山大学・学術研究部・教授	1
D02-31 公	23H04345 アンビエント音響としての謡曲が持つ幽玄の理解	令和5年度 ～ 令和6年度	木谷 俊介	北陸先端科学技術大学院大学・人間情報学研究領域・講師	1
D02-32 公	23H04348 色素濃度による色度変化と色覚特性の関係：分光計算と画像解析	令和5年度 ～ 令和6年度	鯉田 孝和	豊橋技術科学大学・准教授	1
D02-33 公	23H04349 正確に記憶に残る視覚質感とは何か：画像記憶容易性と長期記憶バイアスの定量的解析	令和5年度 ～ 令和6年度	齋木 潤	京都大学・大学院人間・環境学研究科・教授	1
D02-34 公	23H04358 自閉スペクトラム症児の深奥質感認識における経時的変化と個人因子との関係の解明	令和5年度 ～ 令和6年度	熊崎 博一	長崎大学・医学部精神科神経科・教授	1
D02-35 公	23H04363 多次元感覚情報から価値と意思決定への神経機構	令和5年度 ～ 令和6年度	鮫島 和行	玉川大学・脳科学研究所・教授	1
D02-36 公	23H04366 マウスの床質感に対する触嗜好性を司る神経回路機構	令和5年度 ～ 令和6年度	山下 貴之	藤田医科大学・医学部医学科・教授	1
D02-37 公	23H04368 匂いを多次元的価値に変換する神経回路機構の解明と質感の客観的評価法の構築	令和5年度 ～ 令和6年度	眞部 寛之	奈良県立医科大学・生理学第一講座・准教授	1
D02-38 公	23H04369 おいしさを生み出す風味知覚の脳内メカニズム	令和5年度 ～ 令和6年度	塩谷 和基	立命館大学・生命科学部生命情報学科・助教	1
D02-39 公	23H04370 認知・身体の複合的情動に基づく質感の神経機構の解明	令和5年度 ～ 令和6年度	安田 正治	関西医科大学・医学部生理学講座・講師	1
D02-40 公	23H04372 認知情報に基づく触感覚認識とその背景にある神経機構の解明	令和5年度 ～ 令和6年度	窪田 慎治	国立精神神経医療研究センター・神経研究所モデル動物開発研究部・室長	1
D02-41 公	23H04374 下側頭皮質における顔質感の時間的処理過程と顔選択性領域との関係	令和5年度 ～ 令和6年度	菅生 康子	産業技術総合研究所・人間情報インタラクション研究部門・研究グループ長	1

公募研究 計 60 件（廃止を含む）

- [1] 公：公募研究
- [2] 公募研究は研究代表者が1名で実施

研究領域全体に係る事項

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「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させる」ものであるか、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。

質感はさまざまな事物(モノ)や事象(コト)の性質や状態、本性を察知する人間の高度な能力である。人間は瞬時に、事物や事象がどのような物性を持ち、どのような材質に由来し、どういう状態にあるのかという物理的質感を解読することができるのみならず、自分や他人にとってどのような価値や意味を持ち、情動を誘発するのかといった感性的質感の認識が可能である。また、質感は事物や事象の「本物らしさ」に深く関わっており、質感の探求は主観的現実感(リアリティ)の解明につながる。

本プロジェクト「深奥質感」の中核をなすメンバーは、二度の新学術領域研究プロジェクトを通して「質感学」という学問分野を確立してきた。サイエンスとエンジニアリング、基礎と応用、感覚モダリティの違いを超えた学際的な研究者コミュニティを確立し、独創性が高く、世界的にも先端的な研究を生み出してきた。しかし、これまでの質感情報処理の理解は、表層的なものに留まったものが多かった。たとえば、人間の質感認識機能の一部を、深層学習を用いた機械質感認識で実現することができるようになったが、それは人間の機能を断片的に模倣しているに過ぎない。人間の質感認識は、言語ラベルで理解できるような表層的なものだけでなく、言語化できない複雑な脳内表現と、奥深い情報処理に支えられている。そこで、本プロジェクトでは、質感情報処理の奥深くに潜んでいる本質を「深奥質感」と名付け、研究をそのレベルまで掘り進めることによって、「質感」学における日本の先端的な研究をさらに高めることを目指している。

図1に表層質感処理と深奥質感処理の関係を明示する。まず、実世界の事物・事象の質感情報が、視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚などの感覚信号として人間に与えられる。人間は感覚信号に含まれる質感手がかりを解読して、外界の事物・事象が持つ質感を推定する。物性、材質、状態、感性的価値などに関する質感ラベルが言語化・意識化される。ここまでが従来の研究対象の中心であった表層質感処理である。さらに、本プロジェクトでは、このような表層質感処理の背後に控えている、深奥質感処理の解明を目指す。

深奥質感とは、容易に言語化できない質感であり、それは多くの場合、マルチモーダルな質感である。さらに、その中身を考えると、適切に環境と関わるための質感を含む世界モデルの構築、事物や事象の生態学的価値の計算、感情・情動や身体運動の誘発まで含めた質感情報処理が考えられる。実物の持つ質感、本物と偽物の違い、芸術や匠が生み出す質感の本質も研究対象となる深奥質感である。さらに、深奥質感情報処理は、感覚入力のみならず受け手の特性の影響を大きく反映する。すなわち、種、年齢、性別、健康状態、環境などによって、質感のもつ意味は変調される。「深奥質感」では、質感情報処理の概念を本質的に拡張・発展させ、その全体構造の理解を通して深奥質感処理の理解と実装を目指す。サイエンス、エンジニアリング、アートを融合させ、質感研究のみならず構成分野を活性化・発展させる。

研究は大きく質感の生成と質感の認識に分かれ、質感の認識は機械(計算機)による認識と、生体

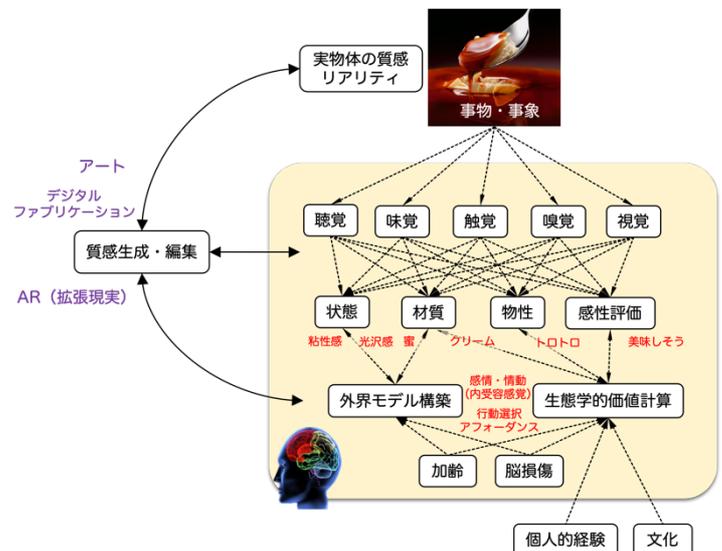


図1：研究対象となる深奥質感

(人間)による認識に分かれる(図 2)。コンピュータビジョンの分野で世界的に活躍する3人の研究者が代表を務める A01 項目「質感機械認識」では、さまざまな視点から深奥質感の機械認識の問題に取り組んでいる。A01-1(西野班)は実世界における実体的および非実体的質感の構成要素を視覚情報から抽出する計算機視覚技術の確立を目指している。A01-2(岡谷班)は、入出力関係の教師あり学習による人の認知過程の模倣にとどまらず、「自己教師学習」で画像と言語といった異なるモダリティの情報を融合させることにより、言語ラベルを超えた真の画像理解の実現を目指している。A01-3(佐藤班)は、本物および模倣品のアート作品の光学特性を最先端の計測法で解析し、鑑賞者が知覚する(もしくは知覚できない)光学特性の違いを解明することを目指している。

B01 項目「質感生体認識」の4つの計画研究は、脳神経科学、臨床医学、認知心理学の分野で活躍する研究者が、異なる切り口で、人間の深奥質感認識の情報処理を研究している。B01-1(神谷班)は、脳内の外界モデルの表現形態を理解するために、脳活動データから人間が知覚している深奥質感を含む3次元世界を解読することを目指しており、脳情報デコーディングとコンピュータグラフィックスの研究を並行して進めている。B01-2(南本班)は、化学遺伝学による神経活動操作技術などを駆使して側頭葉などの高次感覚野、眼窩前頭皮質を含む価値システム神経回路、複数の価値システム同士をつなぐ視床などをコアとした神経ネットワークの関係を明らかにし、質感から価値への脳内変換プロセスを理解することを目指す。B01-3(鈴木班)は、健常者と脳損傷者の深奥質感認知の神経基盤を質感情報に対する無意識的身体反応や嗜好判断によって明らかにするとともに、エクストリームユーザーとして位置づけられる認知症を含む脳損傷者にとって快適な質感環境を明らかにすることを目指している。B01-4(西田班)は、実世界の質感情報が視覚・聴覚・触覚などの複数の感覚モダリティを通して人間に伝えられ、言語に変換されてコミュニケーションに利用されるという質感情報処理全体を統一的な視点で解析することにより、マルチモーダルな深奥質感処理の構造を明らかにする。

C01 項目「質感生成」では、バーチャルリアリティやメディアアートで最先端を走る新進気鋭の3人の研究者を代表とする計画研究班が、人間にとってより自然で、より快適で、より安全で、かつ全く新しい体験を生み出す深奥質感の生成・編集技術を開発している。まず、C01-1(岩井班)は、反射光線場を直接操作する新しい質感編集技術の設計論を構築している。人の目に到達する光線群をその直前で時空間的にフィルタリングできる近接眼光学系を構築し、光線の自在な加減算を実現することを目指している。C01-2(渡辺班)は、人工現実技術を使って、質感を媒介とした現実と虚構の融合を試みている。深奥質感を正しく埋め込めば現実と虚構が融合した世界で新たなリアリティを創造することができると想定し、大規模高速センシング&プロジェクションシステムの能力を質感再現の限界にまで高め、限界まで到達した質感再現技術によってリアリティの様々な側面を自在に創造することを目指している。C01-3(寛班)は、現在の拡張現実等で多く見られる映像重畳のアプローチではなく、素材の群を機械的に制御する、あるいは素材特性を用いて物理的に制御し、形状・色彩・触感などの情報を提示し、さらには人間とのインタラクションを可能にするフィジカルメディアの創出を目的とする。

さらに、この計画班の研究を補い、強化するために、前後期それぞれ30の公募班を採用した。

これらの研究課題の解決を通して、質感という本質的でありながら、ある意味非常に日本的な概念を核として、情報科学と認知神経科学とアート、基礎と応用・臨床が一体となったあらたな学問分野の創出、学術の変革が生みだされる。さらに、質感関連技術を人間の情報処理の正しい理解に基づいたものにしていくことで、学術の進歩のみならず、生成AIを含む情報技術のネガティブな側面による弊害を乗り越える科学的視点、たとえば、何を真実として信じるべきか、実物が持つ価値とはなにか、を社会に与えることができるはずである。

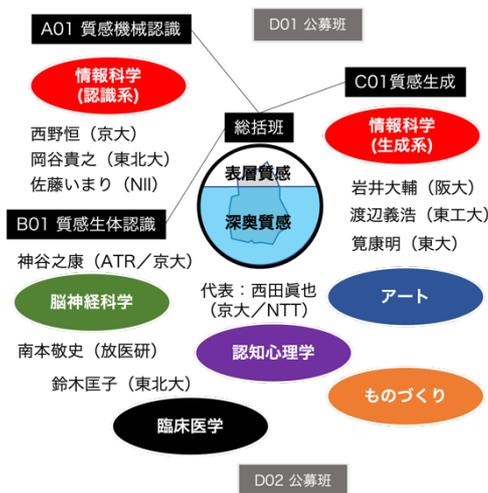


図 2: 研究体制

5 審査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。

審査所見では、キーワードである深奥質感の定義に関して、「計画研究ごとにブレが存在するので、より明確にした上で、研究を推進していくことが必要である。特に、アートから臨床まで網羅する研究項目 C01 で取り扱う質感の生成・編集は、それ以外の項目での定義と比べてかなり異質だと感じられるため、統一した目標に向かうように、有機的な連携が求められる。」との指摘を頂いた。

本プロジェクトでは、質感情報処理の背後に潜むさまざまな問題を対象としているために多様な軸で研究を進めているが、研究領域の開始にあたり、申請段階の深奥質感の概念をさらにブラッシュアップし、以下の3つを基本軸として深奥質感の定義を整理した。

- ① 容易に言語化できない質感。複合的であり、多くの場合マルチモーダルの質感。非実体的なヒトやモノの特性を含む。
- ② 感覚情報に基づいて環境と適切に関わるための世界モデルの構築、生態学的価値の計算、感情・情動誘発まで含めた質感情報処理、およびそれらに対する個人特性の影響。
- ③ 実物の持つ質感、本物と偽物の違い、芸術や匠が生み出す質感の本質。

異質性を指摘された C01 項目に関しても、以下に述べるように、①②③の深奥質感の定義に沿った研究を順調に進めており、他項目と共に統一した目標に向かっていていると考えている。

・岩井班(C01-1):実物の持つ質感を編集し、質感情報処理の個人特性の影響を探るために、眼前で実物の質感を変調して視野に与える拡張現実眼鏡の開発を進めている。さらに、現実潜む、人間の視覚では感知できない質感を可視化することの生態学的価値を探る研究を進めている。

・渡辺班(C01-2):実物の持つ質感を思いのままに操作し、本物と偽物の区別がつかないレベルの提示を可能とする光投影技術の開発を進めている。また、感情・情動誘発まで含めた質感に関する研究として、顔への投影技術による印象操作に関する研究を進めている。さらに、生来の視覚機能では捉えられない質感世界を実体上に可視化することで、人の認識行動の強化を図る。

・笥班(C01-3):実物の持つ質感およびその価値を探るために、素材の特性制御やセンシング技術の開発を通して、多様な質感を持つ実素材を介した情報提示やモノとのインタラクション手法の提案を行うと共に、それらの見た目や触感が引き起こす印象や情動の評価軸を探る研究を進めている。

C01 班が担当する生成・編集技術と A01 班が担当する認識技術は情報学的深奥質感研究の両輪である。さらに、生成・編集技術は鈴木班が目指す個人に合わせた質感環境の改善においても、重要な役割が期待される。

参考意見として、渡辺班(C01-2)について「拡張現実分野の研究者を研究分担者や研究協力者等として参画させた方が良いのではないか」との意見を頂いたが、渡辺班は、心理物理研究の西田班、拡張現実分野を専門とする岩井班や天野(公募)と研究協力者相当の連携をしており、さらにはセンシング技術を専門とする河野(公募)と班間連携をしている。研究業績も出ており、現在まで研究進捗にまったく問題はない。

また、審査所見として、班領域内連携に関して、「3研究項目それぞれの中の計画研究間の連携も、公募研究をうまく利用することなどによって、強化することが望まれる。」との指摘を頂いた。また、留意事項としても、「A01、B01、C01 それぞれの中の計画研究間の連携が明確ではないので、有機的なつながりを一層促進することが求められる。」との意見をいただいた。

多様な計画研究(及び下記に述べる公募研究)の有機的な連携を高めるための施策として、班会議を半年に一度のペースで開催し、班員間の情報交換を行っている。単に各班の研究発表を議論するだけでなく、領域全体に関わる以下のようなテーマに関して総合的な議論を進めてきた。

- ・動物実験研究における情報技術(コンピュータビジョンやVR技術)の活用
- ・価値・報酬・意思決定・情動に関わる神経科学の動向と、質感科学との融合
- ・Foundation model(生成AI、LLM)のインパクトと質感研究の方向性
- ・深奥質感が目指す革新的なメタバース技術

また、日常的な活動として、毎月開催する総括班連絡会議、領域メンバーが参加する Slack チャンネルでの意見交換、深奥質感ランチタイムセミナーの開催、Wet の会、領域コアメンバーの本音を聞く音声プログラム(「質感ラジオ」、<https://soundcloud.com/ckhuo8f8xb7n>)の制作、などを通じて、領域内の連携を促してきた。その結果、次のセクションで紹介するように、分野を超えた領域内の連携が進んでいる。

さらに、深奥質感の多様な側面(上記①②③)をより広い視点から探求し、計画研究間の連携を補強するために、公募班を採択した。その布陣は以下のようになる。

〈おもに①に関して〉

- ・マルチモーダル機械学習にもとづく質感技術:柳井啓司(画像・言語データ統合)
- ・マルチモーダル質感認識の工学的研究:田中充(食品風味可視化技術)、鶴木祐史(異常音検知)
- ・マルチモーダル質感認識の神経機構:岡本雅子(ヒトの脳内匂い表象)、眞部寛之(匂いから多次元的価値への変換回路)、村田航志(おいしさの快情動の神経基盤)、塩谷和基(おいしさを生み出す風味知覚)、白松知世(リズムの神経基盤)、伊藤哲史(音の生得的/後天的情動価値の符号化)、窪田慎治(アクティブタッチの神経機構)、山下貴之(触嗜好性を司る神経回路機構)

〈おもに②に関して〉

- ・質感を世界モデル・価値・情動に変換する神経機構:北西卓磨(海馬空間表象における質感の役割)、鮫島和行(価値変換の神経回路)、宮川尚久(情動的質感認知の神経回路)、川寄圭祐(質感への選好注視の脳活動)
- ・触り心地よさの認識と生成:岡本正吾(肌の触り心地)、楊家家(心地よい触感の神経機構)、渡辺哲陽(肌質感操作)
- ・質感受容者の身体状態と質感情報処理:安田正治(内受容感覚依存的な情動の誘発)、國松淳(呼吸と質感認知)
- ・受け手の多様性が質感処理に与える影響:熊崎博一(自閉スペクトラム症児の質感認知)、三浦貴大(視覚障がい者のための質感提示)、溝上陽子(肌質感認知の国際比較)

〈おもに③に関して〉

- ・本物に迫る質感の生成認識技術:岩崎慶(CGの質感表現の深化)、天野敏之(光線場の計測と投影)、平木剛史(形状・反射特性制御)、昆陽雅司(立体振動ディスプレイ)、伴祐樹(毛並みディスプレイ)、岡部孝弘(データ駆動能動光線空間による質感機械認識)、田中緑(画像機器に潜む深奥質感)
- ・本物感の認識機構:栗木一郎(知覚的ノイズ効果)、鯉田孝和(色グラデーションの質感)、永井岳大(質感の階層表現構造)、眞田尚久(質感運動知覚)、齋木潤(記憶に残りやすい質感)、菅生康子(顔質感認知の神経機構)
- ・芸術のもつ質感:木谷俊介(謡曲における幽玄の音響学的分析)、内藤智之(絵画芸術生成)
- ・匠の技:河野行雄(非破壊計測と匠の技)、野中哲士(工芸における身体技法)、渡邊順子(熟練看護師の触診技術)

公募班に参画により深奥質感研究のスコープが更に広がり、次項で述べるように成果も上がっている。

6 研究の進展状況及び主な成果

(1) 及び(2)について、計画研究及びそれと連携している公募研究ごとに、具体的かつ簡潔に記述すること。
(一つの計画研究及び連携する公募研究で2頁以内)

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

(2) 各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果について、(計画研究・連携する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。)

