

文部科学省科学研究費補助金
新学術領域研究

多元質感知



News Letter No. 3
2020.03.09

目 次

領域代表挨拶	vi
計画研究	1
計画研究 A01-1 信号変調に基づく視聴触覚の質感認識機構	2
西田 真也(京都大学大学院情報学研究科・教授)	
古川 茂人(NTT コミュニケーション科学基礎研究所・上席特別研究員)	
鈴木 匡子(東北大学大学院医学系研究科・教授)	
柳井 啓司(電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授)	
計画研究 A01-2 質感知覚の神経基盤とその獲得および変容機構	6
小松 英彦(玉川大学脳科学研究所・教授)	
本吉 勇(東京大学大学院総合文化研究科・教授)	
下川 文明(国際電気通信基礎技術研究所(ATR)・主任研究員)	
郷田 直一(自然科学研究機構生理学研究所・助教)	
計画研究 A01-3 質感認知に伴う情動惹起の神経機構	10
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・グループリーダー)	
本田 学(国立精神・神経医療研究センター神経研究所・部長)	
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)	
計画研究 A01-4 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	14
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)	
向川 康博(奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科・教授)	
西野 恒(京都大学大学院情報学研究科・教授)	
佐藤 洋一(東京大学生産技術研究所・教授)	
平 諭一郎(東京藝術大学社会連携センター・特任准教授)	
鄭 銀強(国立情報学研究所コンテンツ科学研究系・准教授)	
計画研究 B01-1 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	18
岡谷 貴之(東北大学大学院情報科学研究科・教授)	
川寄 佳祐(新潟大学大学院医歯学総合研究科・准教授)	
計画研究 B01-2 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	22
神谷 之康(ATR 脳情報研究所・客員室長/京都大学大学院情報学研究科・教授)	
計画研究 B01-3 視覚系における質感情報表現の階層的情報変換	26
大澤 五住(大阪大学大学院生命機能研究科・教授)	
田村 弘(大阪大学大学院生命機能研究科・准教授)	
佐々木 耕太(大阪大学大学院生命機能研究科・助教)	

計画研究 B01-4	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	30
	坂本 真樹(電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授)	
	中内 茂樹(豊橋技術科学大学大学院工学研究科・教授)	
計画研究 C01-1	触覚的質感の記録再生技術	34
	梶本 裕之(電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授)	
	岡本 正吾(名古屋大学大学院工学研究科・准教授)	
計画研究 C01-2	コンピュータグラフィクスによる質感表現技術	38
	土橋 宜典(北海道大学大学院情報科学研究院・准教授)	
	岩崎 慶(和歌山大学大学院システム工学研究科・准教授)	
	岡部 誠(静岡大学大学院総合科学技術研究科・准教授)	
	井尻 崇(芝浦工業大学工学部情報工学科・准教授)	
	藤堂 英樹(中央学院大学現代教養学部・助教)	
計画研究 C01-3	超多自由度照明による実物体の質感表現編集技術	42
	岩井 大輔(大阪大学大学院基礎工学研究科・准教授)	
	日浦 慎作(兵庫県立大学大学院工学研究科・教授)	
計画研究 C01-4	実社会の多様な質感情報を分析・制御・管理する技術	46
	岡嶋 克典(横浜国立大学大学院環境情報研究院・教授)	
	堀内 隆彦(千葉大学大学院工学研究院・教授)	
	富永 昌二((長野大学企業情報学部・客員研究員)	
	公募研究(前期)	51
公募研究 D01-1	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	52
	栗木 一郎(東北大学電気通信研究所・准教授)	
公募研究 D01-2	フラッシュラグ効果を用いた質感処理過程の同定	54
	塩入 諭(東北大学電気通信研究所・教授)	
公募研究 D01-3	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～	56
	野々村 美宗(山形大学大学院理工学研究科・教授)	
公募研究 D01-4	肌色空間の構築と肌質感認識のマッピングによる解析	58
	溝上 陽子(千葉大学大学院工学研究院・教授)	
公募研究 D01-5	質感認知の異文化比較研究	60
	高橋 康介(中京大学心理学部・准教授)	
公募研究 D01-6	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	62
	仲谷 正史(慶應義塾大学環境情報学部・准教授)	

公募研究 D01-7	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 鵜木 祐史(北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科・教授)	63
公募研究 D01-8	おいしさをつくりだす神経細胞集団の同定 村田 航志(福井大学医学部脳形態機能学分野・助教)	65
公募研究 D01-9	高精度視覚質感記憶の心理学的基盤と神経機構の解明 齋木 潤(京都大学大学院人間・環境学研究科・教授)	67
公募研究 D01-10	細胞集団による質感情報の符号化, 復号化, 皮質表現 藤田 一郎(大阪大学大学院生命機能研究科・教授)	69
公募研究 D01-11	ワンショットBRDF計測と質感解析 長原 一(大阪大学データビリティフロンティア機構・教授)	71
公募研究 D01-12	多様な感覚による質感認知の発達初期過程 山口 真美(中央大学文学部・教授)	72
公募研究 D01-13	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 伊村 知子(日本女子大学人間社会学部・准教授)	74
公募研究 D01-14	触覚の質感を表現するオノマトペの神経基盤 北田 亮(Nanyang Technological University・Associate Professor)	76
公募研究 D01-15	液体粘性知覚の神経メカニズムの解明 眞田 尚久(関西医科大学医学部・助教)	77
公募研究 D01-16	新奇食品に対する感性的質感認知の解明ー食用昆虫を例としてー 和田 有史(立命館大学食マネジメント部・教授)	79
公募研究 D01-17	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 宮川 尚久(量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所・主任研究員)	81
公募研究 D01-18	顔の質感情報の時間的コーディングの研究 菅生 康子(産業技術総合研究所人間情報研究部門・主任研究員)	83
公募研究 D01-19	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 藤崎 和香(日本女子大学人間社会学部・准教授)	85
公募研究 D02-1	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 嵯峨 智(熊本大学大学院先端科学研究部・准教授)	86
公募研究 D02-2	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 小泉 直也(電気通信大学大学院情報理工学研究科・助教)	87
公募研究 D02-3	高速ビジョン・プロジェクタに基づいた動的質感再現 渡辺 義浩(東京工業大学工学院・准教授)	88

公募研究 D02-4	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	90
	鳴海 拓志(東京大学大学院情報理工学系研究科・准教授)	
公募研究 D02-5	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	92
	天野 敏之(和歌山大学システム工学研究科・教授)	
公募研究 D02-6	多波長・多方向光源による蛍光物体の質感編集	94
	岡部 孝弘(九州工業大学大学院情報工学研究院・教授)	
	公募研究(後期)	97
公募研究 D01-1	広輝度帯域における視覚特性と質感知覚に関する研究	98
	栗木 一郎(東北大学電気通信研究所・准教授)	
公募研究 D01-2	「脳ならではの」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	100
	永井 岳大(東京工業大学工学院・准教授)	
公募研究 D01-3	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	102
	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)	
公募研究 D01-4	耳鳴の脳活動の解明と質感制御	104
	高橋 宏知(東京大学大学院情報理工学系研究科・准教授)	
公募研究 D01-5	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	106
	三浦 貴大(産業技術総合研究所人間拡張研究センター・研究員)	
公募研究 D01-6	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	108
	鶴木 祐史(北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科・教授)	
公募研究 D01-7	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	110
	村田 航志(福井大学医学部脳形態機能学分野・助教)	
公募研究 D01-8	質感記憶の変容とその神経基盤の解明	112
	齋木 潤(京都大学大学院人間・環境学研究科・教授)	
公募研究 D01-9	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	114
	藤田 一郎(大阪大学大学院生命機能研究科・教授)	
公募研究 D01-10	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	116
	楊 家家(岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科・助教)	

公募研究 D01-11	質感知覚の獲得過程:知覚環境と感性情報	118
	金沢 創(日本女子大学人間社会学部・教授)	
公募研究 D01-12	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	120
	伊村 知子(日本女子大学人間社会学部・准教授)	
公募研究 D01-13	液体粘性知覚の神経メカニズムの解明	122
	眞田 尚久(関西医科大学医学部・助教)	
公募研究 D01-14	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	124
	近添 淳一(生理学研究所・生体機能情報解析室・准教授)	
公募研究 D01-15	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	126
	宮川 尚久(量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所・主任研究員)	
公募研究 D01-16	深層ニューラルネットを用いた質感的な不協和の神経情報表現の解明	128
	林 隆介(産業技術総合研究所人間情報研究部門・主任研究員)	
公募研究 D01-17	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	130
	菅生 康子(産業技術総合研究所人間情報研究部門・主任研究員)	
公募研究 D01-18	質感の深層生成学習理論	132
	細谷 晴夫(国際電気通信基礎技術研究所(ATR)・主任研究員)	
公募研究 D02-1	流体状食品のシミュレーションと物性推定	134
	楽 詠瀬(青山学院大学理工学部・准教授)	
公募研究 D02-2	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	136
	鳴海 拓志(東京大学大学院情報理工学系研究科・准教授)	
公募研究 D02-3	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	138
	渡辺 義浩(東京工業大学工学院・准教授)	
公募研究 D02-4	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	140
	天野 敏之(和歌山大学大学院システム工学研究科・教授)	
公募研究 D02-5	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	142
	石塚 裕己(大阪大学大学院基礎工学研究科・助教)	
公募研究 D02-6	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	144
	岡部 孝弘(九州工業大学大学院情報工学研究院・教授)	
公募研究 D02-7	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	146
	三木 則尚(慶應義塾大学理工学部・教授)	

領域代表挨拶

新学術領域研究「多元質感知」のニュースレター3号をお送りします。我々の領域は2020年3月に予定研究期間を終了します。このニュースレターは、この5年間の研究成果をほぼ網羅したものです。12件の計画班の成果報告、25件の第二期公募班の成果報告、さらには25件の第一期公募班の成果報告も加えて、堂々の140ページ超えの大作です。この領域は何をしてきたのか、質感研究の現時点の到達点はどこなのかを知るのに、絶好の資料になったのではないかと思います。

また、2019年12月5日6日に、京都大学医学部創立百周年記念施設芝蘭会館にて、国際シンポジウム "Past, Present and Future of Shitsukan Science and Technologies" を開催したことをご報告させていただきます。Barry Richmond (NIMH)、Charles Spence (Oxford University)、Pascal Barla (Inria)、Gabriel Kreiman (Harvard Medical School)、Bernd Bickel (IST Austria)、Wenzel Jakob (EPFL)、Boxin Shi (Peking University)、Sylvia Pont (TUDelft)、David Brainard (U Penn)、Lynette Jones (MIT) といった、国際共同研究を行ってきた研究者や、質感関連の研究で世界をリードしている新進気鋭の研究者を海外から招待して、領域メンバーとともに質感研究の過去、現在、未来を語り合いました。その様子は近日中に動画で公開する予定です。詳細は多元質感知ホームページ (<http://www.shitsukan.jp/ISST/>) を御覧ください。

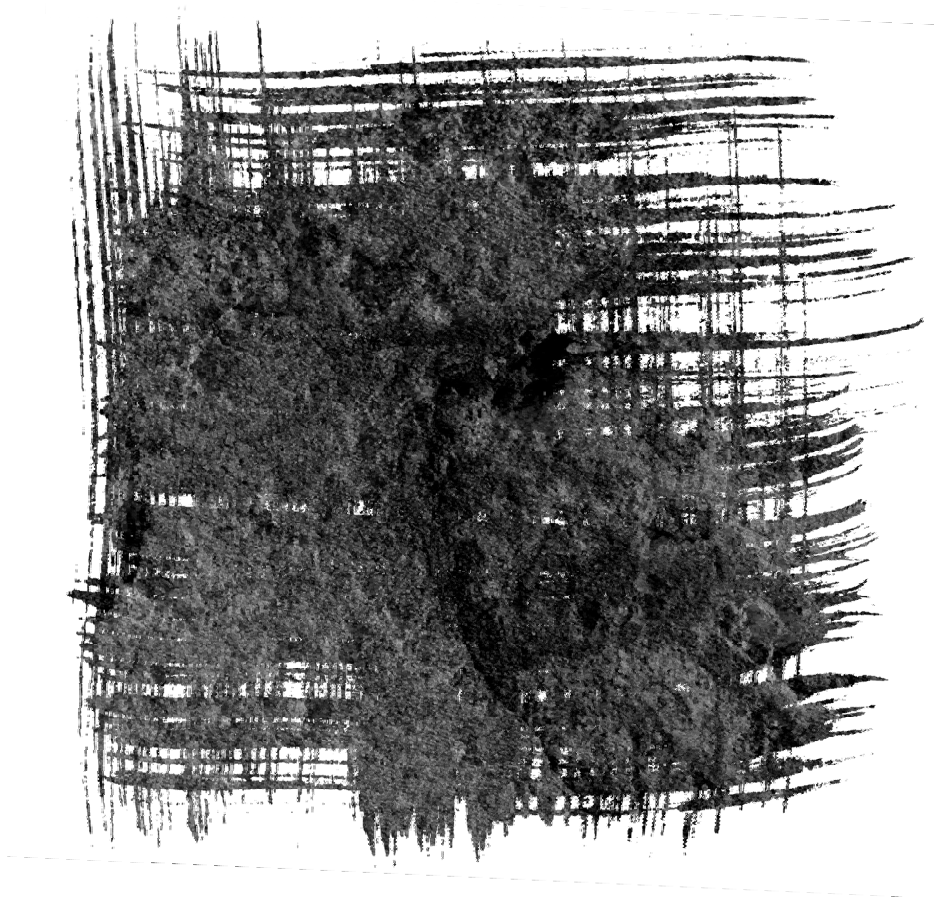
「多様な質感認知の科学的解明と革新的質感技術の創出」 領域代表

京都大学大学院情報学研究科 教授

NTT コミュニケーション科学基礎研究所 リサーチプロフェッサ／上席特別研究員

西田真也

計画研究



信号変調に基づく視聴触覚の質感認識機構

研究代表者 西田 真也（京都大学大学院情報学研究科・教授）
 研究分担者 古川 茂人（NTT コミュニケーション科学基礎研究所・上席特別研究員）
 鈴木 匡子（東北大学大学院医学系研究科・教授）
 柳井 啓司（電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授）

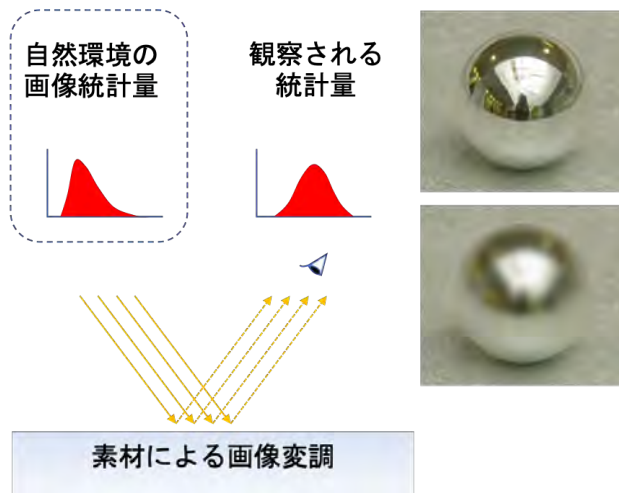


図1：信号変調による質感認識。視覚の例。

○研究の背景と目的

視覚的な質感情報は、光と物体の相互作用が生み出す画像特徴の複雑な変調パターンの中に埋め込まれています[文献1]。たとえば、金属表面に映り込むシーンのボケ具合を変調すると、金属表面の質感ががらりと変わります。その際、映り込んでいるシーンは関係ありません。映り込み映像の変調の具合が表面の質感として解釈されます(図1)。同様のことは聴覚や触覚の質感にも当てはまります。

この班の研究では、視覚、聴覚、触覚信号の変調パターンに埋め込まれた多様な複雑な質感情報を読み取る脳の仕組みを明らかにするために、各質感に結びついた変調情報を特定して、その抽出の仕組みを解明することを目指しました。また、脳が障害を受けたときに質感認知がどのように変化するかを明らかにしました。さらに、質感認識の科学的理解に基づいて、新たな質感操作技術の開発を行いました。

○研究成果

まず、西田チームでは、視覚質感の画像手がかりを解明してきました。前回のニュースレターで紹介したように、画像の色彩度を強調し、トーンカーブを変えて輝度ヒストグラムの歪度を増加すれば物体表面をぬれて見せることができます。また、視覚解像度より細かい要素で構成されたテクスチャ（例えば髪の毛）の細かさ知覚では、輝度コントラストが

低いほど細く見えます。これらは、物理光学的な変化を視覚系が正しく理解して、質感認識に利用していることを示しています。

光沢感に関しては、ピクセル強度ヒストグラムの歪度が有望な手がかりになるということを以前の研究で提案していました。歪度が正になるほど光沢感が上がるという関係です。しかし、強度ヒストグラムの歪度のような低次画像特徴量が光沢感の手がかりであるという考えに対しては、物体表面の三次元形状を含む高次の情報が光沢感に影響するという反論も出されています。そこで、質感（光沢）知覚と形状知覚の関係を分析し、図2に示すような仮説を導き出しました[文献2]。視覚系は、画像の強度勾配を二種類の成分に分解します。強度勾配の方向（＝強度順序）と、強度勾配の大きさ（傾き量）です。そして、勾配方位を対象物体の表面形状の復元に利用し、勾配量を物体の反射特性（質感）の復元に利用します。強度ヒストグラムは勾配量だけを反映する特徴量なので、その歪度が光沢感に関係するのです。また、強度勾配量から質感を推定する際には、形状情報との関係も考慮します。また、表面アルベド（反射率マップ）や照明は、両方の強度勾配成分から推定します。心理物理実験を行い、この仮説を支持する結果を得ました。例えば、強度順序を維持したまま勾配量を変化させても見かけの表面方向は変化しませんが、強度順序が変わると見かけの表面方向が変化しました。また、正しい光沢ハイライトは強度勾配量を操作することで消失させることができましたが、ハイライトの位置や方向をずらして白いペイント（アルベド変化）のように見える場合にはできませんでした。

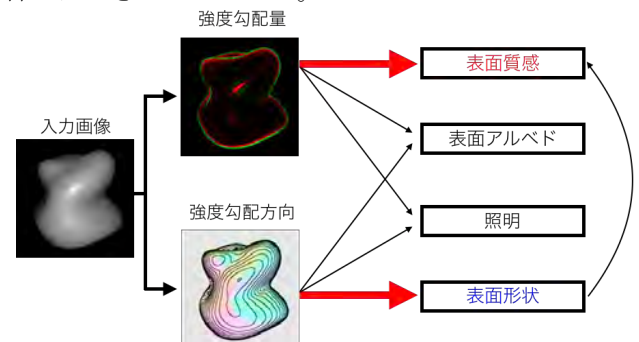


図2：強度勾配情報を2つの成分に分けて、表面質感と表面形状を並列的に計算する。

多様な質感を学際的なアプローチで研究するには、刺激やタスクを統一することが有効な研究戦略になります。そこで、光沢感や透明感など6つの質感次元で変化する刺激セットをCGで作り、単純な弁別タスクの標準的な反応をクラウドソーシングなどで収集しました[文献3]。このようにして出来上がったデータベースは、神経生理実験や幼児の行動実験など、領域内の様々な研究で活用されています。

また、クラウドソーシング実験で開発した汎用PCやiPad上で動く視覚実験環境を発展させ、ゲームを使って楽しく簡単に視覚機能が測定できるシステムの開発にも取り組みました[文献4]。

代表的な機械的質感特性である液体の粘性の知覚については、液体の形や動きの様々な特徴が手がかかりになっていることがわかってきました。この情報処理をさらに解明するために、機械学習を使った研究を行いました[文献5]。さまざまな液体動画をCGでレンダリングし、学習によってその動画から液体粘性（真値）を推定する人工ニューラルネットワークを構築したところ、とくに学習の初期段階で人間に近いエラーパターンを示すことが分かりました。また、このネットワークの内部構造を分析することで、さまざまな画像特徴に応答するユニットが粘性判断に関わっている可能性が示されました。

触覚に関しては、色を含む画像特徴量と温度感覚の関係の分析を深めました。また、触覚テクスチャの研究では、3Dプリンタを使って様々な刺激を作成し、視覚テクスチャ研究を参考に画像統計量に基づいた分析を行いました[文献6]。その結果、低次の画像統計量（強度ヒストグラムや空間周波数パワースペクトラム）で一致したテクスチャは、高次

（V2）統計量の違いで視覚的には区別できても触覚的にはメタマーになる（区別できない）という結果を得ました。これは、触覚系と視覚系の空間情報処理に本質的な違いがあることを示唆しています。

視覚系の特性を利用したメディア技術の開発も行いました。止まった実物が動いて見えるプロジェクションマッピング技術「変幻灯」の改良を進め、刺激作成時のパラメータの最適化に人間の視覚系のモデルを組み込みました[文献7]。

聴覚質感は古川チームが担当しました。自然な環境で私たちが会える音はそれぞれ複雑です。我々の聴覚は、音に含まれる様々な特徴に基づいて、音源や環境の性質を判断しています。特に重要な特徴は音波形の振幅の緩やかな時間変動（振幅変調；AM）です。入力音の生（なま）の情報が知覚に至るには、多段階の情報処理が行われます。AMの情報も、段階を経るごとに形を変えて中枢へと伝えられます。これまでに多くの聴覚生理者が、各処理段階について、AM情報に対する神経細胞の反応をAM周波数（変動の速さ）に対する感度を調べることで整理し、膨大なデータを報告してきました。今回、深層ニューラ

ルネット（DNN；図3）を、脳の計算機モデルと見立て、その内部の「ニューロン」の特性を生理学データと比較しました。このDNNは、音声や環境音など、自然な音を認識するように訓練されたもので、具体的な神経細胞や神経回路を模擬したものではありません。にもかかわらず、実際の脳のニューロンと似た特性がDNNの「ニューロン」にも発現し、しかも、一連の処理段階全体にわたって、ニューロン特性の構成が互いに類似していることを発見しました[文献8]。自然音認識に最適化するために独立に「進化・発達」した人工ニューラルネットが、実際の脳に似ていたという事実は、逆に、AM情報を処理する脳の特性が、自然音認識に最適化するように進化・発達した可能性を示すものといえます。

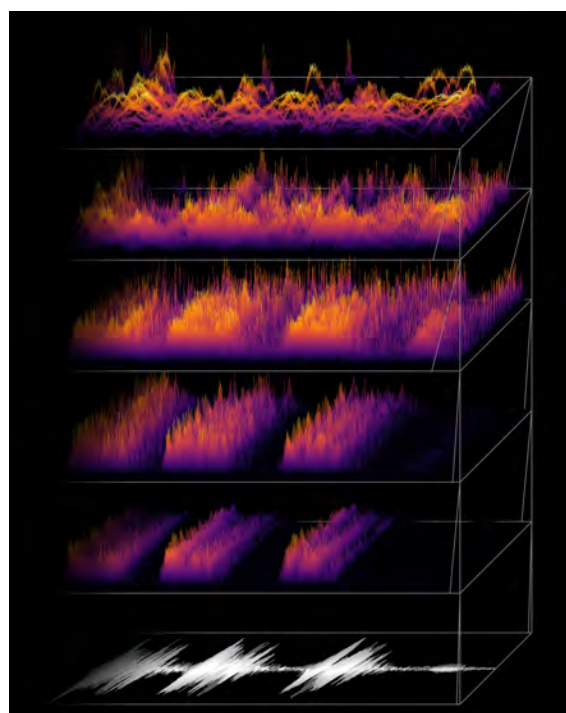


図3：音入力（最下段の白線）に対するDNN各処理階層内の「ニューロン」の応答。処理階層が上がるにしたがって、音情報の表現が変化している。

私たちは、物を叩いた時に出る音をもとに、その物の材質を当てることができます。ここでもAM情報は重要です。しかし、音源から耳に届く音には室内の残響が加わり、AM波形も変形されます。しかもその変形は部屋ごとに異なります。こういった変形は、材質判断にどのように影響するのでしょうか？ 私たちは、様々な室内音響を模擬した条件で、音による材質判断への残響の影響を調べました[文献9]。残響は材質判断に影響し、その影響の傾向は個人ごとに異なることがわかりました。しかし、一定の残響で聞き続ける条件では、残響が常に変化する条件よりも、残響の影響が小さいこともわかりました。これは、私たちの聴覚が、室内の条件に適応することにより、安定した材質判断を行おうとする働きを

反映しているものと考えられます。

鈴木チームは脳が障害されると質感認知がどう変化するかという視点から質感の神経基盤を探ってきました[文献 10]。対象は脳血管障害などの局所脳損傷の患者と、アルツハイマー型認知症、レビー小体型認知症などの神経変性疾患の患者です。さらに、加齢による質感認知の変化も検討しました。

まず、局所脳損傷による質感認知の変化に関して、ヒトの脳は部位によって機能が異なります。これまでの研究で色や形などの視覚情報は視覚腹側路（後頭側頭葉）が関与し、触覚情報は頭頂葉が関与することがわかっています。しかし、視覚性および触覚性質感認知がどの部位に関連するのかはまだよく分かっていませんでした。そこで、脳血管障害などで脳の一部の機能が障害されている患者 11 名を対象に、視覚性・触覚性質感認知について調べることにしました。質感認知課題としては、円筒形の 6 種類の素材刺激を作成し、視覚的、触覚的に呈示して、素材を同定できるかどうかを検査しました。また、素材の画像刺激を作成して視覚的に素材を同定できるかも調べました。その結果、左紡錘状回～舌状回に病巣のある 5 例中 4 例に視覚性質感認知障害を認めました。また、この 5 例中 2 例で触覚性質感認知も低下していました。一方、右紡錘状回～舌状回病巣や頭頂葉病巣のある患者では視覚性/触覚性質感認知は保たれていました。したがって、素材の質感を認知し素材を同定する機能は左後頭葉底面が要となるネットワークが関与していると考えられました。

つぎに、認知症における質感認知の変化に関して、神経変性による認知症のうち、アルツハイマー型認知症（AD）とレビー小体型認知症（DLB）は比較的に早くから視空間認知障害があることが知られています。AD では頭頂葉を中心とした血流低下が、DLB では後頭頭頂葉を中心とした血流低下が特徴的です。そこで、私たちは 1 と同じ方法で AD53 名と DLB25 名における視覚性質感認知機能を測定し、他の認知機能や視覚機能との関連を調べました。その結果、DLB は認知症がごく軽度の段階から視覚性質感認知が低下することが明らかになり、健常人との鑑別にも有用であることが分かりました。AD でも視覚性質感認知は健常人より低下していました。DLB や AD では視覚性質感認知が低下することで、対象の同定や質的狀態の判断が困難となり、日常生活に影響することが推測されました。

また、高齢者における質感認知の変化に関して、地域在住高齢者のコホート研究において 75 歳 84 名、86 歳 35 名を対象に質感認知機能を検討しました。その結果、視覚性質感認知は 75 歳群より 86 歳群で有意に低下し、触覚性質感認知は両群で有意な差はありませんでした。また、画像による質感認知、触覚性質感認知の成績は、全般的認知機能および歩行機能に関連していました。

以上より、視覚性および触覚性質感認知は後頭葉を中心とした神経ネットワークで処理され、脳損傷および加齢により変化することが示唆されました。

柳井チームは、深層学習を使ったデータドリブンな画像質感変換を研究しました。畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いた画像変換に関する研究を行い、(1) 言葉によってスタイル変換を制御する方法、(2) 画像中の物体の素材を別の素材に変換するのに適したスタイルを検索する方法、(3) 食事画像を別の食事に変換する画像変換手法、(4) スケッチから手軽にラーメン画像を生成する”RamenAsYouLike”システム、(5) 処理途中のノイズを画素単位で推定して信頼性の高い結果のみを統合することで高い精度を達成した弱教師あり学習による意味的画像領域分割[文献 11]、について研究を行いました。

従来から CNN を用いたスタイル変換技術を利用することで、画像の質感を変えることができることが知られていましたが、与えられた画像にどのようなスタイル画像を適用すれば、最も効果的に質感を変えることができるかは分かっていませんでした。(1) の言葉によるスタイル画像変換では、スタイル画像を与える代わりに、単語を入力して画像スタイル変換を直接行うネットワークを実現しました。言葉に対して、スタイルを固定するのではなく、言葉と入力画像の特徴の組み合わせによってスタイルを選択することとして、同じ言葉でも、画像内容に応じたスタイルでスタイル変換が行われることを実現しました。(2) では、入力した画像と変換後の素材（例えば、木、石、プラスチックなど）を与えると自動的にスタイル変換に最適なスタイル画像を検索する方法について研究し、実際に木製の物体を石や鉄でできた物体に自然に見えるように変換することが可能となりました。実際の変換では(5)で研究している領域分割技術と組み合わせ、木製の部分だけを石に変換するというような、特定の素材の部分だけを別の素材に変えることが可能となりました。

(3) の食事画像変換の成果は、拡張現実感（AR）の研究者と協力することによって、食べている料理をリアルタイムに別の料理に変換し、あたかも実際に食べている料理と違う画像変換された料理を食べているような体験ができる AR システム[文献 12]に応用されて、テレビ番組でも紹介されました。食事画像変換は iPhone 上で動作するモバイル食事画像変換アプリケーション”MagicalRiceBowl”として、iOS アプリストアで公開していますので、誰でも簡単に体験することが可能です[文献 13]。

(4) はスケッチで手軽に食事画像（ラーメン画像）を生成できる方法の研究です。丼、スープ、チャーシューや煮玉子などのトッピングをインタフェース画面上で描画すると、ほぼリアルタイムで画像に変換され表示されます。さらに、背景、丼、スープなどそれぞれ別々の画像からスタイルをパーツごとに抽出して、それをスケッチから生成される画像に転送す

ることができます(図 4)。つまり、最高のスープ、最高のチャーシュー、最高の煮玉子のスタイルをそれぞれ別々の画像からとってきて組み合わせることで、最高の一杯を描画することが可能となります。図 3 がスタイル転送を行った画像生成結果になります。左 1 列目のスケッチ画像に対して、1 行目の異なるスタイルを適用した結果を示します。各スケッチがそれぞれ対応するスタイルを持った画像として生成できていることがわかんと思います。



図 4：スタイルを考慮したスケッチからの画像生成

(5)では、弱教師あり学習による意味的画像領域分割問題において、自己教師学習を用いて変化領域の推論を行うことで、初期の結果とそれを洗練させた処理後の結果の 2 つの結果の信頼度をそれぞれ部分毎に推定し、信頼度の高い部分を組み合わせることが可能となりました。それによって、単純に処理後の結果を最終結果とするよりも、精度の高い結果を得ることに成功し、標準的なベンチマークデータセットにおいて最高精度を達成することに成功しました。これは部分的な質感の領域の推定に役立つ技術で、(1)(2)の画像質感変換技術と組み合わせることによって、特定の素材領域だけ別の素材に変換するようなことが可能となります。

○今後の展望

われわれの班は、質感認知の人間科学的基礎研究を、驚異的なスピードで発展する機械学習研究と、非定型な質感認識者を対象とする臨床研究とを結びつけることで、さまざまな成果を上げてきました。今後も、この連携を更に強め、質感やリアリティの本質に迫りたいと思います。

○関連する研究発表

1. Nishida S: Image statistics for material perception. *Curr Opin Behav Sci* 30: 94–99, 2019.
2. Sawayama M, Nishida S: Material and shape perception based on two types of intensity

gradient information. *PLoS Comput Biol* 14(4): e1006061–, 2018.

3. Sawayama M, Dobashi Y, Okabe M, Hosokawasa K, Koumura T, Saarela T, Olkkonen M, Nishida S: Visual discrimination of optical material properties: a large-scale study. *bioRxiv* 800870; doi: <https://doi.org/10.1101/800870>, 2019.
4. Hosokawa K, Maruya K, Nishida S, Takahashi M, Nakadomari S: Gamified vision test system for daily self-check. *IEEE GEM*, New Haven, USA, 2019.
5. Van Assen JJR, Nishida S, Fleming RW: Visual perception of liquids: insights from deep neural networks. *VSS Annual Meeting*, St Pete Beach, USA, 2019.
6. Kuroki S, Sawayama M, Nishida S: Haptic metameric textures. *bioRxiv* 653550; doi: <https://doi.org/10.1101/653550>, 2019.
7. Fukiage T, Kawabe T, Nishida S: Perceptually Based Adaptive Motion Retargeting to Animate Real Objects by Light Projection. *IEEE TVCG* 25(5): 2061–2071, 2019.
8. Koumura T, Terashima H, Furukawa S: Cascaded tuning to amplitude modulation for natural sound recognition. *J Neurosci* 39:5517–5533, 2019.
9. Koumura T, Furukawa S: Context-dependent effect of reverberation on material perception from impact sound. *Sci Rep* 7:16455, 2017.
10. Oishi Y, Imamura T, Shimomura T, Suzuki K: Visual texture agnosia in dementia with Lewy bodies and Alzheimer's disease. *Cortex* 103: 277–290, 2018.
11. Shimoda W, Yanai K: Self-supervised difference detection for weakly-supervised semantic segmentation, *ICCV*, Seoul, Korea, 2019.
12. Nakano K, Horita D, Sakata N, Kiyokawa, K., Yanai K, Narumi T: DeepTaste: Augmented reality gustatory manipulation with GAN-based real-time food-to-food translation, *ISMAR*, BeiJing, China, 2019.
13. Izumi Y, Horita D, Yanai K: MagicalRiceBowl, <https://apps.apple.com/jp/app/magicalricebowl/id1459013192>, 2019.