【A01-1 班】「実体・非実体深奥質感の計算機視覚の実現」研究代表者：西野恒（京都大学）、研究分担者：鄭銀強（東京大学）、延原章平（京都大学）

1. 研究目的と評価実施時までの進展

本計画研究は、実世界における物体や光景の質感の構成要素を視覚情報から抽出すべく、実体的 (tangible) または非実体的 (intangible) 質感の両者を知覚しうる計算機情報処理機構の実現を目指している。実体的質感に関して、単に物をその見え（見た目）から認識するという現在の計算機視覚の限界を突破し、一見明らかではないが、視覚情報から抽出されうる物体や環境にまつわる属性を推定するための手法、非実体的質感に関して、人間が暗黙に視覚より得ている物、人や場に対して働きかける上で有用な属性情報の顕在化のための研究を進めてきた。現在までに、偏光画像などを用いた新たな物体形状や素材の推定法、自由行動を行っている人間を捉えた映像からの視線行動の推定やカメラ群の較正、さらに死角領域の自動的推定など、実体質感および非実体質感を発現させる物体や人間の属性に迫る情報を視覚から求める新たな手法を数多く導出し、コンピュータビジョンやロボティクス分野における最難関国際会議および論文誌において10篇を超える発表を行ってきた。さらに、公募班 (D02-4 身体運動の誘発に関わる音楽の質感とその神経基盤) と密に連携し、変形するラットの体表面を画像列から推定するための撮影システムおよび数理モデルの導出をおこなった。本成果はコンピュータビジョンと神経科学をラットの行動観察の自動化および精緻化を通して橋渡しする分野横断研究によるものであり、領域会議における研究代表者企画から生まれた、本学術変革研究によってのみ実現し得たものである。

2. 計画研究の成果

偏光を用いた実体的質感の定量化 (西野・延原・鄭) 現実物体等の質感を定義する上で、その形状や反射特性を精確に定量化することが必須となる。画像からの3次元形状復元や反射特性推定は、周囲光源環境からの入射光が物体表面形状と反射特性によって作用された結果結像する画像から逆にこれらの構成要素を求める逆問題を解く必要があり、未だ困難である。本計画研究では、電磁波としての光の波面の傾き、すなわち偏光に着目し、特に自然光の偏光特性および物体表面における反射によって変化する偏光角度と強度を偏光画像を解析することにより、物体法線および反射特性を推定できることを示した。この原理に基づき、空の偏光分布を活用した屋外での一枚の偏光画像からの形状復元 (Ichikawa et al. CVPR2021) ならびに2枚の偏光画像を用いた物体の密な法線分布の復元手法を導出した (Fukao et al. CVPR2021)。これらの研究成果は共にコンピュータビジョン分野における最難関国際会議である IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) において2021年に発表を行っており、すでに計20件以上の引用がされていることからわかるように、偏光を活用した実物体属性解析に関する世界的にも先駆的研究である。

さらに、偏光を含め RGB 以外の光の属性を用いることにより、頑健に実物体の質感を直接的に決定する素材を同定する研究を進めた。特に自動運転や先進的運転支援システムへの応用を考慮した屋外での車載視点映像における密な素材認識を実現すべく、通常の RGB だけではなく、近赤外光および偏光を用いた素材認識手法を新たに導出した。このために、RGB ステレオ、近赤外カメラ、ならびに偏光カメラを組み合わせた撮影システムを構築し、全イメージングモダリティを同一視点に位置合わせした上で各画素について素材および物体カテゴリをアノテーションした新たな画像列データを撮像および整備した。さらに、物体と素材の相互依存関係を自動的にモデル化する深層学習ネットワークを導出し、このデータを用いて訓練し、高い精度で屋外環境の素材認識を行えることを実証した (Liang et al. CVPR2022)。

この研究成果も IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)において 2022 年に発表を行っており、データおよびコードの公開とともに多くのダウンロードと引用がされている。また、偏光カメラ自体の高精度化を目指し、学習データの自動生成により偏光カラー画像の鮮明化を達成した (Li et al. CVPR2023)。さらに、偏光情報を用いたガラスセグメンテーションや色恒常処理に対する物理的攻撃手法を初めて開発した (Li et al. 投稿中)。この研究成果に基づき、偏光に基づく計算機視覚の脆弱性を発見した上、保護手段の開発に取り組んでいる。

人の非実体的質感の定量化 (西野・延原) 人々を固定視点のカメラ等で捉え、撮像された映像からそれらの人々の意図を汲み取り、周囲環境における物や他の人との相互作用を紐解き、さらに全体として構成する場の雰囲気や空気まで理解するための基盤技術を整備することが本計画班の非実体深奥質感に係る研究の目標である。これに向け、人の意図を反映する視線の変化の視覚的理解を実現すべく、部屋の四隅に設置された固定視点カメラからの 3 次元視線方向推定を実現した。これは、眼の見え方に依存していた従来の数ある手法とは異なり、遠くからでも正確に追跡できる体と頭の動きならびにそれらの連動を深層学習ネットワークを用いて学習することにより、視線方向を外挿するものであり、室内で自由行動をおこなう対象人物の視線行動を正確にとらえる初めての手法である。本研究成果も IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)において 2022 年に発表を行っており、データおよびコードの公開とともに多くのダウンロードと引用がされている。また、人間の視覚の死角になっている空間領域を映像の中で自動的に検出する手法を導出した。これは特に自動運転や先進的運転支援システムにおいて事故抑止等に資する成果であり、特許出願した上で論文発表を行った。さらに、人間の体そのものをカメラ間で対応が直接取れ (あるカメラから見た右手は、他のカメラから見ても右手) かつ向きが一意に決まる (体躯の正面方向など) 関節点で構成され、さらに関節点間距離が変化しない較正物体として定式化することにより、自由行動をおこなう人物を観察するだけで複数の固定視点カメラ間の位置関係を求めることができる (外部キャリブレーション) ことを実証した。この研究成果により、非実体質感を捉える室内撮像システム等を簡便に構築することができ、本研究課題のみならず、老人の見守りなど広い応用が期待できる。本研究成果はロボティクス分野の最難関会議で論文発表を行った (Lee et al. IROS2022)。

連携する公募研究の成果

D02-4 身体運動の誘発に関わる音楽の質感とその神経基盤 (研究代表者: 白松和世 東京大学) では、音楽が誘発するラットの身体同期反応の神経メカニズムを解明するとともに (Ito et al, Science Advances, 2022)、同期反応が生み出す社会的結合の効果を検討している。この班と連携し、ラットの体表面モデルの導出および構築をおこなった。脳神経科学研究を代表として、ラットの行動観察は多くの科学的知見をもたらしてきた。映像に捉えられたラットの行動を自動的に解析するために、深層学習を用いた骨格推定などが提案されてきた。人間とは違い、ラットの骨格を推定することは難しい。人間の関節点は見た目から推測可能であるため、大量のデータを用いることにより、視覚的特徴を学習して骨格を推定できる。それに対して、ラットは体の大部分が毛で覆われているため、関節点を捉えることが難しく、画像から推定できるのは前脚や後脚、顔などの非常に限られた部分だけである。限られた特徴点から推定する骨格には曖昧さが残る。加えて、多個体が密接する場合は、体表面の様子が分からなければ、交錯する個体同士の体位を区別することが困難である。よって、より正確に骨格推定をするためには、見えている体表面を捉えることが重要である。さらに、骨格だけでなく体表面にも行動理解につながる重要な情報がある。例えば、個体同士が身体を接触させることは安心感やストレスを与える重要な意思疎通の手段であるが、骨格だけでは接触状況が分からない。体表面を観測することで初めて、体の接触を捉えることが可能となる。しかし、ラット体表面は特徴がないため、体表面座標を抽出し追跡することができない。本研究では、検出可能な脚などの座標から体表面座標を推定する 3 次元モデルを導出した。体表面にビーズをつけたラットを、新たに設計した多視点撮影ドームで撮影し、多視点幾何を用いることで体表面座標を取得した。これらの体表面座標と脚などの体位座標の主成分分析により変形可能な 3 次元体表面モデルを導出し、何も特徴点のないラットの検出可能な体位座標から体表面を推定した。実個体を用いた実験を通し、検出可能な脚などの座標からモデルによって体表面座標が推定可能であることを示した。本モデルは、映像から自動的に体表面を含めたラットの姿勢を求められるため、より深い行動解析につながるだけでなく、コンピュータグラフィックスなど応用が多岐にわたると期待できる。

【A01-2 班】「深奥質感のマルチモーダル深層モデルの確立」代表者：岡谷貴之（東北大学情報科学研究科）、分担者：鈴木潤（東北大学データ駆動科学・AI 教育研究センター）、菅沼雅徳（東北大学情報科学研究科）

研究目的：質感を始めとする多様な抽象概念の表現（＝深奥質感）を、人と同じように認識できる AI システムの実現を目指している。深層学習の発展により、AI 関連技術は近年劇的な進歩を遂げたが、可能になったのは“cognitive automation”（＝人の認知過程の自動化）に過ぎない。質感は認知の内容を言語化・定量化しづらく、教師あり学習のためのラベル付けが困難であるため、同じアプローチでは目標は達成できない。また質感の認知は文脈に依存するため、物体認識のようなスタンドアロンのタスクとしては取り出すことができず、究極的には包括的画像理解の問題として捉える必要がある。これらの課題を解決するため、「人に近い水準で画像理解を実行できるニューラルネットワークの内部に、多様な質感概念の表現が自動的に獲得される」という仮説に基づき、①画像理解のタスクの実行性能を現在より一層向上させた上で、②ネットワーク内部の表現の抽出を行う方法を確立し、冒頭の目標を達成する。

評価実施時までの進展：【計画研究】上述のように、画像理解 AI（＝画像と言語を操るマルチモーダル AI）の研究性能向上と、ネットワーク内部の特徴表現空間の分析に、それぞれ多方面から取り組み、以下に述べるような成果を得た。

1. 画像理解 AI の性能向上

・ 比喩表現を用いた画像記述手法の研究（岡谷）

従来の画像記述（＝あるシーンの画像を入力にそのシーンの説明文を生成するタスク）の研究では、主に事実の簡潔な記述が目標とされた。人間は、説明するのに適切な言葉が見当たらない場合、比喩的な表現を使うことで視覚情報を効果的に言語化できる。そのようなことが可能な画像理解 AI の実現を目指した。この問題は過去に類似研究がなく、まず問題を定式化し、次にベンチマークとなるデータセットを既存の複数の画像記述データセットの中から比喩表現を含む記述例を抽出することで構築した。また、記述モデルの性能評価が既存方法では難しかったため、OpenAI のマルチモーダルモデル CLIP を用いた方法を開発した。今後の研究のベースラインとなる記述手法も開発し、今後の研究の道標となる研究成果である（Tran, Okatani, ACCV2022）。

・ 高性能かつ高効率な画像記述モデルの研究（岡谷・菅沼）

従来よりも高性能かつ高効率な画像記述 AI を実現すべく、その DNN アーキテクチャを新たに設計した（GRIT と命名）。GRIT の技術的な核は 2 つあり、1 つは画像特徴の抽出方法である。GRIT は入力画像から、物体検出を行なって得た物体の各領域から取り出した画像特徴と、画像全体から取り出した特徴を融合して用いる。さらに従来手法では画像特徴抽出は CNN を用いることが多かったが、全てをトランスフォーマーで設計し、記述生成部分とあわせて全てをトランスフォーマーとするモノリシックなデザインとした。GRIT のもう 1 つの核は、その学習方法にある。上のデザインにより、推論に要する計算量が小さく抑えられ、また入力画像から生成する記述までを一気通貫で学習できるようになったことで、画像特徴の抽出性能が向上し、記述の精度が向上した。標準ベンチマークテスト COCO captions において、世界トップクラスの記述精度を、従来手法の 20 分の 1 の学習データしか用いることなく達成しつつ、推理に要する計算時間を 5 分の 1 程度まで短縮した。最近の関連研究分野では、学習を大規模化して性能向上を果たすことがトレンドとなっているが、要求される計算機資源が莫大になり大学の研究室で研究できるレベルを超えてしまっていた。GRIT はこのトレンドを覆す意味でも意義ある成果である（Nyugen et al., ECCV2022）。

・ 言語で指示された作業を行う AI エージェント（岡谷・菅沼）

AI が質感を理解させるには、画像認識や記述といった受身のタスクだけでは十分ではない。深い画像理



図. 2つの画像記述 AI の実行例. (a) 比喩表現を用いて絵画の印象を記述した結果. (b) GRIT による一般的なシーンの記述.

解を可能とするために、理解に基づいて行動までを可能な AI を研究している。1つの形として、自然言語の指示によって作業を行う AI エージェントを開発した。エージェントが空間を見る視野をなるべく広く取るとともに、作業の指示を与える言語情報を 2 回解釈する DNN アーキテクチャを考案し、これによって高い作業成功率の達成が可能となった (Nguyen et al., IJACI2021)。

2. 学習で獲得される潜在特徴・表現空間の理解

・画像特徴の自己教師学習の研究 (岡谷・菅沼)

近年、画像特徴の学習は自己教師学習を用いた事前学習による方法が一般化しているが、そこで獲得される特徴表現空間の分析はあまり進んでいない。これに対し理論的な分析を行なった。自己教師学習手法には 3 つのグループが知られるが、そのうちの 1 つである「負例を用いない自己教師学習手法」について、その有効性がどこから由来するものかを明らかにした (Liu et al., NeurIPS2022)。

・質感語データセット生成と言語モデル等による理解の検証 (鈴木)

深奥質感のこれまでの研究では質感を表現する言葉(単語など)については明確に定義してこなかった。あるいは、特定の少数の質感語のみを対象として実験を実施してきた。そこで、質感語を可能な限り網羅的に収集し、質感を表す用語とそうでない用語の境界をより明確にすることを目的にクラウドワーカーを活用して、画像から想起される質感や、特定の物体の単語が固有に保持すると考えられる質感を収集し、質感語の集合を実験的に構築した。収集したデータは専門家の力を借りて英語化し、質感語の言語横断的な分析ができるようなデータセットに拡張した。現在、質感判別タスクを構築し、昨今の言語モデルや視覚と言語の融合モデルが質感を理解しているかを検証しているところである。

【連携する公募研究】

計画班 A01-2 では、上述の通り質感を理解できる AI の実現を大目標に掲げているが、そのステップとして、画像理解 AI の性能向上と、画像理解 AI が学習によって得た特徴表現空間の分析という 2 つのテーマに取り組んでいる。さらに目標の達成をより確かなものとするため、画像を生成する AI を研究する D01-4 班と、人がどのような画像の成分(特徴)に質感を感じているかを、AI を共通の道具として研究する D01-6 班と連携を進めている。これら公募班は、A01-2 班と同じ目標を共有しつつ異なる取り組みを実施し、目標達成への手段においてお互いを補完する位置付けである。

・D01-4 質感と形状の分離による奥深質感画像分析・生成のためのマルチモーダル深層学習モデル (柳井)

画像質感特徴量と言語質感特徴量の共通質感埋め込み空間を構築し、画像と言語の双方向検索(認識)を実現し、質感埋め込みベクトルと画像の形状特徴量を融合させることで、新たな質感を持つ画像生成を実現する深層学習モデルの提案を目標とした。これに対して、次の 3 点の研究成果を得た。クロスモーダルレシピデータセットを用いて、言語と画像双方から埋め込み可能なレシピ情報空間中のレシピベクトルと、食事の形状特徴を融合させることで、任意形状のレシピ情報に基づく食事画像生成を実現した。事前学習済の画像・言語のクロスモーダル巨大モデル CLIP を用いて、画像の質感操作を実現し、その操作の度合を自由に制御する方法を提案した。微分可能レンダラーを用いたフォント生成に対して CLIP を適用して、任意の言葉に対応したスタイルをもつフォント画像の生成手法も提案した。

・D01-6 人工知能と逆相関法を用いた絵画芸術作品の魅力を決める画像特徴の定量的検証 (内藤)

絵画アートの魅力度判断において心的テンプレート仮説が成立するかどうかを検証し、心的テンプレートを画像として可視化することを試みた。

【A01-3 班】「アートに含まれる質感情報の情報学的解析」研究代表者：佐藤いまり（国立情報学研究所）、研究分担者：日浦慎作（兵庫県立大学）、佐藤洋一（東京大学）、平論一郎（東京藝術大学）

1. 研究目的と評価実施時までの進展

本課題では、美術品、工芸品、工業製品において再現されている光学特性を解明し、我々が視覚を通して感じる質感と物体が有する光学特性の解析を進め、質感を構成する幾何・光学特性の計測と評価技術の創出を進めてきた。美術館の協力のもと、肌質感で著名な藤田嗣治の油彩作品における質感表現の分析を進め、芸術の専門家の知見と過去の破壊調査結果により得られた情報をもとに肌質感を生む構成要素となる色合いや顔料のキャンバス上の分布を推定する手法の開発を進めた。また、反射特性の分離計測手法やその効率化、素材識別手法の開発も進展があり、像の認識・理解シンポジウム MIRU2021/2022 において MIRU 優秀賞や MIRU デモ発表賞を受賞した。

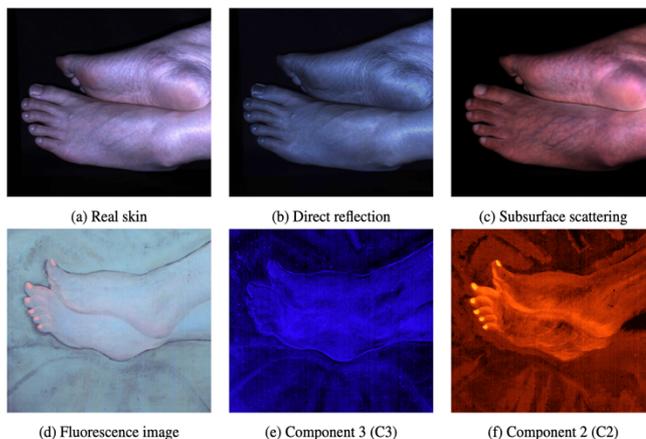
2. 計画研究の成果

絵画作品の質感表現の解明「レオナルド・フジタの肌質感解析」（佐藤いまり・平・佐藤洋一）

レオナルド・フジタ（藤田嗣治）は 1920 年代、エコール・ド・パリの時代にフランスで活躍した西洋画家で、「乳白色の肌」と称される透明感のある柔らかな絵肌の表現で世界的に評価された人物である。藤田がどのような画材を用いたかについては破壊調査等である程度明らかになっている（複数の白色顔料の成分が発見されている）が、それらをどのように用いて絵画を描いたか、その意図については十分に解明されていない。本研究では、最新の光学計測技術を用いて、絵画表面における光学特性を明らかにすることを旨とする。我々はこれまでに、微弱な紫外線光源およびハイパースペクトルカメラを用いて絵画の蛍光発光スペクトルを観測し、それらをいくつかの主要なスペクトルに分離することによって、複数の画材の分布を明らかにした。

従来の反射スペクトルを観測する方法では、分離対象が白色画材であるために反射スペクトルの差異が小さいことと、分離モデルが非線形であるために問題が複雑になることから、繊細な白色の使い分けで表現される藤田作品への適用は困難であった。我々は、過去の破壊調査によって発見された白色画材が紫外線を照射した際にそれぞれ異なる蛍光発光スペクトルを示すことと、蛍光発光の分離問題が線形モデルで表現できることを利用して、より正確で安定な分離アルゴリズムを開発した。

解析結果の一例として、右図(e,f)に示すような画材の分布が得られた。(d)は計測した絵画の蛍光発光スペクトル画像を RGB 表示したものである。(e)と(f)の分布は相補的になっており、特に(f)は肌の厚みのある部分に重点的に現れているように見える。光学特性の比較として、表面反射と表面下散乱を分離する手法を人の肌に適用したものが(a-c)である。興味深いことに、肌の表面反射(b)と絵画の



青色発光成分(e)、表面下散乱(c)と赤色発光成分(f)の分布および色に高い類似性が見られた。この結果は、藤田が肌の三次元的な形ではなく、散乱のような光学特性を絵画面上に再現することで、立体感のある表現を行っていた可能性を示唆している。本研究の解析結果は、美術分野の専門家と議論した上で、視覚科学における主要なジャーナルである Journal of Vision に投稿済みであり、現在査読中である。