質感知覚の神経基盤とその獲得および変容機構

研究代表者 小松 英彦（玉川大学脳科学研究所・教授）

研究分担者 本吉 勇（東京大学大学院総合文化研究科・教授）

下川 文明（国際電気通信基礎技術研究所 (ATR)・主任研究員）

郷田 直一（自然科学研究機構生理学研究所・助教）

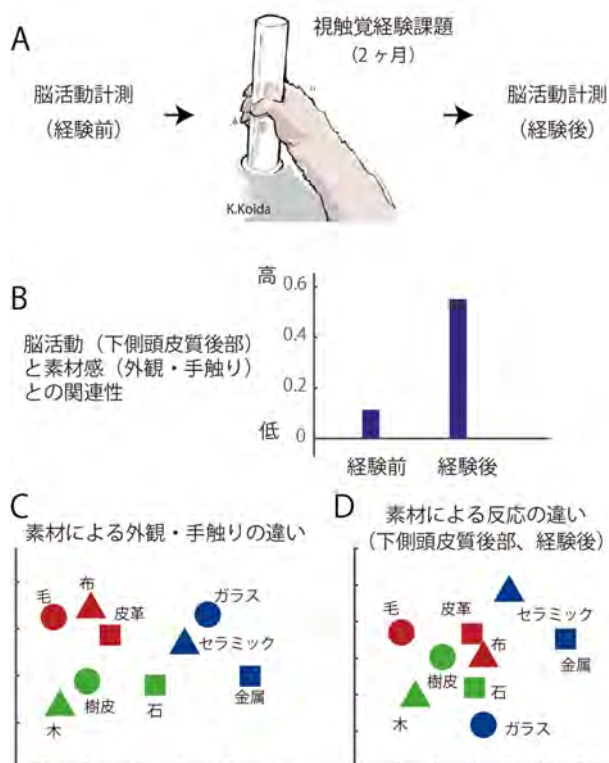


図1：(A) 素材の実物に触る経験の前後でサル脳の活動を fMRI で測定した。(B) 下側頭皮質後部の活動パターンが経験前後で変化した。(C,D) 経験後の活動パターンはヒトの素材印象と類似していた。

○研究の背景と目的

質感認知の基本的な機能には素材を分類する機能と、特定の質（光沢や半透明など）の程度を区別する機能が含まれます。また物体の美醜の判断や生物的な価値の判断につながる感性・情動的な処理も伴います。光沢や素材識別などの基本的な視覚質感については、それらに関する刺激の特徴の心理物理学的研究が進み、大脳視覚野での処理の内容についての基本的な理解も得られています。しかし、そのような情報が脳の階層的なネットワークのどのような計算によって取り出されるのか、どのように獲得され変容されるのか、また感性・情動的な質感認知にどのような処理に関わり、どのような情報が使われているかについてはよく分かっていませんでした。本研究では質感認知におけるそれらの重要な問題にアプローチしました。

○研究成果

これまでの研究から、視覚的な素材識別には大脳視覚野の腹側経路が関係し、低次視覚野で単純な画像特徴が検出され、高次視覚野でマルチモーダルな素材の印象が表現されていることが知られていました。高次視覚野の素材の情報表現の獲得に、物体を見て触る視触覚経験が果たす役割を明らかにするために、小松と郷田らはさまざまな素材でできた円柱状の物体を見て触る課題をサルに数カ月間行わせ、その前後で視覚野の活動を機能的 MRI (fMRI) で測定し、経験前後の脳活動の比較を行いました。その結果、高次視覚野の下側頭皮質後部の活動が視触覚経験前後で変化し、経験後には素材の印象が表現されることが明らかになりました (図1、Goda et al. 2016)。またこの課題を行っているサルの行動を成功率や把持力にもとづき詳しく解析した結果、素材により触り方が異なることが明らかになりました。予想外のこと、毛で覆われた物体は顕著に避ける傾向が見られましたが、画像を触る課題ではそのような傾向は見られませんでした (Yokoi et al. 2018)。この結果は、質感認知の仕組みを理解するための研究においては、実物体を用いることで初めて手に入る情報があることを示しています。

それでは、このような素材認知は脳内のどのような計算で行われるのでしょうか？その手がかりを得るために、郷田は近年画像認識分野で急速に発展したニューラルネットワークを用いた解析を行いました。この解析では、多数の素材の画像についての深層畳み込みニューラルネットワーク (DNN) の特徴表現と、質感との関係を調べました。DNN には、物体画像認識のためによく用いられている、物体カテゴリーを事前学習済みのもの (VGG16/19) を使用しました。このネットワークは複数層の畳み込み・プーリング層と3層の全結合層で構成されています。このネットワークは脳視覚野ネットワークの基本構造をある程度模擬していて、脳の視覚野ネットワークと一定の対応がみられることが示されています。

それぞれの画像に対する DNN 各層の活動から、そこで表現されている特徴を求め、それらと、12 形容詞対尺度の心理評定実験で求めた質感印象を比較したところ、DNN 特徴と心理的な質感印象との間によ

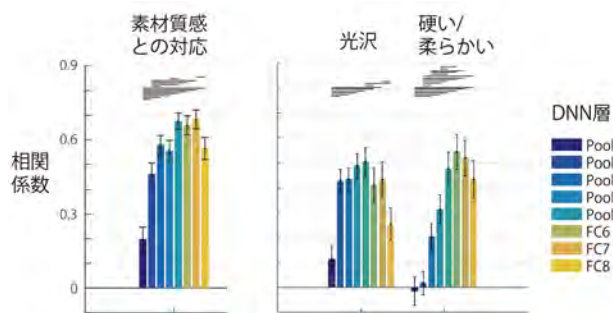


図2：DNN 各層の特徴と素材質感（左）、光沢感および硬さ感（右）との対応

い対応がみられることがわかりました(図2)。DNNの層ごとにみると、一般に、高次の畳み込み層・プーリング層(VGG19-pool5層等)の表現が質感印象をよく反映していました。より高次の全結合層等では逆に質感との対応は悪くなります。さらに、光沢などの視覚的な質感については比較的低次の層からよい対応がみられ、一方、硬さ、重さなどの非視覚的な質感に対しては、より高次の層がよく対応することもわかりました。

特定の質感と関係するDNN特徴が見つければ、それらを操作することで、その質感を変えることが期待できます。このような試みにも取り組んでおり、これまでに提案されている画像工学の手法よりも、より簡単に直接的な方法で質感を変調させることが可能になりつつあります。

質感認知は逆光学の過程であると言われます。これは、「物体形状」と「表面反射特性」と「照明」の三つの要素が相互作用して物体画像を生み出す過程(順光学の過程)のちょうど逆の向きのことを質感認知では行っているからです。質感認知では物体画像を元にして、主に質感に関わる表面反射特性の情報を取り出すことが行われています。このような逆光学の過程は一般には解が一意に定まらない不良設定問題ですが、ヒトはうまくこの問題を解いており、それがどのように行われているのかは、質感認知に関わる大きな謎として残っています。下川らはこの仕組みについて理解を進めるために、光沢(鏡面反射)を持つ画像から3次元形状の復元を行うことができる計算モデルを構築しました(Shimokawa et al. 2019)。この研究ではヒトの形状知覚についての心理物理学研究にヒントを得て、画像から3次元形状を復元するアルゴリズムを作成しました。このアルゴリズムは「画像方位」と「上下方向の輝度極性」という2つの画像特徴量を用います。これらを用いることで凹凸の複雑な形状であっても、また1枚の画像からでも3次元形状を復元することができることを示しました(図3)。

さらに心理物理学研究の知見に基づいたアルゴリズムであるため、単に正しい形状に近いものを復元するだけでなく、ヒトの形状知覚と共通点があることを示しました。例えば図3の画像(A)と画像(B)は

3次元形状(C)に基づいてコンピュータグラフィックス(CG)で作成したものです。ただし、画像(A)はわざとヒトの形状知覚が間違えやすいように照明環境や形状を工夫して作成した画像です。真の形状(C)では赤の十字で示した地点は出っ張っていますが、画像(A)では凹んで見えます。そして今回開発したアルゴリズムを用いて画像(A)から復元した形状が(D)、画像(B)から復元した形状が(E)です。アルゴリズムの形状復元の仕方が、ヒトの知覚と対応していることから、開発したアルゴリズムはヒトの脳情報処理の仕方を反映したものであると考えられます。開発したアルゴリズムのソースコードはウェブ上で公開しています(学会発表など[2])。

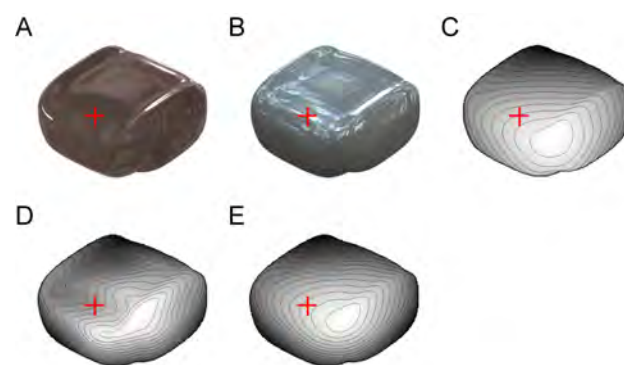


図3：CGで作成した画像の見え方とアルゴリズムで復元された3次元形状。(A,B)異なる照明環境下で生成された画像。(C)CG作成時に用いられた真の3次元形状。(D,E)それぞれ(A)と(B)の画像からアルゴリズムで復元された3次元形状。(論文[4]より転載)

本吉らは、滑らかなシルクからブツブツした生き物の表皮まで様々な表面の質感が喚起する心地よさや気持ち悪さを人間の観察者に評価させ、質感の情動的価値や美醜の判断がどのような情報に基づくかを調べました。その結果、表面の心地よさや気持ち悪さの判断は、表面の画像に含まれる比較的少数の画像統計量とよく相関することが明らかになりました(図4: Motoyoshi & Mori, 2016)。決め手となる画像統計量を人工的に操作すると実際に表面の美醜が変わること、表面の画像を極めて短時間だけ提示して材質認知をできなくしても情動的評価はあまり変わらないこともわかりました。空間周波数や方位のスペクトルだけを操作した無意味なノイズ画像でも類似の結果が得られました(Ogawa & Motoyoshi, 投稿中)。その一方で、画像統計量の点ではかなり醜い表面に分類される「食べ物」の画像は心地よいと評価されることもわかりました(森・本吉, 2017)。食べ物のような特別な材質の処理は非常に素早くおこなわれ、情動処理を強く変調する可能性が考えられます。

一般に、モノの価値の評価はそのモノの認識のあとに行なわれると考えられがちですが、上の実験結果は、ヒトの脳には材質の認知とは別に画像統計量

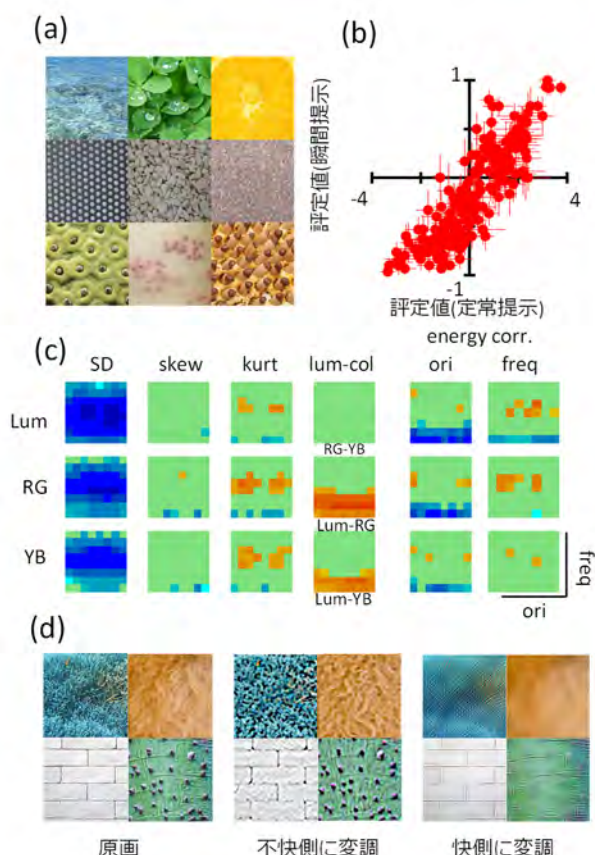


図4：(a)様々な情動価値をもつ表面画像。(b) 画像を定常提示したときの心地よさ評価と瞬間提示したときの評価の関係。(c) 心地よさ評価と相関する画像統計量。赤は正の相関、青は負の相関を示す。(d) 心地よさに関連する統計量を弱めた画像(中央)と強調した画像(右)

から直接に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ます。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を見出しました(小川・本吉, 2019)。これらのことから、材質認知の複雑な情報処理を完全に理解せずとも表面画像の特徴を分析するだけで、表面の美しさ・醜さを予測したり制御したりする技術への可能性が見えてきました。これは表面に限らず情景や絵画など、画像や動画の知覚全般に当てはまる可能性もあります(Sato et al., 2016; Kobayashi & Motoyoshi, 2019; Motoyoshi, 2019)。

また本吉らは、質感とその価値の知覚において重要な役割をもつテクスチャ情報あるいは画像統計量を符号化するメカニズムに関する基礎的な研究を進めました。例えば、近接する方位の間の角度や位置関係により定義される高次の画像統計量を符号化する機構が存在すること(Sato et al., 2019)、カテゴリカルな明暗コントラストの表現が存在すること

(Hata & Motoyoshi, 2018)、などを新しい残効錯視を用いて示しました。また、様々な自然テクスチャ画像に対する視覚誘発電位を解析した結果、視覚

皮質において低次・高次の画像統計量がそれぞれ異なるタイミングで組織的に符号化されることを明らかにしました(Orima & Motoyoshi, 2019)。更に、質感知覚の照明に対する依存性についても新たな検討を進めました。従来の研究では、光沢などの質感は照明の空間構造(照明統計量)に強く依存することが知られています(Motoyoshi & Matoba, 2012)。質感知覚にとりわけ大きな影響をもつ照明統計量を突き止めるため、様々な自然照明場(light field)のもとに置かれた様々な物体の光沢やザラザラ度の知覚を精密に測定し、照明統計量との関係を解析しました。その結果、コントラストや歪度など従来から知られていた統計量に加えて、方位信号間の相関という高次の統計量が質感知覚に強く影響することを見出しました。この結果に基づいて、質感の知覚を促進する「演質感性」の高い照明場を提案しました(Kondo, Fujita & Motoyoshi, 2019)。

質感知覚の研究では物体や表面の「見え」に関する人間の主観評価のデータを大量の画像について集める必要があります。本吉らは、この主観的な心理値をより高い効率と少ない心的負担で計測するため、古典的な一対比較法を実験手続きとデータ解析の双方において改良した「適応的比較行列法」を考案しました。これにより、古典的な方法では数万以上の試行を必要とした見えの心理値を、わずか数百の試行で求められるようになりました(Motoyoshi & Kashiwakura, 2018)。

人間は画像の特徴を利用して質感を素早く知覚しますが、じっくり観察してより深い判断を下すこともできます。本吉らは、この「遅い視覚」のメカニズムに迫るために、動的なテクスチャ画像に対する意思決定のダイナミクスを探索研究を進めました。その結果、視覚系は複雑な画像から統計量を素早く取り出し、その統計的情報を系列的にサンプルして「見え」に対する意思決定をするという図式が成立することを明らかにしました(Maruyama et al., 2019; Yashiro et al., 2020)。

○今後の展望

心理・行動実験と脳活動計測を組み合わせた研究により、感覚情報処理やマルチモーダルな処理の結果生み出される、素材や表面状態を識別する脳の信号が、感性や価値を含んだ質感認知とどのようにつながっていくのかについての理解が今後進んでいくものと期待されます。

またモデルによる研究や、モデルの構築も重要です。脳の基本的な構造を模擬したDNNの特徴と素材の質感との対応が見えてきたことから、DNN特徴をもとに素材情報を表現する脳の高次視覚野ニューロンのモデルへと発展する可能性があります。また、その成果は、質感の評価、再現、制御のための新しい技術の開発へも繋がるものと期待されます。

逆光学課程の計算モデルは定量的にヒトの知覚を

表すことができるため、ヒトが間違えにくい、もしくはわざと間違えるようにして人目を引くようなデザインに役立てることができるかもしれません。また、画像に基づいた形状の編集技術にも役立てることができるかもしれません。一般に、人が見て変だと感じないようにコンピュータグラフィックスの画像を修正するには3次元形状に基づいた計算負荷の高いレンダリング処理をやり直す必要があります。しかし、ヒトの知覚の要点を把握することで、そのような処理をショートカットしてもっともらしい画像を生成・編集することができるようになるかもしれません。

○関連する研究発表

論文

1. Goda N, Yokoi I, Tachibana A, Minamimoto T, Komatsu H: Crossmodal association of visual and haptic material properties of objects in the monkey ventral visual cortex. *Curr Biol* 26: 928-934, 2016.
2. Yokoi I, Tachibana A, Minamimoto T, Goda N, Komatsu H: Dependence of behavioral performance on material category in an object grasping task with monkeys. *J Neurophysiol* 120(2):553-563, 2018.
3. 郷田直一: 質感認知の神経基盤を探る. 日本画像学会誌 57(2):197-206. 2018.
4. Shimokawa T, Nishio A, Sato M, Kawato M, Komatsu H: Computational model for human 3D shape perception from a single specular image. *Front Comput Neurosci* 13:10, 2019.
5. Sato H, Motoyoshi I, Sato T: On-Off asymmetry in the perception of blur. *Vis Res*, 120: 5-10, 2016.
6. Hata W, Motoyoshi I: Bidirectional aftereffects in perceived contrast. *J Vis*, 18(9):12, 1-13, 2018.
7. Kobayashi M, Motoyoshi I: Perceiving natural speed in natural movies. *i-Perception*, 10(4), 1-5, 2019.
8. Sato H, Kingdom FAA, Motoyoshi I: Co-circularity opponency in visual texture. *Sci*

Rep, 9: 1403, 2019.

9. Yashiro R, Sato H, Motoyoshi I: Perception and decision mechanisms involved in average estimation of spatiotemporal ensembles. *Sci Rep*, 10(1), 1-10, 2020.

学会発表など

1. 郷田直一 小松英彦: 物体の材質を表現する視覚特徴: CNNを用いた解析. 第40回日本神経科学大会, 千葉, 2017.
2. Shimokawa T: ShapeFromSpecularity, MATLAB code for estimating 3D shape from a single specular image, <https://github.com/takeakishimokawa/ShapeFromSpecularity>, 2019.
3. Motoyoshi I, Mori S: Image statistics and the affective responses to visual surfaces. *J Vis* 16(12):645, 2016.
4. Orima T, Motoyoshi I: Image- statistics correlates of visual evoked potentials to natural texture images. *J. Vis*, 19(10): 123c, 2019.
5. Motoyoshi I, Kashiwakura S: MaxFind: an efficient method for psychological scaling of large stimulus sets. *J Vis*, 18(10): 214, 2018.
6. Motoyoshi I: Characteristic image statistics observed in paintings by Rembrandt van Rijn and his workshop. Visual Science of Art Conference 2019, 2019.
7. Kondo D, Fujita H, Motoyoshi I: Material rendering property of illumination. The Asia Color Association Conference 2019, 2019.
8. Maruyama H, Yashiro R, Sato H, Motoyoshi I: Reverse-correlation analysis of real-time perceptual decision for dynamic visual stimuli. *Vision*, 31, 32, 2019.
9. 森詩織・本吉勇: 視覚質感への嗜好と嫌悪: 食べ物の魅力と画像統計量. 日本視覚学会 2017 年冬季大会, 2017.
10. 小川成美・本吉勇: 表面質感の情動的価値に関連した視覚誘発電位. 日本基礎心理学会第38回大会, 2019.

質感認知に伴う情動惹起の神経機構

研究代表者 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・グループリーダー）

研究分担者 本田 学（国立精神・神経医療研究センター神経研究所・部長）

研究分担者 鯉田孝和（豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・准教授）

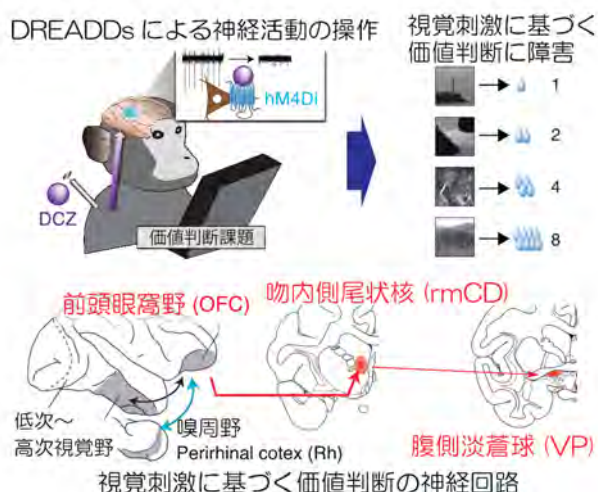


図1. 化学遺伝学 (DREADDs) などによりサル脳神経活動を操作することで、視覚に基づく価値判断に必須の神経回路として、嗅周野→前頭眼窩野→吻内側尾状核→腹側淡蒼球の経路を特定した（論文1,2,3）。

○研究の背景と目的

私たちは知覚した感覚情報に伴って「美しい」「すばらしい」と感じる感性や価値判断、そして「快い」などといった情動反応が生じます。多様で複雑な現実世界の質感から、私たちはどのような属性を頼りに特定の情動反応を引き起こしているのか？この質感認知の感性的側面—感性的質感認知—の謎を解き、共通原理を理解できれば、日常を心地よいものにするとともに世界をより豊かに導けるかもしれません。この感性的質感認知の仕組みを紐解く鍵はきっと私たちの脳の中にあるはずです。

これまでの研究から、私たちが受け取った複雑な感覚情報は、最終的に情動や価値判断を担当する「辺縁系」と呼ばれる部位で処理され、快楽や価値に関係する報酬系とよばれるシステムとの相互作用の結果、特定の感情や情動が生じると考えられています。しかし、どのような辺縁系神経回路が関わっているのか？そしてどの質感属性が特に辺縁系に働きかけて特定の情動反応を引き起こすか？について、詳しくは分かっていません。

そこで私たちのグループは、感性的質感認知における脳の基本的な仕組みを明らかにすることを目的に掲げました。そのため、サルをモデルとして標的

の脳回路を操作して価値判断や情動行動への影響を特定するという手段を用いることで、感性的質感認知における情動・感性系の神経回路の特定を試みました。研究手法としては、サル類を対象とした研究では画期的な試みとなる標的神経回路の活動のみを薬物で遠隔的に ON/OFF できる化学遺伝学的手法 Designer Receptors Exclusively Activated by Designer Drugs (DREADDs) を用い、イメージング等と組み合わせた解析を進めました（南本）。一方、別のアプローチとして特定の情動反応に影響を与える質感属性を特定して、それが辺縁系にどのように作用するかを明らかにすることを試みました。人間の可聴域上限をこえる超高周波により音の感性的質感認知が顕著に向上する現象〈ハイパーソニック・エフェクト〉に着目し、聴覚における強い効果をもたらす刺激属性を抽出、動物実験でその効果の検証を行うとともに、質感刺激による情動神経系の活動変化の医療応用について検討を行いました（本田）。また視覚においては、明るく鮮やかなシーンや画像が好まれる現象に着目し、ヒトとサルを対象とした心理・神経生理学実験を通じて脳の仕組みの理解を目指しました（鯉田）。

○これまでに得られた成果

（1）視覚認知に伴う価値判断の神経回路

視覚物体認知の最終ステージである下側頭皮質(IT)から、嗅周野(Rh)そして報酬などの価値が表現されていることが知られている前頭眼窩野(OFC)に至る経路が、視覚認知に伴う価値判断に重要であると考えられてきました。私たちは、側頭葉や前頭葉がヒト同様に発達したニホンザルなどマカク族サルをヒトのモデルとして用い、視覚認知に伴う価値判断を調べる行動パラダイムを構築しました。喉が渇いたサルは簡単にこなせるタスク（握っているレバーをタイミングよく離す）を成功させると、報酬としてジュースがもらえます。報酬量は4段階あり、どの量がもらえるかはあらかじめ試行が始まる前に視覚刺激で提示されます。この視覚刺激—報酬量の連合をサルはすぐに覚えて、報酬量が多い視覚刺激が提示されれば、やる気をだしてタスクを成功させる一方、報酬が少ない視覚刺激が提示された試行では、タスクを「拒否」する割合が増えます。この拒否する割合と報酬量との間には一定の法則が成り立つため、サルが視覚刺激の価値がわからなくなると、拒

否する割合との法則に変化が見られることが予測されます。

さて、Rh と OFC との神経連絡が価値判断評価に必須であるか？を調べるために、その神経連絡を一時的に遮断することで、報酬量一拒否法則が障害されるかを調べることにしました。片側の Rh を外科手術により切除したサルに対して、反対側の OFC の神経細胞に抑制性の人工受容体 (DREADD) を導入しました。この人工受容体が発現している細胞は、それに選択的に作用する薬物(CNO)を全身投与することにより、一時的に活動が抑制されます。このように一時的に左右の Rh-OFC の連関が機能しなくなったサルは、一度学習した視覚刺激の価値がわからなくなり、報酬量一拒否法則が消失しました。このように、Rh-OFC が価値判断に必須であることを明らかにするとともに、これが世界に先駆けてサル脳に DREADD の技術を適用した研究となりました(論文 1)。

次に、OFC から神経投射を受けとる吻内側尾状核 (rmCD) という脳部位に着目し、両側の rmCD の神経細胞に抑制性 DREADDs を導入し、同様に CNO の全身投与により rmCD の神経活動を一時的に抑制させることができる3頭のサルを作出しました。これらのサルは、やはり CNO を投与した後は、価値判断に障害を引き起こし、価値一拒否法則が障害されることを見出しました(図2・論文2)。

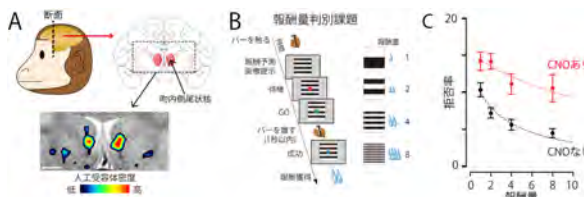


図2. サル吻内側尾状核に抑制性 DREADD を発現させ、PET イメージングにより可視化(A)した。サルに報酬量判別課題(B)を行わせたところ、通常は報酬量の多くなると拒否率が0に近づくが、CNO 投与後は、報酬量の影響がはるかに小さくなることから、吻内側尾状核が視覚に基づく価値判断に必須であることがわかった (C) (論文2より)。

では、rmCD の神経活動にはどのように価値が表現されているのでしょうか？それを調べるために、価値判断の行動パラダイムを遂行中のサルからニューロン活動記録を行いました。rmCD とその主たる投射先である腹側淡蒼球(VP)から記録した多くのニューロンは視覚刺激の提示にあわせて神経活動を変化させました。重要なことに、その神経活動の大きさは、その視覚刺激が意味する報酬量の大きさに相関していました。さらに rmCD や VP の神経活動を薬理学的に抑制することで、価値判断に障害を引き起こすことを明らかにしました(論文3)。

これらの結果から、霊長類が視覚刺激を元に価値

を正しく判断・評価して、それを行動に移すためには IT→Rh→OFC→rmCD→VP という神経回路が必須の役割を果たすことが分かりました。

(2)聴覚認知に伴う情動惹起の神経回路

OFC は視覚だけではなく全ての感覚入力を受け取る脳領域であり、高次感覚野との双方向性の神経連絡があります。聴覚の認知に伴う情動惹起の神経回路として、この OFC を取り巻く神経回路の役割を明らかにするため、抑制性 DREADD を両側の OFC に導入することで、この領域の神経活動を選択的・一時的に抑制可能にしたサルを作出しました。サルにとって情動の顕著性が高いサルの音声(叫び声)を呈示した際にみられる自律神経応答(皮膚温度の変化)が、CNO 投与後に OFC 活動抑制に伴って有意に減弱すること。それと平行して、情動に関連する視床 MD 核、扁桃体などの広範な神経ネットワーク活動に有意な変容を引き起こすことを見出しました。

(3)霊長類の特定脳回路を操作する手法の確立とその応用

以上のように霊長類の価値判断や情動惹起の回路を操作し、行動や神経ネットワークへの影響を調べる手段として DREADDs が非常に有用であることが実証されました。しかしその作動薬として用いられている CNO がスムーズに脳に移行しないため、その有効性が疑問視されるとともに、副作用の懸念もありました。私たちはこの問題を解決する、新しい作動薬、Deschloroclozapine (DCZ)を開発しました。この DCZ は既存の作動薬である CNO の100倍もの薬効があり、素早い神経活動の操作が可能であることを実証しました。さらに PET イメージング剤としても有効であり、サルの脳内局所に発現させた DREADDs を画像化することに成功しました(論文4)。

この PET イメージング法により、両側 OFC に抑制性 DREADD を発現させた複数のサルにおいて、OFC と神経連絡をもつ皮質下領域、吻内側尾状核 (rmCD)と視床 MDmc 核に投射している神経細胞末端であると考えられる DREADD の発現を同定しました。これらの領域に DCZ を局所注入することで OFC→rmCD、OFC→MDmc のそれぞれの経路選択的な神経活動抑制操作が可能となり、視覚刺激が意味する価値によって柔軟な判断が要求される場面において、それぞれの経路が異なる貢献をしていることを明らかにしました(学会発表1)。

(4)音響環境エンリッチメントが動物生存と社会性に及ぼす効果の検討

特定の質感刺激は情動・感性神経系に作用し、生存に最適な環境を選択することで生存値を向上させるための機能を果たしていると考えられます。聴覚における環境情報の複雑性が、動物の寿命や生存値

に与える影響を特定するため、マウスを熱帯雨林の環境音を呈示する音響環境エンリッチメント条件と、通常の実験動物飼育環境の騒音下で飼育する対照条件に分けて長期飼育しました。その結果、音響環境エンリッチメント条件で飼育したマウスで寿命が有意に延長しました。この効果は、自発活動量の増加による影響を差し引いても有意であったことから、単なる運動量増加以外の要因が関与することが示唆されました。また音響環境エンリッチメントによる寿命延長効果はオスで顕著であり、自然環境音呈示によって最長寿命は変化しないものの、最短寿命が延長するとともに、同一ケージ内の個体ごとの寿命のばらつきが小さくなることがわかりました。このことは、個体間の社会的順位付けがメスより顕著なオスにおいて、自然環境音呈示によって順位付けが緩和され、いじめ行動が抑制されることにより、最短寿命が延長したことを示唆すると考えられます。すなわち自然環境音による音響環境エンリッチメントがもたらす寿命延長効果には、ケージ内での社会的ストレスの軽減が関与している可能性が示唆されました。(論文 5)。

(5)報酬系を強化する超高周波音響と認知行動療法を組み合わせた新しいうつ病治療法の開発

精神疾患はわが国の 5 大疾病のひとつであり、最も患者数が多いことで知られます。うつ病の症状のなかでも、快楽消失と呼ばれるアンヘドニア症状はとくに治療によって改善しにくいことが報告されています。アンヘドニア症状は従来の治療では改善されにくい症状であり、ポジティブ感情の低下、意欲の減退、報酬に対する感受性の低下、喜びの喪失などを特徴とする症状です。

そこで私たちは、新しいうつ病治療として、“アンヘドニアに対するポジティブ価値システムに焦点を当てた認知行動療法(Positive valence system-focused cognitive behavioral therapy)”と“超高周波音響によるハイパーソニック・エフェクト(Hypersonic Effect)”を組み合わせた新しい治療法を開発しました。ポジティブ価値システム認知行動療法も、超高周波音響も、どちらも脳の報酬系システム(もしくはポジティブ価値システム)の活性化に関与すると想定されます。そこで、両方のアプローチを組み合わせることによって、報酬系システムがより活発に活性化され、それによってうつ病の症状が改善すると期待されます。本治療プロトコルを論文として発表し(論文 6)、現在アンヘドニア症状を呈する成人 44 名を被験者対象集団とした Randomized Control Study を実施中です。

(6)視覚における明るさの選好性と非対称情報処理

視覚においては一般的に明るい環境や色鮮やかに輝くモノが好まれます。これらは学習によってできた価値や好みなのでしょうか?あるいは強い光や色

が本能的な情動刺激となっているのかもしれませんが。シーンの明るさへの自律神経応答を評価するため、生理応答として注目したのは瞳孔径です。瞳孔径は自律神経系の制御を受け、刺激光に対する素早い縮瞳反射と、集中度や情動の状態に応じた効果が重ね合わされています。また、縮瞳反射は光感受性網膜神経節細胞(ipRGC)の活動に大きく支配されているため視覚刺激の色と時間特性に特徴が出ると予想されます。高輝度大画面ディスプレイに赤、青の全面刺激を呈示して、サルとヒトの生理応答を記録しました。測定の結果、サルもヒトも 2 秒~1 分に渡ってゆっくりとした持続的収縮が青色光で観察され、赤色光では生じないことがわかりました。いわゆるブルーライト刺激による応答がヒトとサルとで同様に観測されたのみならず、サルにおいては再現性の極めて高い瞳孔径応答であることが明らかとなり、モデル動物としての有用性が確かめられました(発表 2)。

次に私たちは、輝度コントラストの正負が色の見えに決定的に影響を与える錯視を発見しました。色の見えは周辺の影響を受けることが知られており、同時色対比、同時色同化という相対する効果が知られています。過去の研究から刺激画像の細かさや輝度コントラストの有無が決定要因であることがわかってきました。ところが、われわれは色同化が支配的となると予想されていたきわめて細い灰色線に、細い白い縁取りをつけると強い色対比が生じることを発見しました。黒い縁取りでは生じないことから細さと白さが錯視の発生に重要と考えられます。縁取り部位の輝度に関する非対称性は知られておらず、また赤とシアン(LM錐体色)での対比効果は弱いということか通説だったことから、錯視の発見はその年の錯視世界コンテストで入賞するなど注目されています(発表 3)。

(7)微小電極の位置マーキング技術

色やテクスチャーといった視覚情報表現や情動に関わる脳部位は脳の腹側や中心部にあります。深い脳部位の神経活動を細胞レベルで調べるためには微小神経電極を刺入して計測する方法が唯一の方法です。微小電極を用いた細胞外記録法は単一神経細胞の活動を容易に測定できることから広く用いられていますが、実は記録部位や細胞を正確には特定できないという大きな弱点があります。これは脳組織が柔らかく電極の刺入によって変形してしまうことや、細い電極自体も曲がりやすいことが原因です。そのため位置を特定するマーキングが必須になりますが、広く用いられているリージョンマーク法や色素沈着を用いた方法は、脳部位へのダメージが大きく解剖構造を特定できなかったり、位置分解能に制限があったりします。私たちは電極に貴金属の二層めっきを施し、目的部位で電気分解を起こすことで低侵襲・高精細なマーキングが可能であることを発明しまし

た(発表4)。本技術は特許出願されており企業との共同研究を後押ししています(特許5)。これらのマーケティング技術を応用することで、質感表現と情動に関わる脳機能の解明に大きな貢献をはたすことが期待できます。

○今後の展望

感性的質感認知を支える脳の基本的な仕組みを理解するため、サル脳をモデルとして標的の脳回路を操作することで、(1)霊長類が視覚刺激を元に価値判断・評価し、行動に移すにはIT→Rh→OFC→rmCD→VPという脳回路が機能していること、(2)聴覚認知に伴う情動惹起には、OFCが必須の役割を示し、扁桃体や視床MDを含む神経ネットワークが機能していることを明らかにしました。(3)さらに霊長類脳の複数の神経経路を画像化して、1つの経路の伝達を止める画期的な技術を開発しました。言い換えると、「質感の知覚から価値・情動への変換」が脳のどこで行われているか?の「地図」(脳回路)が分かり、さらに地図上の道を「一時通行止め」にする手法(経路選択操作)が確立できたと言えます。これらを組み合わせることで、今後それぞれの道でどのような「荷物の積み下ろし」がされているか?(情報変換プロセス)という、感性的質感認知の重要かつ本質的な仕組みについて、その理解が一層進むものと期待されます。

また、特定の情動反応に影響を与える質感属性の特定と辺縁系への作用については、(4)熱帯雨林の自然環境音に含まれる環境情報の複雑性に延命効果があり、社会的ストレスの軽減を介した作用であることを動物実験により見出しました。さらに、(5)このような“超高周波音響”が脳の報酬系を活性化させる作用に着目し、うつ病の快楽消失などの症状を改善するための治療プロトコルを開発し、現在、臨床応用へと着実に進んでいます。

さらに、明るさ・鮮やかさが好まれる仕組みの理解については、(6)明るさへの生理応答である瞳孔経に着目し、サル瞳孔径反射がヒトの良いモデルとなりうる確証を得ました。また明るさの選好性には、(7)輝度コントラストの正負と色の見えの錯視で見出したような非対称情報処理が関与している可能性も考えられます。(8)今回開発した脳深部から神経活動を正確に記録・解析するための手法を利用することで、光感受性網膜神経節細胞(ipRGC)のような縮瞳反射を支配する神経活動の特性を調べるなど、光の選好性の神経科学的メカニズム解明に期待できます。

○関連する研究発表

論文

1. Eldridge MA, Lerchner W, Saunders RC, Kaneko H, Krausz KW, Gonzalez FJ, Ji B, Higuchi M, Minamimoto T, Richmond BJ.: Chemogenetic disconnection of monkey

orbitofrontal and rhinal cortex reversibly disrupts reward value. *Nature Neurosci.* 19: 37-39, 2016.

2. Nagai Y, 他 27 名, Minamimoto T: PET imaging-guided chemogenetic silencing reveals a critical role of primate rostromedial caudate in reward evaluation. *Nat Commun.* 7: 13605, 2016.

3. Fujimoto A, Hori Y, Nagai Y, Kikuchi E, Oyama K, Suhara T, Minamimoto T: Signaling incentive and drive in the primate ventral pallidum for motivational control of goal-directed action. *J. Neurosci.* 39:1793-1804, 2019.

4. Nagai Y[§], Miyakawa N[§]([§]筆頭共著者),他 27 名, Minamimoto T: Deschloroclozapine: a potent and selective chemogenetic actuator enables rapid neuronal and behavioral modulations in mice and monkeys. *bioRxiv.* <https://doi.org/10.1101/854513>, 2019.

5. Yamashita Y, Kawai N, Ueno O, Matsumoto Y, Oohashi T, Honda M: Induction of prolonged natural lifespans in mice exposed to acoustic environmental enrichment. *Scientific Reports*, 8, 7909, 2018.

6. Ito M, Miyamae M, Yokoyama C, Yamashita Y, Ueno O, Maruo K, Komazawa A, Niwa M, Honda M, Horikoshi M: Augmentation of Positive Valence System-Focused Cognitive Behavioral Therapy by Inaudible High-Frequency Sound for Anhedonia: A Trial Protocol for a Pilot Study. *JAMA Network Open*, 2(11): e1915819, 2019.

学会発表など

1. Oyama K, Hori Y, Nagai Y, Hirabayashi T, Miyakawa N, Fujimoto A, Mimura K, Inoue K, Eldridge MAG, Saunders RC, Suhara T, Takada M, Higuchi M, Richmond BJ, Minamimoto T: DREADD inactivation reveals critical role of orbitofrontal cortex in reward-based adaptive decision-making in monkeys. 第42回日本神経科学大会, 新潟, 2019/07/27.

2. Tanaka K, Koida K: Position dependency of the slow pupil constriction to intense blue light. 12th Annual Asia Pacific Conference On Vision, Fremantle, Australia, 2016/7/14-17

3. Kanematsu T, Koida K: “White + Gray = Red” The Best Illusion of the Year 2018, <http://illusionoftheyear.com/cat/top-10-finalists/2018/>

4. Koida K, Sawahata H, Numano R, Kawano T, Hara T: Fine marking method of metal microelectrode for the electrophysiological recording in vivo. *SfN2019*, Chicago, US, 091.10. Oct 19 2019.

5. 澤畑博人、鯉田孝和、電極及びその用途, 特願 2017-241054

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

研究代表者 佐藤 いまり(国立情報学研究所・教授)

研究分担者 向川 康博(奈良先端科学技術大学・教授) 西野 恒(京都大学・教授)

佐藤 洋一(東京大学・教授) 平 諭一郎(東京藝術大学・特任准教授)

鄭 銀強(国立情報学研究所・准教授)

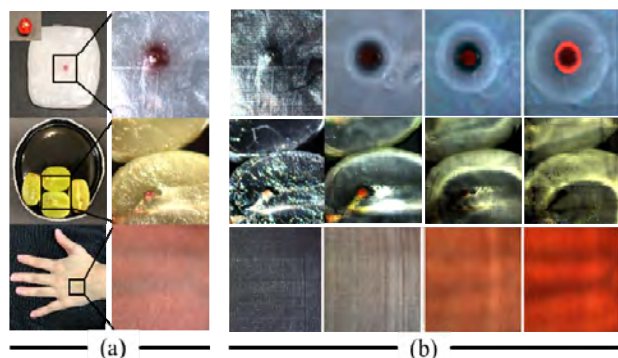
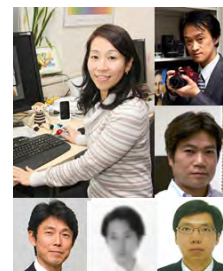


図1：可変リングライトイメージングによる
(a)半透明物体の(b)物体表層における光伝搬の観測。

○研究の背景と目的

草花の透明感、果物のみずみずしさ、絹織物の輝きなど、身近でありながら従来型の反射モデル式を用いての計測と再現が容易ではない反射特性を持つ物体が多数存在します。光沢・艶具合などの光学特徴がもたらす質感については、光学物理現象を記述する反射モデルが提案され、そのモデルに基づき実在物体の反射特性を推定し、コンピュータグラフィックス(CG)により再現する手法の開発が活発に進められてきました。その一方で、物体表面の微細構造に起因する表面下散乱、内部散乱、異方性反射、構造色、相互反射といった複雑な光学現象に起因する質感を効率的に記録・再現・加工する手法は未だ確立されていません。

本研究では、実物体表面・内部の微細な構造に起因して発生する複雑で多様な質感を対象として、人間の質感知覚と関連が深い光学現象を解明することで、質感知覚と関係する光学特性を近似するモデルを提案し、質感知覚に基づく質感の効果的なモデル化技術の実現を目指しています。

○研究成果

国立情報学研究所のグループでは、人間の質感知覚、質感解析のための3次元推定、質感モデリングのための分光情報解析の3つの研究成果を紹介しします。

人はデッサンを描くとき、対象のあらゆる箇所に注目をします。本研究では、デッサン熟練者と非熟練者のキャンバス上での視線を解析、比較すること

で、人が物体の質感を認識する際に重要となる要素の特定を目指します。しかし、視線の解析を行う際、手や鉛筆といった遮蔽物が映りこんでしまいます。

キャンバスを映したフレームから、手や鉛筆といった視線解析に不要な領域を取り除き、視線解析のためのプラットフォームの構築をしました。さらに注視点の可視化も行いました。

デッサンの様子を撮影した固定カメラ映像を入力とし、各フレームを斜影変換してキャンバス領域のみを抽出します(図2)。変換後のフレームについて、遮蔽物が映るフレームと映らないフレームに分けて、各フレームでデッサンが描かれた領域のみを抽出することで不要な領域を取り除きました(図3)。

注視点の可視化については、眼鏡型視線計測装置から取得した一人称映像と視線位置情報を、固定カメラ映像の時空間に重畳することで、キャンバス上に視線情報を可視化しました(図3)。

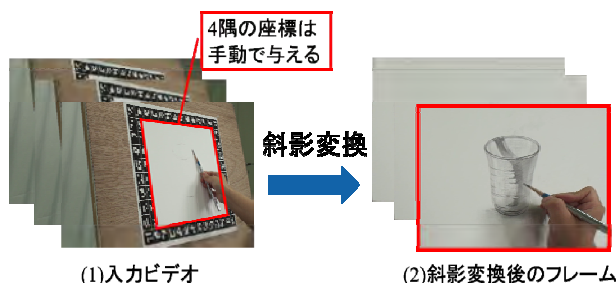


図2：固定カメラ映像からキャンバス領域を抽出。

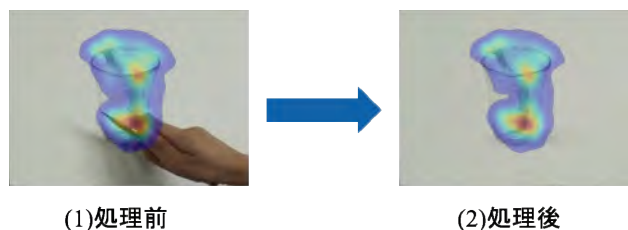


図3：不要な領域を取り除く前後の例。
図中のヒートマップは注視点を可視化したもの。

次に、質感解析のための、分光画像を利用した物体表面の三次元情報推定に関する研究を紹介しします。質感解析において、物体表面の分光情報は、従来のRGB信号では計測できない詳細な光反射の観測や、

吸収・透過・散乱といった物体内部で起こる現象の解析に用いられます。他方、物体表面の三次元情報も、物体の質感に影響する光の伝搬を計算する際に不可欠な情報として知られています。物体表面の分光情報と三次元情報を同時に取得することで、より高度な質感解析の実現を目指します。

本研究では、色収差を生じる標準的な広口径薄レンズと、一台の分光カメラを用います。レンズに入射する光線は屈折により、波長に応じて角度が変化します。波長依存の焦点距離の変化によって、各波長で異なる焦点ぼけが発生します。焦点ぼけがガウシアンぼけであると仮定すると、DfD (Depth from Defocus) にもとづいて、色収差を生じる単一の分光画像から物体表面の三次元情報が取得可能であることを示しました。被写界深度合成法を使用して、各波長の焦点ぼけの改善も実現しました[文献 1]。

提案手法における結果の一例を示します。図 4 (a) は撮影シーンの外観です。(b) は撮影した分光画像の RGB 表示です。可視光域の六種類の波長を撮影しました。(c) は提案手法を用いて分光画像から推定した三次元情報の可視化図です。球体表面の形状や各物体の前後関係が表れています。(d,e) は撮影した分光画像の一部です。レンズの色収差の影響により、450nm 画像では手前の球体に合焦しますが、650nm 画像では奥の物体に合焦します。(f,g) はそれぞれ 450, 650nm 画像に被写界深度合成を適用した結果です。元画像の焦点ぼけが改善されています。

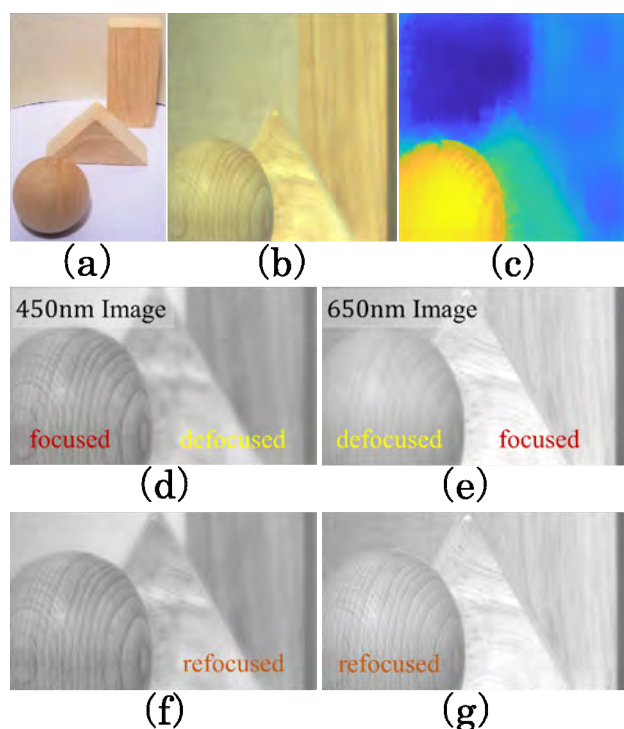


図 4：提案手法の入出力の一例。

3 つ目の研究では、植物や果物など身近な物体に含まれている「蛍光物質」に注目します。蛍光物質は、短波長の光を吸収し、長波長の光を発光するため、光源色に依存せずに独特の質感が生じます。そのため、詳細な質感を解析するためには、一般的な反射モデルとは別に、蛍光物質による吸光・発光特性による詳細な情報を取得する必要があります。

本研究では、蛍光物質による吸光・発光特性の差異を RGB 画像から検出するのに適した光源色を機械学習により導出することで、蛍光物質を識別する手法を開発しました。蛍光物質が吸収する光と発光する光の分光分布は、物質毎に異なります。この吸光と発光の波長の関係性を特徴量として活用するために、狭帯域波長の光を対象に照射した時の RGB 画像を学習データとしてサポートベクターマシンに適用することで、反射光と蛍光発光の特徴を抽出し、識別に適した光源色を算出します[文献 2]。

提案手法による識別結果の一例を示します。図 5 は、はちみつに含まれる蛍光物質の発光の見え方を比較するための画像で、(a)の白色光源下では発光色の差異が分かりづらいですが、(b)の学習により導き出した光源下では蛍光発光色の差異を確認することができます。一対一分類器による識別を行うと、アカシア、カナディアンクローバー、オレンジはちみつを約 74%の精度で識別することができました。また、アルコール飲料としてスコッチウイスキー、バーボンウイスキーなどのウイスキーと、コニャックなどのブランデーの識別を行うと、約 97%の精度で識別を行うことができました。

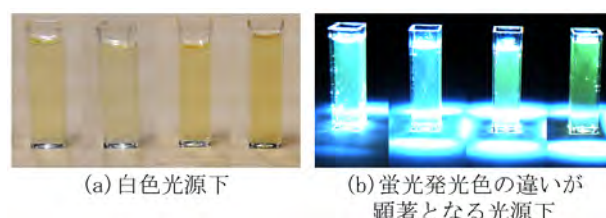


図 5：はちみつの蛍光発光の可視化。

奈良先端大のグループでは、人間が視覚的に感じる質感を光の伝播として捉えることで、質感を工学的に解明することを目指しています。そのため、反射や散乱などの光学現象を対象として、光伝播と質感の関係を解明するための研究に取り組んでいます。例えば、反射については、物体表面がツルツルしているのかザラザラしているのかといった反射特性を効率よく計測し、それを CG で再現する手法の開発に取り組ましました。一方、金属以外の多くの物体では、光は表面で反射するだけでなく、内部に光が入り込む「表面下散乱」という現象が起こります。この散乱の性質によって、色と形が同じであっても、質感に関する印象が大きく変わります。そこで、食品内部でどのように光が伝播するかを計測し、3D プリンタでその食品の質感を再現できるレプリカを作成しました。



図 6：時間同期式プロジェクターカメラシステム。

本稿では紙面が限られているため、最近の研究成果を二つ紹介します。

一つ目は光伝播を効率的に獲得できる計測システムです。私たちは、物体の光学的な質感を取得するためには、物体表面で生じる光伝播だけではなく、物体内部で生じる散乱現象などを捉えた、より一般的な光伝播の計測が必要不可欠であることに気がつきました。従来、光源としてのプロジェクターと、光計測器としてのカメラとを用いた光伝播計測では、膨大な計測回数が必要です。そこで本研究では、時間同期式のプロジェクターカメラシステムを用いて伝播距離に応じた光伝播を効率的に獲得します。従来のプロジェクター・カメラ系による光伝播計測では、特定の伝播距離の光伝播を計測するためには複数回の計測が必要でしたが、本研究では図 6 に示すように平行化された小型のレーザー走査方式のプロジェクターとローリングシャッター式のカメラを用い、照明を照射する行とカメラで観測する行との間に一定のオフセットを保ちながら計測することにより、特定の距離の光伝播を画像として取得することが可能です。さらに、この時間同期プロジェクターカメラシステムを用いて、人の肌におけるごく短距離の光伝播を画像として観測したところ、通常の画像では見ることができなかった皮下の静脈の様子を鮮明に可視化することが可能となりました（図 7）【文献 3】。

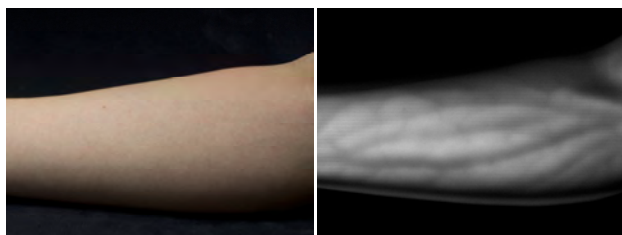


図 7：皮下の静脈の可視化。

二つ目は照明変動を考慮した分光計測です。通常のカメラでは、色を RGB の 3 色で計測しますが、実はそれだけでは不十分であることが知られています。そこで、私たちは図 8 のように、回転ミラーシステムと分光器を組み合わせ、200nm～1,100nm の波長を 0.5nm 刻みで計測できるパノラマ分光計測システムを構築しました。このシステムで、フランスのア

ミアンにあるノートルダム大聖堂のステンドグラスを分光計測しました。この時に問題となるのが、計測時間が長いことに起因する照明変動の問題です。すなわち、計測中に太陽の位置が変わってしまい、ステンドグラスの位置によって照明の影響が異なります。そこで、ステンドグラスの一部だけを高速に追加計測することで、照明変動を補償する手法を開発しました【文献 4】。



図 8：パノラマ分光計測システム。

京都大学のグループでは、質感の発現にまつわる光学的事象の解析とそれにより実現しうる物理量の復元に関する研究を進めました。

物体表層内での光の伝搬の特性に着目し、通常のカメラを可視光下で用いて物体表層内の光の伝搬過程を可視化する画像撮像法を開発しました。この新たな手法の特徴は、time-of-flight カメラや精密に時間的オフセットの制御されたカメラシステム等の特殊機器を用いて光の伝搬を時間分解するのではなく、その定常状態、すなわち物体表面の見えそのものを、新たに導出した光源の照射方法を用いて、観察する光の伝搬距離を（仮想的に）制御することによりその伝搬過程を復元することにあります。具体的には、物体表面の各点を中心とした徐々に大きくなる半径のリングライトで照射した放射輝度を、各点を個別に照射した画像列から仮想的に作成し、それぞれの半径に対応する画像同士の差分を取ることで光の伝搬距離がそれらの半径の差に限定された画像列を生成できることを示しました。このようにして得られた画像列は、物体表層内で光が拡散・散乱しつつ伝搬する様子を捉えていることを、果物や人間の皮膚を含めた様々な自然物体を用いて実証しました（図 1）。さらに、これらの復元された伝搬画像から物体表層内の異なる深さにおける色の特定をおこなえることも示しました。本成果は、その簡便な実装から、実用的な物体表層の解析手段として役立つと考えられます。特に、表層構造解析などを通じた非破壊検査のみならず、人間の皮膚や内臓表面などの可視化による医療や美容に関する応用が期待できます。

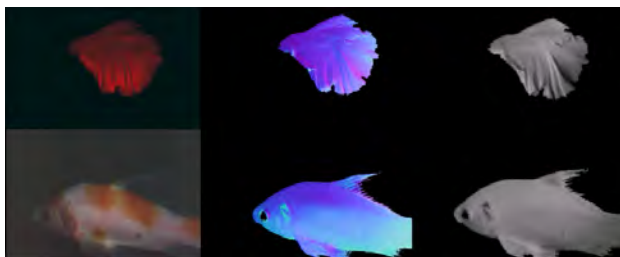


図 9：水による近赤外光の吸収と反射特性を利用した、水中物体（左）の法線（中）と 3 次元形状（右）の精緻な復元。

水中における光の伝搬特性を用いた新たな 3 次元復元法も導出しました。近赤外光の水中における吸収特性を用いた水中物体の 3 次元形状復元法をすでに知られていましたが、根本的に水中光の吸収具合の度合いによる距離計測であるため、計測誤差の大きい復元とならざるを得ず、精緻な形状特徴を捉えきれません。

我々は新たに、近赤外光の波長だけではなく、方向も変化させることにより、吸収だけではなく、反射度合いの変化を用いた非常に精緻な 3 次元復元方法を導出しました。この手法では、物体表面における光の入射角の違いから物体表面各点において深度のみならず法線を復元できること、最低で 4 つの光源が必要であること、さらにそれらの光源の方向と波長選択法を数理的に解析しました。この結果、図 9 に示すように、水中における動的な物体の複雑な形状変化を非常に精緻に計測することが可能となりました。この手法もまた、非常に簡便かつパッシブな観測による形状計測を実現するため、医療応用を視野に入れています。



図 10：水面反射像からの 3 次元形状と見えの HDR 復元およびカメラ較正。

光を伝搬する媒体としての水に着目し、その吸収特性だけではなく、反射特性を利用したユニークな 3 次元復元法も導出しました。京都など神社仏閣の写真などを代表として、水面における反射像を含め対象物体を写真に収める機会が多々あります。水面に限らず、平面による実像の反射は仮想的な視点を鏡面の裏に追加することに等価であるため、水面反射を含む写真は対象物体を二つの異なる視点から観測していることになります。さらに、水面における光の反射はフレネル反射であるため、入射角に依存してその反射率が決定されます。そのため、鏡面反射像の観測値は対象物体表面の各点において、実像とは異なる輝度として観測されることになり、これ

ら二つの観測値は同じ放射輝度を二つの異なる露光で撮像したものと等価となります。さらに、この角度依存のフレネル反射は、透視投影モデルにおいてカメラの焦点距離により決定されます。これらの事実より、水面反射像を含む一枚の写真より、対象物体の三次元形状を復元できるばかりではなく、その見えのハイダイナミックレンジ (HDR) 復元、さらにカメラの内部（焦点距離推定）ならびに外部較正を自動的に行えることを示しました。この手法により、図 10 に示すように、何も制約なく取られた一枚の画像から豊かな見えの 3 次元構造として対象物体を観察でき、新たな写真術の展開が期待できます。

○関連する研究発表

学会発表、論文など

1. Ishihara, S., Sulc, A., & Sato, I.: Depth from Spectral Defocus Blur. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Taipei, Taiwan, p.1980-84, 2019.
2. Asano, Y., Meguro, M., Wang, C., Lam, A., Zheng, Y., Okabe, T., & Sato, I.: Coded Illumination and Imaging for Fluorescence Based Classification, in Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV), Munich, Germany, p.502-516, 2018.
3. Kubo, H., Jayasuriya, S., Iwaguchi, T., Funatomi, T., Mukaigawa, Y., & Narasimhan, S. G.: Programmable Non-Epipolar Indirect Light Transport: Capture and Analysis, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, doi: 10.1109/TVCG.2019.2946812, 2019.10.
4. Ogawa, T., Funatomi, T., Tanaka, K., Kubo, H., & Mukaigawa, Y.: Compensation for Illumination changes on Whisk-broom Hyperspectral Imaging, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2019), PS1-63, 2019.7.
5. Nishino, K., Subpa-Asa, A., Asano, Y., Shimano, M., & Sato, I.: Variable Ring Light Imaging Capturing Transient Subsurface Scattering with An Ordinary Camera, in Proceedings of European Conference on Computer Vision (ECCV), Munich, Germany, p.598-613, 2018.
6. Murai, S., Kuo, M. Y. J., Kawahara, R., Nobuhara, S., & Nishino, K.: Surface Normals and Shape from Water, in Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Seoul, Korea, p.7830-7838, 2019. (Oral) (*equal contribution)
7. Kawahara, R., Nobuhara, S., & Nishino, K.: Appearance and Shape from Water Reflection, in Proceedings of Winter Applications on Computer Vision (WACV), Colorado, USA, 2020.

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



研究代表者 岡谷 貴之（東北大学大学院情報科学研究科・教授）

研究分担者 川崎 佳祐（新潟大学大学院医歯学総合研究科・准教授）

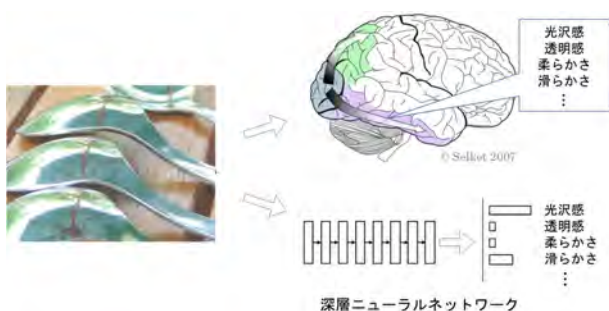


図1. 目標とする「人と同じように質感を認識可能なビジョンシステム」の概念（上）と動作例（下）

○研究の背景と目的

われわれは、画像から質感を認識するシステムの実現を目指し、研究を行っています。質感は言語化しづらく、それゆえに人と人、あるいは人と機械の間での共有・伝達が難しいという性質があります。例えば「漆のような黒」や「ダイヤモンドの透明感」は、様々に解釈が可能です。これを踏まえ、画像に写る物の質感を「数値化」し、万人が共有できるような「質感の標準化」を可能にすることが、最終的な目標です。

このようなことが実現されれば、産業・社会への大きなインパクトがあります。質感を数値化・可視化することで、工業デザインの効率化（＝製品の試作や実物目視の必要性を排除）を図れるでしょう。また、ウェブの検索サイト等での情報取得や、商品推薦の精度を向上させることもできると期待されます。人が感じとる質感因子の成分が明らかにされることで、画像（に写る物）の質感を制御することや、映像伝送時の情報圧縮への応用も可能になるかもしれません。

質感とは、様々なものを指し得る広範な概念です。われわれは主として、表面の素材や形状に由来する視覚で知覚可能なものを、ターゲットとしています。その中でも、光沢感や透明度といった視覚でのみ捉えられるものだけでなく、冷たさや柔らかさといった、触覚に結びついた質感もあります。人はそういった属性であっても、視覚によってかなり正確に認識できることが知られています。

われわれは、こういった質感を、人と同じように認識できるシステムの実現を目指し、いくつかの取

り組みを行ってきています。以下に、われわれの取り組みのいくつかを紹介します。いずれにおいても、画像認識の定番となった畳み込みニューラルネットワーク（以下 CNN）を始めとするディープラーニング（深層学習）が、中心的な役割を果たします。

○研究成果

画像理解の研究

質感の概念の広がりや、形容詞一語で表せる質感は限られています。また、質感の表現の中には、文脈によって意味が変化するようなものもあります。読み取った質感を表現するには、形容詞＋名詞でできた句や、より柔軟な言語表現を用いる必要があると言えます。そのためには、単一の形容詞のように閉じたクラスを対象としていては不可能であり、新しい言語表現を生成できるようにする必要があります。そこでわれわれは、画像記述の枠組みを採用し、商品の画像から、その商品の内容を的確に表現したタイトル文を生成する問題を対象に、この問題に取り組みました。この目的で商品のタイトル文から教師データを生成し、これを使って CNN-LSTM ハイブリッドを学習し、画像からタイトル文を生成するシステムを構築しました。結果の一例を図2に示します。図には、一般的な画像記述手法の結果（画像とその記述のペアを収めたデータセット MS-COCO を用いて学習したもの）も、併せて示しています。この方法では、自然な商品タイトルを生成できる場合がある一方で、全く不自然なものも多く生成されることが分かりました。このような経験を通じ、質感認識は、決して単純な画像認識の問題として扱うことはできないことが分かってきました。

Original			
	Zombie Chicken - Needle Felted Wool Sculpture - MADE TO ORDER	Rooted	Fairy Walking sticks
Our model	needle felted animal	art print	primitive doll
MS-COCO model	a white teddy bear sitting on top of a green field	a close up of a pair of scissors	a man sitting on a bench with a bunch of bananas

図2. 写真からの商品タイトルの生成



図 3. シーンの画像とそれに関する質問に対する AI の回答例 (Pred: が回答, Ans: が正解). 右は AI の注目領域を表す.

そこで、画像に写る事物を「理解」する問題への取り組みを行っています。最初に取り組んだのは、1枚の画像と質問文のペアを入力に、質問文に答える問題、すなわち Visual Question Answering (VQA) です。VQA であるシーンの画像とともに与えられる質問文は、そのシーンに関するもので、それに的確に答えるには画像の理解が必要になる、と考えられます。

われわれは、VQA というタスクの適切なネットワーク構造がどのようなものかを考えることにしました。注目したのは、注意機構のデザインです。VQA の研究では、最初に、与えられた質問文から、画像のどこに注意を向けるべきかを計算する注意機構が考え出され、次に、これと同時に画像から質問文中で重視すべき単語の位置を計算する注意機構 (Co-Attention) が考え出されていました。ただしそれら先行研究では、質問文全体から画像の各部分領域を相手に注意 (重み分布) を計算し、また画像全体から質問文の各単語を相手とする注意を計算していました。これに対しわれわれは、画像の各領域から質問文の各単語への注意と、その逆を計算できるようなニューラルネットワークの構造を考案しました [文献 1]。これは、言い換えると、画像の各領域と質問文を構成する各単語の間の、より密で粒度の細か

いインタラクションが生まれるような構造です。実験を通じて、この構造が高い正答率をもたらすことと確かめています。図 2 に動作例を示します。

画像の画質向上

画像は、撮影時の条件や伝送時の圧縮等の原因で品質が劣化することがあります。画像の画質は、質感認識に様々な角度から影響を与えます。そのように劣化した画像から元の画像を推定する画像復元の問題は、品質の高い映像を得る目的の他、様々な応用において画像認識の性能を確保する上でも重要です。そこで、多様な要因により品質が劣化した画像を対象とする画像復元の研究に取り組みました。

文献 2 でわれわれは、画像復元のための畳み込みニューラルネットワーク (以下 CNN) の基本構造「二重残差結合 (dual residual connection)」を提案しました。この構造は、対をなす 2 つの演算の適用が画像復元に特に有効であるという観察に基づき、それら演算の性能を最大限引き出そうとする意図があります。ノイズ、モーションブラー、降雨、雨滴、霧・霞という 5 つの画質劣化要因それぞれに適用し、9 つのベンチマークテストにて世界最高精度を達成しています (図 4)。

この他にも様々な取り組みを行っています。その一つは、複数の異なる画像復元のタスクを、単一の CNN で解決するための方法の研究—複数のタスクを同時に学習することで個別タスクの性能が相乗的に向上する、マルチタスク学習の画像復元への世界初の適用—や、画質劣化時の画像認識の性能について、CNN と人間の視覚を比較する研究—CNN は、学習時と品質が同じ画像に対しては人に匹敵する精度で認識できる場合でも、学習時より品質が低い画像に対する認識性能は、一般に人に大きく劣ることを指摘—などです。上述の画像復元を行う CNN を入力画像に適用し、その出力を認識に用いることで、人との性能差を解消できることがわかっています。



図 4. 画質の改善結果及び既存手法の結果との比較. 左はモーションブラーの除去例. 右は霧・霞の除去例.



図 5. 左：着合わせの良し悪しを答える推薦システム. 右：良し悪しの判断を説明する AI による実行例.

ファッション認識への応用

深層学習の発展により、これまで人間にしか行えなかった判断や意思決定を肩代わりできる AI が、実現可能になりつつあります. そのような AI 技術の応用対象の一つに、ファッションがあります. 質感認識とも深いつながりがあり、人の主観や流行など未だに工学的な扱いが難しい要素を含む点で、学術的な研究の意義も高いと言えます. われわれはいくつかの研究を行ってきました.