反射成分分離装置（日浦） シーンからの反射光には、光源からの光が物体表面で一度だけ反射した直接反射成分と、物体間を 2 回以上反射する相互反射や、物体内への光のにじみである表面下散乱などの間接反射成分が含まれる。これらを分離することで物体を構成する素材の光学特性や内部構造の解析が可能となるが、従来の手法は全て計算機内の画像処理により行うものであった。それらに対し本研究課題では、鏡やレンズなどの光学部品のみにより、反射成分分離結果を肉眼で観測できる装置 EpiScope を開発した。当該研究は画像の認識・理解シンポジウム MIRU2021/2022 において MIRU 優秀賞や MIRU デモ発表賞を受賞した。

反射特性計測の効率化（日浦） 布や革、木目など複雑な質感をもつ物体は、その見た目を CG により正確に再現することは容易ではない。これらの物体は、光の反射や透過に加え、表面下散乱、表面の凹凸による微細な影など、複雑な現象が複合しているためである。そこでこのような物体の再現方法として、双方向テクスチャ関数（Bidirectional Texture Functions : BTF）が用いられる。しかし、この計測には長時間を要する上、データ量も膨大になるという問題がある。本研究課題では、物体の反射特性に応じてサンプリング点の配置を適応的に制御することで必要な画像数を絞り、効率的に BTF を取得する手法を開発した。実験の結果、等間隔にサンプリングする場合と比較して最適配置を行ったものは質感の再現度が向上することがわかった。これに伴い、質感の再現度を保ったまま必要な撮影画像枚数を削減できる。

全偏光特性の計測による素材識別（日浦） 画像を用いた素材の識別では、高度な印刷技術により複製された偽物を本物と区別することができないことがある。しかし木や布などの方向性を持つ物体は、それを構成する分子の向きに偏りがあり、それに伴い特異な偏光特性を有する事が多い。本研究課題では利用されることが多い直線偏光に加え、円偏光の照射と計測も行うことで、複屈折反射特性を含む全偏光反射特性を計測する装置を開発し、それにより素材の高度な識別や真贋判定を行うことができる手法を開発した。

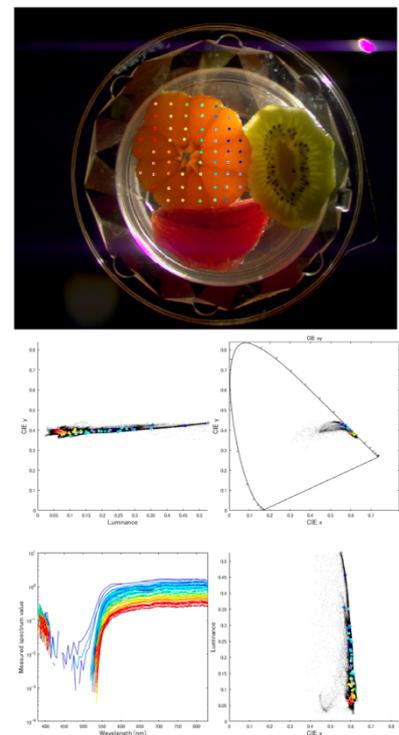
連携する公募研究の成果

ものづくり現場の非破壊検査における匠の技の科学的理解と視覚増強への応用展開（河野行雄）

本研究で用いるフレキシブル広帯域工学カメラの光学特性の確認し、実応用に向けての問題点およびキャリブレーション手法を検討した。

色素濃度による色変化解析（鯉田孝和）

色度情報の色空間を二次元で表現した CIE xy 色度図は、人間の視覚システムに基づいて、色相を可視化した標準的なモデルで、白色点からの方位が色相に対応し、等色相を色度図上に表示すると曲線になることが知られている（Abeny 効果）が、色相の変化が曲線となるメカニズムは判明されていない。そこで、Abeny 効果は色素濃度による物理的な色変化が反映された現象であるという仮説を、分光スペクトルおよび分光画像を用いて解析・検証を行った。Abeny 効果に対応する色相変化が実物体において再現されるかを確認するために、透明液体（6 種の色の付いた透明な飲み物）中の光路長を変化させた際の分光吸収スペクトルと色相を測定・解析したところ、液体の濃さに依存した輝度変化はべき乗計算で再現できないが、色相変化はべき乗計算のみで再現可能であることが分かった。容器中の透明液体、半透明な物体（フルーツやいくらなど）の空間的な色度分布を確認したところ、光の散乱や相互反射の影響で、複雑な色度の変化を含む色相分布も存在したが、撮影対象の形状に依存して試料中の光路長が異なることで、同一の単色対象内の色相変化がべき乗計算のみで再現可能である状況を確認した（右図）。



【B01-1 班】「3次元質感の脳内表現の解明」研究代表者：神谷之康（国際電気通信基礎技術研究所）、研究分担者：土橋宜典（北海道大学）

1. 研究目的と評価実施時までの進展

リアルな外界の認識は、物体表面の見えだけではなく、その背後にある3次元世界の実在感や感情を伴う。脳は、知識や身体状態と組合せて外的世界をモデル化することで、リアルな質感を生み出していると考えられる。本課題では、大規模データで訓練した深層ニューラルネットワーク（DNN）モデルと脳の情報表現の相同性を特徴づける方法を開発しながら、DNN情報表現を介した脳内質感情報を解読する研究を進めてきた。また、脳情報との統合に向けた、コンピュータグラフィックスによる質感表現技術の開発にも取り組み、形状モデリング、反射・散乱の表現、音響効果の利用、照明効果、流体の表現など、CGによる映像表現に関する研究を行った。これらの研究成果は国内外の論文誌や学術会議にて発表している。

2. 計画研究の成果

DNNと脳の階層的類似性の定量化（神谷） DNNモデルをヒトの脳との階層的類似性の観点から評価するため、脳活動から個々のDNNユニットの活性度を予測し、階層的対応関係を定量化する指標Brain hierarchy (BH) scoreを提案した。さまざまなアーキテクチャを持つ29個の事前学習済みDNNのBHスコアは画像認識性能と負の相関があり、最近開発された高性能DNNは必ずしも「brain-like」ではないことがわかった。また、比較的単純なフィードフォワードアーキテクチャと幅広い空間統合が脳の階層構造に重要であることが示唆された。この結果は、脳内モデルに対応するDNNモデルを構築する指針となるものである（Nonaka et al., iScience, 2021）。

脳からの3次元構造の再構成（神谷） これまでの2次元画像再構成手法を3次元に拡張するため、画像から立体を出力するDNNモデルの中間層と脳活動の対応関係を調べた。一部のDNNについて、脳活動から中間層をよく予測できることがわかった。また、2次元画像を見ている時の脳活動から3次元知覚像を再構成する予備実験を行い、大まかな3次元形状を再構成できることが明らかとなった。

感情の意味空間（神谷） 感情と表情の関係についてのこれまでの研究では、6つの基本感情と典型的な顔のポーズに焦点が当てられており、その限界が議論されてきた。われわれは、2,185本のビデオに対する45,231人の表情反応をウェブカメラで取得し、DNNによる表情認識結果と感情体験の自己報告とを対応づけた。その結果、感情と表情に共通する多数の次元が存在し、文化間で共通性があることがわかった（Cowen et al., 投稿中）。また、感情語を大規模画像言語モデルの表現に変換して、画像の再構成プロセスに付加する手法により、被験者が体験する感情を反映した画像再構成の開発を行った。顔画像を用いた検証実験では、一部の表情について感情が反映されるという結果が得られたものの、全体的には十分な効果は得られなかった。

流体の質感表現（土橋） 流体の質感は微粒子による光の散乱や吸収などの光学的特性と微粒子の密度分布に加え、流れの乱れを表す乱流の程度が大きな影響を及ぼす。しかし、乱流を表現するためには高解像度での数値流体解析が求められるため、計算コストが高くなる。このことは、目的の質感を表現する際に大きな問題となる。目的の流体の質感が得られるまで、乱流に関するパラメータをさまざまに変更してシミュレーションを繰り返す必要があるためである。そこで、低解像度のシミュレーションにより得られた煙のデータに対して、後処理により高解像度の乱流成分を付加する手法を開発した。低解像度のシミュレーションは高速に実行できるため、目的の動きと質感を持つ映像を効率的に生成できる。この研究成果は、CG分野における世界最難関の学術会議SIGGRAPH 2021にて発表した。本研究の延長として、低解像度と高解像度のシミュレーションを組み合わせた効率的なシミュレーション手法を国内の学術論文誌（英語）にて発表した。現在、実写映像から乱流のパラメータを推定する逆問題に取り組んでおり、その初期的な成果は国内の学術会議にて発表した。このほか、水の表現について、画像および音の合成に関する研究を進め、国内外の学術会議にて発表した。

CG映像表現（土橋） その他、3次元情報や画像情報に基づくCG映像表現について、基盤的な研究

にとどまったものの、一定の成果を得ることができたものについて以下に列記する。1) 建築物や結晶に関して、それらの形状の潜在変数を特定し、さまざまな形状を自動的に生成できる手法を開発した。2) CG キャラクタの表情合成に関して、2次元スケッチから3次元キャラクターの表情を合成する手法を開発した。3) 物体の質感表現に関して、キズを伴う透明物体の反射・透過光の写実的な表現手法や実写映像から半透明物体の散乱パラメータを推定する手法を開発した。4) 屋外における質感表現に関して、空や霧の表現手法について研究した。5) 音の利用に関して、前述の水の音の表現に加え、音楽情報に基づく照明映像の合成手法を開発した。6) 画像処理による質感操作に関する研究を実施した。

連携する公募研究の成果

匂いの脳情報業限 (岡本雅子) リアルな外界の認識には、視覚以外の感覚モダリティからの情報も重要である。このうち匂いは、甘い、フルーティー、快いなど様々な「感じ」つまり質感を与え、ヒトが素材の状態(例:果物の熟度、リネンの清潔さなど)に関する情報を得るのに寄与している。しかし、ヒトの脳において、末梢からの嗅覚入力匂いの質感へと変換される経時的な過程は、未解明な点が多い。本研究では、ヒトの脳において嗅覚情報が質感へと変換される過程の時間的側面を明らかにすることを目的とし、様々な質感を持つ匂いに対するヒトの脳の反応を、ミリ秒単位の時間分解能を持つ脳波計で計測した。まず機械学習を用い、嗅覚誘発脳波の時空間的パターンから、呈示した匂いの種類を判別する解析を行った。その結果、匂いの種類は、匂い呈示100ミリ秒後から統計的に有意に判別でき、約350ミリ秒後に最大となること、その脳における信号源は100ミリ秒後において一次嗅覚野を含む領域に、350ミリ秒後において2次嗅覚野原を含む領域に推定されることが示された。さらに、匂いの判別成績から脳における匂い表象の類似度構造を推定し、主観的な知覚との関係を表象類似度分析(Representational similarity analysis)により調べた。その結果脳における匂い表象は、匂い呈示約350ミリ秒後から匂いの不快さと、約500ミリ秒後から匂いの快さ及び、匂いの主観的な質(果物のような、花のようななど)と有意に相関すること、これらの脳における信号源は、感情や意味をつかさどる脳の領域に推定されることが明らかになった。これらの結果から、ヒトの脳における匂いの質感の表象は、匂い呈示後約350ミリ秒から生じ、不快さ、快さ、主観的な質それぞれに異なる時間的経過を示すこと、匂いの質感が生まれる過程では嗅覚野だけではなく感情や記憶に関わる脳の領域が関与することが示唆された(Kato et al., Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2022)。

コンピュータグラフィックスによる質感表現 (岩崎慶) 計画研究班B01との連携として、コンピュータグラフィックスによる質感表現の研究を行なった。具体的には、1. 人の肌や大理石に代表される、表面下散乱を考慮した半透明材質の高精度かつ効率的な画像生成技術の開発、2. キズを伴う透明物体の質感表現(計画班研究分担者との共同研究)、3. 髪の毛や毛皮の質感を制御するパラメータの推定の3つの研究を行なった。表面下散乱を考慮した画像生成では、輝度を計算するシェーディング点の周囲で、双方向散乱面反射率分布関数に比例した距離で点をサンプリングする必要があり、この計算コストが高いことが知られていた。本研究では、半透明材質を構成する三角形メッシュを適応的に分割し、低コストな一様サンプリングを行うことで、所望の相対誤差以内となるようにサンプル点を生成する手法を提案し、権威のある国際論文誌であるIEEE Transactions on Computer Graphics and Visualizationsに掲載された(K. Nabata and K. Iwasaki, 2022)。金属やガラス表面には加工や日常生活での使用を経て細かい傷がつく。金属表面での傷による反射分布(BRDF)を考慮する手法は提案されていたが、ガラスの様に光が透過する誘電体表面の傷を考慮した質感表現手法は提案されていなかった。我々の研究グループでは、透明物体についたキズで反射・透過する光のBSDF(Bidirectional Scattering Distribution Function)を前計算することで、傷ついた透明物体をレンダリングする手法を提案した。髪の毛内部の光の減衰係数やキューティクルの粗さといったパラメータに関する勾配画像を計算する微分可能レンダリングを用いて、画像からパラメータを推定する手法を提案し、難関国際会議SIGGRAPH ASIA 2022 Technical Communicationsで発表した。

【B01-2 班】「質感から価値への脳内変換機構の解明」代表者：南本敬史（量子科学技術研究開発機構）、分担者：小松英彦（玉川大学）、網田英敏（京都大学）、村田航志（福井大学；R5 年度より参画）

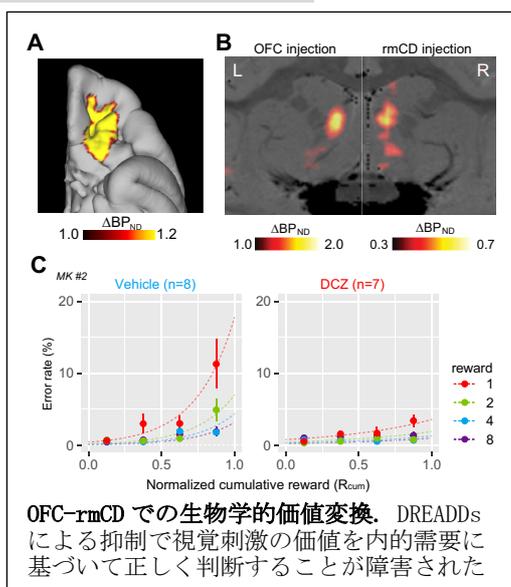
研究目的：私たちヒトは多様な感覚情報の価値を評価するにあたって、生物学的な欲求、学習・経験、環境、文脈、感情などによる影響を受ける。B01-2 班は、高次感覚野とこれら複数の価値システムが相互作用することにより、①感覚情報が生態学的価値情報に変換される一方、②複数の価値システム同士をつなぐ神経ネットワークとモノアミン系の作動により変換結果が統合・変調されるという作業仮説を立て、これを検証することで、深奥質感認知のコアをなす生態学的価値計算とその変調の仕組みの理解を目指すことを目的とした。中間評価時までには①化学遺伝学ツール(DREADDs)を用いた複数の価値システム脳領域への介入を行い、その価値計算への影響を神経活動と行動との両面で検証を開始し、②薬理的な操作介入による価値変調の仕組みを理解、遺伝学的ツールを適用した操作・計測実験系を立ち上げる。最終的に領域期間内に価値情報変換・変調機構の統合的な理解を目指す。

評価実施時までの進展：【計画研究】①前頭眼窩皮質と吻内側尾状核の相互作用による内的欲求に基づく価値、すなわち生理学的価値変換機構として働きなど、価値変換システムの一部を明らかにした。また、複数の価値システムと高次感覚野との連関について調べる実験系を確立し結果が得られている。②変調の仕組みについては、ドーパミン・セロトニン神経機構それぞれについて薬理介入による価値変容を明らかにするとともに、遺伝学的ツールによるドーパミン放出の計測やセロトニン神経活動操作についての全く新しい実験系を立ち上げ、すでに有望な結果を得ている。また、価値システムに伝えられる質感情報が視覚皮質でどのように作り出されるかについても、新たな知見が得られつつある。

1. 価値システムと高次感覚野との相互作用による質感—価値変換の並列処理機構の解明

・前頭眼窩野—吻内側経路における生理学的価値変換（南本）

好きなリンゴを満腹まで食べると、しばらくは好きではなくなる。このような視覚刺激の価値が生理的欲求の変化に伴って変化する生理的価値システムの一つとして、腹側視覚皮質から入力を受け取る前頭眼窩皮質(OFC)とその投射先の一つである吻内側尾状核(rmCD)との神経連絡に着目した。2頭のサルはOFC, rmCDに左右交差する形で抑制性 DREADD を発現させ、2領域間の連絡を一時的に遮断する実験を実施した。これらサルに4種類のジュース量と連させた視覚刺激の価値判断を行わせたところ、通常は獲得ジュースの総量が増え満足するに従い、拒否反応する試行の割合が増大するが、DREADD アゴニスト投与により、この変化が消失した。この結果から視覚刺激の価値を内的需要に基づいて正しく判断・行動する生理的価値変換においてOFCとrmCDの神経連絡が必須の情報処理をしていると考えられる(右図)(Oyama et al., JNS 2022)。



・体性感覚野の操作とネットワーク活動への波及・機能イメージングと DREADD の融合（南本）

機能MRI (fMRI) と DREADD を組み合わせた、サル体性感覚野(SI)の抑制により、巧緻な手指運動の障害が引き起こされる背景に、SIと直接・関節的に結合がある頭頂葉の複数の領域を含む物つかみネットワークの反応性の減弱を認め、行動変容と対応したネットワーク変容を捉えることができた(Hirabayashi et al., Neuron2021)

・前頭眼窩野—扁桃核経路における感情価値変換（南本）

fMRI 計測によりサルは情動性音声に強く応答する領域として前頭眼窩皮質(OFC)を見出し、その領域に抑制性 DREADD を発現させた。OFC 抑制により、叫び声などの情動性音声で鼻の温度が低下する情動反応が消失するとともに、OFC と解剖学的結合がある扁桃体中心核(CeAmy)などの領域をつなぐ顕著性ネットワーク内の応答が軒並み減弱した。その神経基盤として、CeAmy の神経活動から読み出された感情価値の神経情報がOFC抑制で減弱する結果を得ており、OFC-CeAmy 経路が感情価値変換システムとして機能している可能性を示唆された。

・高次視覚野における質感情報生成（小松）

サルの下頭側皮質で見いだされた光沢選択性ニューロン存在領域へのトレーサー注入による神経結合の解析、および微小電気刺激とムシモル注入により光沢識別行動への影響を解析することで、下頭側皮質

内で複数の小領域から成るネットワークの働きで光沢情報が作られる可能性を示唆する結果が得られた (Baba et al. Cerebral Cortex Commun 2021; Komatsu et al. Brain Struct Funct 2021) .