文献 3 では、ユーザが所有するアイテム、例えば衣服、アクセサリ、靴をどのように組み合わせるべきかを推薦（レコメンデーション）するシステムを提案しています. その中核には、服装を構成するアイテムの画像を入力すると、その組み合わせの良し悪しを評価する深層ニューラルネットワークがあります. ファッションの情報共有サイトにおいて、同サイトのユーザが登録した 40 万件以上の組み合わせ事例を用いて同ニューラルネットワークを訓練しています. 実験を通じて、以上の方法によって高精度な推薦が可能であることを示しました (図 5 左).

さらに、上で構築した推薦システムの中核にある深層ニューラルネットワークを対象に、その判断の理由を、人間が理解できる形で説明する方法を提案しています. 同ニューラルネットワークが出力する服装の良さを表すスコアに、各アイテムとその色や形などの特徴が、どの程度の大きさの影響を与えているかを計算することで、例えば、悪いと判断された組み合わせのうち、どのアイテムのどの特徴が原因となってその悪い評価につながったかを提示できます (図 5 右).

霊長類の皮質脳波の符号化・復号化

質感認識のメカニズムを考える上で動物、特に霊長類の脳は良い手本になります. われわれは、霊長類の視覚に関わる脳内情報処理の仕組みを解明することを目的に、マカクザルの頭蓋内に留置した電極で測定される皮質脳波（以下 ECoG）を使い、脳波による視覚の符号化と復号化の方法を研究しています.

文献 4 では、マカクザルの視覚皮質（下側頭葉皮

質）から得た ECoG の信号を使って、その各周波数帯域においてどのような情報が表現されているのかを調べています. 静止自然画像 1 枚をサルに提示したときに測定される脳波と、同一の画像を深層畳み込みニューラルネットワーク（以下 CNN）に入力したときに得られる内部の層の出力との関係を、回帰分析によって調べました (図 6). その結果、脳波のシータ帯が CNN の上位層の特徴と、ガンマ帯が CNN の下位層の特徴と、それぞれ密接に対応付けられることが分かりました. これは、視覚皮質における脳波のシータ帯とガンマ帯が、それぞれ高次と低

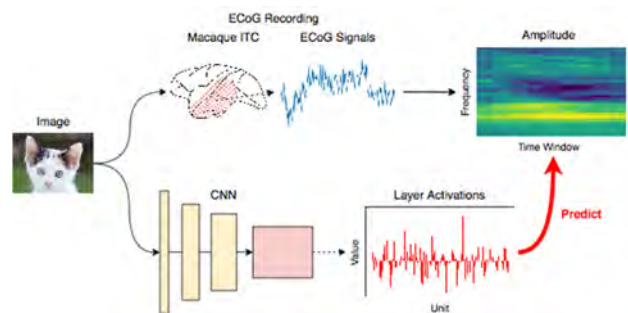


図 6. 動物が画像を見たときの皮質脳波を、同じ画像を CNN に入力したときの層出力から予測する.

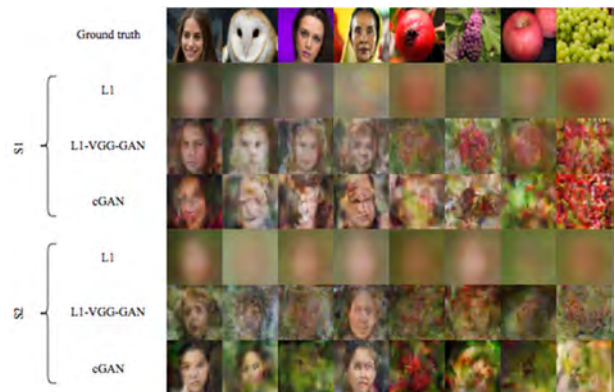


図 7. 画像（最上段）を見たときのサルの皮質脳波から同画像を再構成した例.

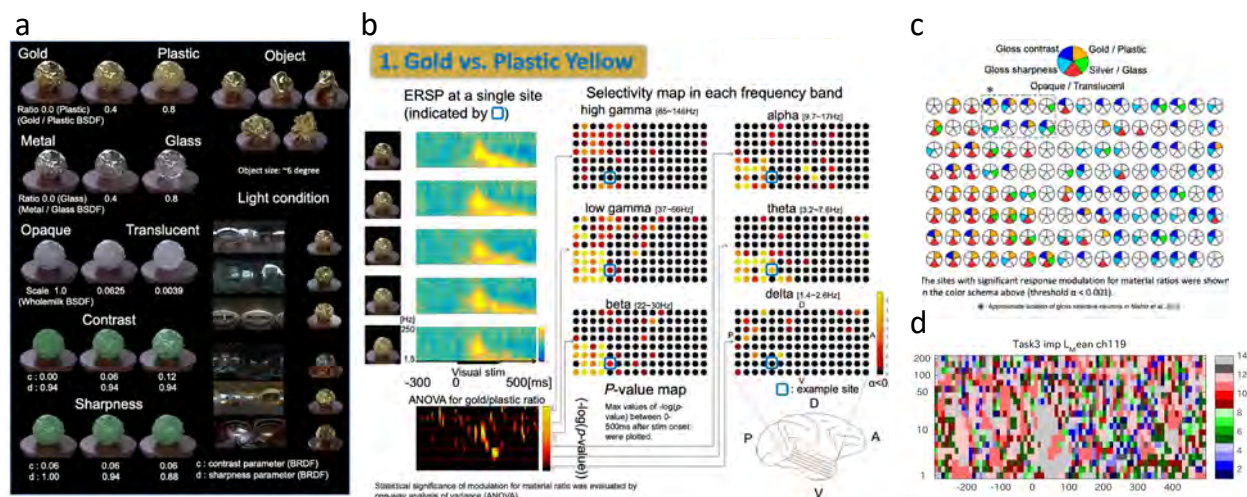


図 8. a. 視覚刺激：質感認知標準課題画像データベース (sawayama et al., 2019) を用いた。物理ベースレンダリングコンピュータグラフィックス (CG) によって、3次元物体を生成し、物体素材を金とプラスチック、金属とガラス、不透明物と半透明物の間で段階的に変化した。また表面光沢のコントラスト、鋭さを段階的に変化した。b. サル下側頭葉皮質から記録された質感 CG 刺激に対する皮質脳波応答：左列、金とプラスチックの割合を段階的に変化した時の事象関連スペクトラム摂動。右2列、有意な事象関連スペクトラム摂動がみられた電極位置を周波数帯域毎に示した。b 最下段右：大脳右半球での電極留置位置。各周波数帯ごとに示した。c. 各素材変化に対して有意な変調が見られた電極位置。d. 質感 CG の画像基本統計量 (1. L*平均 2. L*標準偏差 3. L*歪度 4. L*尖度 5. a*平均 6. a*標準偏差 7. a*歪度 8. a*尖度 9. b*平均 10. b*標準偏差 11. b*歪度 12. b*尖度 13. 色相平均 14. 彩度平均) による皮質脳波事象関連スペクトラム摂動の回帰。

次の画像特徴を表現していることが示唆される知見です。

また、マカクザルの視覚皮質の ECoG 信号を元に、サルが見ている画像を再構成する問題を研究しました。信号の適切な前処理を検討し、再構成に適した構造の深層ニューラルネットワークをデザインし、敵対的学習の枠組みによってその学習を行うことによって、画像の内容を部分的に再構成することに成功しています (図 7)。皮質脳波 (ECoG) を扱ったものとしては、関連分野で最初の成功事例です。

さらに CNN での質感内部表現を解明し、質感の表現空間構築へのヒントを得るため、質感認知標準刺激に対する皮質脳波応答を下側頭葉皮質から記録しています。その結果、下側頭葉皮質で各素材次元が空間マップとして表現されることが明らかになりました。また、機械学習を用いた決定木回帰法により、質感 CG の画像基本統計量による皮質脳波事象関連スペクトラム摂動の回帰分析を行なった結果、質感 CG の特定の画像基本統計量が、特定の時間・周波数領域で動的に表現されることが明らかになりました。今後、より高次の画像統計量と皮質脳波応答の関係、さらに CNN の内部表現との対応を検討していく予定です。

○今後の展望

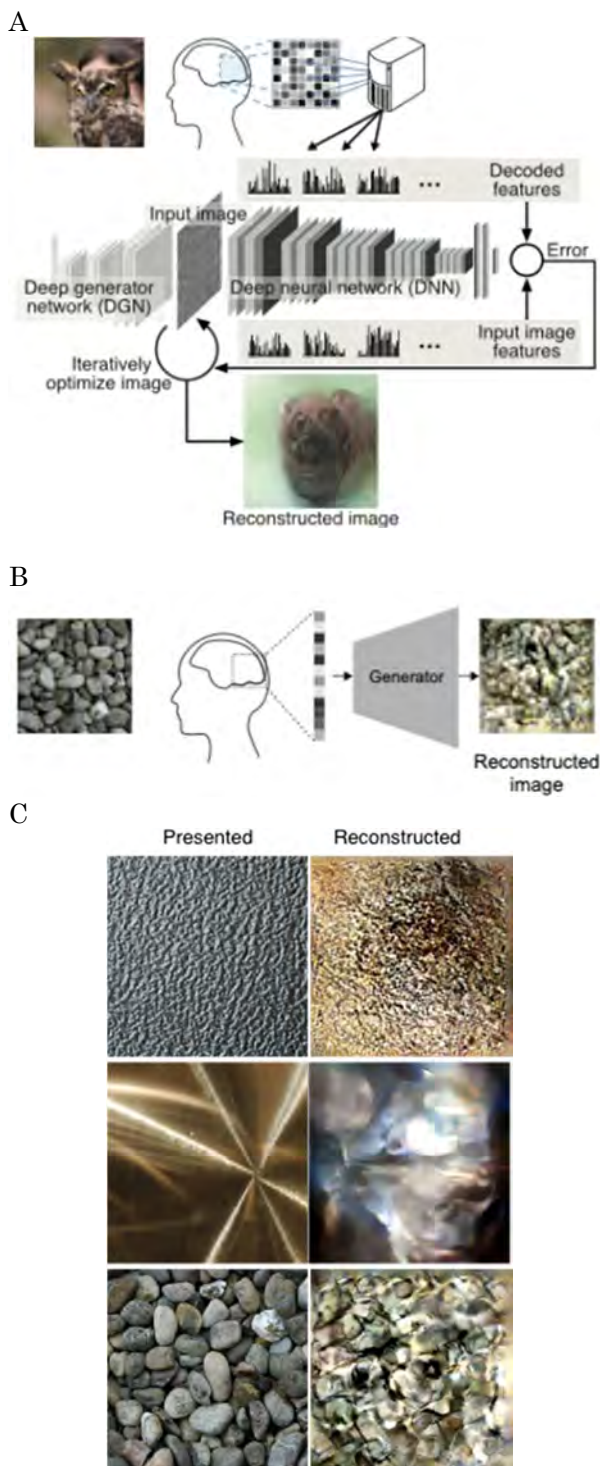
以上のように、質感の理解という、本領域の究極の目標達成へ向けて、本計画班では多方面から、主に画像からの質感の認識システムの研究を行ってきました。いくつかの理論的な成果を得るとともに、応用の実現も果たしましたが、残された課題も多く

あります。特にこれまでの研究の結果、よりはっきりしてきたことは、質感の画像認識という問題は、画像認識の一つの応用問題と見ることは不可能であり、それどころか、より上位の本質的な問題—画像理解や、画像や言語を扱う深層学習全般—に帰着されるということでした。それらは、画像や言語を扱う人工知能の研究が現在直面する課題ということもでき、今後は、質感研究という切り口を重視しつつも、必ずしも質感だけに関わらない、本質的な課題解決に注力することを考えています。

○関連する研究発表

論文

1. Duy-Kien Nguyen, Takayuki Okatani: Improved Fusion of Visual and Language Representations by Dense Symmetric Co-Attention for Visual Question Answering. Proceedings of CVPR 2018: 6087-6096, 2018.
2. Xing Liu, Masanori Suganuma, Zhun Sun, Takayuki Okatani: Dual Residual Networks Leveraging the Potential of Paired Operations for Image Restoration. Proceedings of CVPR 2018: 7007-7016, 2019.
3. Pongsate Tangseng, Kota Yamaguchi, Takayuki Okatani: Recommending Outfits from Personal Closet. Proceedings of WACV 2018: 269-277, 2018.
4. Hiroto Date, Keisuke Kawasaki, Isao Hasegawa, Takayuki Okatani: Neuronal oscillatory activities in separate frequencies encode hierarchically distinct visual features, bioRxiv 2020.01.13.902775.



A. 深層画像再構成モデル, B. End-to-end 型深層画像再構成モデル, C. 質感画像の再構成 (左: 呈示画像, 右: 脳活動からの再構成画像)

○研究の背景と目的

画像の現実感を生み出す質感は、言語表現とも結びついた複雑な情報構造をもつと考えられ、少数の物理パラメータを用いてその情報表現を理解することは困難です。研究者が理論的に考案する特徴量ではとらえきれない画像特徴表現を理解するため、本プロジェクトでは、テキストでアノテーションされた大規模画像データから抽出した画像特徴と、機能的磁気共鳴画像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) を用いたブレイン・デコーディングを組み合わせて、脳に表現される質感特徴をデータ駆動的に発見・利用する方法を開発しました。

このアプローチでは、まず、大規模画像データを用いて、深層ニューラルネットワーク (deep neural network, DNN) を訓練します。DNN の中間層に表現される中間的な画像特徴表現を、質感を生み出す複雑な画像特徴の候補とみなします。この中間的な画像特徴は、従来の理論で用いられる単純なフィルタ (の組合せ) で表現することが難しく、また一方で、言語的な概念と対応付けることも容易ではありません。この「名もなき画像特徴」をデータ駆動的に抽出し、活用することが、本アプローチの特色です。

次に、これらの画像特徴を脳活動パターンから予測するデコーディング解析を行い、脳活動パターンが質感特徴や概念をどのように表現しているかを調べます。さらに、デコードされた特徴ベクトルから、刺激画像や質感の同定・再構成を実現する方法を開発し、脳に表現される質感要素特徴がどのようにしてトータルな質感認知を生み出すかを解析します。

この方法は、特定の物理パラメータを操作して質感認知のメカニズムを探る従来の手法と異なり、データ駆動的に中間的な画像特徴を抽出して脳情報表現と対応づける点でこれまでになくユニークなアプローチで、ブレイン・デコーディングやディープラーニングの近年の進歩によって初めて可能になったものです。

fMRI 等により計測されるヒトの脳活動信号を機械学習によるパターン認識で解析することで心の状態を解読する技術はブレイン・デコーディングと呼ばれ、われわれのグループが世界に先駆けて開発してきました。一方、DNN は、脳の基本素子であるニューロンやシナプスにヒントを得て作られた人工ニューラルネットワークの一種で、近年ではヒトと同レベルの物体認識精度を達成しています。

本プロジェクトの開始前、われわれは、画像を見

ている時のヒトの脳活動パターンと、同じ画像を入力としたときの DNN の活動パターンの間に関連性があることを発見し、脳から DNN への信号変換が可能であることを見出していました。ヒトの脳活動から DNN 活動パターンに変換できるということは、データ駆動的に得られる膨大な数の特徴の中にヒトの脳活動と密接に結びついた特徴が多数含まれることを示唆しています。この方法により、質感を生み出す多彩な特徴とその脳内表現にアプローチすることができると考えました。

○研究成果

1. 脳-DNN 間の階層的情報表現の相同性

本プロジェクトの第一段階では、脳から DNN への信号変換技術を完成させるための研究を進めました (Horikawa & Kamitani, *Nature Communications* 2017)。

本研究では、コンピュータ・ビジョンの分野で用いられる「物体概念を画像特徴のパターンによって表現する」という考え方を採用し、DNN 特徴量のパターンによって物体画像を表現しました。そして、ブレイン・デコーディングを応用して、被験者が物体画像を見ているときの脳活動パターンから DNN 信号を予測 (脳から DNN への変換) するデコーダを構築しました。訓練済みのデコーダで予測された特徴パターンを大規模画像データベースとマッチングすることで、画像を見たり想像したりしているときの脳活動から、任意の物体カテゴリーを解釈 (検索) する方法を考案しました。

このアプローチの有効性を検証するため、われわれはまず、脳活動から DNN 特徴量を正確に予測できるかどうかを確認しました。脳の視覚野の異なる部位の活動を使ってデコーダの訓練を行ったところ、低次視覚野の活動を使って訓練したデコーダは、DNN 低次層の特徴量をよく予測でき、高次視覚野の活動を使って訓練したデコーダは、DNN 高次層の特徴量をよく予測することがわかりました。この結果から、脳と DNN の間の階層的相同性 (ホモロジー) を確認することができました。

デコーダを、物体を想像中の脳活動に対して適用すると、DNN 高次層の特徴量を予測した成績のピークのタイミングが、低次層の予測成績のピークのタイミングに先行するという結果が得られました。これは、脳が高次から低次の順にトップダウン的に階層的な特徴表現を活用していることを示しています。

これらの結果をもとに、提案するアプローチを用いて、ランダムに選択した 1000 個の物体カテゴリーから、知覚している物体カテゴリーを正しく予測 (検索) できるか検証した結果、正解の物体カテゴリーが検索ランキングの上位にランクされる結果が得られました。また、予測が外れた場合であっても、正解のカテゴリーと意味的によく似たカテゴリーを予測できていることがわかりました (例: “duck”が

正解の場合に他の鳥類のカテゴリーが予測として与えられる)。

この研究により、モデルの訓練に用いていない任意の物体に関しても、脳活動から物体のカテゴリー情報を予測することが可能になりました。また、脳の視覚野と DNN の階層的相同性が示されるとともに、物体を想像しているときには、階層的な情報表現が高次から低次に向けて段階的に活用されていることが明らかになりました。

人工ニューラルネットワークは脳の構造にヒントを得て作られた数理モデルですが、脳のモデルとしてよりも汎用的な機械学習手法として利用されてきました。この成果によって、人工ニューラルネットワークが再び実際の脳と対応づけられることとなりました。ブレイン・デコーディングへの応用だけでなく、脳型人工知能の開発にも貢献することが期待されます。

2. 階層的な情報表現のトップダウン変調

Horikawa & Kamitani (2017) の成果をもとに、われわれは、トップダウンの視覚情報処理が脳内の階層的特徴表現に与える影響について調べました (Abdelhack & Kamitani, *eNeuro* 2018)。

この研究では、低周波フィルタによりぼかした画像 (ブラー画像) を刺激として脳活動を計測し、そこから、上記と同じアルゴリズムで DNN 特徴量をデコードしました。デコードされた DNN 特徴量を、ブラー画像自体の DNN 特徴量とブラー処理する前の元画像の DNN 特徴量それぞれと比較しました。

その結果、脳からデコードされた DNN 特徴量は、刺激画像と比較して元画像の DNN 特徴量により近くなることが見出されました。これは、脳がブラー処理で失われた特徴を補完して表現していることを示しています。ぼかした画像を知覚する際には、トップダウン処理により補完された質感が意識に上っている可能性が示唆されます。

この研究では、ブラー処理によりぼかした画像を刺激とし用いましたが、一般に視覚入力においては、物理的な遮蔽や光学的制約により、多くの情報が失われています。ベイズ推論の考え方を利用してトップダウン処理を説明する理論がこれまで提案されてきましたが、実際の脳活動データと対応づけられた具体的な情報表現を調べることは困難でした。脳活動パターンから DNN 特徴量をデコードすることにより、トップダウン処理による具体的な情報表現の変調を捉えることが初めて可能になりました。

3. DNN 特徴予測精度の被験者間相関

Horikawa & Kamitani (2017) では、訓練済み DNN の各ユニットに表現される画像の特徴量を脳活動パターンから予測 (デコード) できることを示しましたが、そのデコード精度にはユニット間で大きなばらつきがありました。最近の研究でわれわれは、ユ

ニット間のデコード精度のばらつきには被験者間で共通のパターンがあることを見出しました (Horikawa, Aoki, Tsukamoto, & Kamitani, *Scientific Data* 2019)。

DNN の各階層で、各ユニットの脳活動から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りました。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ます。われわれは、主要な訓練済み DNN について、各ユニットのデコード精度を計算した結果をデータベースとして公開しました。このデータベースは、脳と類似した視覚情報処理をもつ人工視覚をデザインする上で有用であると考えています。

4. 深層イメージ再構成

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ました (Shen, Horikawa, Majima, & Kamitani, *Plos Computational Biology* 2019 ; 図 A)。

Horikawa & Kamitani (2017)の方法を用いることで、物体画像や風景画像など自然な画像を見ているときの脳の視覚野の活動パターンを DNN の信号パターンに変換 (翻訳) することができます。さらに、脳から変換した DNN 信号パターンと、入力画像から計算される DNN 信号パターンとの誤差が小さくなるよう画像を徐々に最適化していくことで、脳活動から被験者が見ている画像を再構成できることを示しました。

この研究では、再構成画像の見た目の自然さを向上させるため、深層生成ネットワーク (deep generator network, DGN) と呼ばれるもう一つの DNN を導入しました。このモデルは、敵対的生成ネットワーク (generative adversarial network, GAN) と呼ばれる技術を利用して構築されたもので、写真のようにリアルな画像を生成するために有用であることが知られています。脳計測実験の被験者とは別の被験者グループを対象に行った評価実験で、DGN を導入したときの方が、DGN を導入しないときよりも、実際に見ていた画像と再構成画像の見た目の類似性が向上することが確かめられました。また、画像の再構成に使用する DNN の階層の数を変化させた時に、複数の DNN 階層を使用することで、より再構成画像の精度が向上することも明らかになりました。この結果は、低次の視覚特徴だけでなく複数の階層的視覚情報を利用することが、再構成精度の向上に有効であることを示しています。

さらにわれわれは、脳活動パターンから直接画像を生成する end-to-end 型の深層イメージ再構成モデルを構築しました (Shen, Dwivedi, Majima, Horikawa, & Kamitani, *Frontiers in Computational Neuroscience* ; 図 B)。再構成精度では、DNN 特徴の予測を介した前記のモデル (Shen,

Horikawa, Majima, & Kamitani, *Plos Computational Biology* 2019) に劣るものの、訓練データが増えることによって、精度のさらなる向上が期待できることがわかりました。また、この方法を用いると、テクスチャや材質に関する画像を比較的高い精度で再構成することができます (図 C)。

5. 脳と類似した階層的情報表現をもつ DNN の探索

Horikawa & Kamitani (2017)の研究から、DNN と脳の間に階層的な類似性が存在することが明らかになりました。一方で、コンピュータビジョンの分野では、物体認識精度の向上を目的としてさまざまな構造を持つ DNN が活発に開発されてきました。そこでわれわれは、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ました。

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ました。このことは、高い物体認識精度を実現するような DNN の構造上の工夫が、脳との階層的な類似性に必ずしもつながっていないことを示しています。ネットワークの構造を比較すると、全結合層を持つ DNN ほど高い BH スコアを持ち、全結合層の活動値は高次の視覚野からよく予測されることがわかりました。これらの結果から、近年の DNN は、全体的な形状の認識ではなく、物体カテゴリー内で共通する局所的な特徴 (テクスチャ等) を抽出することに特化することで、高いパフォーマンスを達成しているのではないかと推測されます。

○今後の展望

本プロジェクトでは、大規模画像データで訓練した階層的ニューラルネットワークの中間層の画像特徴に注目することで、理論的にモデル化するのが困難な質感の脳情報表現を発見・活用する方法を研究しました。脳活動パターンから DNN への信号変換技術と画像生成技術により、脳活動だけから質感を伴う画像を再構成することにも成功しました。

本プロジェクトの成果は、ヒトの知覚内容を今までにない精度で解読することが可能であることを実証するとともに、脳-DNN 間の信号変換技術にもとづくブレイン・デコーディング技術の応用可能性の高さを強く示唆するものです。同様のアプローチは、画像だけでなく、動画や音声、テキストなど、さまざまな刺激に対する脳活動からの情報解読に応用可能で、ブレイン-マシン・インターフェースの技術の開発にも貢献することが期待されます。今後は、提案技術による再構成の精度向上を進めるとともに、夢や錯覚など、より多様な心的内容を可視化する研究を進める予定です。

一方、深層イメージ再構成の最適化プロセスを可視化した動画は、現代美術家ピエール・ユイグ氏の展示 ("Umwelt", Serpentine Gallery, London, 2018-

-2019) で用いられ (ユイグ氏のリクエストを受け 神谷研究室で作成)、「新たな芸術形式の発見」として美術批評家から高く評価されました (*New York Times*, *Financial Times*, *The Guardian* 等)。アートとしての面白さを生み出す要素を分析しつつ、新たな画像生成技術を開発するとともに、訓練データの取得にかかる時間を減らす方法など、アート表現としての普及を促進するための研究も進める予定です。

○関連する研究発表

論文

1. Horikawa, T., & Kamitani, Y. (2017). Generic decoding of seen and imagined objects using hierarchical visual features. *Nature Communications*, 8, 15037.
<https://doi.org/10.1038/ncomms15037>
2. Shen, G., Horikawa, T., Majima, K., & Kamitani, Y. (2019). Deep image reconstruction from human brain activity. *PLOS Computational Biology*, 15, e1006633.
<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006633>
3. Shen, G., Dwivedi, K., Majima, K., Horikawa, T., & Kamitani, Y. (2019). End-to-end deep image reconstruction from human brain activity. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 13, 21.
<https://doi.org/10.1101/272518>

視覚系における質感情報表現の階層的情報変換

研究代表者 大澤 五住（大阪大学大学院生命機能研究科・教授）

研究分担者 田村 弘（大阪大学大学院生命機能研究科・准教授）

佐々木 耕太（大阪大学大学院生命機能研究科・助教）

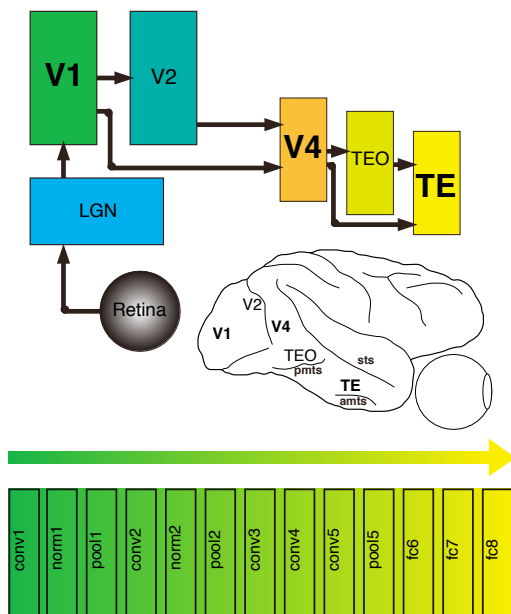


図1：サル大脳皮質階層構造（上）と深層畳み込みニューラルネットワーク（DCNN）の階層構造

○研究の背景と目的

私たちの研究はおもにデータ駆動型アプローチを用いて質感情報処理を単一細胞の神経活動と対応づけて理解することを目的としています。このデータ駆動型アプローチというのはどういうことでしょうか。従来の多くの研究は、説明のために名付けるとすれば、仮説駆動型アプローチと呼ぶことができます。例えば、ある視覚野のある細胞は何を表現しているのかについて仮説を立て（例えば図形の角の角度を表現している等）、その証拠を実験により集めることにより検証します。しかし、視覚野に限らず、少なくとも最初は個々の神経細胞が何を表現しているかはよくわかりません。これまでの多くの研究により、例えば V4 という高次視覚野の一つでは、折れ曲りなどの曲率、色、テクスチャーなど複数の機能にかかわっていることが明らかになっています。そのような細胞が多く役割を持つ実態にも関わらず、個々の細胞を自分の特定の仮説の検証のために、まさに一面的にしか見ないアプローチでは、不十分ではないかという反省がありました。このような考えから、データ駆動型アプローチが提案されました。このアプローチでは、特定の仮説は一旦脇に置き、

できるだけ多くの可能性を探索できる過程をできるだけ排除した刺激により脳活動を引き起こし、様々なデータ解析により神経細胞のありのままの挙動の姿を引き出そうとするアプローチです。

階層的に構成された視覚系において、質感にかかわる情報処理過程を、主として神経細胞レベルでの電気生理学、心理物理学的手法、および深層畳み込みニューラルネットワーク（DCNN）により解析しました。中間段階の視覚領野における質感情報の担われ方には未知な点が非常に多いため、少数の可能性に特化した仮説やモデルを検証する従来手法は上でのべたように限定的にしか使えません。このため、データ駆動のマイニング的なアプローチとネットワーク内のニューロンの特性を極限まで詳細に調べることができる DCNN を利用しました。つまり、自然画像による刺激だけでなく、特定の仮説やモデルに強く特化しない視覚刺激として、画像統計量を体系的に操作した刺激や、視覚情報の起点である一次視覚野（V1）の細胞が担う情報の集合として生成したランダム人工刺激を使用し、V1 から MT や V4 などの高次の視覚野までのデータを取得し解析し、質感情報の分析と統合のメカニズムについて解明を目指しました。

○研究成果

Part 1

この頃、AI という言葉を目にしなかったり耳にしなかったりする日はないかもしれません。現在の AI の中核をなす技術の一つが深層畳み込みニューラルネットワーク（DCNN）です。

DCNN はもともと、大脳 1 次視覚野にある神経細胞の機能的性質や、そこから始まる階層的な視覚情報処理にヒントを得て構成されました。私たちは、視覚刺激を呈示して、それに対する大脳 1 次視覚野の応答を記録し、その応答を再現するような機能モデルを構築することで、将来、AI の性能をより高めることに資するべく、視覚情報処理の基礎的な理解を深める研究を行っています。

大脳皮質 1 次視覚野のひとつひとつの神経細胞は、視野のごく一部しか「見て」いません。そして、その細胞の視野の中に見える特定の傾きの縞模様の濃さに応じて、応答の大きさを変化させます。これが、大脳皮質 1 次視覚野神経細胞のもっとも基本的な性質で、DCNN の第 1 畳み込み層のユニットにフィルタ

として実装されています。ただし、実際の大脳皮質 1 次視覚野神経細胞の応答はもっと複雑であることが知られています。例えば、縞模様がある限界を超えて広い範囲に広がっていたりすると応答は小さくなります。これは周辺抑制と呼ばれ、縞模様があるところとないところの境界、つまりテクスチャーなどの境界を見つけるために役に立つと考えられています。

私たちは、スパース STC というデータ解析手法を開発し、実際の神経細胞の応答からその応答を再現するモデルを構築しました。ある神経細胞の機能モデルを図 2 に示します。現在の DCNN の第 1 畳み込み層のユニットとほぼ等価なのは、1 段目の構成要素です（空間フィルタ、その周波数応答、および活性化関数を示します）。私たちが記録し、応答を解析したこの実際の神経細胞は、このほかに、興奮性に働く構成要素（2 段目）と抑制性に働く構成要素（3-6 段目）を持っていました。抑制性に働く構成要素が応答する傾きは 1 段目のフィルタの傾きとほぼ同じで、アナログ時計でいうと 4 時くらいの方角ですが、場所は 1 段目のフィルタとは違うことがわかります。このことから、抑制性に働く構成要素は周辺抑制を引き起こすと考えられます。

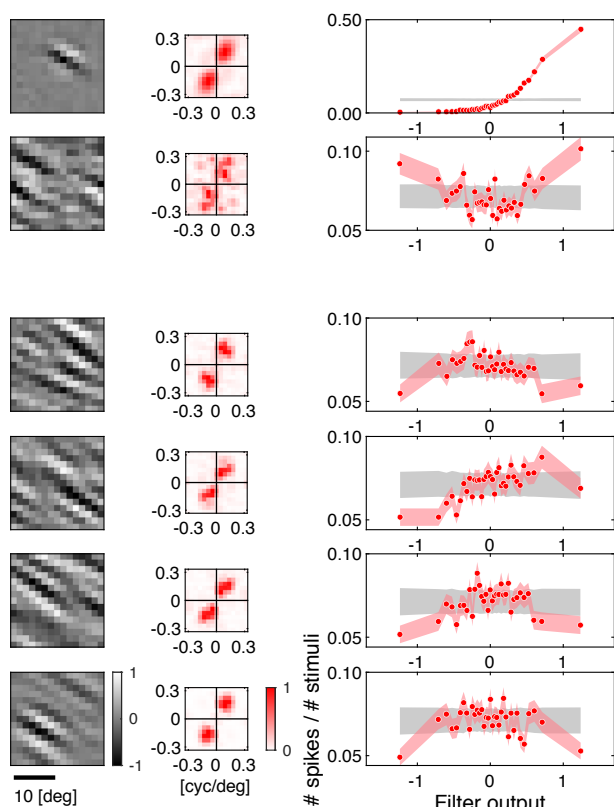


図 2 : スパース STC 解析により見つかった実際の神経細胞の反応に寄与する複数の機能フィルター

Part 2

霊長類腹側視覚経路の高次視覚皮質には、特定の物体画像の輪郭や色、テクスチャーなどの表面画像特徴に選択的に反応する神経細胞が存在します。このような神経細胞が生後発達の過程で、どのような時間経過で出現するのかについては不明な点が多くあります。例えば、個々の神経細胞の反応選択性がどのような時間経過で成熟するのか、画像認識能力の発達とどのように関連するのかなどは不明です。しかし、このような問題を動物を用いて神経生理学および行動学的に調べることは技術的に困難です。生理学の実験では、どのような方法を用いたとしても、視覚領野全体の細胞数からすれば、ごく少数の細胞からごく短時間だけ記録できるにすぎません。