・脳内価値情報と質感との関連を紐解く革新的パラダイムの開発 (南本・領域内共同研究)

A01-1 西野班、C01-1 岩井班と共同し、サルを対象とした双方向性没入型視覚提示システム (サル VR) の開発をすすめた。すでにサルが自主的に豊かな VR 環境を探索するなど、既存の報酬制御の枠から脱却した革新的なパラダイムとして、脳内価値情報と質感との関連を探索できる可能性を見出した。

2. 価値システム間をつなぐ神経ネットワークとモノアミン系の作動による価値統合・変調処理の解明

・ドーパミン伝達による価値変調システムの解明 (南本・網田)

サルドーパミン D₁,D₂ の2種類の受容体を定量的に薬理的に阻害したところ、視覚の価値情報から意欲への価値変換効率の悪化を引き起こし、それが阻害の程度と関係していることを見出した。これは、視覚などの刺激がもたらす価値を意欲に変換する際に、ドーパミン伝達が線形に変調する形で作用する神経機構の存在を示唆している(Hori et al, PloS Biol 2021). さらに、ファイバーフォトメトリー法を用いた蛍光ドーパミンイメージング法をサル脳に導入し、ドーパミン放出動態を高い時空間解像度で計測する革新的なシステムを立ち上げた。これを用いた計測によりドーパミン入力を受ける被殻と尾状核の2領域間で、予測と異なる視覚や体性感覚入力に対するドーパミンの応答が異なるという結果が2頭のサルで得られた(Gaoge et al., SfN2022)。このようなドーパミン応答の違いは、これらの2つの線条体部位のドーパミン伝達による価値変換機能の違いを反映している可能性が示唆され、引き続きこの実態を明らかにする研究を進める。

・セロトニン伝達による価値変調システムの解明 (南本)

ドーパミン同様、セロトニン受容体の PET イメージングと薬理阻害操作を行い、5-HT_{1A}、5-HT_{1B} の2つの受容体サブタイプを介したセロトニン伝達が、視覚刺激がもたらす価値やコスト情報への感受性を調節していることを明らかにした (Hori et al., BioRxiv2023)。この価値変調が生じている脳部位を探索すべく、背側縫線核と正中縫線核の2つのセロトニン神経起始核のそれぞれにセロトニン神経特異的に抑制性 DREADD を導入した4頭のサルを作出した。セロトニン神経の2経路それぞれの抑制により視覚刺激に基づく価値判断課題において全く異なる行動変容を生じることが明らかとなった。

【連携する公募研究】①②に関係し複数の感覚モダリティーと価値システムとの連関について神経科学研究を進める公募班と積極的に連携し、領域のコアテーマとして生態学的価値計算の脳内実装の実態や身体情報による質感情報処理変調について統一的な理解を進め、以下の成果が得られた。

・D02-9 おいしさから紐解く快情動への身体反応とその神経機構 (村田)

価値判断に含まれる欲求と快感という異なる側面の切り分けるため、ラットが好物であるチョコレートを食べる時に生じる特徴的な超音波音声を見出した。計画研究と密接に関係するため R5 年度より計画班に参画し、この音声発声に関与する神経系の介入操作と身体性反応の変化を探索する予定。

・D02-19 化学遺伝学操作による情動的質感認知の解明 (領域内共同研究・宮川/南本)

サルの扁桃核外側部(BLA)を DREADD を用いて賦活したところ、恐怖顔などの情動刺激に対する瞳孔の情動性反応を低下させるとともに、下側頭皮質(ITC)における視覚応答による情動の神経表現を減弱させた。この結果は BLA-ITC のフィードバック経路が情動価値変換を担っている可能性を示唆する。

・D02-2 呼吸による認知の揺らぎが与える質感への影響 (國松)

・D02-18 内受容感覚依存的な情動を伴う質感の神経メカニズムの解明 (安田)

D02-2 班は呼吸による質感認知変調の仕組みとして、独自に確立したサル呼吸計測法 (Kunimatsu et al., eNeuro 2022) を使い、吸息期は呼息期に比べて視覚情報処理が促進されるという結果を得た。D02-18 班は身体内部からの入力を受ける脳幹の外側腕傍核の神経活動が、心拍などの自律神経応答から推定される情動状態や、意思決定課題での情動性の行動パターンと対応することを明らかにした。これらは末梢由来の身体情報が外界世界の認知に作用する深奥質感の神経機構の一つとして重要な発見である。

・D02-17 匂いが多次元の価値を獲得する神経回路機構の解明 (眞部)

匂い刺激と様々な価値情報の連合による外界の匂いの脳内モデルを構築している嗅覚系の一つ、外側嗅索核(NLOT)に着目し、核内のニューロン種ごとに価値回路への情報分配を調整する機能を見出した。

・D02-16 多次元感覚情報から価値への変換様式と神経機構 (鮫島)

環境から経験に基づいて学習し習慣となっていく価値情報の抽出能力と大脳基底核の神経情報表現を調べるため、CV を用いた解析により行動学習中のラットの振る舞いの特徴的なパターンを見出した。

【B01-3 班】「脳損傷者における深奥質感認知の解明と質感技術の臨床応用」研究代表者：鈴木匡子（東北大学大学院医学系研究科）、研究分担者：中内茂樹（豊橋技術科学大学）

1. 研究目的と評価実施時までの進展

本研究では、深奥質感認知に関するヒトの脳のしくみを知るために、加齢や脳損傷による深奥質感認知の変化を中心に研究を進めてきた。瞳孔は入射光量だけでなく、視覚認知状態や情動など様々な要因で変化することが知られている。そこで、視覚的な深奥質感の変化を客観的に調べる方法として、Glare 錯視や絵画配色による瞳孔反応の変化を測定した。まず、若年成人、高齢者、認知症を含む脳損傷者を対象に、Glare 錯視による瞳孔反応を測定し、加齢、脳損傷による深奥質感認知の変化について検討した。また、深奥質感を特徴付ける価値判断と結びついた質感認知に関して、視聴覚特徴と選好の関係について、瞳孔反応を含めて研究を行った。さらに、難治性てんかん患者において、皮質電気刺激による視覚性・聴覚性質感認知の変化を検討した。連携する公募研究では、自閉スペクトラム症や視覚障害者における質感認知について研究を進めた。これらの研究成果は国内外の論文や学会にて発表した。

2. 計画研究の成果

Glare 錯視による瞳孔反応への加齢や脳損傷の影響（鈴木、中内）

神経疾患の既往のない高齢者 20 名（平均 73.9 歳）と若年者 22 名（平均 29.0 歳）、認知症性疾患である正常圧水頭症（NPH）の患者 17 名（平均 75.4 歳）を対象とし、Glare 錯視に対する瞳孔反応を測定した。その結果、若年群・高齢者群では Glare 錯視の効果がみられるのに対し、NPH 群では錯視効果は認められなかった。下位検定で Glare 刺激に対する対光反射量は NPH 群と若年成人群で有意差を認めた。現在、自覚的な輝きの認知（表層質感認知）と瞳孔反応（深奥質感認知）との関連について検討を進めている。

絵画配色に対する選好判断（中内）

深奥質感を特徴付ける価値判断と結びついた質感認知に関して、視覚特徴と選好の関係について調べた。絵画配色に対する選好を対象とし、平均色度（CIELAB 空間における a^* , b^* 値）を中心として、色相方向に絵画の色域を回転させた際の好ましさを実験的に求めた (Nakauchi et al., 2022)。刺激には分光画像計測された西洋画 10 点、日本画 10 点、Web より入手した西洋画 20 枚を用いた。原画 (C1)、空間スクランブル (C2)、20 枚の異なる絵画を混合した空間スクランブル (C3)、空間・色相スクランブル (C4) の 4 条件について、これらの画像に対する色相回転角度に対する選好を 4AFC (色相角を 0, 90, 180, 270deg 回転) によって計測した。絵画に対する専門的な知識を有しない日本人 45 名（平均 26.6 歳）、ポルトガル人 45 名（平均 19.8 歳）が参加した。その結果、絵画を事前に見たことがない場合でも、国籍、絵画のジャンルによらず、原画が最も好まれることが分かった。さらに絵画に記載された物体と想起される記憶色の影響を排除するために、絵画を小さなパッチに分割し場所をランダム化する空間スクランブル、および 20 枚の異なる絵画を混合した空間スクランブルの条件で同様の実験を行ったところ、原画配色に対する選好が再現された。この結果は絵画固有の色彩構造が配色に対する選好に関与している可能性を示唆する。そこで、配色選好に寄与した絵画の色彩統計量を特定するため、各画像の選好率と色彩統計量との関係を重回帰分析によって求めたところ、 L^*-b^* , a^*-b^* の相関および a^* の skewness が絵画の選択率に関与していることが明らかとなった。絵画の色分布に対する分析からも、色彩統計量は絵画ジャンルによらず共通した性質を持ち、自然画像とは異なっていることが明らかとなった (Nakauchi and Tamura, 2022)。

絵画配色の選好判断と瞳孔反応（中内）

若年成人 26 名（平均 21.4 歳）を対象に、静物画（花）、抽象画各 18 枚を用い、原画あるいは色相反転画像を呈示した際の瞳孔反応を測定した (Taniyama et al., 2023)。その結果、静物画、抽象画とも色相反転画像に対する瞳孔の縮瞳反応は大きいことが分かった。絵画の色相反転の違いが提示後 1 秒未満で瞳孔反応に現れることから、比較的早い段階で絵画配色に対する特徴量が抽出されていることが示唆され、その特徴量の候補が選好と関わりの深いいくつかの色彩統計量である可能性が考えられた。

音楽におけるテンポの選好判断（中内）

絵画同様、音楽においても作曲家と聴衆の間で普遍的な構造が共有され、それが選好と関わっている可能性を考え、作曲家が指定したテンポと聴衆が好むテンポの関係について調べた (Hine et al., 2022)。その結果、楽曲の馴染みの度合いに関わらず、参加者の好みのタッピングテンポが好みの音楽テンポに寄与していることがわかった。一方、音楽構成要素の寄与は楽曲への親しみによって異なることがわかった。絵画配色に対する選好とは異なり、テンポの好みは運動と記憶の両方に影響される可能性を示唆する結果であった。

難治性てんかん患者における皮質電気刺激による質感の変化（鈴木）

難治性てんかん患者では、焦点切除術の術前評価として皮質電気刺激による機能マッピングを行う。その際、視覚対象や聴覚対象の質感が皮質電気刺激によりどう変化するかを検討した。聴覚に関しては、右前頭葉弁蓋部内側の刺激で同一の音を聴いても自覚される音程が変化する現象が観察された (Osawa et al. 2023)。自覚される音の高低は刺激の予測性等の文脈によって変化した。視覚に関しては、左紡錘状回刺激により、線画の顔で目が強調されて感じられる顔特異的な変形視が誘発された。左側頭葉後部刺激では静止している対象が回転してみえる変形視が認められた (Kakinuma et al. 2022)。このように、特定の領域の機能低下により、受容される聴覚/視覚情報が質的に変化することが直接的に示された。

【連携する公募研究】

自閉スペクトラム症児の感覚処理評価研究から探る深奥質感認識 個人差の解明（熊崎）

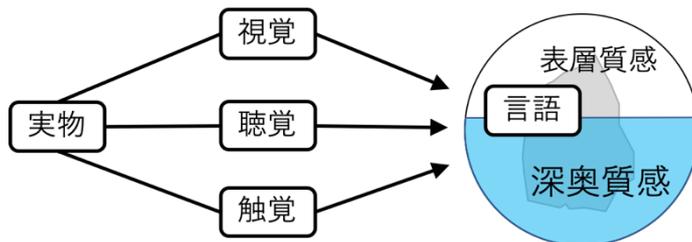
自閉スペクトラム症者（ASD 者）の多くは、感覚過敏や感覚鈍麻といった感覚処理の特異性を示すことが明らかになっており、背景には質感認識における特異性の存在が推測できる。本研究では、ASD 者の中で形態により好悪が出やすい目玉焼き画像を対象に研究を進めた。見た目を変数に応じて自在にコントロール可能な GAN（敵対的生成ネットワーク）を用いた視覚入力刺激提示ソフトを開発し、1022 個の目玉焼き画像を作成した。その中から代表的な 78 個を選択し、ASD 者、定型発達者に見せて好悪を判断させた。ASD 者が好む目玉焼き、定型発達者が好む目玉焼きに分類し、ASD 者が好む目玉焼き / ASD 者が苦手な目玉焼きと年齢、性別、IQ、自閉症重症度との相関関係を分析した。また、任意の質感を表現できる目玉焼き画像を作成し、特徴空間を主成分分析した結果、第一主成分として、黄身の色、大きさ、第二主成分として、黄身の位置、第三主成分として、白身の広がり、第 4 主成分として、白身の気泡、第 5 主成分として焦げが候補となった。さらに、被験者へのインタビュー調査の結果から、現在までに目玉焼きをどの程度食べているかは目玉焼きの好みと関係が深いことが示唆された。ASD 者、定型発達症者との間の好みの差については、馴化が影響している可能性が考えられた。ASD 者は定型発達症者と比較して馴化が苦手であり、一度苦手と思った目玉焼きになれるまでに時間を要することが示唆された。今後、目玉焼きの好みと馴化の関係性についてさらに検討していく予定である。

視覚障害者・晴眼者が質感体験を共有できるインクルーシブ質感提示法の解明（三浦）

視覚障害者は独特の感覚・知覚・認識系を持ち、質感認知にも不明な点が多い。本研究では、視覚障害者・晴眼者が同様の質感体験を共有するための質感提示法の解明を目的とした。まず、マスク着用時の五感活用の状況を調査した結果、全盲者はマスク着用により聴覚・嗅覚の鈍化を自覚することが分かった。頭部運動・両耳聴により、全盲者では障害物からの反射音を基にした障害物の存在知覚が高まることが示唆された (Miura et al., 2023)。次に、視覚障害者が画像情報を直感的に理解するための可聴化・可触化法の検討を行った。地図情報を支援する「OTASCE Map」では音・振動を組み合わせた多感覚性が重要で (Matsuo et al, 2022)、コンピューターゲームでは前提となる情報・知識の得やすさと効果音などの音情報の細かな付与が有用であることが分かった (松尾ら、2022)。さらに、視覚障害者 151 名を対象に、実生活で聴覚的・触覚的な質感をどれだけ手がかりにするかの度合と、その質感を表現するオノマトペを調査した。その結果、全盲者は聴覚的・触覚的な質感をより手がかりとして活用していた。オノマトペについては、触覚的質感を表すオノマトペとしてツルツル・ザラザラ・サラサラが一貫して多く回答された一方、聴覚的質感に関しては一貫した表現はあまり確認できなかった。

【B01-4 班】「視覚・聴覚・触覚・言語情報からの深奥質感認識の統一的理解」代表者：西田眞也（京都大学）、分担者：梶本裕之（電気通信大学）、上村卓也（NTT コミュニケーション科学基礎研究所）、堀内隆彦（千葉大学）、坂本真樹（電気通信大学）

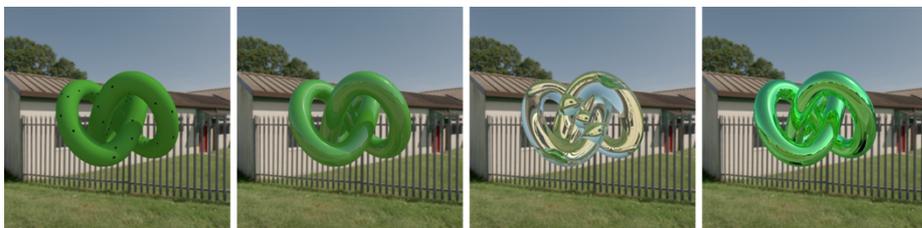
研究目的：実世界のモノやコトの質感情報は、物理的な光や振動を通して人間に伝えられ、視覚・聴覚・触覚などの感覚モダリティで処理され、一部は言語に変換される。B01-4 班は、深奥質感処理の大きな特徴の一つであるマルチモーダルの質感情報処理（右図）について、その全体を統一的な視点で解析することにより理解を深めることを目指している。視覚・聴覚・触覚・言語の研究者の力を結集し、心理物理学・コンピュータグラフィックス・触覚工学・オノマトペ感性工学といった多彩な手法を駆使した研究を展開している。



評価実施時までの進展：

・外界の内部モデルに関する視覚的深奥質感認識の理解（西田）

光学的な特性に依存する物体の質感と幾何学的な特性に依存する物体の形状変化が画像上に生み出す複雑な相互作用に適切に対応する人間の視覚系の戦略を心理物理学的に明らかにすることを通して、人間が脳内に構築する外界のモデルの構造を分析した。運動する物体の材質（光学特性）を変化させると（右図）、映像中のオプティカルフローは大きく変化する



るにもかかわらず、形状変形の検出閾がほとんど変化しないという恒常性機能を発見した（van Zuijlen et al, Vision Sciences Society, 2022）。さらに、これは脳内に正しい3次元形状と光学特性を備えた外界モデルが復元されていることを意味するのではなく、ハイライトや透過光などが生み出す複雑な画像の動きを巧妙に無視した結果であることを見出した。

・視覚との比較を通じた触覚的深奥質感認識の理解（西田）

触覚の空間パターン認識特性を分析し、触覚と視覚が大きく異なる方略で質感を認識していることを明らかにした。視覚と違って触覚が低次のテクスチャ統計量しか処理できないという発見（Kuroki et al., Journal of Neurophysiology, 2021）に続いて、時空間的な特徴（方位や運動）が基本的な特徴（視覚では色、触覚では振動テクスチャ）とバインドされることで特徴選択されるという特徴に基づく注意選択機能が触覚には備わっていないことが明らかになった（Kuroki & Nishida, Society for Neuroscience, 2021）。

・映像質感再現に注目した視覚的深奥質感の理解と技術開発（堀内）

照明の多様性が表層質感に与える影響を解析し、主に皮革や金属を対象として、実物の物理情報と知覚量の関係のモデル化に取り組み、最適化手法を用いた質感の階層構造モデルを提案した(Watanabe & Horiuchi, IEEE SMC 2022)。また、視覚系に加えて、多感覚情報の統合をモデル化する研究を開始し、報酬系の質感知覚における嗅覚と視覚のインタラクションについて実証した(Yamashita et al., i-Perception 2022)。

・触覚再現に注目した触覚深奥質感認識の理解と技術開発（梶本）

研究分担者の梶本らは、人肌をなでる際の触感の生成に取り組み、人工人肌モデルを3D形状計測した結果に基づいて振動生成することで人肌感を生成できることを実証した。さらに、触感生成にとって重要な温度感覚の提示手法を検討し、電気刺激によって冷感を明瞭に提示できることを明らかにした。また化学物質を用いた冷感と温感の提示によって痛覚を生じる錯覚現象を発見し、最適な条件を明らかにした。

・人工ニューラルネットを用いた聴覚深奥質感認識の理解（上村）

自然な音環境認識のために訓練された人工神経回路を聴覚系の計算機モデルと見立て、音の質感知覚に

重要な特徴である振幅変調に着目し、モデルが人間と類似した変調への感度を示すことを発見した (Koumura et al., Journal of Neuroscience, 2023)。同時に、両耳音認識でモデルを訓練するパラダイムの検討を進めている。

・感性言語を通したマルチモーダルの深奥質感認識の理解と技術開発 (坂本)

前領域「多元質感知」から進めてきた実物-物理量-知覚量-感性言語 (オノマトペ) を組み合わせた質感データベースの拡充に取り組んだ。そして合成皮革素材 48 種類を対象とし、素材の質感をオノマトペで評価してもらい被験者実験を行い、オノマトペの音素や構造をモデルの入力 (説明変数) とし、合成皮革素材の物性値を目的変数とする非線形回帰モデルを構築し、その精度について検証した。さらに、革・紙・布・ガラスを対象として、各サンプルを直接触ったまたは画像を見た際の感性評価を実施した。

【連携する公募研究】

視覚

・D02-1 物体の実在感 (リアリティ) と知覚的ノイズの関係 (栗木)

VR 環境や色輝度相関などに注目して、深奥質感の重要な概念である知覚的リアリティと質感の関係に関する研究を進めた。明度の恒常性が VR 環境内で実世界並みに高くなることを見出し、色彩度が画像の自然さに与える影響の分析を進めた。

・D02-3 国際比較による顔の色・質感認識メカニズムの探究 (溝上)

深奥質感認識の個人差に迫るために、肌の知覚における国際比較を進めた。赤みを帯びた顔が黄味を帯びた顔より明るく見えることに続いて、肌の色素であるヘモグロビンの増減により顔の赤味が強くなると怒りの表情に認識されやすくなることを日本人観察者で見出したが (Kato et al, Vision Research, 2022)、他の国の観察者では必ずしも同じ傾向が見出せないことが明らかとなり、顔質感認識に環境や文化が大きく影響することが示唆された。

・D02-6 心理物理学・生理学的時間特性に基づく物質的/感性的質感間の階層構造モデリング (永井) 物理的質感と感性的質感の生起の関係性に関して、心理物理学的に応答時間を考慮した重回帰分析で前者が先行するという非対称性傾向が見出された。生理学的手法 (EEG) と CNN を使ったモデリングを使って、さらなる分析を進めている。光沢知覚についても研究を進めた (Koizumi et al., Journal of Vision, 2023; Nohira et al., Journal of Vision, 2023)。

・D02-13 質感運動知覚に寄与する神経基盤の解明 (眞田)

液体の動きを模した視覚的運動フローからの質感認識の神経メカニズムに関して、順応効果を用いた心理物理学的分析と、人工神経回路を使ったサル神経応答の分析を進めた。

聴覚

・D02-8 アンビエント音響としての謡曲における幽玄の理解 (木谷)

能の謡曲の深奥質感 (幽玄) を生み出す音響的特性の解明のために、謡い手の違いや能面の違いを Spectral-temporal modulation 特性、放射特性、心理評価を測定し、それらの関係の分析を進めた。

触覚

・D01-5 肌と肌が合うときの特異的な接触現象が生む心地よい触感の解明 (岡本正吾)

肌の触り心地の良さを決める要因を分析した。人工肌と潤滑剤を使った素材に対して心理評定と触覚運動計測を行い、摩擦は小さい方がよく、硬さは触るヒトの肌に近い方が良いことを見出した。摩擦と柔らかさに関するパラドキシカルな関係に対する分析も進めた。

・D02-12 心地よい触感を生み出すヒトの多階層な脳内神経機構の解明 (楊)

心地よい触感を生み出す脳内神経機構の分析を心理物理学および fMRI を使った実験で進め、対象の触り方が表面粗さの知覚に影響すること (Li et al., Experimental Brain Research, 2022) などを明らかにした。

味覚・マルチモーダル

・D01-9 食品風味の深奥質感を解き明かす呈味・香気・食感の可視化・デジタル化技術の構築 (田中充)

食物の味覚と噛み心地の計測技術によりおいしさの客観計測への取り組みを進めた。固体食品中の呈味・香気成分を網羅的かつそのまま可視化する新たな Flavoromics imaging 技術として、カーボンブラックナノ粒子を用いたレーザー脱離イオン化質量分析 (Tanaka et al. ACS Applied Nano Materials, 2022) によって味成分・匂い成分の同時分析を達成した。

【C01-1 班】「人間機械融合視覚による質感認識能力拡張」代表者：岩井大輔（大阪大学）、分担者：伊藤勇太（東京大学）

1. 研究目的と評価実施時までの進展

C01-1 班では、人の視覚では感知できない質感情報を機械視覚で捉え、人の知覚できる形に変換して視界に与え、人の外界モデルをアップデートすることで、深奥質感の生成に迫る。具体的には、①実物から放射される光線場を、人間の目に届く直前で直接操作する装着デバイス（光変調眼鏡）を開発し、光線場の中に重層的に織り込まれている質感情報を選択的に強調ないし抑制する。それにより、光変調眼鏡によって人の質感認識能力を向上させることができるか、を明らかにする。また、②光変調眼鏡の応用可能性を明らかにするため、プロジェクションマッピング、デジタルファブリケーション等の他の質感表示技術で再現された質感を光学レタッチする枠組みを構築する。中間評価実施時までに、①を達成することを目指して研究を進めてきた。

2. 計画研究の成果

【計画研究】

・光変調眼鏡の開発（岩井・伊藤）

研究代表者と分担者とで異なるアプローチで、光変調眼鏡の開発を実施した。代表者は、実物反射光から直接・間接反射成分を分離し、それを人の視界に直接与えることのできる質感分離スコープを開発した。空間的に高周波な白色と黒色のストライプ 2 値パターンを実物に投影し、白色投影エリアを反射型液晶である LCoS (Liquid Crystal on Silicon) を用いて視界から遮蔽するシステムを構築した。これにより、黒色投影エリアに漏れ出した間接反射成分のみを観察系に通過させることで、裸眼で間接成分のみを観測できるスコープを実現した (Makita et al., IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (以降、IEEE VR), 2023)。分担者は、光学シースルー型頭部搭載ディスプレイ（光を加算するデバイス）に、光線を減算する遮蔽マスクを組み合わせることで自由度の高い光変調眼鏡の開発を行った。従来、遮蔽マスクとしては LCoS 等が用いられており、頭に装着するには重すぎるのが問題となっていた。これに対し分担者は、紫外線によって遮蔽率が変化するフォトクロミック材料を用いて軽量の遮蔽マスクを実現した (Ooi et al., IEEE VR, 2023)。

・光変調眼鏡を用いた質感操作（伊藤）

開発した光変調眼鏡を用いて、質感を操作する様々なアプリケーションを開発し、その有効性を明らかにした。例えば、加算減算可能な光学シースルーディスプレイを用いて、「陰影」を自在に操る技術を開発した。実験により、現実空間に仮想物体を重畳表示する拡張現実感 (Augmented Reality: AR) システムにおいて、実物からの影を仮想物体に反映することや、逆に仮想物体からの影を実物に重畳させることにも成功した (Someya & Itoh, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (以降、IEEE ISMAR), 2021)。他にも、シュリーレン撮影した空気の流れ場の情報を用いて、不可視な質感情報を可視化して実シーンに重畳することで、新たな質感認識能力の獲得を可能とするシステムの開発にも成功した (Zhibin et al., IEEE ISMAR, 2022)。

・プロジェクションマッピングおよびデジタルファブリケーション技術と光変調眼鏡技術の組み合わせによる質感提示（岩井）

計画に先立ち、項目②に関する研究についても成果が上がってきている。プロジェクションマッピングでは実物上に映像を提示するため、実物形状とは異なる映像（例えば、空中に浮いた像）を提示することは困難とされてきた。この未解決課題に対して、光変調眼鏡から着想を得た多重焦点技術をプロジェクションマッピングと組み合わせることで、同課題を解決する技術の開発に成功した (Kimura et al., IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (以降、IEEE TVCG), 2021; IEEE ISMAR 2021 Best Journal Paper 受賞)。他にも、光変調眼鏡の要素技術である網膜投影とプロジェクションマッピングを組み合わせることで、従来プロジェクションマッピングでは再現の難しかった鏡面反射を、高い輝度の鏡面反射を表現できるディスプレイ要素技術の開発にも成功している (Kinjo et al., IEEE VR, 2023; 同 Best Poster Honorable Mention 受賞)。①で構築した質感分離スコープの核心技術である直接・間接反射成分分離を応用し、表面からは見ることで見えない不可視な情報を食品に埋め込むデジタルファブリケーション技術も開発した。埋め込まれた情報は、反射成分分離することでデコード可能となる。埋め込まれたコードによる食感の制御も可能と考えられ、食べ物の質感変調へとつながる技術で

ある (Miyatake et al., ACM Symposium on User Interface Software and Technology (以降、ACM UIST) , 2022)。

これらの他にも、光変調眼鏡、プロジェクションマッピング、デジタルファブ리케이션を用いた質感提示のための基盤技術の開発も実施してきた。成果例としては、光変調眼鏡の主要素である光学シースルーディスプレイの歪み校正技術 (Hiroi et al., Optics Express, 2022)、プロジェクションマッピングにおける主要な画質劣化要因である焦点ボケの補償 (Kageyama et al., IEEE TVCG, 2022; IEEE VR 2022 Best Journal Paper Honorable Mention 受賞) や影の除去 (Hiratani et al., IEEE TVCG, 2023; IEEE VR 2023 Best Paper Nominee 選抜; **D01-2 平木班との領域内共同研究成果**)、3D プリンタ出力物の内部構造最適化 (Zhong et al., Computer Graphics Forum, 2022) が挙げられる。また、**B01-2 南本班との領域内共同研究**として、C01-1 班が有する仮想現実感 (Virtual Reality: VR) 環境構築する技術を用いて、サルのための没入型 VR システムの開発を行った。

なお、成果発表先の、IEEE VR、IEEE ISMAR、ACM UIST は、VR 分野、AR 分野、ユーザインタフェース分野それぞれの主要国際会議であり、IEEE TVCG は VR 分野および AR 分野の主要な国際論文誌である。これらで複数の論文を出版し、さらに論文賞およびポスター賞を受賞するなど、各成果は国際的に高い評価を受けてきた。また、研究者個人も主要な賞を受賞しており、研究代表者が令和 4 年度日本学術振興会賞を、研究分担者が令和 3 年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞を、それぞれ受賞した。一方、光変調眼鏡によって人の質感認識能力を向上させることができるか、を明らかにするという目標に対しては、数値的な評価に比べて被験者実験による評価は十分ではなく、中間評価以降の課題と考えている。

【連携公募研究】

C01-1 班の研究課題に関し、AR/VR 技術による質感提示技術の研究をすすめる公募班とも積極的に連携を進めてきた。特に関連の深い D01-1 および D01-2 では以下の成果が得られた。

・ D01-1 外界を定位させる高臨場立体振動ディスプレイの実現 (昆陽)

C01-1 班が視覚に力点を置いているのに対し、D01-1 班では VR 環境での触覚による質感提示をターゲットとし、立体音響の触覚版である立体振動ディスプレイを実現し、外界で振動を発生する振動源あるいは音源の存在感・迫真性を格段に向上させることを目的とする研究を推進した。具体的には、立体振動の基盤技術として、知覚インテンシティの配分に基づく外界および身体上の振動源の体感提示法を確立した。また、聴覚帯域の音源から、ヒトが知覚可能な知覚インテンシティを実時間で算出し、複数の振動子に配分するアルゴリズムを開発した。床面振動デバイスを用いて被験者実験を行い、身体外の外界に振動源が定位できることを実証した (Ohara et al., AsiaHaptics, 2022)。さらに、振動子を 3 次元配置することにより、3 次元空間で身体外に振動源が定位できるかを、前腕に配置した腕輪型デバイスと把持デバイスにより検証を行い、その定位能力を定量的に評価した。最後に、その立体振動源の運動パターンによって想起される感情に変化があることも確認した。これらは、C01-1 班の視覚ディスプレイ技術と組み合わせることで、リアリティ高い質感を提示するマルチモーダル VR 環境の実現へとつながる重要な知見である。

・ D01-2 投影光を用いた実物体の形状・反射特性制御による現実拡張型質感操作技術 (平木)

C01-1 班が研究するプロジェクションマッピングによる実物の質感変調に加え、その投影光によって実物の反射特性・形状を制御する現実拡張型の質感操作技術を構築することを目的とする研究を推進した。具体的に、反射特性の制御については、外部刺激で色が変わるクロミックインクを塗布した投影対象に対し、紫外線パターンを可視映像に重畳して投影することで高コントラストな投影を実現した (Umetsu et al., ACM Siggraph Asia, 2022)。形状の制御については、液相-気相転移アクチュエータアレイを作成し、CO2 レーザー走査によってそれらの変形を空間的に制御することで、柔軟でヒトの皮膚との親和性が高い力覚ディスプレイを構築した。さらに形状の制御に関して、**C01-1 班との領域内共同研究**により加熱により液晶構造が変わり収縮する柔軟素材である液晶エラストマー素材を、熱投影により自在に変形させることができるソフトロボットサーフェスの開発にも取り組んだ。これらの成果は、従来の映像に依存した視覚的質感表現より自由度の高い質感操作を実現する上で重要な設計指針を与えるものである。

1. 研究目的と評価実施時までの進展

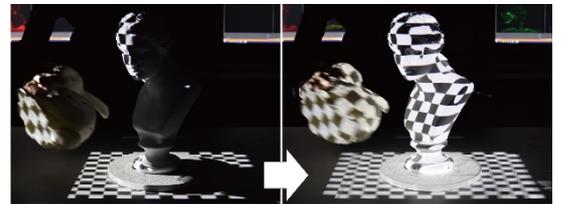
C01-2 班では、深奥質感を変容しうるレベルのリアリティを、実世界上の目の前の実体上に創造することを目標とする。同目標を、人に接触することなく、環境側に設置された技術のみによって達成する。具体的には超高速のプロジェクトンマッピング技術を駆使することで実現する。本研究では、この構想のもと、領域設定期間内までに、表層質感の再現限界を超える（観測・環境に整合するモノの質感再現）。また、生来の視覚機能では捉えられない質感世界を実体上に可視化することで、人の認識行動能力を拡張する（超越質感の提示による視覚拡張）。さらに、モノから場へと範囲を広げることで、人の行動と協調する質感操作を明らかにする（場の質感操作）。以上 3 つのかつてないレベルの質感操作技術によって、最終的に深奥質感の変容に挑む（深奥質感の変容）。また、中間評価実施時までに、「観測・環境に整合するモノの質感再現」、「超越質感の提示による視覚拡張」、「場の質感操作」をほぼ完了するとともに、「深奥質感の変容」の初期検討に着手する計画である。以下に示す通り概ね計画通りに進展している。

2. 計画研究の成果

【計画研究】

・観測・環境に整合するモノの質感再現（渡辺）

並列輝度制御に基づく複数台の高速プロジェクタによるダイナミックプロジェクトンマッピングを実現した (Nomoto et al., TVCG, 2022, 右図)。これは、わずか数ミリ秒の投影遅延が求められるダイナミックプロジェクトンマッピングにおいて、プロジェクタ台数が 1 台に制限されていた課題を解決するものである。複数台の

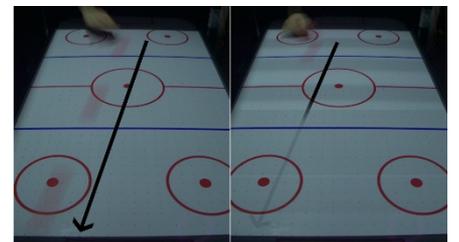


プロジェクタが同時に投影することによって、対象表面の全方位に死角なく投影することが可能となり、質感再現レベルが大きく向上する。しかし、従来手法は複数プロジェクタの協調投影を制御する手法が大規模な最適化問題となっていたとともに、台数に対して計算時間が 2 乗のオーダーで増加する問題を抱えていた。そこで、複数台のプロジェクタの投影画像をそれぞれ独立に、さらには画素並列に計算できる手法を提案した。これは、投影される対象形状の凹凸に対して、プロジェクタの画像解像度が十分に高いという前提のもとでは、前述の最適化問題を緩和して並列に解くことができる点に着目したものである。このような並列化により、高速での計算を実現するとともに、台数増加によってほぼ計算時間が変わらない性能を達成した。さらに、この計算手法によって、多数台の高速プロジェクタをネットワークで接続して、分散制御するシステム構成を可能にした。また、リアルタイムレイトレーシングを用いたリアリスティックダイナミックプロジェクトンマッピングを開発した (宮本ら, VRSJ, 2022)。これは、多数回の屈折・反射を伴う写実性の高いグラフィクスをプロジェクトンマッピングへ新たに導入するものである。ただし、このようなグラフィクスの生成には時間を要するため、本応用が求める 500~1000 fps の高速なレンダリングが難しい。そこで、投影対象との位置が合っているがレンダリング時間が短いためにノイズを含む中間画像を、人間の視覚限界を超える高いフレームレートで投影する手法を構築した。このような投影のもとでは、人間の視覚的持続による積分効果により、人間はノイズが低減されつつも、対象と位置ずれを起こしていないように知覚することができることを実証した。さらにノイズを低減させるための手法を、西田班と連携して開発した。また、周期運動する実素材を用いたリアリスティックな 3 次元ディスプレイ (Asahina et al., IEEE VR, 2021, SIGMR 賞, 右図) や、皮膚変形に整合する腕へのダイナミックプロジェクトンマッピング (Peng et al., Applied Science, 2021) も実現した。



・超越質感の提示による視覚拡張（渡辺）

スポーツにおける運動知覚を操作するシステムを実現した (Sato et al., SIGGRAPH Asia, 2022, Emerging Technologies Best Demo Award, VRSJ 学術奨励賞, 右図)。これは目の錯覚を利用することで、エアホッケーにおいて通常の視覚では得られない体験を提供する試みである。提案システムは、高速なプロジェクタ・カメラシステムによって、移動するパックに錯覚を誘発するパターンを遅れなく投影することで、テーブル上からパックが消え



たように知覚させる体験や、物理法則を無視した軌道で運動したように知覚させる体験が可能であることを示した。特に後者の体験については西田班と連携した。また河野班と連携して、機械の視覚像をプロジェクションマッピングすることで、人間が知覚できない非可視光の波長の世界を把握できるようにする試みにも着手した。

・場の質感操作(渡辺)

動的に変化する場の色を自在に操作する研究を、天野班と連携して取り組んだ(樊ら, SIGMR 2023, SIGMR 賞)。高速な赤外プロジェクタを用いた 3 次元計測によって、奥行きが大きく変化したときにも破綻しない色操作や、高速プロジェクタと同期連携した瞬間撮像に基づくビジュアルフィードバックによって色操作の精度を向上させる手法を実現した。本技術をもとに、機械学習による画風変換を実世界上で再現する試みにも着手した(右図)。また、コントラスト低下を避けるために暗い環境下でしか実現されていなかったプロジェクションマッピングの課題を克服する研究にも着手した。本研究では、投影対象以外の空間に光を届けるライトフィールド照明と、投影対象へのプロジェクションマッピングを連携させることで、明るい環境下でのプロジェクションマッピングを実現した。これによって、通常の実体とプロジェクションマッピングされた実体が違和感なく共存する視覚世界を創出した。



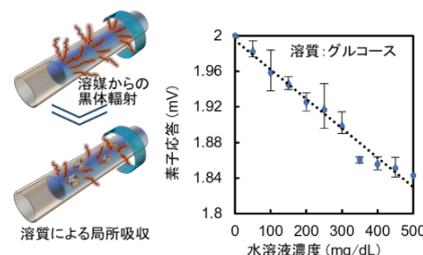
・深奥質感の変容(渡辺)

顔へのプロジェクションマッピングを軸に、事前検証を実施した。具体的には、プロジェクションマッピングによる顔の年齢変容の可能性を西田班と連携して検証した(袁ら, SIGMR, 2023)。この質感技術をもとに、年齢変容がもたらす印象やコミュニケーションの変化を探ることができると考えている。また本手法を拡張することで、年齢以外にも様々な変容が可能であると考えられる。さらに、モニタ上の顔を用いた被験者実験に基づく深奥質感研究を、実際の顔を用いて展開する可能性について、溝上班との連携を検討した。加えて我々の質感研究をもとに始まった化粧企業との共同研究の成果(プロジェクションマッピングによって様々な化粧を高い再現度で体験できるシステム)が、銀座の実店舗、世界最大級のテクノロジー見本市 CES 2023、世界フィギュアスケート選手権大会 2023 で試験運用され、大きな反響を呼んでいる。

【連携公募研究】

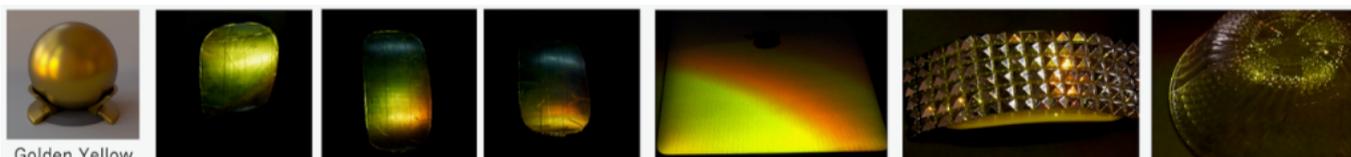
D01-3 ものづくり現場の非破壊検査における匠の技の科学的理解と視覚増強への応用展開(河野行雄)