そこで私たちは、霊長類腹側視覚経路と構造および反応特性が類似する深層畳み込みニューラルネットワーク (DCNN) をモデルとして用いて、DCNN フィルタの物体認識における役割を検討してきました (Kanda et al., 2020)。この研究では、DCNN をモデルとして用いて、フィルタの選択的反応の発達過程と認識能力の発達過程との関連を理解することを目指しました。DCNN として、AlexNet (Krizhevsky et al, 2012) を用いました。Alexnet は学習初期で認識精度が急激に上昇することが知られています。私たちの実験でも、1 エポック（トレーニングの 1 回分）から認識精度が上昇し、30 エポックで 80% の認識精度に到達することを確認しました（図 3、上）。ネットワークを構成する各フィルタの成熟過程を定量化するために、各フィルタの応答を最大化する入力画像（最適画像）を、activation maximization を用いて求めました。トレーニング回数が異なるモデル間における最適画像を、十分訓練した（90 エポック）時点での最適画像と比較しました。AlexNet の低次層では最適画像が 20 エポックで 90 エポックの最適画像にかなりの程度、類似度が向上しました。一方、高次層では 70 エポック前後で類似性は飽和しました（図 3、中）。この結果は、高次層の発達は低次層の発達に比べて遅れることを示唆しています。また、認識精度の向上が、高次層フィルタの発達をとまなっていないことも示唆しています。

そこで、フィルタ集団としての画像情報表現の発達過程を検討するために、DCNN 各レイヤーにおけるフィルタ集団応答による画像間非類似度行列 (RDM, Representational Dissimilarity Matrix) を各エポックごとに作成し、RDM 間の類似度を検討しました。モデル間で画像セットの表現が似ていれば、RDM は互いに似るので、その類似度を評価します。初期層、高次層ともに、訓練初期の段階（5 エポック）から情報表現が 90 エポックでの情報表現と類似していました（図 3、下）。以上の結果より、最適画像で表される個々のフィルタが保持する内部パラメータの発達とフィルタ集団の示す情報表現の発達過程には解離が生じますが、フィルタ集団の示す情報表現の

発達過程とは類似することが明らかになりました。

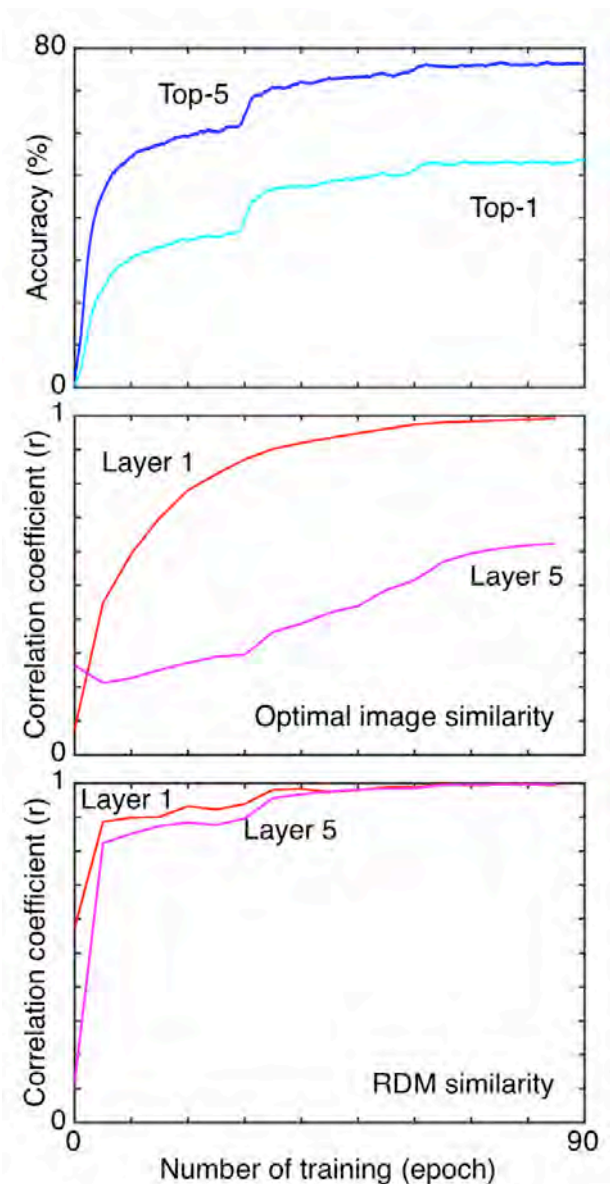


図3：深層畳み込みニューラルネットワーク (DCNN) の初期層と高次層の学習の時間経過。

Part 3

視覚系は多層からなる階層構造を持っています。近年注目されるようになった人工の深層畳み込みニューラルネットワーク (DCNN) では、フィルタリングとプーリングの階層的繰返し構造が注目されていますが、実際の脳の最初の視覚野である一次視覚野でのプーリングに着目し、それがもたらす細胞特性への影響を調べました。一次視覚野の複雑型細胞におけるプーリングの程度を、多くを仮定しないサイン波の縞模様 (グレーティング) を様々な組み合わせで左右眼に網羅的に提示することにより、マイニング的なアプローチで解析しました。

図4Cは両眼視差検出器の最小単位の(X,Y)視野空間におけるプーリングを示していますが、プーリングの概念を(X,Y)視野空間だけでなく、さらに空間周波数と方位パラメータを追加した「V1空間」に拡張しました。従来、プーリングは、細胞のあるパラメータに対する選択性 (チューニング) を広くしてしまうものであると考えられてきました。選択性はシャープであるほど刺激や物体の弁別能力は高いわけで、それが広がることは望ましくないことです。もちろん、この代償としてノイズに対する耐性が高まり認識システムの最終的なロバスト性や信頼性が全体として高まるので、そうなっているのだろうと考えられてきました。

今回の研究で、私たちはV1空間におけるプーリングにより、細胞のパラメータの両眼一致度に対する選択性が全パラメータについてよりシャープになることを発見しました。両眼立体視の視力 (stereo acuity) は、角度ベースで数秒 (Westheimer and McKee, 1979) であり、視力検査で測る通常の解像度としての視力1.0が角度ベースでは1分 (1/60度) であることを考えると、両眼立体視の視力は解像度としての視力より10倍はよいことが知られています。プーリングという簡単なメカニズムが両眼立体視の高精度化に寄与しているのかもしれない。

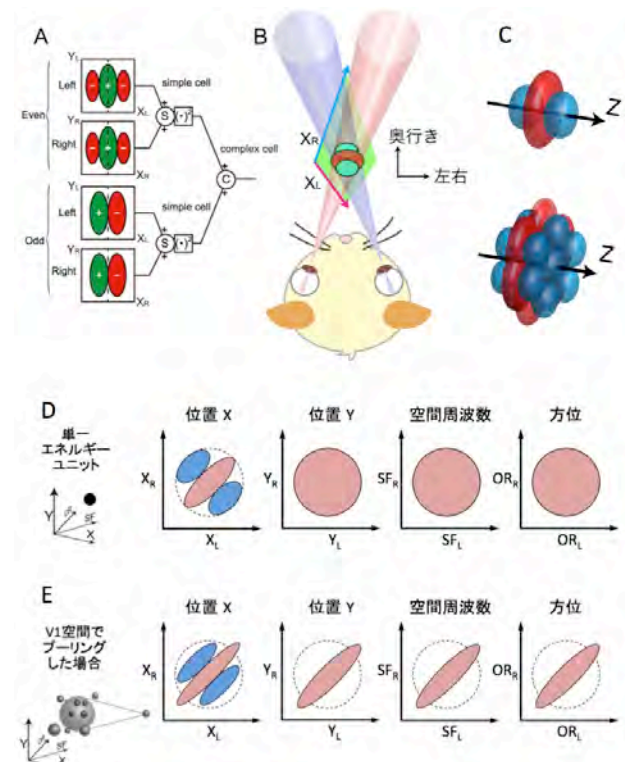


図4：両眼立体視の高精度化のメカニズム：V1細胞のプーリングにより左右刺激パラメータの整合性がより強く要求される

○今後の展望

深層畳み込みニューラルネットワーク (DCNN) は、この新学術領域研究が進行していく過程で、その重要性を私たちが理解し使い始めました。研究に着手した当初は、DCNN をどのように使えば良いのか、どのように使えるのか、私たちも手探りの状態でした。今後の神経科学において、実際の動物の脳を使った研究といわば人工の脳である DCNN は、相補的な役割を果たしていくでしょう。例えば、DCNN においては、動物の脳では非現実的な実験、脳の全細胞からの網羅的記録なども可能です。また、脳の一部を破壊して、その前後での脳機能の変化なども、実際の脳では破壊後は元には戻せませんが、DCNN では完全に可逆的な操作が可能になります。これは、DCNN の利用のメリットのごく一部です。今後、ますますこの相補性を活かした研究が発展することでしょう。

このように AI の分野と神経科学が真に協調して発展していくためには、制約が多い動物を使った脳研究のための技術の発展も欠かせません。私たちの研究チームでは、視覚野の多数の細胞から記録するためにミシガン電極やユタ電極など、32~100 の電位記録点を持つ多点電極を使用しています。これらの電極を使った実験に関して、上で述べたデータ駆動型アプローチを実現するために、実験制御・データ取得・解析システムを開発してきました。

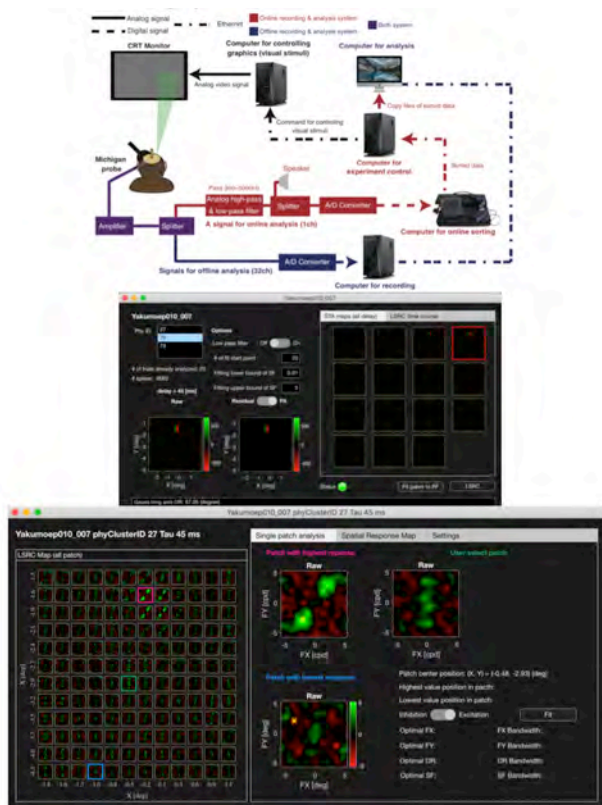


図5：視覚神経科学実験システムと多点電極データ解析システム

刺激と実験制御システムは、これまで大澤らが使ってきたものをベースにし、多点電極記録システムからのデータを扱えるように統合するための開発を行ってきました。

多点電極記録システムは、オープンソースで公開されている KiloSort をベースにシステムに組み込みました。

<https://github.com/cortex-lab/KiloSort>

これは、多点電極からのデータを、各電極に複数の細胞からの信号が混ざり、さらに同じ細胞からのスパイク（活動電位）が複数の電極チャンネルから記録されるという状況で取得された信号を、多数の細胞からのスパイクに分離するソフトウェアです。スパイクを分離する計算は計算量が非常に大きいため、GPU を備えた計算サーバーが主要部分として組み込まれています。今後、これらのシステム全体を視覚神経科学のコミュニティに提供する計画です。

○関連する研究発表

論文

1. Kato D, Baba M, Sasaki KS, Ohzawa I. Effects of generalized pooling on binocular disparity selectivity of neurons in the early visual cortex. Phil. Trans. R. Soc. B. 371: 20150266, 2016.
2. Kanda Y, Sasaki KS, Ohzawa I, Tamura H, Deleting object selective units in a fully-connected layer of deep convolutional networks improves classification performance. arxiv 2020, 2001.07811 <http://arxiv.org/abs/2001.07811>

学会発表など

1. Sasaki KS, Tsukada T, Azuma Y, Sakamoto H, Nagano Y, Yue Y, Okada M, Ohzawa I. Recovery of functional elements in V1 complex cells via sparse STC. 第42回日本神経科学大会、新潟、2019.



研究代表者 坂本 真樹（電気通信大学大学院情報理工学研究科・教授）

研究分担者 中内 茂樹（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・教授）



図1. データベースの素材検索用ページ

○研究の背景と目的

質感認知とは表面形状・熱伝導率・硬度・水分量などの物理量と粗いー滑らか、熱いー冷たい、硬いー柔らかい、濡れたー乾いたなどの知覚特性が対応づけられて成立します。さらに近年、質感の物理情報は快・不快などの高次感性知覚にも影響し、人の価値判断や意思決定に繋がることも知られています。西洋では物理量に対応する単一の知覚特性(粗いー滑らかなど)を中心に研究がされてきました。一方、日本では日常的にオノマトペなどの音象徴語を使用することにより、質感知覚を統合的に表現しています。例えば、「さらさら」とは乾いて滑らか、かつ快の質感特性を統合的に表します。

坂本研では、音象徴性が触覚の材質感表現においても観察されることを示してきました(論文2)。そして、質感とオノマトペ音韻の結びつきを工学的に応用し、さまざまなシステムを構築してきました。任意のオノマトペで表される多次元質感印象を推定するシステムを用いることで、任意のオノマトペが表す質感印象を数値化できることから、オノマトペとそれが紐づく素材を2次元マップ上に配置し、質感空間の可視化を可能にしました。この成果は、後述する質感オノマトペプロジェクトの一環で作成したフリーペーパーにまとめ、アウトリーチ活動を行ってきました。各素材の感じ方には個人差があり、特に、子供やお年寄りでは感じ方が異なることから、簡単に個人差を捉えられる個人差可視化システムも構築しました(論文4)。このシステ

ムは、感覚を画像として可視化できることから、人工知能に感覚の個人差を学習させるためのデータ取得用インタフェースとしても応用可能ですし、個人差を考慮した商品推薦にも応用可能です。

本計画研究課題の中核は、質感データベースの構築であった。従来の研究では、オノマトペから抽出される質感次元と物理次元や知覚次元との関係性は明らかにされていませんでした。そこで本計画研究課題では、物理量－知覚特性－言語表現の関係を解明し、得られた情報をデータベース化することを目的として進めてきました。海外でも画像データベースに関する研究が行われていますが、本研究のように質感情報が充実した画像データベースは、建築・デザイン分野で好んで活用され、さらに学術的な研究においても相互に活用しあえるなど、様々な利用方法が考えられます。図1は、質感データベースの素材検索性ページの例ですが、坂本班の主課題である「質感情報」に着目し、実素材の物理量と知覚特性、言語表現がインタラクティブに結びついたデータベースとなっています。「やわやわ」といった新規性の高いオノマトペで検索しても、そのような質感に近い素材の検索も可能です。

また、身の回りに溢れている“質感”を表す言葉「オノマトペ」が、社会の中でどのように使われているのかをさまざまな素材の専門家の方たちに伺い、木、紙、布などの質感オノマトペマップを作成する「質感オノマトペマッププロジェクト」も進めてきました。その成果についても後述します。

さらに、画像の印象のオノマトペ表現と、画像を見た時に感じる質感の関係を調査しています。また、その結果を基に、日本語を母語としない被験者を対象とした実験を国内外で行ってきました。ブーバキキ効果に見られるような言語に依存しない普遍性が質感の音象徴にも存在するかを調査しました。その成果についても後述します。

○これまでに得られた成果

- ・ 質感データベースについて

質感データベースは、素材材料及び表面状態とヒトの質感感性の関係を結びつける大規模なデータを収集し、適切に管理することにより、質感を活かしたもののづくりやヒトの質感感性の解明のために有用な情報を製品開発者や研究者をはじめとするユーザへ提供することを目的としたものです。

同じ材料から作られたものでも表面の凹凸の違いによってヒトの認知する質感は異なります。凹凸の少ない滑らかな表面からは「つるつる」、あるいは「さらさら」といったような質感が得られ、反対に凹凸の大きいものは「ざらざら」といった質感になります。硬度や熱伝導率などのパラメータもヒトの認知する質感に影響するため、表面形状が同一であっても、素材が異なればまた質感は異なります。また、質感は被験者による言語表現によって表されるため、被験者各々の表現力や感覚器官の影響を受けます。感覚が敏感で表現力が豊かな被験者ほど、細かな違いを感じ取って表現することが可能です。40代男性と、20代女性とでは感覚器官の鋭さが異なるだけでなく、表現に用いられる言葉も異なると考えられます。したがって、それぞれの素材に対して、どんな被験者がどんな質感を得たのかを可能な範囲で記録する必要があります。

質感データベースは元々、きめ細かな実験データを参照できるよう15個を超えるテーブルで構成しておりましたが、これを保守・運用性を高めるために3個のテーブルで再編しました(図2)。



図2. 3テーブル構成の質感DB

3個のテーブルはそれぞれ、物理量テーブル、被験者情報テーブルおよび感性評価結果テーブルとなります。物理量テーブルには素材の熱伝導率や硬度に加え、3D形状測定器によって得られた素材の表面状態が、被験者情報テーブルには性別・年齢などの個人情報を含まない被験者情報が記録されており、感性評価結果テーブルには登録されている素材に対して、どの被験者がどのような質感を覚えたかが記録されています。被験者毎のデータを分析し、表現力の豊かな被験者に絞ってデータを選択すれば質感のより細かな違いを見ることもできると考えられます。

質感データベースに今年度に登録された素材データは262種類で、木材、金属、紙、合成樹脂、ゴムなどの素材を中心に、研磨などの表面処理を施すことで、様々な素材と質感の組み合わせのデータを収集しました。昨年度までに作成したデータベースと合わせて2,300のレコードが蓄積されています。

・質感オノマトペマッププロジェクトについて
木、紙、布、髪、酒、音、漆を取り扱う専門家へのヒアリングを行い、各50種類程度の素材の収集と質感を分類するオノマトペなどの言葉の調査を行ってきました。各素材の質感を分類するオノマトペを、オノマトペで表される質感を数値化するシステムによる解析結果を用いて、オノマトペマップを作成し、図3のような質感オノマトペマッププロジェクト冊子としてまとめてきました。



図3. 布のオノマトペマップ

図3は布のオノマトペマップです。50種類程度の布と、その布に対応付けられたオノマトペが2次元マップ上に分布しています。特に、「粗いー滑らか」、「凸凹なー平らな」、「硬いーやわらかい」、「冷たいー温かい」、「乾いたー湿った」、「滑るー粘つく」の6軸を重ねることにより、素材-知覚-オノマトペの関係が直感的に分かるようになります。最新のオノマトペマップは、漆を対象にしました。本プロジェクトのために漆アーティストの戸田蓉子氏が様々な質感の漆器を作成しました。そして、戸田氏が各漆器の質感を表現したオノマトペを、坂本研のオノマトペを数値化するシステムで解析し、その数値を統計解析し、2次元マップに配置しました。実際の漆器もオノマトペマップ上に配置し、図4のように展示も行いました。



図4: マップ上に配置した多様な質感の漆器

・視覚と触覚の質感と音象徴性について
 例えば「ふわふわ」というオノマトペを聞くと、物体がやわらかく、軽い印象が伝わります。では、「もまもま」と聞くとどのような印象を受けるでしょうか。これからも、やわらかく、あたたかいような印象を感じ取れます。このように、単語を辞書で引いたときのような、意味の定義上のつながりだけでなく、オノマトペを構成する音そのものが、私たちの感じる印象とリンクしていることがわかります。このように、特定の音と意味がつながることを音象徴と呼びます。また、ブーバキキ効果に代表されるように、異なる言語や文化のバックグラウンドをもつ人々の間に、共通した音象徴的つながりが存在することが知られています。

日本人を対象に、触覚のブーバキキ効果について確認した研究（論文1）では、日本人が自発的にオノマトペを回答できることから、素材の手触りをオノマトペで表現してもらう実験を行うことで、触覚と音韻のクロスモーダルな関連性に関する探索的研究を実施しました。そもそも日本語を中心に本研究を開始したのは、日本語には、広範囲の触覚的知覚空間を高解像度で表現できるオノマトペが多数あり、音と手触りの強い関連性があることが知られているからです。論文1の実験では、120個の日常的にみられる素材を使用しました。これらの素材が、触覚の基本的な次元に関連する素材カテゴリをカバーしたものであることは、坂本研の先行研究で確認されています。実験では、被験者は、これら120素材に触れて、日本語のオノマトペで触覚を表現しました。同時に、8種類の感性及び触覚に関連する形容詞対ごとに手触りの印象を評価しました。

多様な素材を用いたおかげで、音と触覚の基本的な知覚的次元との体系的な関連性の存在が、これまで以上に詳細かつ包括的な方法で実証することができました。結果は図5を参照ください。16回以上出現した最初の音節が表に記載されています。各尺度で全1566例の平均から有意差があった値が示されています。形容詞の欄の上に表示されている形容詞（快、凹凸がある、粗い、硬い、弾力性がない、滑らか、乾いた、温かい）は正の数値で、オレンジ色のセルに、下に表示されている形容詞（不快、平らな、滑らかな、柔らかい、弾力性がある、粘つく、湿った、冷たい）は負の数値で、水色のセルで表示されています。

特に、母音の場合、正の触覚評価は後舌母音（/u/）に、負の評価は前舌母音（/i/および/e/）と関連性が強いことがわかりました。中舌母音/o/や/a/は、主に、粗く、硬く、乾燥した印象と結びつくことがわかりました。子音については、声の特徴と明瞭度に基づいて分類しました。有声子音のカテゴリ（例：/dz/および/g/）は粗さと結びつき、無声子音のカテゴリ（例：/ts/および/s/）は滑らかさに結びついていました。両唇破裂音（/p/および/b/）と/n/といった子音カテゴリについては、主に柔らかく、粘つく、湿度感と結びついていましたが、無声破裂音（/ts/）と/k/といった子音は、硬く、滑らかで、乾いた感覚と結びつくことなどがわかりました。

こういった日本人を対象にした実験で示された質感とオノマトペの音との音象徴的結びつきについて、言語依存性を調査するため、複数の地域（日本・イギリス・韓国・中国）で実物の質感サンプルを用いた実験を行いました。

TABLE 1 | List of first syllables that were obtained more than 16 times (1% of all responses).

	N = 1,397/1,566	Comfort Discomfort (0.11)	Bumpy Flat (-0.12)	Rough Smooth (-0.06)	Hard Soft (-0.18)	Non-elastic Elastic (0.05)	Slippery Sticky (0.25)	Dry Moist (0.43)	Warm Cold (-0.41)
/ts/+/u/	149	0.92	-1.87	-1.70	1.34	1.21	1.89	1.01	-1.18
/s/+/u/	94	1.13	-1.67	-1.78		0.87	1.70		
/s/+/a/	130	0.68		-0.68			1.14	1.08	
/p/+/a/	22								
/p/+/o/	29								
/k/+/a/	52				1.23	0.79	0.98	1.77	
/k/+/u/	118	1.90			-1.73	-1.16			0.91
/m/+/o/	32	1.19	1.06	1.00					1.00
/g/+/a/	50		1.40	1.28	0.84			1.00	
/dʒ/+/a/	24		1.38	1.38	0.96			1.33	
/b/+/o/	63	-0.56	1.95	1.27	0.87	0.78			
/dʌ/+/a/	195	-0.49	0.87	1.52	0.48	0.68		1.24	
/g/+/o/	52		1.33	0.92	1.27	1.00		1.10	
/tʃ/+/i/	23	-0.87	1.35	2.52				1.43	
/b/+/u/	27					-1.33	-0.74	-1.00	
/g/+/u/	32		0.63		-1.44	-1.44	-0.66	-1.06	
/p/+/u/	57	0.63		-0.98	-2.05	-2.21		-1.49	
/t/+/i/	18							-0.89	
/p/+/i/	22		-1.00					-1.91	-1.82
/b/+/e/	101	-1.41	-0.96		-1.50	-1.00	-2.29	-1.35	
/n/+/e/	26	-1.19		-0.88	-1.73	-1.04	-2.58	-1.81	
/p/+/e/	81	-0.41	-1.23	-0.64	-1.00	-0.65	-1.49	-1.00	

The values, which are significantly different from the average of 1566 cases for each scale (t-test, $p < 0.05$), and whose difference in absolute value from the average are larger than 0.5, are shown. Positive values are in orange (upper adjective in the first row), while negative values are in light blue.

図5：手触りと音の音象徴的結びつき

現在までにわかってきたことは、滑らかでやわらかい素材の質感が「ふほふほ」や「もまもま」という音の印象とつながっており、粗くてかたい素材の質感が「きちきち」や「げけげけ」という音の印象とつながる傾向が日本人で見られることです。さらにこの傾向は実験を実施したほかのすべての地域でも共通していることがわかりました。また、サンプルを見ずに触るだけの触覚条件と、サンプルを見るだけで触らない視覚条件で類似した結果が得られたことから、触覚情報、あるいは視覚情報のみが音象徴性をもつのではなく、それらから推定された質感が音象徴性をもつことが示唆されました。

・質感に関する音象徴の自動性について
 これまでの研究では、2つの質感と2つの音を提示し、どちらがどちらにふさわしいと思うかを聞くというような、被験者の主観に基づいた応答に注目して実験を行ってきました。この研究では、客観的指標から質感に関する音象徴を説明することが可能かを検討するため、音声刺激をプライマー、質感画像をターゲットとし、プライマーとターゲットの質感印象が一致・不一致の場合にターゲットの質感を判別するタスクの反応時間と正答率を計測する実験を行いました。結果として、被験者は音声を見捨てて質感の判別を行ったにも関わらず、光沢感と硬軟感において、音声と画像の質感が不一致の場合に一致の場合よりも反応時間が長くなりました。この結果から、私たちが音を聞いたときに感じる質感印象が、タスクのパフォーマンスに自動的に影響を与えることが明らかになりました (Wakamatsu et al., VSS2019)。

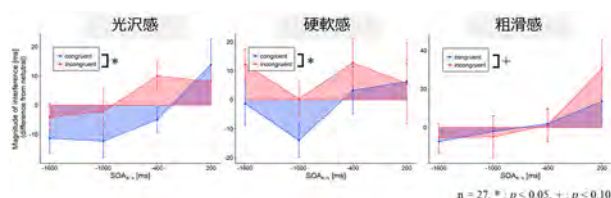


図6：質感が一致(赤)と不一致(青)の条件の質感判別タスクの反応時間

・絵画配色に対する選好について
 これまでの研究で、絵画のジャンル、観察者の国籍に依らず、原画の配色が最も好まれることが示されています (Kondo et al., ICVS2017)。さらに、30,000人を超える被験者を対象とした大規模被験者実験によって、この原画配色選好はロバストであり、性別、収入、学歴による原画選択率の差は無いことが明らかになりました (Nakauchi et al., VSS2019; ICVS2019)。

また、原画と、色相を反転した偽物の絵画に対する瞳孔反応を計測したところ、原画と偽物で異なる反応が見られ、被験者の感じる配色の「自然さ」が瞳孔反応に反映されることが示唆されました (Taniyama et al., VSS2018)。

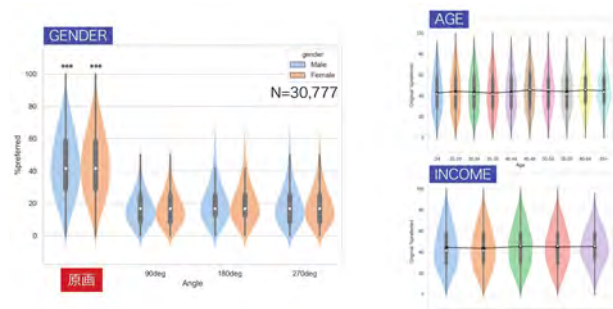


図7：被験者属性ごとの原画選択率

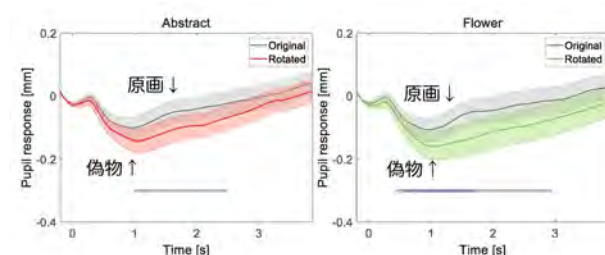


図8：原画と色相反転画に対する瞳孔反応

脳波計測実験の結果からは、原画と偽物を用いたオドボールタスクにおいて、「自然さ」の違いを反映する P3 非対称性が確認されました。静物画と抽象画の両者でこの現象が確認されたことから、記憶色とは異なる何らかのメカニズムによって、原画の配色が私たちにとって「自然な」配色であると感じられることが示唆されました (Taniyama et al., VSS2019)。

○関連する研究発表

論文

1. Maki Sakamoto, Junji Watanabe: Visualizing Individual Perceptual Differences Using Intuitive Word-Based Input, *Frontiers in Psychology*, 10(1108), 1-8. DOI: 10.3389/fpsyg.2019.01108 (2019)

2. Maki Sakamoto, Junji Watanabe: Bouba/Kiki in Touch: Associations Between Tactile Perceptual Qualities and Japanese Phonemes, *Frontiers in Psychology*, 9(295), 1-12. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00295 (2018)

学会発表など

1. Wakamatsu, K., Michael J. Proulx, & Nakauchi, S. Visual-auditory crossmodal priming affects visual texture recognition. *Vision Sciences Society 2019 Annual Meeting*, Florida, U.S.A.

2. Nakauchi, S., Nishimoto, M., & Tamura, H. Age-related change in preference for chromatic compositions of art paintings revealed by 30K subjects experiment. *The 25th Symposium of the International Colour Vision Society*, Riga, Latvia.