工場やインフラ設備の点検時における検査員の認識プロセスの理解や視覚補強に向けた研究を行った。まず、検査の目となるセンサ開発を行った。光センサシートを、液体が流れる配管やチューブに巻き付けることで、サンプル非採集による非接触液質検査を実現した(右図)。シート状のセンサであるため、配管形状に合わせて自在に形を変えることができ、化学合成プラントや飲料品製造現場などへの応用が期待できる(Li et al., Science Advances, 2022)。さらに、熟練の検査員は、対象物外観のわずかな状態変化から、内部状態との相関を経験的に認識し、品質を判断していることが分かった。



D01-7 光線場の計測と投影による現実を超える質感への操作(天野)

光線場の計測と投影による新たな質感操作を実現した。異方性反射の操作では、Ashikhmin BRDF モデルに基づく異方性反射の強調や減弱を、視点依存性の光沢強調では光沢物体の光沢強調で現実を超える光沢提示を実現した。また、4 自由度光線場投影装置を製作し、照明環境の再現と、図に示す鏡面反射を利用した BRDF で表される質感の提示も実現した(下図)。これらの技術は、演出や科学シミュレーション、デザイン補助、美術品の光学的修復、宝飾品の照明などへの応用が期待される。



【C01-3 班】「実体の質感情報を引き出すフィジカルメディアの設計と表現実践」 代表者：笥康明（東京大学）、研究分担者：仲谷正史（慶應義塾大学）

（1）領域設定期間内及び中間評価実施時までには何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにはどこまで研究が進展しているのか

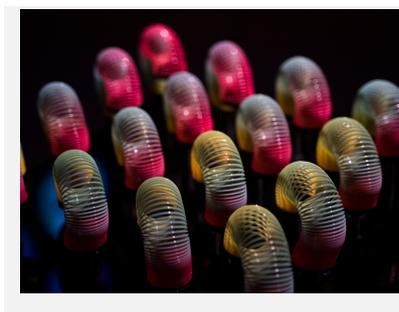
本研究では、実素材およびそれらを多数集めた群（実素材群）の特性や振る舞いを制御し、素材性を活かした情報提示やインタラクションを行うフィジカルメディアの創出に取り組む。これまでに、色彩や表面形状などを動的に制御できる実体ディスプレイの開発、3Dプリンタによる柔軟変形センサの造形手法、および3Dプリンタによる帆布の質感再現などの課題に取り組んだ。また、コンピュータシミュレーションに制御される動的な実素材群の形状・色彩・触感などが人間にもたらす質感および行動変容に関する研究として、実体ディスプレイの質感印象に関する評価用語の選定、VRを用いた実験環境の構築などに取り組んだ。本研究ではヒューマンインタフェース、アートなどへの応用を通して、環境に溶け込みながら、人間とのインタラクションを誘引する作品制作・展示を実施した。中でも、親疎水性パターン加工を施した容器の表面に付着する泡の位置およびサイズを制御することで泡のピクセルイメージを創出する手法はインタフェース技術としてだけでなく、アート作品の基盤として用いられ、国際会議およびメディアアートフェスティバルにて発表された。また、実素材の質感評価の実践として、料理の魅せ方が想起させる五感イメージ（心的イメージ）に着目し、主菜の感性的印象に周辺視覚情報である付け合わせが与える影響を分析した。これらの研究は、論文、国際会議、展覧会等にて対外発表している。

（2）各計画研究で得られた成果、及びそれぞれの計画研究と連携している公募研究で得られた成果

計画研究の成果

1. 実素材のマルチモーダル制御を活かす実体ディスプレイの研究（笥）

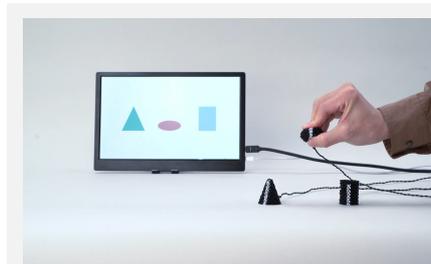
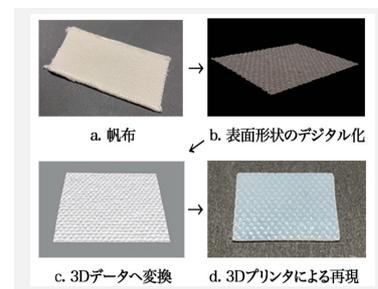
隣り合うように配置され、上下駆動する2本のアクチュエータを架橋するようにスプリング状モジュールを取り付けることで、形状と質感が動的に変化する実体ディスプレイの設計と実装に取り組んだ。スプリング各層に色や形状の差異を施すことで、モジュールの傾きに伴い見た目の色彩や形状、艶などが変化する。本項目ではこのほか、超音波による水面の形状制御、パウチアクチュエータを用いた形状およびテクスチャの繰り返しの変更と固定が可能な物体のファブリケーション、コンベックステープの伸縮制御による大型形状変化インタフェースの開発に取り組んだ。



2. デジタルファブリケーションによる質感表現およびインタラクション手法の創出（笥・仲谷）

本研究項目では、3Dプリンタをはじめとするデジタルファブリケーション機器を用いて実体の質感の設計や再現、また実体の質感を活かしたインタフェースの創出に関する研究を実施した。まず仲谷グループでは3Dプリンタを用いた帆布の質感再現に関する研究を実施した。実物の帆布の表面形状を測定し、そのデータをもとに3Dプリンタによる表面形状の再現を試み、印刷物と実際の帆布に関して触覚のグルーピング実験を用いて評価した。笥グループでは、導電性フィラメントを用いた3Dプリントによる柔軟変形センサの研究を行なった。ラテックス構造を持つ物体に対して導電性と非導電性部位を組み合わせることで、形状、硬度、変形方向、配線位置を設計可能なセンサを実現した。センサの特性評価を行うと共に、インタフェースとしてアプリケーション開発を進めた。

このほか本研究項目では、3Dプリンタを用いて物体の粗さや押し込み反力を設計する方法の検討や、大型造形物に対する質感付与として、切込みを入れた平面素材を張力により立体的に変形させる手法の実装に取り組んだ。



3. 実素材（群）の振る舞いが人間に与える質感評価フレームワークの構築と実践（仲谷）

実体およびその群の有する質感印象を評価するフレームワーク構築を目的として、多様な実体物の深奥質感評価手法の開発を進めた。まず、素材群を駆動する実体ディスプレイに対する質感印象の評価用語選定に取り組んだ。また、VRでバーチャルにさまざまな質感素材を配置した実体ディスプレイを設計・鑑賞できる環境を構築し、今後実機と組み合わせながら評価実験のために用いる基盤とする。また、上記の評価用語を用いた実践として、仲谷グループでは舞台衣装等に見られるスパンコールのきらめきが人間の感性に与える影響について、フリップドットディスプレイで様々なきらめきのパターンを提示し、観察者が視覚的に体験した感性因子を多変量解析により抽出する実験を行なった。

実体質感を評価する30の感性項目の選定			
ヒトの行動に関する評価項目 写真を撮りたくなる 共有したくなる 飽きない 集中してじっと見る 距離がちよどよい 独り占めしたい 近づきたくなる 試したくなる	環境及び情動に関する評価項目 場に通じた 違和感のない リラックスする 魅力的な 見たい 目に訴えかける 刺激的な コントラストがある 不気味な	実験刺激の動作に関する評価項目 動きが重い じっとりと動いている 動きが同期した 滑らかに動いている 動きが速い リズミカルに動いている 可愛らしく動いている	質感評価に関する評価項目 光沢のある 鮮明な 温冷感がある 湿った 重さ軽さ感がある かわいらしい

このほか実体質感分析の実践として、料理の魅せ方が想起させる五感イメージ（心的イメージ）に着目し、主菜の感性的印象に周辺視覚情報である付け合わせが与える影響を検討した。色／乾湿（水分量）／味（酸味や香辛料）が料理写真の判断に関わること、さらに付け合わせが隣に配された主菜の食べたさと好ましさは、見た目の良さと温かさの想起によって共起することを明らかにした。



4. 実素材制御・質感編集技術のヒューマンインタフェース、アートへの応用（寛）

本研究課題では、実素材（群）を制御する技術を通してヒューマンインタフェースおよびアートへの応用展開を企図する。中間評価までの主な成果として、寛グループでは、親疎水性パターン加工を施した容器に炭酸液体を注ぎ、容器内に付着する泡の位置およびサイズを制御することで泡によるピクセルイメージを創出する手法を開発した。撥水コートまたはプラズマ照射による容器表面への局所的な親疎水加工手法、パターン設計ソフトウェア開発、アプリケーションシナリオ提案を行い、国際会議（CHI2023）での発表を行った。また、本手法を応用し容器内でゆっくり消えゆく泡を用いたインスタレーション作品メディアアートの祭典である Ars Electronica Festival2022 にて展示を実施した。また実素材として自然物をインタフェースとして用いたアート作品制作として、海藻の光合成による発泡を制御するオンライン参加型アート作品、および植物の生体電位から環境の雨や風などの変化を推定し、音と光の表現へと変換するアートインスタレーションを制作し、展示発表を行った。



5. 他の研究班との協働

本研究領域において、他の計画研究班、公募研究との交流を行ってきた。計画研究班では、西田班（B01-4）と実体質感の評価手法について議論を交わしている。佐藤班（A01-3）とは深奥質感を通じたアート研究の手法に関して、岩井班（C01-1）とは、デジタルファブリケーションを中心とする造形手法に関する情報交換・議論を定期的に行っている。公募班では D02-11 野中班、D02-3 溝上班の研究アプローチは本研究班の実体（群）の質感分析につながる。また、D01-2 平木班の質感操作技術は本研究班の技術的アプローチと重なる場所が多く今後さらなるコラボレーションが期待できる。

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、主催シンポジウム等の状況。令和5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。

●雑誌論文 ■学会発表 ◆産業財産権 ◎受賞 ○書籍 □報道

A01-1 西野班

- Lee S. -E., Shibata K, Nonaka S, Nobuhara S, *Nishino K. Extrinsic Camera Calibration From a Moving Person. IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L), vol. 7, no. 4, pp. 10344-10351, 2022. 2022.6.20.
- Chen Z, Nobuhara S, *Nishino K. Invertible Neural BRDF for Object Inverse Rendering. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 1, online first:1-16, 2021.11.22.
- Yamashita K, Enyo Y, Nobuhara S, *Nishino K. nLMVS-Net: Deep Non-Lambertian Multi-View Stereo. IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision WACV'23, Hawaii, USA, (<https://openaccess.thecvf.com/WACV2023>), 2023.1.4.
- Lee S. -E., Shibata K, Nonaka S, Nobuhara S, *Nishino K. Extrinsic Camera Calibration From a Moving Person. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS'22 京都, 2022.10.23
- Nonaka S, Nobuhara S, *Nishino K. Dynamic 3D Gaze from Afar: Deep Gaze Estimation from Temporal Eye-Head-Body Coordination. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR'22, New Orleans, USA, (<https://openaccess.thecvf.com/CVPR2022>), 2022.6.21.
- Liang Y, Wakaki R, Nobuhara S, *Nishino K. Multimodal Material Segmentation. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR'22, New Orleans, USA, (<https://openaccess.thecvf.com/CVPR2022>), 2022.6.21.
- Ichikawa T, Purri M, Kawahara R, Nobuhara S, Dana K, *Nishino K. Shape from Sky: Polarimetric Normal Recovery Under The Sky. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, online, (<https://openaccess.thecvf.com/CVPR2021>), 2021.6.24.
- Fukao Y, Kawahara R, Nobuhara S, *Nishino K. Polarimetric Normal Stereo. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, online, (<https://openaccess.thecvf.com/CVPR2021>), 2021.6.21.
- Cheng Z, Li H, Asano Y, *Zheng Y, Sato I. Multi-view 3D Reconstruction of a Texture-less Smooth Surface of Unknown Generic Reflectance. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, online, (<https://openaccess.thecvf.com/CVPR2021>), 2021.6.21.
- ◆ *西野恒、延原章平、川原僚、深尾圭貴／情報処理装置、情報処理方法および情報処理プログラム／国内特許／出願／特願 2021-91519／2021年5月31日

A01-2 岡谷班

- Thi H, Tran T, *Okatani T. Bright as the Sun: In-depth Analysis of Imagination-Driven Image Captioning. Asian Conference on Computer Vision, オンライン, 2022.12.04.
- Liu K-J, Suganuma M, *Okatani T. Bridging the gap from asymmetry tricks to decorrelation principles in non-contrastive self-supervised learning. Advances in Neural Information Processing Systems, New Orleans, USA, 2022.11.28
- Nguyen V-Q, Suganuma M, *Okatani T. Grit: Faster and better image captioning transformer using dual visual features. European Conference on Computer Vision, オンライン, 2022.10.23.
- Nguyen V-Q, Suganuma M, *Okatani T. Look Wide and Interpret Twice: Improving Performance on Interactive Instruction-following Tasks. International Joint Conference on Artificial Intelligence 2021, オンライン, 2021.8.21.

A01-3 佐藤班

- *Ishihara S, Sulc A, Sato I, Depth estimation using spectrally varying defocus blur, J. Opt. Soc. Am. A 38, pp. 1140-1149, 2021.
- *Cheng Z, Li H, Hartley R, Zheng Y, Sato I, "Diffeomorphic Neural Surface Parameterization for 3D and Reflectance Acquisition", SIGGRAPH (Conference Paper Track), Article No. 7, pp. 1-10, 2022

- Ryota M, Hiura S, EpiScope: Optical Separation of Reflected Components by Rotation of Polygonal Mirror, SIGGRAPH Asia 2021 Technical Communications, Article No. 12, pp. 1-4, 2021.
- 有川尚輝, 前田涼汰, 日浦慎作. カラー偏光反射特性の計測に基づく材質識別, MIRU2022 画像の認識・理解シンポジウム
- ◆ 日浦慎作, 前田涼汰/反射光弁別装置/出願/特開 2023-8727/2021年7月6日出願
- ◎ 前田涼汰, 日浦慎作. EpiScope: ポリゴンミラーの回転による光学的な反射成分分離 (デモ発表), MIRU2022 画像の認識・理解シンポジウム, MIRU デモ発表賞, MIRU2022 画像の認識・理解シンポジウム実行委員会, 2022/7/28.
- ◎ 前田涼汰, 日浦慎作. EpiScope: ポリゴンミラーの回転による光学的な反射成分分離 (デモ発表). MIRU2021 画像の認識・理解シンポジウム, MIRU 優秀賞, MIRU2021 画像の認識・理解シンポジウム実行委員会, 2021/7/30.
- ◎ 野祐崇, 前田涼汰, 吉田竣亮, 吉木啓介, 日浦慎作. 複屈折反射特性の計測に基づく材質識別, MIRU2021 画像の認識・理解シンポジウム, MIRU 学生奨励賞, MIRU2021 画像の認識・理解シンポジウム実行委員会, 2021/7/30.

B01-1 神谷班

- *Ho JK, Horikawa T, Majima K, Cheng F, Kamitani K. Inter-individual deep image reconstruction via hierarchical neural code conversion. NeuroImage, Vol. 271 p. 120007, 2023. 5.
- *Horikawa T, *Kamitani Y. Attention modulates neural representation to render reconstructions according to subjective appearance. Communications Biology, 5(1), p.34, 2022.1.11.
- Nonaka S, Majima K, Aoki C. S, *Kamitani Y. Brain hierarchy score: Which deep neural networks are hierarchically brain-like? iScience, 24(9), p.103013, 2021.9.24.
- *Sato S, Dobashi Y, Kim T. Stream-guided smoke simulations. ACM Transactions on Graphics, 40(4), p.1-7, 2021.8.31.
- Hashimoto R, *Dobashi Y. Adjusting Level of Abstraction for Stylized Image Composition. Proc. SIGGRAPH Asia Posters, Daegu (Korea), 2022.12.6.
- Fuji S, *Sato S, Iwasaki K, Dobashi Y, Gao S, Tang Z. Rendering of Scratched Transparent Materials using Precomputed SV-BSDFs. Proc. SIGGRAPH 2022 Posters, Vancouver(Canada), 2022.8.7.

B01-2 南本班

- *Komatsu H, Maeno A, Watanabe E. Origin of the ease of association of color names: comparison between humans and AI. i-Perception, 13(5):20416695221131832, 2022.10.26.
- *Miyakawa N, Nagai Y, Hori Y, Mimura K, Orihara A, Oyama K, Matsuo T, Inoue KI, Suzuki T, Hirabayashi T, Suhara T, Takada M, Higuchi M, Kawasaki K, *Minamimoto T. Chemogenetic attenuation of cortical seizures in nonhuman primates. Nat Commun. 14(1):971, 2022.8.11.
- Oyama K, Hori Y, Mimura K, Nagai Y, Eldridge MAG, Saunders RC, Miyakawa N, Hirabayashi T, Hori Y, Inoue KI, Suhara T, Takada M, Higuchi M, Richmond BJ, *Minamimoto T. Chemogenetic Disconnection between the Orbitofrontal Cortex and the Rostromedial Caudate Nucleus Disrupts Motivational Control of Goal-Directed Action. J Neurosci, 42(32):6267-6275, 2022.8.10.
- *Hirabayashi T, Nagai Y, Hori Y, Inoue KI, Aoki I, Takada M, Suhara T, Higuchi M, Minamimoto T. Chemogenetic sensory fMRI reveals behaviorally relevant bidirectional changes in primate somatosensory network. Neuron, 109, 3312-3322, 2021.10. 20.
- Hori Y, Nagai Y, Mimura K, Suhara T, Higuchi M, Bouret S, *Minamimoto T. D1- and D2-like receptors differentially mediate the effects of dopaminergic transmission on cost-benefit evaluation and motivation in monkeys. PLoS Biology, e3001055, 2021.7.1.
- *Komatsu H, Nishio A, Ichinohe N, Goda N. Structure and function of neural circuit related to gloss perception in the macaque inferior temporal cortex: a case report. Brain Structure and Function, 226(9) 3023-3030, 2021.6.22.
- Baba M, Nishio A, *Komatsu H. Relationship between the activities of gloss-selective neurons in the macaque inferior temporal cortex and the gloss discrimination behavior of the monkey. Cerebral Cortex Communications, 2: 1-13, 2021.2.10.

- Gaoge Y, Amita H, Nonomura S, Inoue K, Takada M. Distinct patterns of dopamine responses to reward association in primate caudate nucleus and putamen as revealed by dLight signals. Neuroscience 2022 (Society for Neuroscience), San Diego, USA, 2022.11.14.

B01-3 鈴木班

- *Osawa S, Suzuki K, Asano E, Ukishiro K, Agari D, Kakinuma K, Kochi R, Jin K, Nakasato N, Tominaga T. Causal involvement of medial inferior frontal gyrus of non-dominant hemisphere in higher order auditory perception: A single case study. Cortex 163; 57-65, 2023
- *Hine K, Abe K, Kinzuka Y, Shehata M, Hatano K, Matsui T, & Nakauchi S. Spontaneous motor tempo contributes to preferred music tempo regardless of music familiarity. Frontiers in Psychology, 13:952488, 2022.11.
- *Nakauchi S, & Tamura H. Regularity of colour statistics in explaining colour composition preferences in art paintings. Scientific Reports, 12:14585, 2022.8.
- *Nakauchi S, Kondo T, Kinzuka Y, Taniyama Y, Tamura H, Higashi H, Hine K, Minami T, Linhares JMM, Nascimento SMC. Universality and superiority in preference for chromatic composition of art paintings. Scientific Reports, 2022.3.
- 鈴木匡子、視覚情報処理 連合野ハンドブック 完全版、医学書院、2021.3.15 発行、314 ページ、978-4260043434
- Kakinuma K, Osawa S, Ukishiro K, Shinoda G, Hosokawa H, Oyafuso M, Ota S, Ishida M, Jin K, Tominaga T, Nakasato N, Suzuki K. Kinetopsia induced by electrocortical stimulation -a case of temporal lobe epilepsy-. Neuro2022 第 45 回日本神経科学大会 2022.6.30-7.3 与野湾市
- Miyamoto, K., Taniyama, Y., Hine, K., & *Nakauchi, S. The congruency of color-sound crossmodal correspondence enhances/interferes with color and sound discrimination depending on the color category. Asia Color Association Conference, 2022.10.20
- Hine, K., Abe., K., Nakauchi, S. Internal tempo regulates arousal induced by music listening. 22nd conference of the European society for cognitive psychology, 2022 年 8 月 31 日
- Wakana, Y, Abe, K, Hine, K, Nakauchi, S. Recalled music tempo correlates with internal tempo of individual. 22nd conference of the European society for cognitive psychology, 2022.8.30
- Shinoda G, Iwaki H, Sonoda M, Mitsuhashi T, Osawa S, Kakinuma K, Hosokawa H, Ukishiro K, Asano E, Nakasato N, Tominaga T, Suzuki K. Spatiotemporal dynamics of high gamma activity during facial recognition. 13th Asian & Oceanian Epilepsy Congress (AOEC) 2021.6.10-13 Virtual Congress

B01-4 西田班

- *Koumura T, Terashima H, Furukawa S. Human-like Modulation Sensitivity Emerging through Optimization to Natural Sound Recognition. Journal of Neuroscience. 43(21):3876-3894, 2023/5/24.
- *Hamazaki T, Saito T, Kaneko S, Kajimoto H. Suppressing Discomfort Caused by Electrical Stimulation Using a Local Anesthetic Cream. IEEE Access, vol. 11, pp. 11489-11499, 2023/5/2.
- Yamashita G, Tanaka M, *Horiuchi H. Analysis of Harmony between Color and Fragrance in Lighting Environments by the Reaction of the Orbitofrontal Area. i-Perception, 13(3), p.1-13,2022/5/22.
- *Zhang J, Kajimoto H. A Robust Approaches for Reproducing the Haptic Sensation of Sandpaper with Different Roughness During Bare Fingertip Interaction. Frontiers In Virtual Reality, Vol.3:829946, 2022/5/2.
- *Sawayama M, Dobashi Y, Okabe M, Hosokawa K, Koumura T, Saarela T, Olkkonen M, Nishida S. Visual discrimination of optical material properties: A large-scale study. Journal of Vision, 22(2):17, 1-24, 2022/2/23.
- *Yamagata K, Kwon J, Kawashima T, Shimoda W, Sakamoto M. Computer Vision System for Expressing Texture Using Sound-Symbolic Words. Frontiers in Psychology, 12(654779), 1-11, 2021/10/7.
- *Kuroki S, Sawayama M, Nishida S. The roles of lower- and higher-order surface statistics in tactile texture perception. Journal of Neurophysiology, 126: 95-111, 2021, 2021/5/26
- *Watanabe S, Horiuchi T. Layered Perceptual Modeling Using Structural Equation Modeling: Exploring Structure with Genetic Algorithm. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Czech Republic, 2022/10/9.
- *Hamazaki T, Kaneda M, Jianyao Z, Kaneko S, Kajimoto H. Chemical induced Thermal Grill Illusion. IEEE Haptics Symposium2022, Online, 2022/5/21.

- *van Zuijlen MJP, van Assen JJR, Nishida S, Effects of optical material properties on detection of deformation of non-rigid rotating objects, Vision Sciences Society, St Pete Beach, USA, 2022/5/17.

C01-1 岩井班

- *Zhong S, Punpongsanon P, Iwai D, Sato K. NSTO: Neural Synthesizing Topology Optimization for Modulated Structure Generation. Computer Graphics Forum, 41(7):553-566, 2023.3.20.
- Hiratani K, *Iwai D, Kageyama Y, Punpongsanon P, Hiraki T, Sato K. Shadowless Projection Mapping using Retrotransmissive Optics. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 29(5):2280-2290, 2023.2.22.
- *Hiroi Y, Someya K, Itoh Y. Neural distortion fields for spatial calibration of wide field-of-view near-eye displays. Optics Express, 30(22):40628-40644, 2022.8.10.
- *Kageyama Y, Iwai D, Sato K. Online Projector Deblurring Using a Convolutional Neural Network. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 28(5):2223-2233, 2022.2.15.
- Kimura S, *Iwai D, Punpongsanon P, Sato K. Multifocal Stereoscopic Projection Mapping. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 27(11):4256-4266, 2021.10.1.
- *Miyatake Y, Punpongsanon P, Iwai D, Sato K. interiqr: Unobtrusive Edible Tags using Food 3D Printing. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST) 2022, Bend (USA, Oregon), 2022.10.29.
- *Zhibin Z, Hiroi Y, Itoh Y. Towards Spatial Airflow Interaction: Schlieren Imaging for Augmented Reality. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) 2022, シンガポール, 2022.10.17.
- *Someya K, Itoh Y. Blending Shadows: Casting Shadows in Virtual and Real using Occlusion-Capable Augmented Reality Near-Eye Displays. IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, オンライン, 2021.11.13.
- ◎ *Kinjo K, Iwai D, Sato K. A High-Dynamic-Range Mesh Screen VR Display by Combining Frontal Projection and Retinal Projection. Best Poster Honorable Mention, IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 2023.3.29.

C01-2 渡辺班

- Nomoto T, Li W, Peng H-L, *Watanabe Y. Dynamic Multi-projection Mapping Based on Parallel Intensity Control. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.28, No.5, pp.2125-2134, 2022/2/15.
- *Peng H-L, Watanabe Y. High-Speed Dynamic Projection Mapping onto Human Arm with Realistic Skin Deformation. Applied Sciences, Vol.11, No.9, Article No.3753, 2021.4.21.
- Sato K, Terashima H, Nishida S, *Watanabe Y. Extra-Sensory Puck in Air Hockey using the Projection-Based Illusion. SIGGRAPH Asia 2022, Emerging Technologies EXCO, Daegu, South Korea, 2022/12/7.
- Asahina R, Nomoto T, Yoshida T, *Watanabe Y. Realistic 3D Swept-Volume Display with Hidden-Surface Removal Using Physical Materials. IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, (Online), 2021/3/29.
- ◎ 佐藤健吾. 追跡型投影による人間の視覚特性を利用した運動物体の不可視化と方向・速度操作. 日本バーチャルリアリティ学会 第27回大会 学術奨励賞, 日本バーチャルリアリティ学会, 2023/3/22.
- ◎ Sato K, Terashima H, Nishida S, *Watanabe Y. E.S.P.: Extra-Sensory Puck in Air Hockey using the Projection-Based Illusion. Emerging Technologies Best Demo Award, SIGGRAPH Asia 2022, 2022/12/9.
- 渡辺義浩. Japan's Kose develops projection mapping simulator for makeup. NIKKEI Asia, <https://asia.nikkei.com/Business/Business-trends/Japan-s-Kose-develops-projection-mapping-simulator-for-makeup>, 2023/1/29.
- 渡辺義浩. 「ガリレオ X」, 現実空間×仮想空間 二つの世界を重ねる最新技術. BS フジ, http://web-wac.co.jp/program/galileo_x/gx20220123 2022/1/23.
- 渡辺義浩. 「探求の階段」, 動くものに投影できるプロジェクションマッピング. テレビ東京, <https://www.tv-tokyo.co.jp/tankyunokaidan/backnumber/?trgt=20210121>, 2021/1/21.

C01-3 笥班

- *Kojaji N, *Nakatani M. With a Hint of Sudachi: Food Plating Can Facilitate the Fondness of Food. Front Psychol.12:699218, 2021.10.15.
- *Sareen H, Fu Y, Boulahcen N, Kakehi Y. BubbleTex: Designing Heterogenous Wettable Areas for Carbonation

Bubble Patterns on Surfaces. Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '23), ドイツ, 2023年4月23日.

- 今村 知美, *筧 康明, 質感の変化・取り替え可能な形状ディスプレイの基礎検討. 情報処理学会インタラクシオン 2023, 東京, 2023年3月8日.
- Sareen H, Fu Y, *Kakehi Y, ephemera, Ars Electronica Festival 2022, オーストリア・リンツ, 2022年9月7日.
- 長内心, *仲谷正史. 3D プリンタを利用した触感再現の研究 (第2報) . ロボティクス・メカトロニクス 講演会 2022, 札幌, 2022年6月1日.
- *Sakura R, Han C, Watanabe K, Yamamura R, Kakehi Y. Design of 3D-Printed Soft Sensors for Wire Management and Customized Softness. Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '22)., アメリカ, 2022年4月30日.
- 長内心, *仲谷正史. 3D プリンタを利用した触感再現の研究. 第22回 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, オンライン, 2021年12月16日.

公募班 D01

D01-3 河野 行雄

- Li K, Araki T, Utaki R, Tokumoto Y, Sun M, Yasui S, Kurihira N, Kasai Y, Suzuki D, Martejn R, Toonder JD, *Sekitani T, *Kawano Y. Stretchable broadband photo-sensor sheets for nonsampling, source-free, and label-free chemical monitoring by simple deformable wrapping. Science Advances, 8, 19, eabm4349, 2022.05.11.

D01-5 岡本 正吾

- Sun Q, Okamoto S, Akiyama Y, Yamada Y. Multiple spatial spectral components of static skin deformation for predicting macroscopic roughness perception. IEEE Transactions on Haptics, 15(3): 646-654, 2022.8.16.

D01-8 岩崎 慶

- Nabata K, Iwasaki K, Adaptive Irradiance Sampling for Many-Light Rendering of Subsurface Scattering, IEEE TVCG, 28(10), 3324-3335, 2022.

D01-9 田中 充

- *Tanaka M, Arima K, Takeshita T, Kunitake Y, Ohno N, Imamura M, Matsui T. Laser Desorption Ionization-Mass Spectrometry with Graphite Carbon Black Nanoparticles for Simultaneous Detection of Taste- and Odor-Active Compounds. ACS Appl. Nano Mater., 5, 2, 2187-2194, 2022.

公募班 D02

D02-3 溝上 陽子

- Kato M, Sato S, *Mizokami Y. Effect of skin colors due to hemoglobin or melanin modulation on facial expression recognition. Vision Research, 196, 108048., 2022.7.1.

D02-4 白松 知世

- Ito Y, Shiramatsu TI, Ishida N, Oshima K, Magami K, *Takahashi H. Spontaneous beat synchronization in rats: Neural dynamics and motor entrainment. Science Advances, vol. 8, no. 45, eabo7019 (11 pp.), 2022.11.11.

D02-5 岡本 雅子

- Kato M, Okumura T, Tsubo Y, Honda J, Sugiyama M, *Touhara K, & *Okamoto M. Spatiotemporal dynamics of odor representations in the human brain revealed by EEG decoding, Proceeding of National Academy of Science, 119 (21) e2114966119, 2022.5.18.

D02-6 永井 岳大

- Nohira H, *Nagai T. Texture statistics involved in specular highlight exclusion for object lightness perception. Journal of Vision, 23(3):1, 2023.3.1.

D02-12 楊 家家

- Li H, *Yang J, Yu Y, Wang W, Liu Y, Zhou M, Li Q, Yang J, Shao S, Takahashi S, Ejima Y, Wu J. Global surface features contribute to human haptic roughness estimations. Experimental Brain Research, 240, 20220116.

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。

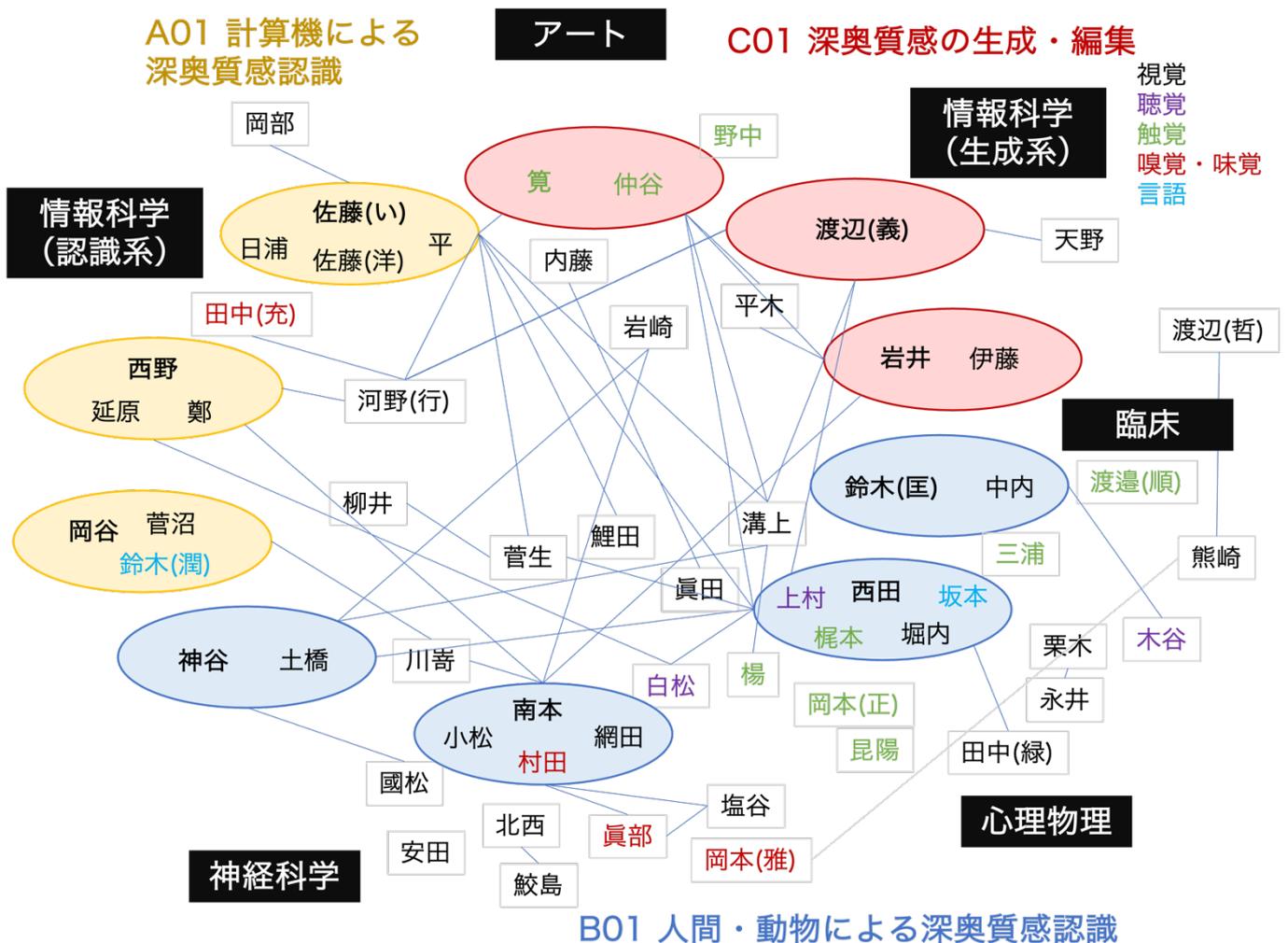
班会議における密な議論や、月に数度開催されるランチタイムセミナーでの研究背景を含めた深い発表により、異分野間の相互理解を進めてきた。また、Wet の会と称して動物実験を行うメンバーが定期的に Gatherstown 上の仮想ミーティングルームに集まって情報交換している。

このような取組の中で、様々な連携が生まれている。そのひとつが、情報科学と神経科学の連携である。西野班が班会議で行ったシンポジウムが契機となり、コンピュータビジョンを使ったマウスの自動行動解析システムの開発が西野班と白松班を中心に進んでいる。さらに、南本班が西野班、岩井班と連携してサル VR 実験システムの開発が進められるとともに、コンピュータグラフィックスを使った動物実験刺激の作成のために川寄班と岩崎班の連携も進んでいる。

アート研究に関する連携も進んでいる。藤田嗣治作品の乳白色の秘密に情報学から迫るポーラ美術館と佐藤いまり班の共同研究に関しては、心理物理学の立場から西田も参画している。また、音楽芸術に関して謡(木谷)・オペラ(中内)・リズム(白松)といった異なる観点からの研究者の間で活発に議論が行われている。班会議では寛班のメディアアート作品が展示され、通常の学会では得られない質感体験が共有されている。

また、報酬と結びつくことの多い食べ物や人肌の質感に関しては、様々な感覚モダリティや神経機能に関する研究者が本領域に集まっており、分野を超えた議論が進んでいる。

このように様々な形で進んでいる領域内連携について、以下の図にまとめる。



9 若手研究者の育成に係る取組状況

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（研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」の定義を始めに示すこと。

本研究領域が育成に取り組んだ「若手研究者」は以下で定義される。

1. 学生やポスドク研究員：大学の学部生や修士課程・博士課程の学生、ポスドク研究員など。
2. 助教や研究機関での研究員：8年未満又は39歳以下の博士の学位を未取得の研究者で、領域の計画・公募研究を推進する中堅・シニア研究者の指導を受けながら、独自の研究スタイルの確立を目指す研究者。

領域では、各計画研究班が研究費を活用して積極的に若手ポスドク（9名）・リサーチアシスタント（RA）（42名）を雇用し、若手研究者の領域への参画と育成に注力した。

また班会議においては、ポスター発表の場を設けることで、若手研究者の発表の機会を提供し、領域内での交流を促進した。さらに国際学会への派遣や国際共同研究への参画などを通じ、若手研究者の国際的な視野を広げる支援を行った。

また領域の構成において、45歳以下の研究者を研究代表者とする計画研究班を3班（C01-1, -2, -3）設けることで、領域の発足時から運営や研究推進において、「次代の学術の担い手となる研究者」としてのロールモデルを示すことができ、若手研究者の育成に寄与できたと考える。

これらの取り組みにより、領域発足から現在に至るまで、計画研究班に所属した学生のうち8名が大学等の研究職に就職、また民間研究機関へ2名が就職した。また7名の若手研究者が昇進・昇格し、4名が准教授・教授などへのキャリアアップするなど、若手研究者のキャリア形成を支援することができた。

10 アウトリーチ活動に係る取組状況

研究領域全体を通じ、一般向けのアウトリーチ活動に係る取組状況について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

領域ホームページ(<https://shitsukan.jp/deep/>)やニュースレターを通じて、領域の活動に関する情報を発信している。加えて、以下に述べるような活動を行った。

質感ラジオ:一般向けの研究紹介

音声配信プラットフォームを利用した領域の研究者の研究内容を紹介する番組。C01-2 班の仲谷がホストとなり、これまでに7名の研究者の研究を紹介した(<https://stand.fm/channels/6269faafd1be6fc466b8de2>)。

質感のつどい:質感に興味を持っている企業に所属する研究者や非研究者との交流

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前進の新学術領域(多元質感知)発足時の2015年に設立した組織で、講演会とオープンの研究発表を行う公開フォーラムを行ってきた。これまで多くの企業から参加や発表が行われ、企業との交流の重要な場となっている(<https://www.shitsukan.jp/tsudoi/index.html>)。2023年3月15日に東京大学本郷キャンパス福武ホールにて、「質感のつどい」第6回公開フォーラムを開催し、領域外からも55名が参加し、講演とポスター発表、質感関連デバイスの展示などを通じ、領域内外の質感に関心をもつ方々との交流を深めた。

個別企業との意見交換

領域主催イベントとして、SONY 新規ビジネス開発本部と今後の質感メディア技術開発の方向性について意見交換の場を設けた。また、SONY CSL の見学会も開催した。