触覚的質感の記録再生技術

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

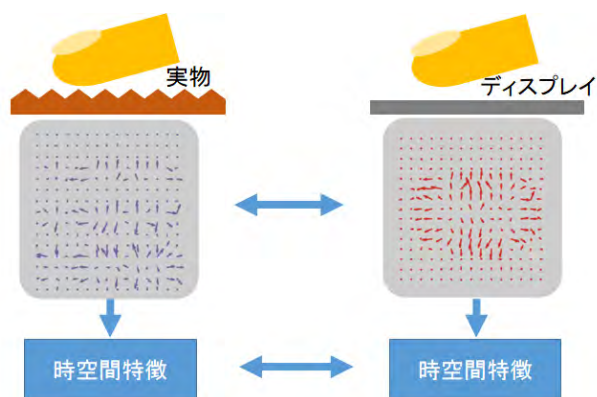


図 1：触覚的質感の計測，解明

○研究の背景

触感の自在な提示は情報端末分野を中心に現在産業界の高い関心を集めています。しかし実現されている触感表現は記号的な触覚提示にとどまり、質感を表現できるレベルに達していないのが現状です。

この原因は、第一に指先を皮膚の知覚能力以上に高い時間・空間分解能で刺激するハードウェアがないこと、第二にその結果として触感表現に関する探索が時間波形と空間パターンに分離して議論されており、刺激の時空間特徴に関する視点が不足していることであると考えられます。

○この研究の目指すもの

本研究は次の二点を目指しています。第一は触感の構成要素の解明です。時間的、空間的に高い解像度を実現する計測装置を開発し、触感を構成する時空間的特徴量を観察により明らかにすると共に、機械的な刺激装置で再現することによって確認します。

第二の目的は産業界からの期待の大きいタッチパネルにおける触感フィードバック法の最適設計論の構築です。タッチパネルですでに提案されている2種類の提示手段を組み合わせ、触感生成の面から最適化する手法を構築します。

○これまでに得られた成果

触感の構成要素の解明に関しては、現在までに指先皮膚が凹凸テクスチャ面上を移動した際の皮膚変形を高速に捉えるシステムを構築しました（図 2）。テクスチャ素材（アクリル製）とほぼおなじ屈折率

のシリコンオイルを用いて凹凸による画像の歪をなくし、指先皮膚のマーカをトラッキングします。指は固定され、接触対象物がリニアアクチュエータで駆動されます。実現した計測系は指皮膚の水平変位を $5\mu\text{m}$ 以下の精度で計測することが可能です。カメラ二台と実体顕微鏡を用いた構成によって、皮膚の変形を立体的に捉えることが可能になりました。

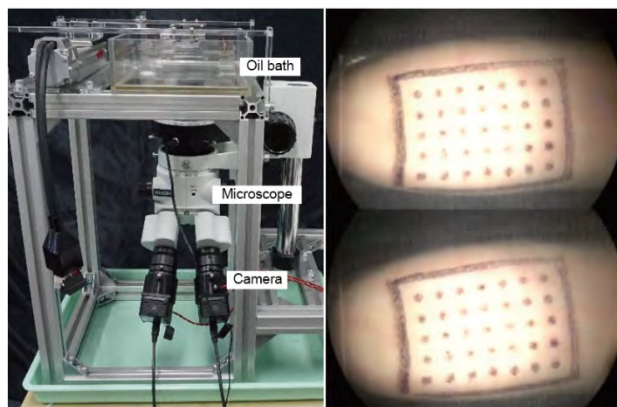
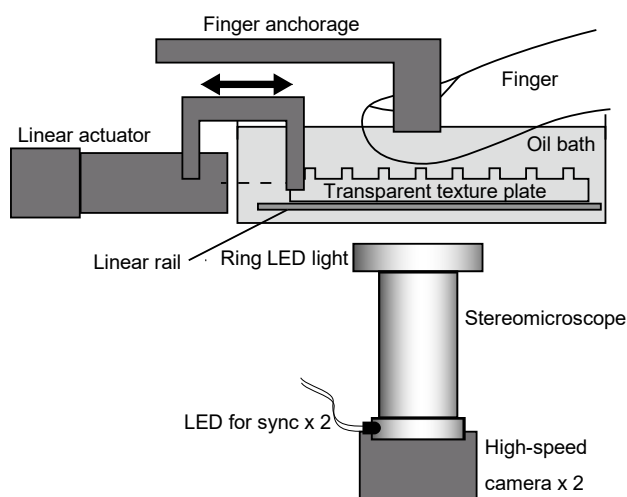


図 2：インデックスマッチングを用いた皮膚計測

実際に正弦波状のテクスチャをなぞった場合の皮膚変形の計測結果を図 3 に示します。横軸はテクスチャの移動量を示し、縦軸は皮膚垂直方向ないし長軸方向のマーカの移動量を示しています。指のほぼ中央のマーカに関する計測結果を格子縞の種類ごとに表示しています。

この結果から、正弦波状のテクスチャをなぞった場合、皮膚の垂直方向変位は明瞭に同じ間隔の繰り返しを観察され、皮膚に対象物体の形状がコピーされている状況であることがわかります。また皮膚の水平方向の変位を見ると、初期の微動以外では顕著な動きはありません。つまり少なくとも凹凸形状に関する情報は皮膚垂直方向の変位が支配的であることが確認されたことになります。

計測実験ではさらに、周期の異なる一次元グレーティングパターンに対する計測も行っており、皮膚の垂直、水平変位がもつ意味がより明確になると期待されます。

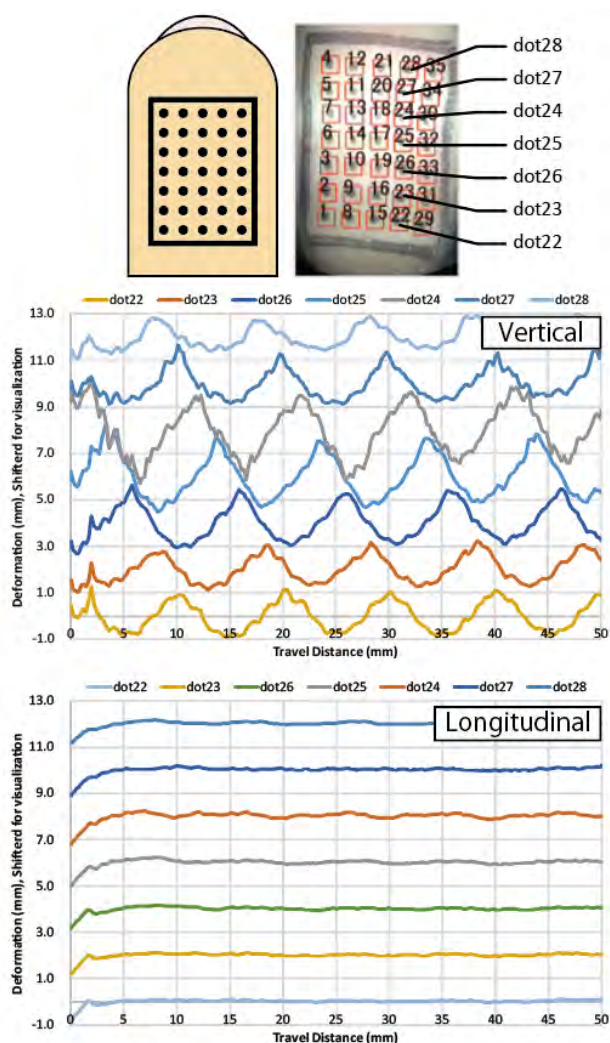


図 3：正弦波状テクスチャをなぞった際の皮膚の垂直・水平運動

以上のような皮膚挙動の3次元的計測にはいくつかの制約があります。第一に接触対象物が透明でなければならないこと、接触対象物と同じ屈折率の油を用意する必要があること、この油によって接触状況が大きく変化すること、です。こうした制約を解決するために、我々は別途、テクスチャ面にごく細

い触知不可能なスリットを設け、そのスリット越しに観察する手法についても検討しています（図 4）。

装置の構成はこれまでの三次元計測装置に近く、大きく違うのは触る対象のテクスチャに細いスリットがつけられており、カメラはそのスリットに対して計測するという部分です。このため油を必要としません。

計測された動画を用いて画像処理を行うため、指表面には事前に縞模様のマーカを塗布しています。縞の間隔は図 4 では 1mm ですが、現在指紋をマーカとする方法も併せて検討しています。

一方でスリット越しの計測では、スリットの存在によって皮膚変形が著しく阻害される可能性も考えられます。この問題に対しては、我々はまず心理物理実験によってスリットを知覚しないためのスリット幅を求めています。現在複数のテクスチャに対してこの閾値を求め、粗さに強い相関がある（粗いテクスチャはスリットを知覚し難い）ことを見出しています。実際の皮膚計測でもスリットの影響が無いことを確認するため、これまでの油中での計測による確認も行予定で

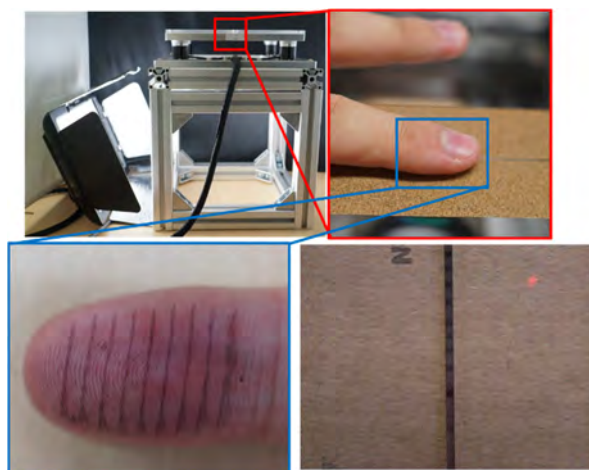


図 4：テクスチャなぞり時のスリット越し皮膚計測

触感の解明には皮膚変形の記録だけでなく、記録された変形を再現する触覚ディスプレイが必要になります。しかし指先の皮膚変形が必要とすると考えられる空間的な解像度に対して、分布的な皮膚変形を提示できる触覚ディスプレイの解像度はかなり低いのが現状です。

そこで我々は、新たにシンプルな原理に基づく高い時間・空間解像度の触覚提示を実現することを提案しました。提案する手法は熱によるワイヤの伸縮を用いるものです。従来から形状記憶合金ワイヤによる熱駆動は数多く提案されていますが、本研究で用いたものは形状記憶合金ではなく電熱線です。本研究では特にニクロムワイヤを用いています。熱による伸縮を起こす電気伝導性のある物質であれば素材の候補となるため、形状記憶合金ベースのものに

比べて設計の自由度も高いと考えられます。

図 5 に作成された触覚ディスプレイを示します。垂直に立てられた黒い棒が触覚提示用のピンで、約 1.2mm 間隔で並んでいます。これらのピンが横から水平方向にニクロム線ワイヤで牽引されています。使用したニクロム線ワイヤは直径 30 μ m というごく細かいもので、このくらいの細さであれば加熱と冷却にかかる時間は短く、約 600Hz 程度までの人に知覚可能な触覚を提示することが出来ます。

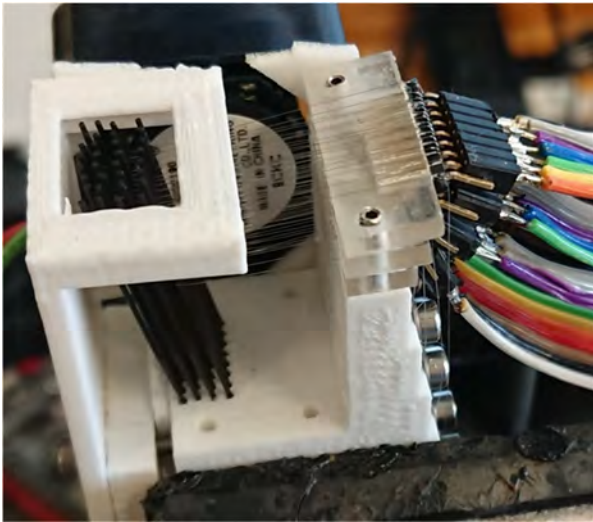


図 5：電熱線を用いた高解像度触覚ディスプレイ

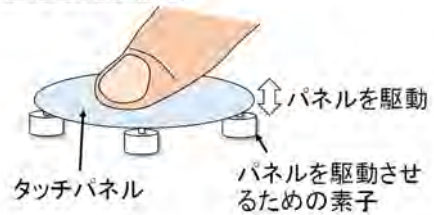
タッチパネルによる触感表現については、現時点でタッチパネルの触覚提示手段として合理的と思われる機械的な振動を提示するタイプ（Active type、エネルギー供給型）と、パネルに帯電した静電気によって摩擦を提示するタイプ（Passive type、エネルギー消費型）を組み合わせ、触感生成の面から最適化する手法を実現しつつあります（図 6）。この二つのタイプの触感提示原理は、提示可能な触刺激の性質が相補的であることから、両者を併用することで高品質な触感刺激を提示することが可能になります。

通常、素材の表面には粗さがあります。また、表面を指で擦ると摩擦が発生します。機械的振動を提示するタイプは、仮想的な表面粗さを提示することが得意ですが、摩擦を生成することはできません。この点を補うために、摩擦を提示するタイプを併せて用います。そのことによって、これまでのどちらか一方のタイプを用いた手法よりも、より本物らしい触感の提示が可能となることが心理学実験によって分かっています。

図 7 は研究室で開発した触感提示装置で、タッチパネルを擦ると、そこに表示された画像に合致した触刺激を感じることが出来ます。図では畳の絵が表示されており、いぐさによる大きな凹凸と一本一本の線維の細かな粗さを感じることが出来ます。これら 2 手法をどのように組み合わせることで、良い触

感が提示できるかという最適設計論を今後も追究していきます。

タッチパネルを機械的に駆動するタイプの触感提示



タッチパネルに電荷を蓄えて静電気による摩擦を生成するタイプの触感提示

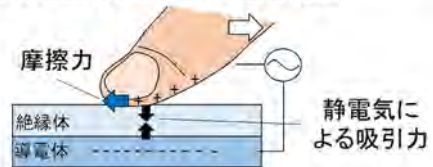


図 6：2 種類の触感提示の原理

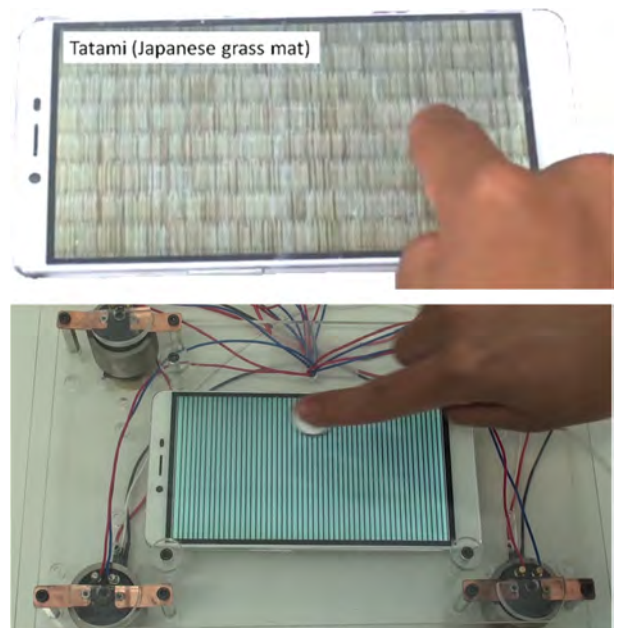


図 7：タッチパネル表面でテクスチャ（触感）を提示する装置。上）合成された畳の触感を提示している様子。下）縞模様の粗さテクスチャを提示している様子。

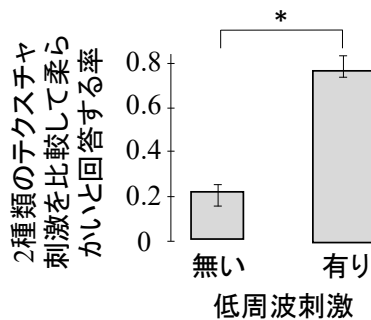


図 8: 低周波刺激がある場合にテクスチャの質感が柔らかく感じられると回答する人が多い

テクスチャと言えば、表面の粗さと摩擦を指す場合が一般的です。しかし、素材には特有の柔らかさがあり、これが触知覚に大きく影響します。そこで、硬いタッチパネルの上で柔らかさを感じさせる方法を追究しています。タッチパネルはガラスの平面ですから硬い質感です。しかし、このパネルに触れる指の皮膚を 5—10 Hz ほどの低周波で変形させると、ほんのり柔らかい触感を感じるという現象があります。この技術によって従来よりも多彩な触感の提示が実現しつつあります。しかし、その知覚機序は未解明であるため、原理の理解に基づいたより効率的な表現方法を研究しています。

触感ディスプレイを開発するためには、人がどのようにテクスチャを知覚しているかを理解することが重要です。そこで、図 9 のような計測装置を用いてさまざまな素材を指で擦ったときに生じる現象を測りました。この装置は、指と素材の法線（縦）方向およびせん断（横）方向の接触力を精緻に測ることが可能です。布・木材・樹脂・金属などのさまざまな素材との接触力を計測し、それを分析することによっていくつかの新しい発見がありました。もっとも重要と考える発見について説明します。接触力はさまざまな周波数成分を有する波です。これまで、この周波数成分の強さが、テクスチャの触知覚に重要であることがわかっています。しかし、波には周波数の強さ以外にも、位相と呼ばれる波と波のずれの情報が 있습니다。法線方向とせん断方向の接触力の波のずれ（位相差）にも、テクスチャの情報が多く含まれていることがわかりました。すなわち、図 6 のような 2 種類の触感ディスプレイを組み合わせる場合には、両者の触感ディスプレイから提示される刺激の波のずれにまで気を配る必要があることを意味しています。このように、触知覚原理の知見が明らかになることは、触感ディスプレイの高度化につながっていきます。

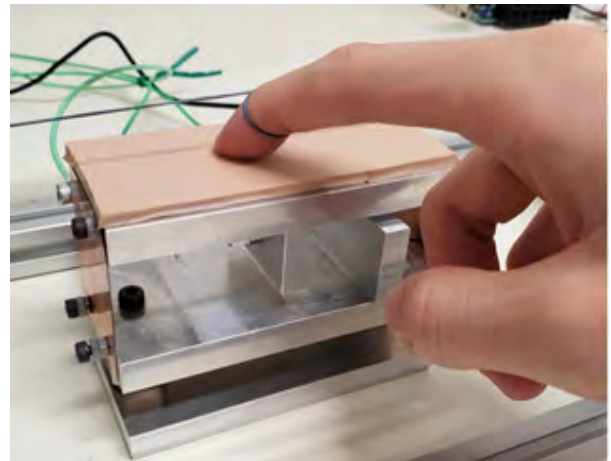


図 9: 指と素材の接触力（法線力とせん断力）を精緻に計測する装置

○関連する論文

1. Tanaka, S., Kaneko, S., Kajimoto, H.: Three-dimensional Measurement of Skin Displacement Using Index Matching and Stereoscopy, In Proc. Haptics Symposium 2020 (to appear).
2. Kajimoto, H., Jones, L.: Wearable Tactile Display Based on Thermal Expansion of Nichrome Wire, IEEE Transaction on Haptics, pp.257-268, 2019.
3. Ito K., Okamoto S., Yamada Y., Kajimoto H.: Tactile texture display with vibrotactile and electrostatic friction stimuli mixed at appropriate ratio presents better roughness textures, ACM Transactions on Applied Perception, vol. 16, issue 4, article no. 20, 2019.
4. Hasegawa H., Okamoto S., Yamada Y.: Phase difference between normal and shear forces during tactile exploration represents textural features, IEEE Transactions on Haptics, vol. 13, 2020.

コンピュータグラフィックスによる質感表現技術

研究代表者 土橋 宜典（北海道大学大学院情報科学研究院・准教授）

研究分担者 岩崎 慶（和歌山大学大学院システム工学研究科・准教授）

岡部 誠（静岡大学大学院総合科学技術研究科・准教授）

井尻 崇（芝浦工業大学工学部情報工学科・准教授）

藤堂 英樹（中央学院大学現代教養学部・助教）（2019年度は連携）

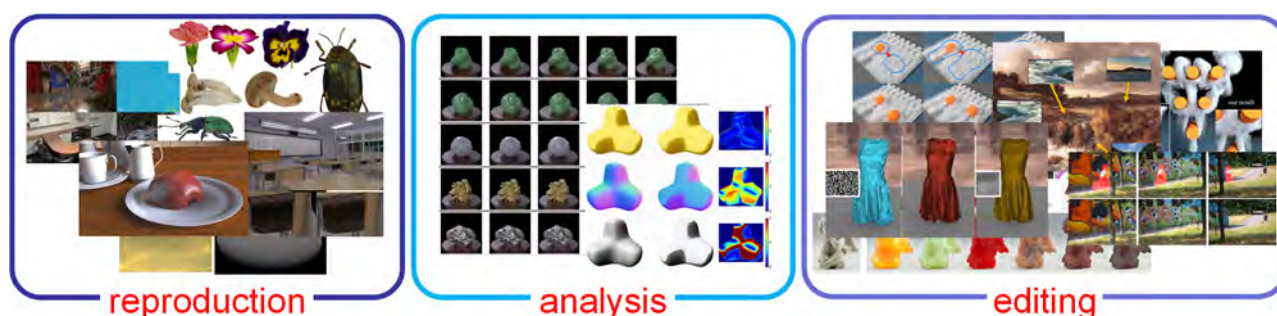


図1 CGチームの目的

○研究の背景と目的

CG技術は各段に進歩し、実写と区別のつかない非常にリアルな画像を生成することが可能となりました。CG技術は工業製品のデザインや事前景観評価、また、映画やビデオゲームなど、幅広く応用されています。CG技術の利点は形状データや材質に関するパラメータを変更することでさまざまな質感を持った映像を作り出せることです。この利点は人間の質感認知の解明にも役立ちます。

多元質感知における私たちCGチームの目的は三つあります（図1参照）。それは、CG技術を用いてリアルな質感を再現すること（**reproduction**）、リアルな質感を表現するために重要な要素を解析すること（**analysis**）、そして、目的の質感を表現するよう編集できる仕組みを開発すること（**editing**）です。この三つの目的に沿って様々な研究課題に取り組んできました。研究期間の前半では、CTを用いた複雑な物体のモデリング、輝度計算における誤差評価、散乱媒体の高速レンダリング、イラストにおける質感の解析、質感表現の逆問題、流体の質感表現などに取り組みました。これらは前回のニュースレターにて詳しく紹介しています。研究期間後半では、より幅広い現象や課題を対象にした応用研究に取り組みました。本稿では、それらの研究の中から、以下の4つの成果について紹介します。

- 1) 流体の表現と編集
- 2) 複数の画像を提示できる特殊な印刷
- 3) BDPT法による高精細輝度計算法
- 4) 画像を用いた質感転写

○流体の表現と編集

煙や炎などの流体はCGによる再現が難しい現象の一つです。計算が複雑で計算コストも高いことから、目的の質感や動きを表現することは容易ではありません。本研究では、事前に計算した結果を再利用することでこの問題の解決を目指します。単に計算されたデータをそのまま再利用するのではなく、別々に計算した異なるデータを合成することが本研究の目的です。

画像処理の分野では、輝度の補正や変形、画像同士の合成など、さまざまな手法が提案されています。また、ポリゴンメッシュや曲面で表現された3次元物体を変形する手法も多数提案されています。それらの手法を流体シミュレーションにより得られたデータに適用すれば、いったん計算したデータを編集して再利用することが可能です。しかし、それらの手法をそのまま利用すると編集を施した後に、流体の重要な物理的な性質を満たさなくなってしまうという問題があります。そのような物理性質の一つに非圧縮性があります。この性質を満たしていないと、あり得ないところから煙や水が湧き出したり、あるいは逆に、吸い込まれたりという現象が発生してしまいます。これでは、再利用ができません。本研究は、この問題を解決し、非圧縮性を保ちながら編集を可能とします。煙のシミュレーションを対象に、流れ場の乱流合成[1]と流れ場の補間[2]に関する方法を開発しました。

乱流合成の研究では、別々に計算した低解像度の流れ場と高解像度の流れ場を合成する方法を開発しています。煙の質感や印象は詳細な渦がどの程度含

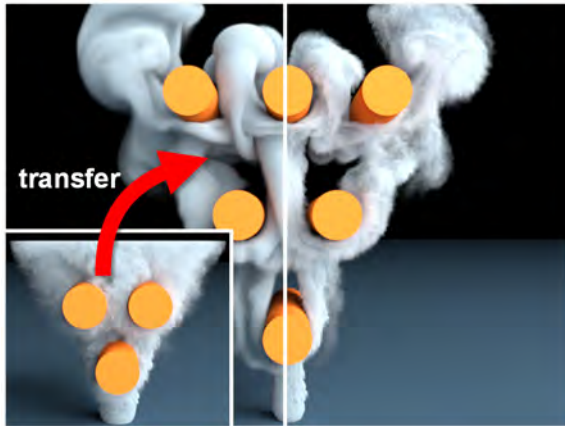


図 2 乱流合成。左側に示す低解像度シミュレーションと部分的な高解像度シミュレーションを組み合わせて右側に示す高解像度の煙を生成。

まれているかによって大きく変わります。しかし、詳細な渦を表現するための高解像度のシミュレーションにはかなりの時間がかかります。そこで、高解像度のシミュレーションを全体の一部にとどめることで低コスト化を図りました（図 2 参照）。この方法の利点は、流体の全体的な大まかな流れを低解像度のシミュレーションで設計し、それとは別に計算した詳細な乱流成分をポストプロセスとして合成できる点です。低解像度の流れは低コストで高速に実行できるため、流れ場のデザインをストレスなく実行できます。詳細な流れは部分的なシミュレーションですので、やはり高速に実行できます。それぞれ、独立に計算を実行できるため、組み合わせを変えることで異なる質感や印象の煙を合成できます。合成する際には、非圧縮性を保ったまま合成するため、自然な映像を生成することができます。

流れ場の補間手法では、ある領域の流れを周辺の流れから補完することができます。これによって、流れ場のコピー＆ペーストや別々に計算した流れ場を結合するなどの処理を実現することができます。ある領域の流れ場を別の領域にコピー＆ペーストすると、当然ですが、その境界が不連続になります。そこで、ペーストした領域の周辺にマージン領域を設けて流れ場を滑らかに補間することで、不連続性を解消する方法を開発しました。この補間処理において、前述の非圧縮性が保たれるよう最適化処理を施すことで、自然な流れ場の合成が行えます。図 3 はこの方法による計算例を示しています。コピー＆ペーストにより部分的に煙の質感を変更しています。

○複数の画像を提示できる特殊な印刷

普通、紙に印刷された絵はどこから見ても同じです。この研究ではこの概念を覆す特殊な印刷方法を開発しました[3]。この技術を使うと、観察方向によって絵柄を変化させることができます（図 5）。CG 分野においては、これまでも見る方向や光の当て方に応じて異なる絵柄が現れるような彫刻や反射板

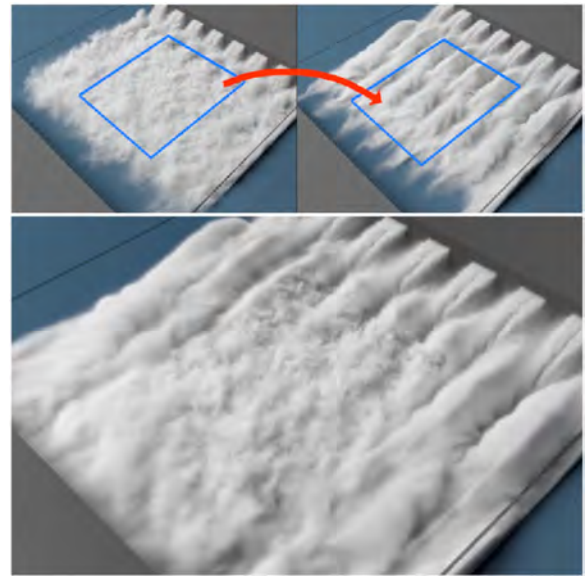


図 3 流れ場の補間。上図に示すように、乱流度の異なる流れを部分的にコピーすることで、煙の質感を部分的に変更。

は提案されています。しかし、それらは二つの絵柄の提示にとどまっていた。私たちの開発した方法をもちいると、最大 6 枚程度のカラー画像の提示が可能となります。

基本的なアイデアはとても単純です。図 4 に考え方を示します。印刷した絵柄の一部を拡大すると、図 4 に示すような 3 次元構造になっています。底面にはインク層があって、色がついています。そして、インク層の上には黒色の壁がいくつかの方向が異なるストライプ状に配置されています。この壁の高さは非常に低く、手で触ってみても認識できるほどのものではありません。さて、いま、図 4 上に示す方向から印刷物を観察した場合を考えると、壁に遮蔽されてインク層が部分的にしか見えません。この図の場合は、インク層の緑色の部分のみが可視であり、結果としてこの場所は緑色に見えます。次に、図 4 下のように観察方向を変えてみます。すると、今度は、インク層の緑色の部分は遮蔽され、赤色の部分のみが見えます。つまり、観察方向によって、インク層の可視な領域が変化し、提示される色が変化するので。

以上の考え方を定式化し、最適化問題として解く方法を開発しました。指定された複数の観察方向で指定された絵柄が提示されるよう、最適な壁の位置や高さ、また、インク層の色パターンを自動的に計算します。計算された結果の印刷には UV プリンタを使用しました。UV プリンタとは、UV 硬化インクを用いることで微細な凹凸を印刷できる機械です。UV プリンタ自体は高価ですが、専門店やインターネットのサービスを介して誰でも利用できます。

この印刷物の応用例を図 5 に示します。図 5 上の例は観察方向によって 4 枚の異なる絵柄が提示されている印刷物を示しています。この印刷物を 4 枚の

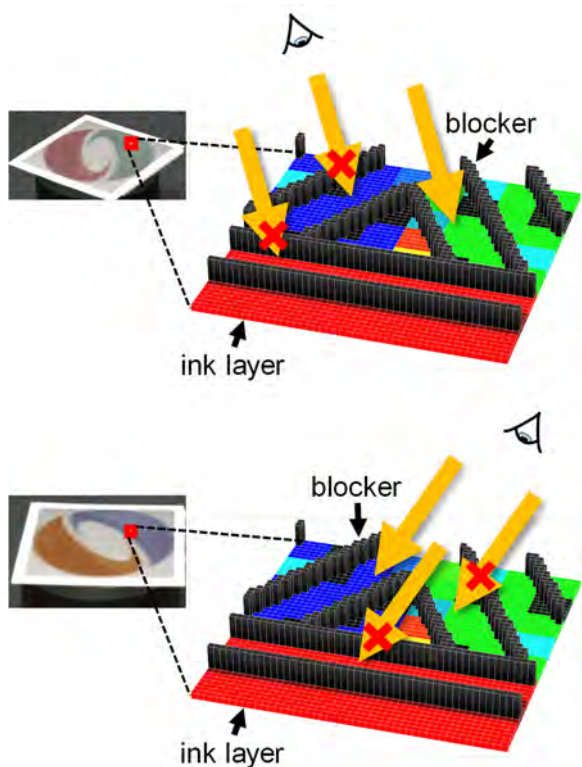


図 4 異なる絵柄の提示方法。微小な微細な壁によって部分的にインク層を遮蔽することで異なる絵柄を提示する。

鏡の前に置くと、それぞれの鏡には異なる絵柄が映り込んで見えます。図 5 下に示す例では、観察方向を固定し、代わりに、光源方向を変えています。光源方向は黄色の矢印で示しています。こうすると光源方向によって異なる絵柄を提示することができ、印刷されたティーポットの陰影や影が光源方向に応じて変化し、印刷物でありながらも、その 3 次元的な質感を表現できます。

OBDDPT 法による高精細輝度計算法

質感を正確に再現するには、仮想環境内での光の振る舞いを正確にシミュレーションした上で対象物の輝度計算を行う必要があります。このような光のシミュレーションに適した方法としてパストレーシングと呼ばれる方法があります。この方法は視点と光源を結ぶ光の経路を確率的にサンプリングし、各経路による画素への貢献度（輝度）の平均値を求めることで画像を生成します。サンプル数を増やしていけば厳密解に収束することが数学的にも保証されていることからその効率化に関する方法が数多く提案されています。

Bi-directional Path Tracing (BDPT)と呼ばれる方法はその一つで、なかでも広く使われている方法です。BDPT 法では光源側と視点側からそれぞれ独立に光の経路をサンプリングします。そして、それらの経路を接続することで視点と光源を結ぶ経路を生成します。これによって、少ないサンプル数から

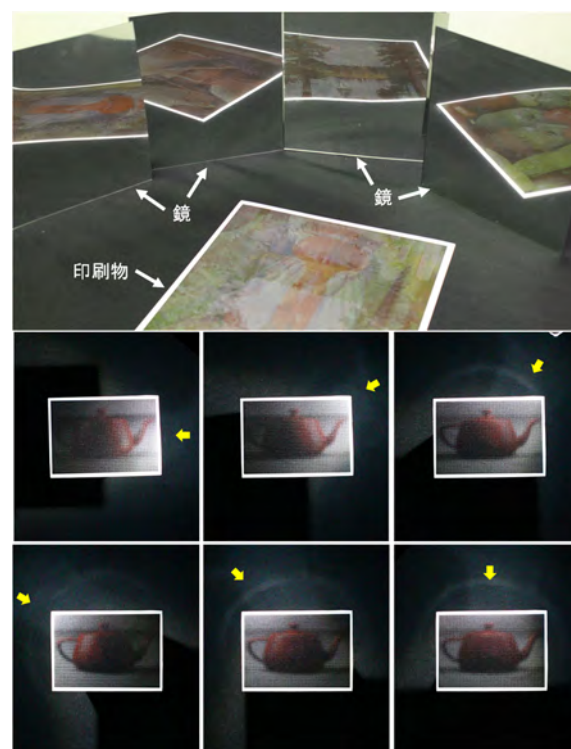


図 5 特殊印刷の応用例。(上) 1 枚の印刷物から 4 つの絵柄が鏡に映り込んでいる。(下) 光に反応して陰影が変化するティーポット。

多数の経路を作り出すことができ、計算効率を向上することができます。最近、光源側の経路を複数生成しておく方法が発表され、計算効率をより一層向上することができる有力なとして注目を集めています。しかし、視点側経路と光源側経路をどのように組み合わせるかによって計算効率が大きく変化してしまいます。そこで、私たちは、この経路の組み合わせにおける最適性を追求しました。視点側経路と光源側経路を組み合わせる重み付き平均を求めることで輝度を計算しますが、このときの最適な重みを数学的に導出しました[4]。これによって、これまでの方法と比べて数倍の高速化が実現されます。

図 6 はこの方法によって計算した例を示しています。計算時間を 1 分に限定し、既存手法との比較を示しています。図 6(a)は標準的な BDPT 法で計算したのですが、ノイズが目立ちます。確率的な手法ですので、サンプル数が少ないとどうしてもノイズが発生してしまいます。図 6(b)は前述の複数の光源経路を用いる BDPT 法ですが、やはりノイズが見られます。このシーンでは、標準的な手法よりもむしろ劣化しています。適切な重みが用いられていないことが原因です。一方、私たちの手法を用いた場合は画質が大幅に改善されており、最適な重みを用いることの重要性が確認できます (図 6(c))。

○画像を用いた質感転写

最後に紹介するのは、撮影した画像の質感を変更する研究です。ろうそくやジェルなど、半透明な物



図 6 BDPT 法による高精度輝度計算。(a) 標準的な方法。(b) 最新的手法。(c) 提案法。



図 7 画像間の質感転写。左の不透明物体に上部に示す半透明物体の質感を転写。

体の質感に着目しました。3 次元情報を利用せず、画像と画像との間での質感の転写を行います。半透明な物体の画像を撮影し、その質感を不透明な物体の画像に転写します (図 7 参照)。

半透明物体の質感には特徴的な性質があります。半透明物体に入射した光は物体内部でランダムな散乱を繰り返した後、入射した点とは異なる場所から放射します。その結果、光が拡散し、シャープなエッジが見えにくくなり、ぼやけたような印象になります。この特徴を捉えるために、半透明物体の画像を複数の周波数バンドに分解します。そして、不透明物体の画像も同様に周波数バンドに分解し、対応する周波数バンド同士でヒストグラムマッチングを行うことで質感の転写を行う方法を開発しました [5]。ただし、周波数バンドごとに独立に処理を行うのではなく、周波数バンド間の相関関係を解析した上でヒストグラムマッチングを行うことで、半透明物体の質感を適切に転写することに成功しました。

図 7 は提案法によって質感転写を行った例を示しています。単一の不透明物体に対して、様々な半透明物体の質感を的確に転写することに成功しています。クラウドソーシングを利用して既存手法との比較に関するユーザスタディを行った結果、提案法により得られた画像が最も自然であるという結果も得られています。また、この方法は静止画だけでなく、動画にもそのまま適用できることがわかりました。一枚の半透明物体の画像の質感を、不透明物体を撮影した動画に転写することができます。

○今後の展望

本稿では、CG チームの研究成果の一部を紹介しました。CG 技術は、非常にリアルな画像を生成で

きますが、必ずしも実際の物理現象を正確にシミュレーションしているとは限りません。本稿で紹介した流体データの編集や質感転写に関する技術はまさにその典型です。このとき、どのくらい物理法則から逸脱すると画像のリアリズムあるいは自然さが失われるのかは明らかではありません。CG 分野の更なる深化のためには、この問題の解明に取り組むことが重要でしょう。

○関連する研究発表

論文

1. Sato S, Dobashi Y, Kim T, Nishita T: Example-based turbulence style transfer, ACM Trans. on Graphics 37(4): article 84, 2018.
2. Sato S, Dobashi Y, Nishita T: Editing fluid animation using flow interpolation, ACM Trans. on Graphics 37(5): article 173, 2018.
3. Sakurai K, Dobashi Y, Iwasaki K, Nishita T: Fabricating reflectors for displaying multiple images, ACM Trans. on Graphics 37(4): article 158, 2018.
4. Nabata K, Iwasaki K, Dobashi Y: Resampling-aware weighting functions for bidirectional path tracing using multiple light sub-paths, ACM Trans. on Graphics, 2020 (in press).
5. Todo H, Yatagawa T, Sawayama M, Dobashi Y, Kakimoto M: Image-based translucency transfer through correlation analysis over multi-scale spatial color distribution, The Visual Computer 35 (6-8): 811-822, 2019.