一般向け講演会・セミナーなど: 計画班 9件、公募班: 5件

Web その他媒体への記事掲載: 計画班 7件

新聞、一般雑誌への掲載: 計画班 8件、公募班 1件

テレビ・ラジオでの放送: 計画班 4件、公募班 1件

主なアウトリーチ活動

- B01-1 神谷班 ライヴマティクスマルチプレックス、公益財団法人東京都歴史文化財団 東京都現代美術館、dissonant imaginary、Daito Manabe + Kamitani Lab、東京都現代美術館、2021年3月20日～2021年6月20日
- B01-2 南本班 第272回 つくばブレインサイエンス・セミナー:適切な行動を生み出す大脳基底核ネットワーク、発表者:網田英敏、オンライン、2022年12月20日
- B01-4 西田班 自動運転シンポジウム 2023～急進展するレベル4への道～「路車連携による自動運転社会の実現」、企画者:読売新聞社、発表者:坂本真樹、KDDIホール、2023/2/15
- C01-3 笥班 SFC TOUCH LAB EXHIBITION2023、発表タイトル:はざま、発表者:永末茉莉絵、仲谷正史、鎌倉画廊、2023年2月25-26日
xlab Showcase 2023 Ways of Uninventing: 3D-Printed Soft Sensors、発表者:佐倉玲、香川舞衣、笥康明、東京大学本郷キャンパス、2023年3月19日
- D01-3 河野 行雄 nanotech2023 国際ナノテクノロジー総合展、発表タイトル:フレキシブルカメラ、発表者:中央大学理工学部電気電子情報通信工学科河野研究室、東京ビッグサイト、2023年2月1-3日
- D01-5 岡本 正吾 東京都立大学オープンユニバーシティ、発表タイトル:触って、だまされて、感じる仕組みを考える、発表者:岡本 正吾、オンライン、2022.8.18
- D02-3 溝上 陽子 NEW! ディスカバリー講座「科学アート教室」、オーエンス八千代市民ギャラリー、発表タイトル:色覚の面白さ!～色の見えの特性とアート～、発表者:溝上 陽子、八千代市市民会館(八千代)、2022年10月2日
- D02-15 北西 卓磨 ランチウェビナー、発表タイトル:神経活動の流れを実測して脳の動作原理を探る、発表者:北西卓磨、発表場所:大阪市立大学、2021年10月8日

11 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫、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1頁以内で記述すること。

総括班では、研究領域全体の研究をサポートするために、初年度に質感知覚にかかわる材質の物理的名特性を測定する以下の装置を購入した。

- ・アピランスアナライザー（光沢測定器） 1台（Rhopoint IQ Flex 20-S） 91万円
- ・熱伝導率測定装置 1台（アイフェイズ・モバイル M10type1） 165万円
- ・分光測色計 1台（コミカミノルタジャパン CM-5） 231万円
- ・やわらかさ計測器 2台（テック技販 YAWASA 5N および 50N） 329万円

これらの装置は、質感データベースの作成や人間の知覚特性との比較を目的に、領域内に貸し出している。

また、領域内共用のLS方式3Dプリンター1台（Sinterit Lisa Pro、495万円）を購入し、前領域「多元質感知」から共用で利用していたマルチマテリアルの3Dプリンタとともに、総括班の分担機関である兵庫県立大学に設置し、領域内のリクエストに応じて様々な部品を出力する体制を作った。3Dプリントのための素材（樹脂）と装置の保守費で、年間400～600万円の経費を計上している。これらの3Dプリンタでは計画班・公募班を問わず領域内から広く依頼を受けて出力しており、当該研究領域の研究期間（令和2年度から現在まで）に320個の出力を行った（前領域からの通算では1,068個）。また、必要に応じて3Dデータの設計・修正等の支援も実施している。

班会議は年2回のペースで開催している。第2回まではオンラインで開催したが、第3回（2022年3月）～第5回（2023年3月）はハイブリッド開催であった。第5回の班会議では、アウトリーチイベントとして一般公開の質感のつどいも開催した。ハイブリッド形式の開催は、会場費に配信のコストが加わるため、1回当たり150万円程度の支出となった（参加者の旅費等は除く）。

領域内のコミュニケーションツールとしてSlackを利用している。昨年度、Slackの方針転換によりプランに変更せざる得なくなったため月額10万円程度の支出が発生している。オンラインセミナーなどのために、zoomのアカウントも契約している。さらに、オンライン交流のため、有料版のGatherTownも利用している。

12 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「これまでの学術の体系や方向を大きく変革・転換させることを先導する」観点から、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、今後実施する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

このプロジェクトでは、これまで培ってきた分野融合的な質感学をさらに発展させるために、表層的な質感の背後にある深奥質感を科学的に理解し、工学的に実現し、アートとして表現し、その結果を社会に還元することを目指した研究を進めてきた。各班で順調に成果が得られている。

質感情報処理の背後に潜むさまざまな問題を対象としているため、多様な軸で研究が進み、その成果の方向性も多岐にわたっている。それゆえ領域全体としての成果が見えにくくなっているかもしれない。今後の推進方策として、あえて特定の深奥質感に研究対象を絞ることをせず、多様な軸で研究を進める方針を維持しつつ、領域全体としての成果が有機的に融合するような形にまとめる。

とくに、基礎研究の成果の社会実装に向けた取組は強化したい。鈴木班では高次脳機能障害者の質感の研究を進めている。これは質感科学・技術に立脚し、患者の QOL を向上させる個別化された医療の社会実装を目指した研究である。非常に重要なテーマであるが、同時に非常に難しいテーマでもある。瞳孔反応などを使った分析から興味深い結果が得られているが、他の班でこれまでに得られている質感認識および編集技術を活用して、研究の加速を図りたい。関連して、fMRI による視覚応答のデコーディング研究においても、健常者に加えて精神疾患を対象とした研究も計画している。

深奥質感処理の神経機構については、感性的質感認識に焦点を当て、多様な感覚情報の入力から価値を評価するまでの神経回路について研究を進めている。これまでは感覚認知、報酬による意思決定や行動形成、情動生起といった機能や、視覚・聴覚・触覚・嗅覚の多感覚の統合処理、そして身体状態信号による知覚処理の調節などが神経科学分野における個別のカテゴリーで独立して研究されてきた。しかし、深奥質感では、その境界を取り払い、統一的に理解することを目指している。今後はそれらを有機的につなぐ理論的な枠組みの形成をより明確に推進したい。具体例として、南本班では感覚情報の価値と行動との関係を報酬学習と独立して扱えなかった既存の神経科学パラダイムの問題を克服するため、新規なサル VR 実験環境を構築し、より実環境に近い場面において脳が何を求め行動に移すのか、その神経機構を探索する計画を立てている。この取り組みは、環境の脳内モデリング、好奇心、アクティブセンシングなど広範なテーマも関連することから、公募班も取り込んだ領域としての発展が期待できる。

ChatGPT に代表される巨大言語モデル AI が社会に大きなインパクトを与えている。これらの技術の基礎となっている深層学習や Transformer は我々の質感研究においても重要な位置を占めてきた。情報科学の分野では、深奥質感の教科書も執筆している岡谷からの「画像と言語ラベルのマッピングは表層的な質感認識であってそれを超えた質感認識を研究すべきである」という指摘が、深奥質感というコンセプト提案の1つの契機になっていた。実際、領域開始当初の岡谷班の計画では、マルチモーダル情報の活用というのがポイントになっており、画像とそれに関する言語記述を Transformer で関連付けることで明示的なアノテーション無しで複雑な質感の意味を扱えるようにするという計画であった。(ちなみに岡谷は世界に先駆けて Vision Transformer を発表した研究者の1人である。)しかし、この3年弱の期間で、マルチモーダル AI が広がり、サービスとして利用されるころまで来てしまっている。マルチモーダル AI が多くのひとに使えるようになったことは福音ではあるが、深奥質感の研究としては、更にその先を目指す必要が出てきている。

インターネット上に存在するデータは膨大で、それを活用することで非常に多くのタスクができるが、多くのデータを集めて統計的に扱っていることによってハルシネーションのような問題が生じる。一方で、インターネット上に存在しないデータに関しては対応できない。どのようなデータをあらたに集めていくことかを明確にし、それに取り組んでいくことが、質感研究を発展させていくことにつながると

考えている。

質感の捉え方は個人によって異なる。たとえば鈴木班が研究対象とするような高次脳障害をもつ方の質感は、健常人とは大きく違うだろう。こういう個人固有の質感情報は、現時点では汎用大規模言語モデルで扱うことはできないはずである。各人に対して望まれる質感環境を科学的に理解し、生成・編集系の技術を活用して個人の環境を個別化する方法を確立し、それを社会実装までもっていくことが、これからの質感技術に求められる一つのゴールであり、それを我々の質感研究が先導していきたい。

また、これまで誰も気づかなかった感覚情報やその分析方法に注目し、これまで利用できなかった質感情報を取り出すアルゴリズムを開発することは、現在の情報技術の限界を突破し、世界に対する知識データを拡大し、新しい知の地平を開くことにつながる。このような方向の研究は深奥質感チームの得意とすることであり、今後も継続していく。

深奥質感の重要なテーマの1つである本物と偽物の質感の違いも近年のAI関係の議論で注目を集めていることの一つである。GANに続いて更に精度の高いDiffusion modelの登場で、生成された画像と実際の自然画像が人間の目にはほとんど区別できないという状況になっている。もし自然画像と生成画像に画像統計量的な違いがあっても、それが陽に定義できるのであれば、その違いが無くなるように画像生成することはできるだろう。となれば、本物と偽物の画像の客観的な区別はほぼ不可能である。一方で、人間が不自然だと思う画像がどのような特徴を持っているかに関しては、研究すべき点は残されている。さらに、実物は画像と違う。これらの問題についても、研究を深めていきたい。

深層学習は認知神経科学にも大きく影響を与えている。神谷らは世界に先駆けて深層ニューラルネットの内部表現を使って脳活動のデコーディングを行った。前領域から深奥質感にかけ、多くのチームが深層ニューラルネットを使った神経情報処理のモデリングを試みている。世界的にも、このような方向の研究が主流になりつつある。そのような中で、神経科学者は無批判的にモデルを受け入れている印象もある。生体の神経回路と人工の神経回路の関係について、我々はもう少し冷静に見直す必要があると感じはじめている。情報学と神経科学の研究者が密に連携する本領域であるからこそ、機械学習と神経科学の関係を冷静に捉え、情報を発信していけるはずである。

視覚や聴覚に比べて触覚の大きな特徴は、パッシブなセンシングに比してアクティブなセンシングの役割が大きいことだと思われる。このことは最近の西田班の研究からも分かってきたことである。しかし、アクティブタッチのメカニズムについては、その神経メカニズムを含めて分からないことが多い。後期公募班でアクティブタッチの神経機構の研究を補強したので、新たな展開が期待される。

領域外に目を向ければ、最近立ちあがった学術変革領域には関連するものがいくつかある。たとえば、「行動変容生物学」「クオリア構造学」「統一理論」などである。これらの領域とは、連携したイベントなどを企画して交流を図りたいと考えている。

最後に、この領域の開始当初から、アドバイザーの先生のお一人より、過去に宗教や哲学で議論されてきたような知見を参考に、大局的な視点から問題を俯瞰して、質感研究のロードマップを作るのが良いとのアドバイスを頂いている(アドバイザーコメント参照)。我々はすぐに答えを出すことはできないかもしれないが、現在取り組んでいる深奥質感のさらなる奥には何があるのかを常に考えながら、攻めの姿勢で、あと二年のプロジェクトを運営していきたい。

13 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（岡山大学／京都大学名誉教授／京都工芸繊維大学名誉教授）

本変革領域では、「計算機による深奥質感認識」、「人間・動物による深奥質感の認識」、及び「深奥質感の生成・編集」という3つの目標を掲げ、研究を展開している。これらの目標は、深奥質感の理解に基づきその展開を図るという全体の目的を達成するためにグループ化されたものである。研究を効率的に進めるためには、グループ間の有機的な連携が不可欠であるが、次のような態勢をとることによって連携が強化された。これにより、研究は、全体の目的の達成に向けて、順調、着実に、一部では初期目標を超えて進捗している。

- (1) 全研究者が、「深奥質感」の概念を共通に認識できるように、深奥質感の定義を具体的に整理し、これを全班員に提示し、概念の理解を深めた。
- (2) 半年ごとに開催する領域会議では、各グループの研究方向を周知するため、グループのコア研究を中心にしたシンポジウムを企画し情報交換を行った。これにより、「深奥質感」の概念の理解が深められ、グループを超えた連携が強化された。サルの自由行動を観察できる画期的な VR システムが構築されたが、これは3グループの連携協力によって可能になったものである。
- (3) 日常的な活動として、毎月開催する総括班連絡会議、領域メンバーが参加する Slack チャンネルでの意見交換、深奥質感ランチタイムセミナーの開催などを通じて領域内の連携を促している。

富永昌二（長野大学/ Norwegian University of Science and Technology）

A01 項目「質感機械認識」は異なるアプローチから深奥質感の機械認識の問題に取り組んでいる。

【A01-1 班】「実体・非実体深奥質感の計算機視覚の実現」(1) 偏光を用いた実体的質感の定量化 当研究では、反射光の偏光に着目し、反射光で変化する偏光角度と強度の偏光画像を解析することにより、物体法線と反射特性を推定できることを示した。偏光を活用した実物体属性解析に関する先駆的研究といえる。**(2) 人の非実体的質感の定量化** 非実体深奥質感の研究では、人々を固定視点のカメラ等で捉え、撮像映像から人々の意図を汲み取り、周囲環境における物や他の人との相互作用を紐解き、さらに全体として構成する場の雰囲気や空気まで理解するための基盤技術の整備を目標とした。これら成果は室内撮像システム等を簡便に構築することができ、老人の見守りなど広い応用が期待される。

【A01-2 班】「深奥質感のマルチモーダル深層モデルの確立」(1) 画像理解 AI の性能向上 Image Captioning の従来画像記述は、事実を簡潔に記述することが主で、時折、比喩的な表現を使うことで視覚情報を効果的に言語化する。CLIP を用いた方法を開発しており、最近の AI 応用研究である。次に、高性能・高効率な画像記述 AI の実現のため、GRIT と呼ぶ DNN アーキテクチャを新たに設計した。提案 GRIT は大学の研究室レベルでも可能で、意義ある成果といえる。さらに理解に基づいて行動まで可能な AI を研究している。**(2) 学習で獲得される潜在特徴・表現空間の理解** まず、獲得される特徴表現空間の理論的な分析し、「負例を用いない自己教師学習手法」の有効性を発表した。次に、質感語を可能な限り収集し、質感語の集合を実験的に構築した。言語モデルや視覚と言語の融合モデルの検証している。

【A01-3班】「アートに含まれる質感情報の情報学的解析」(1) 絵画作品の質感表現の解明「レオナルド・ダ・ヴィンチの肌質感解析」肌質感で著名な藤田嗣治の油彩作品における質感表現の分析を進め、芸術家の知見と破壊調査の結果をもとに色合いや顔料分布を推定する手法の開発をした。今後、藤田作品に限らず、肌を含めた多様な対象を扱った多くの画家の作品への一般化が期待される。**(2) 反射特性計測の効率化** サンプルング点の配置を適応制御するという考えは非常に斬新で、具体的なアルゴリズム開発と応用が期待される。**(3) 全偏光特性の計測による素材識別** 直線偏光に加え、円偏光の照射により全偏光反射特性を計測する装置を開発し、素材の高度な識別や真贋判定を行うことができる手法を開発した。この手法がどのような素材の識別に適用可能か、今後の応用研究に期待される。

河野憲二（京都大学名誉教授）

「深奥質感」領域では、これまで進められてきた物理的「質感」の研究を、ヒトが外界からの入力を受け取った時に誘発される情動や価値判断を含めた「感性的」質感までに深化させて研究を進めている。そのコアとなる「ヒトに

よる質感認識」にダイレクトにアプローチしている。

B01 項目「質感生体認識」グループによる主な成果を見てみると、「B01-1 班」では、ヒト脳と深層ニューラルネットワークモデルの情報表現の相同性の理解、階層的対応関係を定量化する指標の提案など、ヒト脳での外部世界モデルの表現の理解へと着実に研究成果を積み重ねてきている。

「B01-2 班」では、開発した化学遺伝学ツールを用いた薬理的な操作介入による研究で、「感性的」質感の要素である価値判断の神経機構の解明を試みていて、前頭眼窩皮質と吻内側線状体の線維結合が価値判断に重要な役割を果たしていることを示す大きな成果をあげている。さらに、ドーパミン放出動態を高い時空間解像度で計測するシステム、ドーパミンの2種類の受容体の薬理的な操作、セロトニン受容体の PET イメージングと薬理的な操作など、次々と新しい研究手法に挑戦し、確実に成果を上げてきていて、今後の研究の発展が大いに期待できる。また、これまでに優れた研究成果を出してきた公募班「村田グループ」が R5年度から計画班に加わることで、味覚・価値判断など、研究が既存の分野を越えて広がっていくと思われる。

「B01-3 班」では、加齢や脳損傷による深奥質感認知の変化を客観的に調べることを試みていて、Glare 錯視による瞳孔反応の変化に高齢者・認知症性疾患と若年者で違いがあることを発見している。また、てんかん患者の皮質電気刺激では、視覚対象や聴覚対象の質感が変化する脳部位を示すことができおり、連携する公募研究の自閉スペクトラム症児や視覚障害者を対象とした研究も加わることで、包括的な展開が期待される。

「B01-4 班」では、外界の物体からの情報が視覚・聴覚・触覚といった複数の感覚モダリティで質感情報として処理されるプロセスを、ヒトの心理物理学のアプローチによって調べていて、外界から入力される複雑な視覚情報から、不要な情報が無視され、生体にとって必要な外界モデルが脳内に作られることを示す結果や、触覚と視覚での質感認識の違いなど、興味深い成果があがってきている。

このような優れた成果は、「特定の深奥質感に研究対象を絞ることをせず、多様な軸で研究を進め、領域全体としての成果が有機的に融合するような形にまとめよう」とする本領域の基本推進方針によるところが大きい。特に、B01-2 南本班が A01-1 西野班、C01-1 岩井班と共同して開発した「サルを対象とした双方向性没入型視覚提示システム(サル VR)」は、新たな脳内価値情報と質感との関連を探索することを可能にするツールであり、「異分野の研究者が一体となって同じ方向を向かって研究を進めている」この領域の特性が実現した優れた成果であるといえる。

原島博(東京大学名誉教授)

まずは深奥質感の再現技術に関する C01 班の研究を中心にコメントする。3つの計画班の研究はそれぞれレベルが高く評価できる。少し前まで不可能と思えたものが現実の技術となって実現されつつあり、個人的にはワクワクするものがある。C01 班の計画班が若手研究者によって構成されていることは、この分野の未来に期待が持てるという意味で素晴らしい。

一方、深奥質感プロジェクト全体を考えたとき、C01 班の位置づけを明確にすることは重要である。領域の大きな目標が深奥質感の理解であるとする、工学的に現実世界の深奥質感を操作・生成する技術を開発することの意味が、領域外の人にはわかりにくいかもしれない。構成論的に機能を実現することで理解を深めるという工学研究の役割が、これを機会にもっとアピールされることを期待する。さらには、たとえば、高齢者を含めた多様な人間が気持ちよく過ごせる質感環境の実現のために C01 班の質感操作技術がどのように貢献するかを示すことで、C01 班の研究の役割はより明確になっていくであろう。

また、領域全体の運営に関して一言付け加えれば、このプロジェクトで目指す深奥質感の大きな理論的枠組みが示されるとよい。個々の感覚によって得られる質感とそれを統合して得られるマルチモーダルな質感、さらにはやや哲学的になるがそれを感じる人の自我や存在とどうかかわるのか。自然に向き合ったときの畏怖や超越したものへの宗教的な感覚は、対象のどのような質感から生まれるのか。

これはたとえば紀元 4 世紀インドの唯識派によって八識説として扱われているものであるが、このプロジェクトで目指す深奥質感はどこに位置づけられ、現在はどこまで達しているのか。このような大局的な視点から問題を俯瞰して研究のロードマップが示されると、プロジェクトの意義がより明確になるであろう。今後の検討を期待する。