超多自由度照明による実物体の質感表現編集技術

研究代表者 岩井 大輔(大阪大学 大学院基礎工学研究科研究科・准教授)

研究分担者 日浦 慎作(兵庫県立大学 大学院工学研究科・教授)

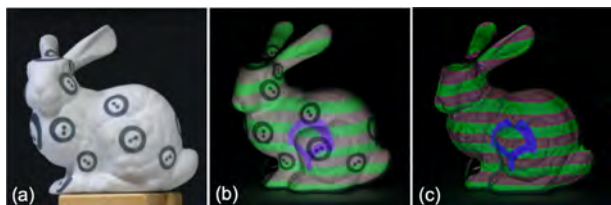


図 1:フルカラー3D プリントによる位置合わせ用マーカー埋め込みとその投影結果 (a: マーカー埋め込み D-Fab 出力物体, b: 位置合わせ投影結果, c: マーカーキャンセル結果)

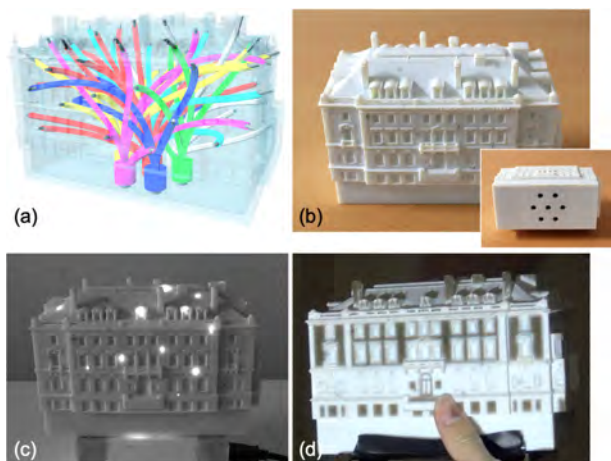


図 2:マルチマテリアル 3D プリントによる光ファイバー型マーカーの埋め込みとその投影結果 (a: ファイバー経路最適化結果, b: 印刷物とその底面に明けた赤外線 LED 挿入穴, c: 赤外線カメラ撮影画像, d: 位置合わせ投影結果)

○研究の背景と目的

質感認識の解明には、多様で複雑な質感を人工的に制御し表現できるディスプレイが不可欠です。物体表面で反射する光の分布は物体に入射する光の方向や配置によって複雑に変化します。個々の物体の豊かな質感をもたらしているこの光線の入出力関係を、正確に再現したり、意図に応じて変更を加える(編集する)技術が求められています。しかしながら、従来のディスプレイ技術では、質感呈示に十分な解像度で光線を再現することは困難でした。

一方、3D プリントや切削加工機等のデジタルファブリケーション(D-Fab)装置の出力を最適化して、実物の反射特性を再現する研究が高い関心を集めています。しかしながら、D-Fab 装置の空間解像度や扱える素材数の制約から、呈示できる質感空間は限

定的で、出力後その質感を編集できません。

本研究課題では、ディスプレイ技術と D-Fab 方式を融合し、それぞれ単体では実現できないレベルの高い再現性および自由度での質感表現を目指しました。具体的には、ユーザが望みの表面質感を指定すると、それに最も近い実物を D-Fab 装置を用いて出力できるように、多自由度照明とコンピュータグラフィック技術を組み合わせた技法で較正する質感較正技術、そして、その出力物体から反射されて観察者の眼に届く光を、プロジェクタを中心とする多自由度照明で変調し、視覚的質感を修飾する質感編集技術の開発に取り組みました。

○研究成果

照射光の D-Fab 出力物体表面への位置合わせ

D-Fab 出力物体の表面の質感を、プロジェクタからの投影映像を用いて編集することを考えます。このとき、プロジェクタの各画素が物体表面のどの点に照射しているかを知る必要があります。この対応は、プロジェクタと物体の 3 次元空間での位置姿勢関係を得ることによって求めることができます。計測精度や導入コストのバランスから、カメラを用いた画像計測により物体の位置姿勢を推定する方法がよく用いられています。具体的には、物体に目印になるマーカーを多数貼り付けて、それを複数台のカメラで計測することで三角測量の原理で位置を推定します。このとき、マーカーの貼り付けは手作業で行う場合が多く、設置の手間と位置ずれが問題となります。また、映像投影された物体上にマーカーが見えてしまい、質感編集の品質が低下します。そこで我々は、様々な色・透明度の物質を混ぜて出力することのできるフルカラー3D プリントやマルチマテリアル 3D プリントを用いて、これらの問題を解決する手法を研究しました。

まず、手動でのマーカー貼り付けを自動化して、手間と位置ずれの問題を解決しました。具体的には、多色刷り可能なフルカラー3D プリントを用いて、カメラで計測できる黒色のマーカーを白色の投影物体に埋め込んで 3D 印刷します(図 1a)。これによって、物体表面に正確に位置合わせして映像投影することができるようになりました(図 1b)。しかしながら、これでは黒色のマーカーが質感編集でも見えてしまうという問題は残ったままです。そこで、物体表面の白色の領域への投影照度を低下させて、反射光の輝度が白色と黒色の領域でバランスするよう

な技術を開発しました。これによって、黒色のマーカーを視覚的にキャンセルすることができ、質感編集結果の画質劣化を抑えることに成功しました（図 1c）。

先に紹介した手法では、マーカー部分の反射光の輝度に合わせるため、全体的に投影結果が暗くなってしまう。そこで、目に見えない近赤外光を発するマーカーを埋め込んだ物体を、透明な素材を 3D 印刷できるマルチマテリアル 3D プリンタを用いて出力する手法を研究しました。具体的には、物体の底面と表面をつなぐ光ファイバーを物体内部に埋め込み、底面に取り付けた赤外線 LED からの光を表面に導く 3D 印刷技術を開発しました（図 2ab）。近赤外線カメラでこの物体を観測するとマーカー位置に輝点が観測でき、物体の位置姿勢を推定することができます（図 2c）。一方、人の目には近赤外光は見えないため、映像投影による質感編集の画質劣化が生じません（図 2d）。このように、D-Fab 装置とプロジェクションマッピングを融合することで、映像品質を低下させることなく、実物体の質感編集を行える技術を実現することができました。

プロジェクタのハードウェア限界を超える質感編集

質感編集するためのディスプレイ技術には、それぞれ長所・短所があり、単一のディスプレイ技術だけでは所望の質感を実現できない場合があります。本研究課題ではプロジェクタを多自由度照明として用いていますが、ハードウェア特有の技術的限界があります。我々は、そのいくつかを解決して、従来実現できなかった質感編集を可能にしました。

まず 1 つ目のハードウェア限界として、プロジェクタによる映像投影では、複数の観察者に異なる見えを提示することができません。例えば、光沢の位置は視点に依存して異なりますので、複数の観察者に対して光沢質感を再現するのにはプロジェクタは向きません。そこで我々は、光学シースルー型の頭部搭載ディスプレイを、プロジェクションによる質感編集の観察者に装着させることで、この欠点を補い、さらに高輝度・高コントラストな質感編集を実現しました（図 3）。

2 つ目のハードウェア限界として、プロジェクタと物体との間に観察者の身体の一部が入り込むと、投影結果に真っ暗な影が生じ、質感編集を阻害してしまいます。一方、日常空間では、身の回りの物体は多方向から照明されているため、ある物体表面が完全に遮蔽されて真っ暗になるということはほとんどありません。そこで我々は、多方向から映像投影することで影の発生を抑制する仕組みを、透過鏡の機能を持つ直交配列微小鏡面板（MMAF: Micro Mirror Array Plate）を用いて構築しました。空間中の 1 点から放射した光は、この光学素子によってその逆側の鏡像の位置に集まります。そこで、質感編集の対象となる物体（ターゲット）に対して鏡面

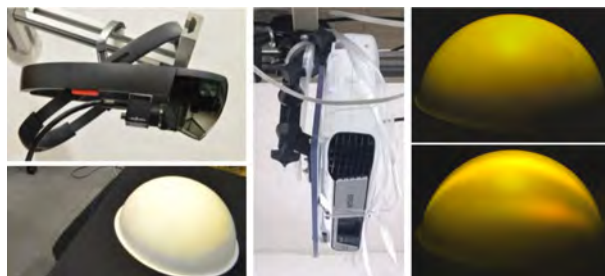


図 3：プロジェクタと光学シースルー頭部搭載型ディスプレイの組み合わせによる質感表現（右上：プロジェクタのみによる表示，右下：両ディスプレイ組み合わせによる光沢表示）

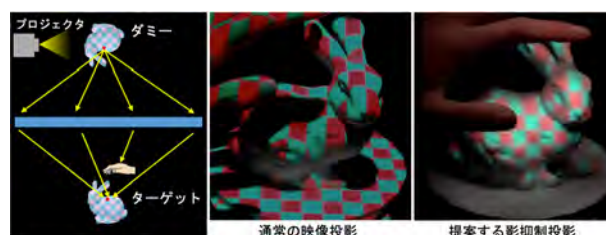


図 4：多方向からの映像投影による影抑制



図 5：映り込み変調による鏡面物体の質感編集

対称な形状の物体を 3D 印刷し、光学素子の鏡面位置に設置します（ダミーと呼びます）。ダミーに映像投影すると、ダミー上で反射した光がターゲット上に集光するため、その表面質感が編集できます。また、光学素子が十分に大きければ、人の手が光学素子とターゲットとの間に入り込んでも、真っ暗な影が発生しないことを確認しました（図 4）。

3 つ目のハードウェア限界として、我々が主たる多自由度照明として用いてきたプロジェクタからの映像投影では、鏡面反射する物体表面の質感編集を行うことができません。プロジェクタから鏡面に映像投影しても、観察者からは鏡に写り込んだプロジェクタが見えるだけで、投影された映像は確認できません。そこで、鏡面に映像を直接投影するのではなく、そこに写り込んでいる環境面の見えをプロジェクションによって変えることで、間接的に鏡面の見えを操作し質感編集する技術を開発しました（図 5）。環境に液晶ディスプレイが予め設置されており、それが対象の鏡面に写り込んでいる場合は、それを多自由度照明として用いることもできます。この技術を通常のプロジェクタ照明と組み合わせる



図 6: 柔らかさ印象を操作する映像投影 (左: 投影前, 右: 投影結果)

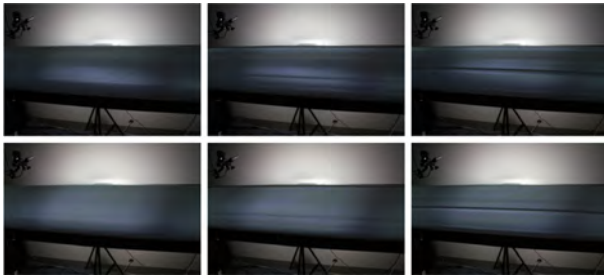


図 7: 形状と表面質感を同時に操作可能な映像投影システム

ことで、拡散反射面と鏡面が組み合わさったような物体表面の見えを同時に変調することが可能になりました。

表面質感以外の質感編集

本研究課題では、物体表面の模様を切り替えることによる表面質感の編集だけでなく、その動きや形状の視覚的な操作も試みました。まず、視覚的な動きを変調することで、布・織物の柔らかさを操作することを実現しました。具体的には、風や物にあたって揺れる対象の布の動きをカメラで計測し、その動きの振幅（動きの幅）を増幅もしくは減衰した画像をコンピュータグラフィックス生成して、対象の布に映像投影しました（図 6）。複数人の被験者に、投影された布を観察してもらい印象評価を行った結果、布の柔らかさ印象が有意に操作可能であることが確認できました。

物体表面に陰影パターンを投影重畳することで、その物体の知覚される形状を操作することができます。さらに、観察者の視点に応じて陰影パターンを適切に切り替えることで、新たな形状をよりもってもらいしと感じさせることが可能になります。我々はこの技術を、実物体の表面質感編集と組み合わせることで、形状と表面質感とを同時に操作可能なシステムを構築しました。このシステムは、自動車の内装などの様々な工業製品の形状・表面質感を、物理的なモックアップ（試作品）を多数準備する必要なく、様々に検討することを可能にします（図 7）。

照明条件により見え方の変わる物体の生成

これまでに述べてきたように、超多自由度照明により実物の見え方を様々に変化させることが出来る

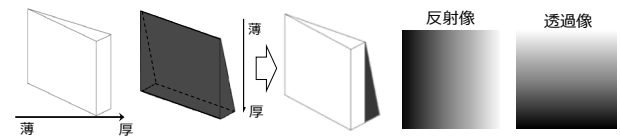


図 8: 物体の反射率と透過率の独立制御

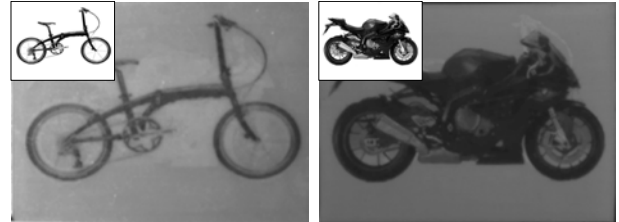


図 9: 透過像と反射像が独立した物体の例

ようになりました。しかし、どんな物体でも思いのままになるかというところとも限らず、物体により見え方が変化しやすいものと変化しにくいものがあります。例えば白い物体であれば投影光の変化により物体の見かけが変化しますが、まったく光を反射しない黒い物体はどんな光を当てても黒いままです。それでは、白い物体よりもさらに見え方が変わりやすい物体はあるでしょうか。さらにいうと、物体側の設計を変えることにより、思いのままに見え方が変わる物体が作れると、広告や娯楽など様々な用途への展開が可能になります。そこでここでは 3D プリンタを用い、照明条件の変化により希望する見た目に変化する物体の設計について紹介します。

1 つ目は、層の厚みにより物体の反射率と透過率を独立に変化させる手法です。図 8 のように、表側に乳白色の素材、裏側に黒色の素材を配置して張り合わせた物体を作成します。乳白色素材の厚みが薄いと裏側の黒色が透けることで黒っぽくなります。また裏側の黒色素材が薄いほど透けやすくなり透過率が上昇します。そのため反射率は乳白色素材の厚み、透過率は黒色素材の厚みで制御できるのですが、実際には乳白色素材の厚みによっても光は減衰しますし、黒色素材が薄いと透けても黒っぽくなりません。このような相互干渉効果を計測結果から補償することで、任意の反射率と透過率を与える各層の厚みを求めることができます。

図 9 に生成した物体の例を示します。左は反射率画像で、表から証明すると自転車の像が観察されます。右は透過率画像で、裏側から照明すると透過率画像が表示されます。用途として、地下街の広告が非常時には避難誘導案内に変化する、などといったものも考えられます。

もう 1 つは、同じ透過像でも光源の位置（光の入射角）により見え方の変わる物体の生成です。図 10 のように、透明な物体内に黒色の粒子を配置します。ちょうどブラインドの羽根の角度を変えることで部屋に入る光の強さが変えられるように、この黒色粒子の形状により 2 つの光源からの透過率をそれぞれ調整します。



図 10：光源の位置により透過率が変わる原理

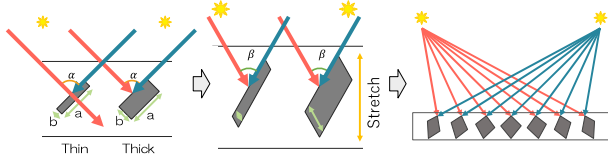


図 11：形状の変形による光学的特性の改善

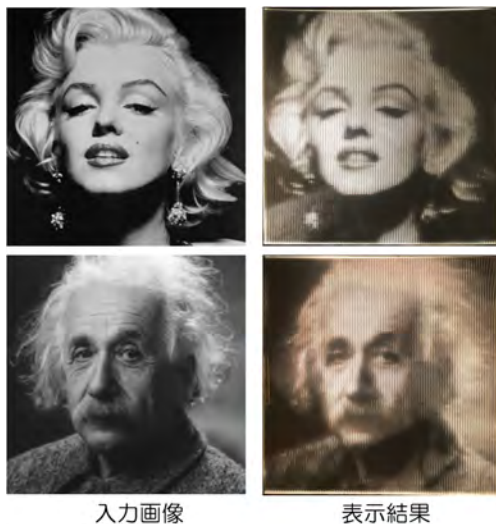


図 12：表示画像例

単純にこの原理のままで物体を生成すると、実際にはかなり使い勝手の悪い物体が生成されます。1 つには、光源の角度（図 11 の角 α ）が開きすぎていて照明を配置しづらいことです。また一方の光源からの光の透過率を向上させるために粒子を薄くすると、粒子が光が透過しやすくなり、他方の光源からの光の透過率も上昇してしまうという問題が生じます。そこで図 11 のように物体を厚み方向に引き伸ばすことで、解像度を損なうことなく粒子の厚みを増加させ、かつ光源間の角度も小さくすることができます。さらに、図 11 右のようにホモグラフィ変換（透視変換）を施すことにより、平行光を前提として設計した構造を点光源に対応するように変形することができます。

これらの処理を経て生成した画像の例を図 12 に示します。物体の背後に設置した光源の位置を変えることで、マリリン・モンローとアインシュタインの顔がそれぞれ表示されることを確認しました。さらに「変幻灯」の手法を組み合わせ、カラー画像を印刷した紙の裏側に、表情変化をつけるための物体を配置することで、光源位置により表情の変わるカラー画像を表示することも確認しました。

○今後の展望

本研究課題では、多自由度照明と D-Fab 装置を用いた質感呈示技術について研究をすすめ、実世界の質感をこれまで以上の正確さで再現できるようになり、また、実世界には存在しないような見えをもつ物体の創成も可能となりました。今後は、こういった技術をより多くの人に使っていただけるよう、簡易開発ツールの作成にも取り組んでいきたいと考えています。

○関連する研究発表

論文

1. Asayama H, Iwai D, Sato K: Fabricating diminishable visual markers for geometric registration in projection mapping. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 24(2):1091-1102, 2018.
2. Tone D, Iwai D, Hiura S, Sato K: FibAR: Embedding optical fibers in 3D printed objects for active markers in dynamic projection mapping. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics (印刷中).
3. Hamasaki T, Itoh Y, Hiroi Y, Iwai D, Sugimoto M: HySAR: Hybrid material rendering by an optical see-through head-mounted display with spatial augmented reality projection. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 24(4):1457-1466, 2018.
4. Punpongsanon P, Iwai D, Sato K: FleXeen: Visually manipulating perceived fabric bending stiffness in spatial augmented reality. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 26(2):1433-1439, 2020.

学会発表など

1. Hiratani K, Iwai D, Punpongsanon P, Sato K: Shadowless Projector: Suppressing shadows in projection mapping with micro mirror array plate, IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, 1309-1310, 2019.
2. Kaminokado T, Iwai D, Sato K: Augmented environment mapping for appearance editing of glossy surfaces, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Beijing, China, 65-75, 2019.
3. Takezawa T, Iwai D, Sato K, Hara T, Takeda Y, Murase K: Material surface reproduction and perceptual deformation with projection mapping for car interior design, IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, Osaka, Japan, 251-258, 2019.
4. Hiura S, Hatadani A, Kitamura H, Kawamoto Y, Miyazaki D, Baba M, Furukawa R: Design of Appearance Changing Objects using Multi-Material 3D Printers, International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication, 2 pages, 2018.

社会の多様な質感情報を分析・制御・管理する技術

研究代表者 岡嶋 克典(横浜国立大学大学院環境情報研究院・教授)

研究分担者 堀内 隆彦(千葉大学 大学院工学研究院・教授)

研究分担者 富永 昌二(長野大学企業情報学部・客員研究員)



入力画像(古く汚れた車) → 新化変換処理後の画像



入力画像 → 質感強調画像

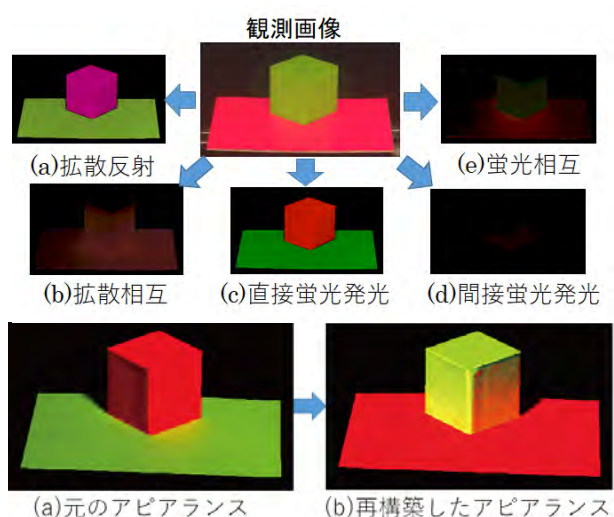


図 上段：新化変換処理の前と後の画像の例
中段：画像質感強調アルゴリズム PuRet の適用例
下段：相互照明を含む蛍光物体の5つの成分から
蛍光物体を異なる照明環境での見えを再構築

○研究の背景と目的

物理的な感覚入力情報が質感判断に変換されるまでのプロセスを脳科学的・情報科学的に理解した上で、ヒトの感性判断のデータを基に、刺激の物理的なパラメータから直接、質感を定量的に制御できる「質感工学」の確立が産業界から求められています。

そこで当班では、質感の科学的な理解に基づき、ものづくりの現場で使える質感マネジメントの学問的な体系である「質感工学」を構築することを目的として様々な研究を進めてきました。本新学術領域から生み出される最先端の質感科学のノウハウを、実社会の様々な問題に適用して磨き上げることで、一般性のある質感知の体系を確立し、多様な質感情報を多角的かつ系統的に分析してモデル化・定式化し、波長次元のレベルから質感を任意に制御・管理するための総合的工学体系の確立を目指してきました。これまでの成果について、対象が多様であるため網羅的かつそれぞれ簡単にではありますが、以下に説明します。

○研究成果

光沢感が画像統計量と関連していることはわかっていますが、画像中から光沢を抽出することは困難で、照明や3次元形状等を考慮した複雑な計算が必須と考えられてきました。しかし、私たちは光沢を一瞬にして知覚でき、その際に照明方向等を意識はしていないことから、視覚系の低次メカニズムで処理していると考え、視覚系の多重スケール ON 中心型受容野の応答から光沢を自動的に検出するモデルを提案しました。このモデルは、照明や3次元形状の処理は行わず、2次元の画像情報を機械的に処理するものですが、精度よく画像中の光沢を検出することがわかりました。またこれを用いて画像中の光沢を任意に増大・減衰または除去できるシステムを開発しました。これは画像の光沢以外を変えずに画像の光沢感を制御できるため、画像の質感処理手法の1つとして様々な応用が期待されています。例えば、深層学習マシンで画像から物体認識を行う際、光沢やグレアを前処理で除去させると認識率が向上することも示しました。これと似たことを私たちの視覚系も行っている可能性があり、様々なノイズがあっても高度な物体認識が可能な理由の1つであることを示唆しています。また周辺視において光沢感評価実験を実施し、網膜位置の違いによる光沢感の

変化も本モデルで説明できることも示しました。また多重スケール OFF 中心型受容野の応答から陰影を自動検出できること、ON/OFF フィルタを組み合わせることで透明感等も含む様々な質感制御が可能であることを示しました。さらに、これらフィルタ出力を組み合わせることで、画像の「光沢感」を予測できることも示しました。また「光沢感」の尺度が定量化されていないことから、「光沢原器」の必要性を提唱し、金を使った原器を試作しました。光沢感が光度(cd)のように単位を有した値として定量化できれば、光沢感に関する研究成果を統一的に解析・解釈できるだけでなく、光沢感メーターを開発することで光沢感を誰もが測定できるようになり、産業界での質感の取り扱いが盛んになると期待されます。

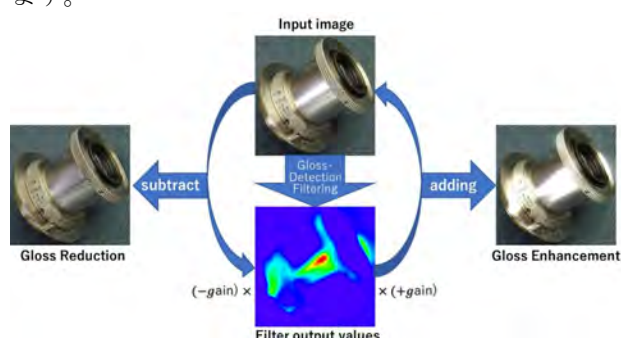


図 A 光沢の検出・増幅処理・減衰処理の例

ヒトの肌知覚に関して、肌の透明感が平均的な測色値だけでなく、色分布にも依存することを示すとともに、プロジェクタ・カメラシステムを用いて顔の肌の表面反射光成分と内部散乱光成分を分離して測定し、それらの成分比を変えた画像を用いて透明感等の肌知覚に両光成分が複雑に関与していることを示すとともに、個人ごとに透明感等の肌質感判定の際の手がかりの重みが異なることを明らかにしました。

また、人工物の退色過程を測定・分析し、人工物の古さ感と画像のエントロピーや色差量と関連性があることを示すとともに、古さ感を定式化することで、画像における人工物の古さ感の定量的制御を可能にし、その技術を応用して京町家の適切な古さ感の度合いを明らかにしました。また、経年変化の逆過程である「新化」を実現するために必要不可欠なノイズ除去処理が機械学習を用いて実現できることを示すとともに、ノイズ除去処理を複数回繰り返すことでノイズ除去効果を高めることができること、ノイズ除去後に逆退色変化を施し、上記の光沢制御法を用いて光沢を増強することで、画像内の物体を任意に新化させることができることを示しました(図の上段)。これらの技術を用いることで、画像内の物体の未来方向(劣化)だけでなく、過去に遡って元に戻す(新化)等、経年変化を自由に制御できるため、デザインや物体認識のための画像の質感処理手法の1つとして応用できます。

また、比較的最近発見された内因性光感受性網膜神経節細胞(ipRGC)が、明るさ知覚に大きく寄与しており、錐体応答がそれに加算されていることを明らかにしました(論文1)。これは視覚的質感においても、XYZ等の測色値だけでなく、ipRGCの効果も考慮しなければならないことを示唆しています。またipRGCの明るさへの寄与率の個人差を解析した結果、かなりのばらつきがあることがわかりました。このことは、光沢等の視覚的質感においてもipRGCが寄与していれば、質感の個人差の原因が部分的にipRGCの寄与率で説明できる可能性を示唆しています。また発光型デバイスと印刷物は測色値を同じにしても色の見えが異なるという「モードの問題」に対して、分光分布を同じに(isomeric color match)すれば、デバイス間の色の違いは生じないことを実験的に示すとともに、ipRGCと杆体の応答までを含めた条件等色(metameric color match)を行えばデバイス間の色の見えは合わせられることも示しました。このことは、中心視においてもipRGCが色知覚に影響することを示唆しているとともに、本質的にデバイスの違いによるモードの違いの問題は存在せず、分光分布の違いが異デバイス間の色合わせに影響していることを示唆しています。

食品の色や質感のリアルタイム変換を可能にするHMD型拡張現実感システムを用いてコーヒーや緑茶の味覚や風味等を視覚情報だけで変調させるクロスモーダル実験を実施し、様々な食品や飲料において視覚が味覚等に与える影響を定量化するとともに、飲料の湯気や粘度も味覚に影響することも明らかにしました。このようなARシステムを用いることで、社会的な課題となっている「減塩」も可能であることを示しました。また画像中に様々な食品(例えば寿司の盛り合わせ)がある際、それぞれの食品を自動的に認識し、対象となる食品(例えば鮪赤身)のみに必要な視覚的変調を行えることが可能な深層学習マシンを組み込んだAI-AR食品仮装システムを開発しました。

HMDの代わりにタブレットやスマートフォンを用いたARシステムを提案し、タブレット/スマートフォンとカメラの測色値と不均一性を瞬時にキャリブレーション可能な電子色票を作成しました。他にも、HMDを用いないプロジェクションマッピングを用いた食品用の拡張現実感システムも開発し、視覚的質感を制御することで、食品の味を変調できることを示しました。その際、特定の非対角反射率行列を用いることで、プロジェクションマッピング時(プロジェクタ・カメラ系)における照射物体色のオンライン推定精度を向上できることを示すとともに、プロジェクションマッピングにおける質感のモード問題(目標の質感が対象物上に正しく再現できない問題)についても実験的に検討し、物体色に見せるにはエッジ強調等の画像処理が有効であることを明らかにしました。

また、2台のロボットアームを制御することで照明とカメラ位置（視点）が質感に与える影響を全自動で測定可能なシステムを開発し、多視点質感画像生成用のプログラムを作成しました。これは絵画や3次元芸術品の計測に加え、加飾印刷の解析等に有効であるため、今後の幅広い応用展開が期待されています。

また山口班（公募研究）と鮮度の知覚実験を乳幼児で行い、鮮度知覚の発達過程についても検討する（論文2）とともに、伊村班（公募研究）と共同で、チンパンジーもヒトと同様な鮮度知覚ができることを実験的に示しました。

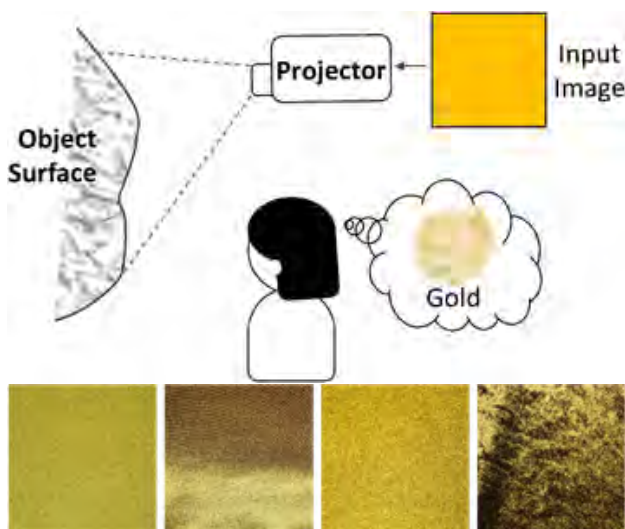
計画研究の目的の一つとして、様々な異なる特性を有するディスプレイなどのデバイスにおいて正しく質感を管理するための「質感マネジメント」技術の構築を掲げていました。そのための基礎研究も継続して実施しました。実物体と物理的に明るさ、色、サイズを揃えてディスプレイに再現した画像との間では、質感が変化し得ることを実験的に示しました。当時の研究は、標準の白色光下で両眼観察において実施していました。実世界の様々な環境下で調査するために、リビングの間接照明などに近いA光源下の環境における実験に拡張し、さらに片眼の観察を追加することによって、実物体と再現画像との質感変化の解析を進めました。その結果、A光源下では、実物の観察において光沢感が強く知覚されることを発見し、順応メカニズムとの関連性が示唆されました。それらの研究結果を踏まえて、再現画像でも実物と同じ質感知覚を与えることを目的として、画像の質感制御アルゴリズムの研究に取り組みました。

心理生理学実験によって、質感に着目した際に瞳孔が散瞳することを発見し、この現象をモデル化することによって、画像の質感強調アルゴリズムPuRetを提案しました。さらに、ディスプレイの特性に応じて、それぞれのディスプレイで正しい質感となるようにPuRetアルゴリズムを制御するパラメータの自動決定法を考案しました（図の中段）。また、企業との共同研究によって、商用の様々な計測器を用いて、光沢感、透明感、凹凸感に関して、物理量と知覚量の関係を解析し、実数乗算を用いてモデル化することに成功しました。様々な材質間の質感調和の心理物理実験も行いました。

色彩には調和する色の組み合わせと調和しない色の組み合わせがあることが知られており、古くから調和理論の研究が進められてきました。私たちは質感にも調和があることを経験しており、系統的に実験によって調べました。当初の研究では、静止状態、回転状態、再現画像のそれぞれに対して評価を行い、材質を越えて調和があることを示しました。その後、質感調和に影響する物理特徴との関係性の解析を進め、静止物体の調和には異方性ヒストグラムが、動的物体の調和にはBRDFが調和度合いを記述するのに有用であることを見出しました。この成果をまと

めた論文は、日本色彩学会論文賞を受賞しました。

光沢を有する金属色は頻繁に目にする質感であり、興味深い研究対象です。金属物体を対象として、様々な研究に取り組みました。先述の質感マネジメントに関連して、色物体に関して、実物とディスプレイ画像から得られる「金色感」および「金らしさ」について評価し、それらの質感が等価となるために制御すべき画像特徴量の解析を行いました。その結果、金の質感と輝度偏差特徴との相関が高いことを見出しました。また、単色光のプロジェクションによる金属再現システム（図B）を構築し、各金属色の知覚条件を心理物理実験により決定しました。その結果、金色と銀色の知覚と比較して、銅色を知覚するための物理的性質（輝度、テクスチャ、光沢等）が大きく異なっていることが明らかになりました。金属は色に加えて光沢を有するため、記憶による光沢感の変化を調査しました。金属実物体を対象とした短期と長期のメモリマッチング実験を通じて、記憶によって彩度に加えて光沢のコントラストが強調されることが明らかとなりました。人間は、金属を見たときに瞬時にその材質を知覚することができます。その瞬時知覚には物体上の色分布の情報が寄与するという仮説を立てて、銅を対象とした知覚実験を行いました。その結果、物体の色域は金属色知覚において重要であることがわかりました。また、シーンに依存して100 ms～300 msで識別ができ、提示時間が短くなればなるほど識別が困難となりますが、識別可能な色域の境界は安定していることがわかりました。ただし、複雑な映り込みのあるシーンでは、さらに高次の判断を行うためか、提示時間が長ずいても識別が不安定になることが確認されました。企業との共同研究も実施し、基礎研究の社会実装にも取り組みました。論文や特許などで公表されている範囲では、印刷における質感表現、星像の質感再現、皮革の質感知覚、照明による感情制御を行いました。



図B 単色光プロジェクションによる金属再現システムと紙・布を用いた金物体再現例

蛍光物体の反射と発光特性は2次元 Donaldson 行列にまとめられますが、モノクロメータを含む高価な設備と長時間計測が必要とされました。我々はスペクトルカメラによる簡便なイメージング系を構築し、効率的にこの2次元行列を推定する方法を開発しました。計測系とアルゴリズムは簡単で高速です。次に、蛍光物体の相互照明現象を解析しました。複数の蛍光物体が接近するとき、相互照明が物体表面で観測され、物体の見えに影響を及ぼします。相互照明の影響をもつ蛍光物体について分光解析法を開発し、その見えは5つの分光画像成分で記述できることを明らかにしました(図の下段)。相互照明効果を含む蛍光物体の観測画像は、(a)拡散反射成分、(b)拡散相互反射成分、(c)直接的蛍光発光成分、(d)間接的蛍光発光成分、(e)蛍光発光による相互反射成分、の5つの成分画像に分解できます。ドナルドソン行列がわかれば、物体の見えを反射と発光成分に分離したり、複数の物体の識別が容易になったりします。この行列は照明光に依存せず、反射・励起・発光を表すその物体に固有の物理情報ですから、任意の光源下におけるその蛍光物体の見えを再構築することが可能になりました。我々はまた複数の蛍光物体間で相互照明効果が存在しても、物体表面の分光情報と幾何情報を分離するアルゴリズムの開発に成功しました。これにより物体形状と視点が同じならば、蛍光材料を変えても任意の光源下で見えを再構築することができます。さらに光源の位置を変えて蛍光物体を複数観測して面法線という幾何情報を推定すれば、任意の照明方向での見えも再現できることを可能にしました。蛍光物体の見え再構築は現在直方体のような平面物体を対象としてきましたが、曲面を含む自由形状物体への拡張も可能です。

また、デジタルカメラを用いてイメージベースの反射計測法を開発し、ゴニオメータによる結果と比較して評価しました。対象物体はシート状のフレキシブルな材料です。通常の一眼レフカメラを用いてワンショットで広範なBRDFを簡便に推定する手法で、カメラの分光感度がわかれば物体の分光反射特性も得られます。イメージベースBRDF計測は異方性反射物体への拡張も可能です。フレキシブルな紙、塗膜、プラスチック、金属等を対象で、研究結果は包装、塗料、繊維、プラスチックといった産業に有用できます。

ところで金属やプラスチック製品の表面は強い光沢や鏡面反射が含まれ、通常の反射計測法では計測時間やダイナミックレンジが問題となります。この問題を解決するために、金属やプラスチック製品の表面は強い光沢や鏡面反射が含まれ、通常の反射計測法ではダイナミックレンジと精度が問題となります。

また、産業界に存在する光沢計で、正反射プロファイル測定ができるものに着目し、これで鏡面反射ピークの反射特性を推測しました。このデータに基

づいて鏡面反射特性をモデル化し、拡散分光反射の推定も加味して、簡便に見えを再現する手法を開発しました。高光沢の不均質誘電体(例えばプラスチック)と強い鏡面を有する金属物体(例えば銅)に有効であることがわかりました(図C)。



図C 見えの再現結果例(左:銅, 右:プラスチック)

○今後の展望

当班では、以上のように社会における多様な質感情報の解析・制御・管理を取り扱ってきました。時間的な制約から、サンプル数が限られているため、モデルや提案式の一般化ならびに標準化のためには、今後も多くの対象を用いて検証実験を行なっていく必要があります。しかしながら、基礎となる知見は数多く得られましたので、今後は本領域の成果を基に質感工学の体系化を加速させ、産業界への応用を進めていく予定です。また今回取り扱わなかった対象についても、これまでの成果を外挿させることで、迅速な定量化・定式化を進め、質感の定量化とともに、デザイン応用についても検討していきます。

○関連する研究発表

論文

1. Yamakawa M, Tsujimura S, Okajima K: A quantitative analysis of the contribution of melanopsin to brightness perception, Scientific Reports, 9, Article number: 7568, 2019.
2. Yang J, Okajima K, Kanazawa S, Yamaguchi MK: "Infant can visually differentiate the fresh and degraded foods: evidence from fresh cabbage preference," Frontiers in Psychology, 10, Article 1553, 2019.
3. Tominaga S, Hirai K, Horiuchi T: Spectral reconstruction of fluorescent objects with mutual illumination effects. JOSA-A 36(9), 1512-1522, 2019.
4. Tanaka M, Arai R, Horiuchi T: Parameter estimation of PuRet algorithm for managing appearance of material objects on display devices, Journal of Imaging Science and Technology 63(6): 60404-1-7, 2019.
5. Tominaga S, Guarnera C: Measuring, modeling, and reproducing material appearance from specular profile, CIC 27, 279-283, 2019.

公募研究

- 前期 -



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

研究代表者 栗木 一郎（東北大学電気通信研究所・准教授）



○研究の背景と目的

画像中のどのような要素が光沢感・透明感を与えるか、という研究は多くなされています。しかし、木目や布目から得られる材質感も重要な質感であるにもかかわらず、これらがどのような画像の特徴に基づいて得られるかはあまり研究されていません。

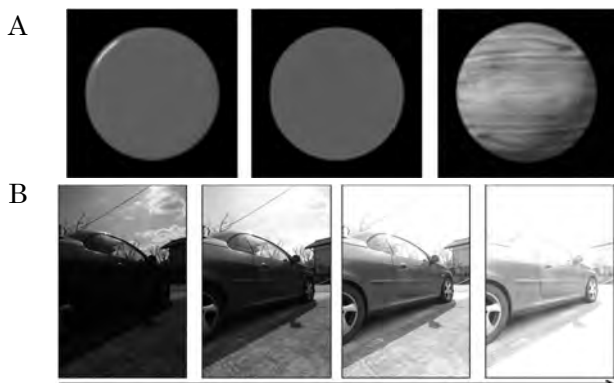


図 1. A. 光沢，無光沢の平面，木目の質感. B. カメラの露出時間を多段階に変えて撮影した画像. 左の写真（短い露出時間）では，雲がきちんと写る反面，車の陰は黒く潰れます．右の写真（長い露出時間）では，空は白飛びしますが，車の陰は明瞭に見えます．人間の視覚は両方を同時に見ることができます．

光沢が高い輝度の手がかかりであるのに対し，木目や布地の織り目は低い輝度の手がかかりです（図 1A）．本研究では，多数の布地，石，木材，皮革の画像を用い，質感を得るのに必要な画像の特徴を明らかにしました．例えば，画像を圧縮しても質感を正しく伝えるには，どのような画像特徴を保持する必要があるかを明らかにし，質感情報の伝達に必要な技術の基礎的知見を確立する事を目的としています．

また，現実の視野における最大/最小の輝度比（「輝度ダイナミックレンジ」と呼びます）は 100 万倍にもなります．しかし普通のコンピュータやテレビの画面の輝度ダイナミックレンジは 1000 倍程度のため，図 1B のように陰影の部分と直射光の部分が同時に表示できません．質感印象を正しく与えるには，光沢も陰影も適切に表示できる輝度比の画像表示システムが必要です．その表示技術も開発しました．

○研究成果

(1) 質感情報と輝度帯域・空間サイクル数の関係

我々は，木・石・布・革の質感に必要な輝度情報を知るため「輝度分布をどのように改変すると質感の印象を損なうか」を調べる方法を取りました．具体的には，画像のもつ輝度のヒストグラムのうち，

平均輝度より高い方または低い方の輝度コントラストを 1/5 に狭めた画像を作成し（図 2），元の画像と質感印象が近いと感じられる画像を観察者（10 名×2 回）に選んでもらう心理物理実験を行いました．

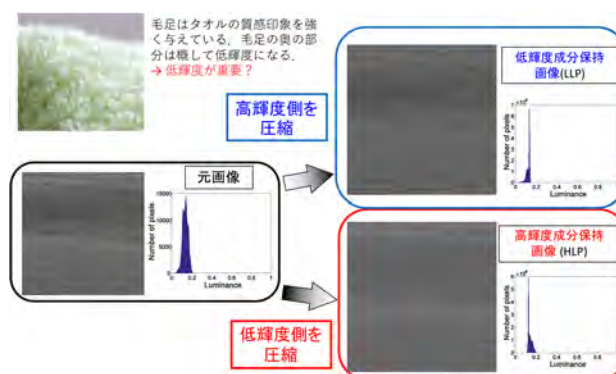


図 2. 生地、織り目や木目など「低い輝度成分を残した方が質感も保持できるか」という仮説を検証するため，様々な素材の画像の輝度成分を加工し，質感の印象を調べる実験を行いました．

図 3 は実験結果を示しています．棒グラフが 0.5 より上になれば，より高い輝度が質感判断に必要とされ，0.5 より下であれば，より低い輝度が質感判断に重要であることを意味します．その結果，質感の認識に必要とされる輝度が高い輝度か低い輝度かは材質によって異なるという結果を示しています．

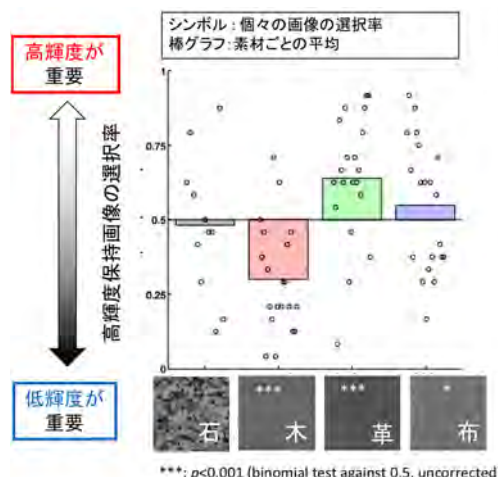


図 3. 様々な材質で図 2 の操作をした際に，高輝度を保持した画像が選ばれた比率．

一方，木目や布目などの情報は空間的に細かな情報，表面全体の凹凸感を与えるのに必要な輝度の変化は空間的に粗い情報として画像内に存在するはずで．そこで，先ほどの実験で被験者が下した判断

が、どの画像の細かさ（空間解像度；空間サイクル数）で、どの画像統計量（コントラストと歪度）に依存するかを、画像解析により調べました。

図4が解析の結果です。青線は横軸の空間周波数（画像の細かさ）における要素の歪度、赤線はコントラストとの関係を示しています。より細かい要素で、より高い輝度が質感判断に重要とされる場合、グラフは右上がりになります。この結果から、物体の材質によって低輝度／高輝度の成分に依存する割合が異なることに加え、質感評価の際に重視している画像統計量が異なることも明らかになりました。

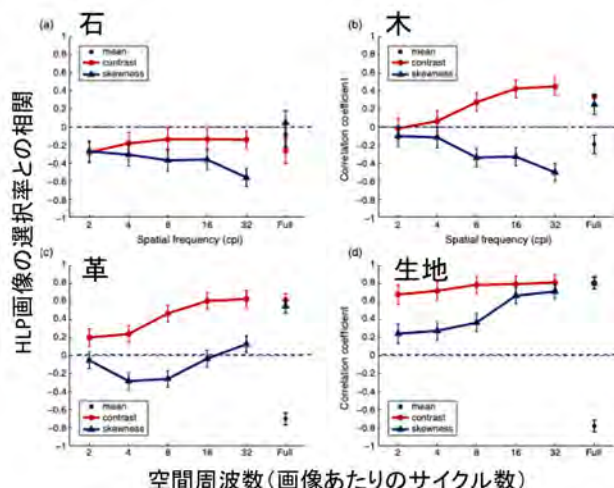


図4. 画像の中で高い輝度が必要とされる比率と、画像の中の細かさの関係。

(2) 広輝度レンジモニタにおける高精細階調表示技術の確立

従来のモニタで表示するのと同じ画像（RGB 各256階調）を有機ELモニタなど100万倍の最大輝度比を表示できるディスプレイに表示すると、輝度の段差が見えてしまいます。我々は、広輝度レンジの表示装置でも画像を正しく表示する為に必要な、無限階調の表示技術を確認しました。すでに報告されている nosy bit method (NBM)を実装したものです。図6の右は256階調で表示した画像で、グラデーション部分に多数のエッジが見えています。左側は同じ画像を我々の方法で滑らかな表示に加工した画像です。



図5. 広ダイナミックレンジ表示の例

図6はRGBの各原色の色を、通常のデジタル値(256段階)の1/10の刻みで我々の技術によって変化させ

た時の輝度値（“NBM-on”のシンボル）です。測定器の誤差が大きいですが、平均値（シンボル）を比較すると従来法では段差があるのに対し、我々の方法では滑らかに変化させることができました。

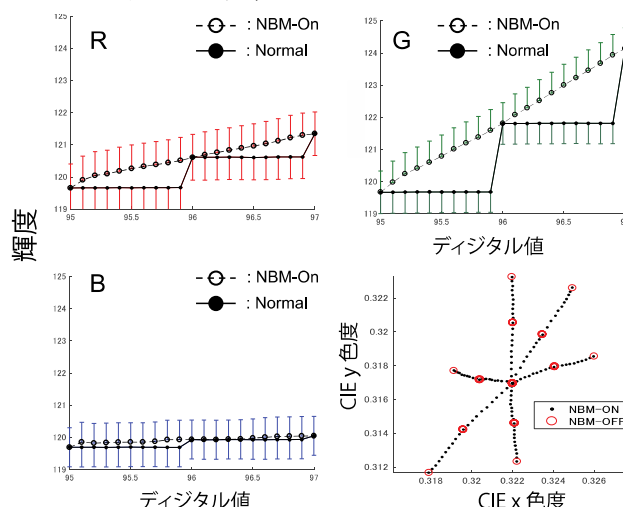


図6. 輝度階調を滑らかに表示する技術。RGB各原色の輝度値と白色付近の色度の変化（右下）。

○今後の展望

本研究では、質感情報表示に重要なのは広い輝度の中のどの輝度帯域かを明らかにする実験を試みましたが、人間の視覚系の感度も輝度帯域によって変化している可能性があります。広い輝度ダイナミックレンジで表示が可能なディスプレイが普及するにつれて、この2つの相関関係が画像の質感表示に強く影響すると考えられます。

人間の視覚は、通常のカメラやディスプレイよりも広いダイナミックレンジの情報を適確に取得することができます（図2）。この性能をカメラやセンサーでも実現するには、明暗に対する人間の視覚感度の調整機構を明らかにする必要があります。

今回の研究では質感情報の表示に必要な輝度帯域と人間の視覚の感度との関係を調べることで、人間の視覚の明暗に関する感度調節が、質感の知覚とどのように関係しているかを明らかにできるのではないかと考えています。

○関連する研究発表

論文

1. Nagai T., Hosaka Y., Sato T., Kuriki. I. (2018) Relative contributions of low- and high-luminance components to material perception. *Journal of Vision*, 18(13), 6, 1-19. doi:10.1167/18.13.6

学会発表

1. Hosaka Y, Nagai T, Sato T, Kuriki I: Impacts of lower- and higher- luminance components on the material perception. *Optical Society of America Fall Vision Meeting (OSA FVM) 2017*. Washington, D.C., U.S.A., 2017/10/13-15.
2. 佐藤智治, 永井岳大, 栗木一郎: 確率的誤差補償法による高ダイナミックレンジ画像表示システムの開発. 映像情報メディア学会HI研究会, 2017/11/24-25.

フラッシュラグ効果を用いた質感処理過程の同定

研究代表者 塩入 諭（東北大学電気通信研究所・教授）

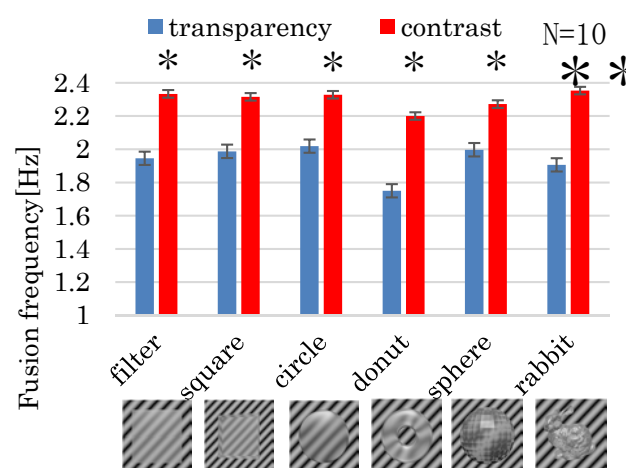


図1 透明感の判断と明暗コントラスト判断に対する融合周波数の比較。

○研究の背景と目的

人間は多様な質感の知覚を通して、物体の表面や内部構造など多様な情報を得ています。しかし、質感とは何か、どのような知覚／認識を質感に含めるかについては共通の認識はありません。質感が主観的には明暗などの初期視覚特徴と異なる知覚といえるでしょうが、それを明確に示す客観的な根拠は十分とは言えません。質感処理が初期視覚処理の結果に基づくとして、初期視覚処理と質感処理を分離することは質感の脳処理を考える上で本質的な問題です。本研究では、初期視覚特徴と質感関連特徴を分離する方法として、フラッシュラグ効果を利用した手法と、融合周波数計測を利用した手法の開発を目的とします。

○これまでに得られた成果

被験者に質感が連続的に変化する動画を見せ、途中で赤枠を短時間呈示すると、赤枠と同時に見えた画像は、実際より時間的に進んだタイミングで呈示された画像が知覚されます。その原因として、フラッシュした赤枠に対する処理時間と画像の処理時間に違いがあるからと考えることができます。この考えでは、フラッシュ刺激の処理が遅れ手いることになるので、この現象はフラッシュラグ効果と呼ばれます。フラッシュラグ効果を測定することで、処理時間の違いがわかるのであれば、光沢に注目した場合と明るさに注目した場合では、フラッシュラグ効果が異なる可能性があります。その違いから、両者の処理における時間特性の違いを知ることがで

き、脳内での処理の順序などについても検討することができるようになります。

実験結果は、予想通りに、光沢と明るさでは、異なる効果量を示しました。時間変化する画像を利用することで、同じ画像に対する異なる知覚、光沢と明るさ（一般的には質感処理と提示視覚処理）を別々に調べることができることを意味します。この事実に基づき、次の実験として時間周波数特性の比較を行いました。

図1に示す刺激を用い、同一刺激に対する透明感評価と明暗コントラスト評価を行い、時間特性を比較しました。刺激画像はレンダリングソフト、Blenderを用いてオブジェクトの透明度を表現するパラメータ「アルファ値」を0.9(不透明)から0(透明)までの間を120段階で変えて作成しました。不透明と透明の間を周期的に変化し、その周波数を高くしていき変化が知覚されない周波数を臨界融合周波数として計測しました。透明感評価では透明感の時間的知覚できなくなる周波数を、明暗コントラスト評価では明暗コントラストの変化が知覚できなくなる周波数を求めました。

図1の棒グラフは、各オブジェクト刺激に対する、被験者10名分の、透明感と明暗コントラストの融合時間周波数の比較です。評価条件(透明感/明暗コントラスト)とオブジェクト刺激(6種類)に対して、2要因分散分析を行った結果、評価条件の間には統計的に有意な差があり($p < 0.01$)、異なるオブジェクト刺激の間には有意な差はありませんでした($p = 0.95$)。また交互作用も見られませんでした($p = 0.90$)。透明感の方がより低い周波数(より長い呈示時間)で変化が知覚できなくなっていることから、透明感処理には明暗コントラスト処理よりも長い時間がかかるといえます。

透明感処理と明暗コントラスト処理に関わる時間特性の違いを取り出すことができました。形状の違いに関わらず透明感と明暗コントラストの間に差が生じ、どの条件においても透明感の方が低い周波数で変化を知覚できなくなっている結果が得られました。この結果は、透明感の方が明暗コントラストよりも高次の特徴であるとの考えと一致し、その処理過程の時間特性の違いも推定できたことになります。

図2は、同様の実験を光沢感と明るさに関して評価し、比較したものです。図2の刺激は、光が半透明な物体の表面を透過し、散乱を繰り返した後に表面から出る表面下散乱現象(Subsurface-scattering)を表現するパラメータである変数の値

を 0.01 から 1 まで等間隔で変えることで半透明感を制御しました。この変数は、オブジェクトに入射する光の散乱半径のグローバルスケール係数を表し、オブジェクトへの光の浸透の程度を表します。この値が大きくなるほどオブジェクトの深くまで光が浸透する、つまりは半透明感が高くなる。

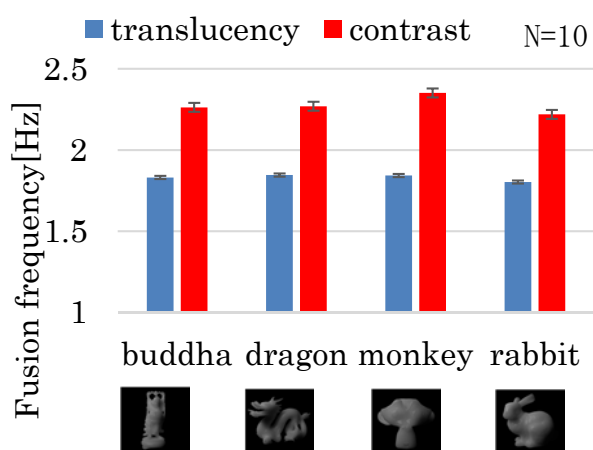


図2 半透明感の判断と明暗コントラスト判断に対する融合周波数の比較。

図2の棒グラフは、各オブジェクト刺激に対する、被験者10名分の、半透明感と明暗コントラストの融合時間周波数の比較です。評価条件(半透明感/明暗コントラスト)とオブジェクト刺激(4種類)に対して、2要因分散分析を行った結果、評価条件の間には統計的有意な差があり ($p < 0.01$)、異なるオブジェクト刺激の間には有意な差はありませんでした ($p = 0.51$)。また交互作用も見られませんでした ($p = 0.83$)。半透明感の方がより低い周波数(より長い呈示時間)で変化が知覚できなくなっていることから、半透明感処理には明るさよりも長い時間がかかるといえます。

透明感と同様に半透明感と明暗コントラストの間にも処理時間の差が存在することが分かり、ここでも質感の方が初期視覚特徴よりも処理に長い時間がかかるという結果が得られました。透明感刺激におけるコントラストは、背景刺激として知覚される部分に対する評価であるのに対して、半透明刺激のコントラストは半透明感を評価する物体そのものの属性であることは、コントラストの評価が物体認識に先立つ初期視覚特徴の知覚を反映することと一致する。透明感、半透明感いずれも、みかけの明暗変化(コントラスト)よりも時間のかかる処理であることを支持する結果と言える。

また光沢感と明るさ感の間にも同様の臨界融合周波数の違いを見出したことから、質感と明るさや明

暗コントラストなど低次処理に関わる時間特性に違いがあることを明らかにしました。これらの結果は、質感処理は低次の視覚処理よりも、時間がかかる高次な処理過程であると言えると考えます。

○関連する研究発表

論文

1. Shioiri S, Honjyo H, Kashiwase Y, Matsumiya K, Kuriki I, Visual attention spreads broadly but selects information locally. *Scientific reports* 6, 35513 (2016)
2. Shioiri, S., Kobayashi, M., Matsumiya, K. & Kuriki, I. Spatial representations of the viewer's surroundings. *Scientific reports* 8, 7171, doi:10.1038/s41598-018-25433-5 (2018).
3. Shioiri, S., Hashimoto, K., Matsumiya, K., Kuriki, I. & He, S. Extracting the orientation of rotating objects without object identification: Object orientation induction. *J Vis* 18, 17, doi:10.1167/18.9.17 (2018).

学会発表など

1. Shioiri S, Ishi K, Matsumiya K, Kuriki I, Measuring the spotlight of moving attention, Asia-Pacific Conference on Vision 2016, Fremantle, Australia, July 14-17, 2016
2. Shioiri S, Spread of visual attention and attentional selection, National Taiwan University Psychology Seminar, April 27, 2016
3. Shioiri S, Honjyo H, Kashiwase Y, Miura T, Matsumiya K, Kuriki I Dynamic change of spatial attention measured by event related steady state visual evoked potential, European Conference on Visual Perception, Berlin, Germany, August 27-31, 2017
4. Tseng, CH, Flash-lag Effect and Material, Invited talk at Division of Biology & Biological Engineering; Computation & Neural Systems Perception, California Institute of Technology, March 23, 2017
5. Tseng, CH. Attentional Selection on Material Property, Invited talk at Viterbi School of Engineering, Computer Science Department, University of Southern California, CA, US, March 25, 2017
6. 高倉健太郎, 後藤直人, Chia-huei Tseng, 松宮一道, 栗木一郎, フラッシュラグ効果を用いた質感知覚の時間特性に関する検討, 日本視覚学会 2017 夏季大会, 松江, 9月6日-7日 (2017)
7. 高倉健太郎, 曾加蕙, 栗木一郎, 塩入諭, The difference of temporal characteristic between for material perception and for perception of basic visual features, 電子情報通信学会技術研究報告=IEICE technical report: 信学技報 118 (381), 21-23 (2018)

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～

研究代表者 野々村 美宗（山形大学大学院理工学研究科・教授）



ヒトはモノに触れると、「なめらか感」「しっとり感」などの触質感を感じます。われわれは、皮膚の表面で起こる摩擦現象の非線形性によって喚起される多彩な摩擦パターンが、繊細な触質感が発現する一つの原因であるという仮説を考え、『非線形触質感喚起モデル』となづけました。本研究では、触質感と摩擦現象の関係を明らかにし、この仮説を検証しました。具体的には、触運動を真似て常に加速度が加わった正弦運動によって摩擦を行い、皮膚のように柔らかく凸凹構造の刻まれた接触子が装着された触質感センシングシステムを開発して、非線形摩擦現象をモデリングしました(図 1)。本研究で触質感が喚起されるメカニズムを説明する物理モデルを構築することで、質感認識機構が明らかになるだけでなく、触覚工学の社会実装が進むことが期待されます。

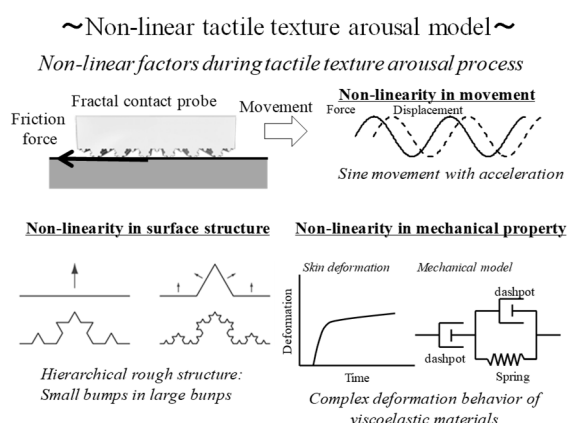


図 1 非線形触質感喚起モデルの概念図

(1) ヒト皮膚を模倣した人工皮膚・指モデル

わたしたちはこれまでに、手触りがヒトそっくりの人工皮膚や指モデルを開発しました。さまざまな高分子エラストマーの中でその表面エネルギーが最も皮膚に近いのはウレタン樹脂であるため、このモデルはウレタンを用いることとした。また、ヒトの指先には指紋がありますが、それによって摩擦運動下において歪みエネルギーが触覚受容器に集中したり、高周波の振動が誘起されることが触覚の鋭敏化に一役買っていることが報告されていたので、人工皮膚の表面にはキメを模した凸凹を、指モデルには指紋のパターンが刻むことにしました。

今回の公募研究では、スキンケアクリームを皮膚に塗った時のなじみ感を再現できる人工皮膚を開発

しました(図 2)。わたしたちは、スキンケアクリーム・ローション・リキッドファンデーションなどの液体化粧料を皮膚に塗ると、スツとなじんでいく感覚が生まれることがありますが、これは、液体が皮膚表面をキメを伝って濡れ広がり、乾燥していくために起こるのではないかと考えました。この仮説を検証するために、さまざまな試行を繰り返すなかで、微細な凹凸表面を持つポリウレタンフィルムで柔らかいウレタンゲルを被覆すると、モデル表面にはマイクロリンクと呼ばれる数十 μm 幅の溝が生成することを見出しました。このモデルに市販のスキンケアクリームを塗布した時の触感を官能評価したところ、Smooth feel、Moist feel、Soft feel の 3 つの触感因子が強く感じられ、従来の人工皮膚よりもヒト皮膚に似ていることが分かったのです。また、モデル表面に油を滴下したところ、表面に形成された微細な溝に沿って油が薄く広がっている様子が観察されました。この現象はウィッキングフロント現象と呼ばれており、皮膚表面のキメで毛細管現象によって液体が濡れ広がるのと同じ現象がこのモデルの表面でも起こっていることが確認されました。これらの人工皮膚や指モデルが開発されたことにより、濡れた皮膚表面で起こる摩擦現象が的確に再現され、化粧料や皮膚洗浄料のテクスチャーの評価が正確に行われることが期待されます。

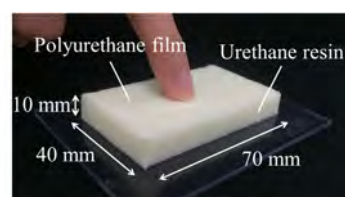


図 2 スキンケアクリームを皮膚に塗った時のなじみ感を再現できる人工皮膚。

(2) 触質感センシングシステムの開発

これまでの摩擦評価は一定速度で行われていました。しかし、ヒトはモノに触れる時、一定速度で運動することはほとんどなく、滑らかに体を動かします。そしてこの滑らかな運動下では、加速プロセスと減速プロセスが繰り返され、常に速度が変化しています。そこで、ヒトがものに触れる時の動きを模倣した正弦運動で摺動する摩擦評価システムを開発しました。この装置にはスコッチヨーク機構と呼ばれる仕組みが導入されており、モノと触れ合う接触子が正弦運動するだけでなく、試料台の上下にはロ

ードセルが取り付けられており、接線方向および法線方向の応力をセンシングすることができます。また、駆動モーター側部に取り付けられたレーザー変位計によって、摺動中の移動距離や速度をきちんと測定することが可能になりました。

このオリジナルの装置を使って、ポリマー、エラストマーなどのさまざまなソフトマテリアル表面の摩擦特性を評価したところ、興味深い現象を見つけることができました。一つ目は、接触子の動きに対する摩擦力の発生が遅れ、二つ目は摩擦速度の加速にともなう動摩擦係数の増加です。金属や金属酸化物のような弾性的なハードマテリアル表面では、接触子が滑り出すと同時に摩擦力が発生しますが、粘弾性を有するソフトマテリアルは滑り出すときに変形するため、摩擦力は運動に対して遅れて発生します。また、ソフトマテリアルは粘弾性体なので、ずり応力のうち粘性抵抗の因子は、ずり速度に比例して増加するのです。これらの特性は本公募研究で開発された触質感センシングシステムを使うことで初めて観察することが可能になりました。また、さまざまな触質感が喚起されるメカニズムを理解するうえでも重要なのではないかと思います。

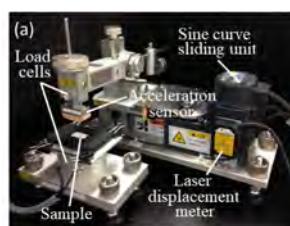


図3 触質感センシングシステム.

(3) 「しっとり感」の発現メカニズム

(2) で紹介したセンシングシステムと官能評価を組み合わせることで、多彩な触感が喚起されるメカニズムのモデリングが可能になるのではないかと考え、モノに触れた時にしっとり感を感じるメカニズムについて検討しました。20人の被験者を対象とした官能評価試験では、「しっとり感」が最も高いのはファンデーションなどの原料として用いられる化粧用粉体で、「湿り感」と「なめらか感」が組み合わせると「しっとり感」として認知されることが明らかになりました。それでは、この「湿り感」と「なめらか感」はどのような物理的な刺激によって喚起されたのでしょうか？この問いに対する答えは筆者らが開発した摩擦モデルによって皮膚表面に加わる力学現象をモデリングすることによって明らかになりました。すなわち、ヒト指モデルで12の物質の摩擦特性を評価したところ、モデルが滑り出すときの摩擦抵抗の大きさを示す静摩擦力と定常的に動いているときの摩擦抵抗の大きさを示す動摩擦力の差が大きいほど湿り感が強くなること、動摩擦力が小さいほどなめらか感が高くなることが明らかになりました。これらの結果は、モノに触れた瞬間

に大きな静摩擦力が発生し、抵抗感が認知されると「湿り感」が、その後摩擦抵抗が一気に低下して抵抗感が小さくなると「なめらか感」が喚起さえること、これら2つの因子が成立したときにはじめて「しっとり感」が感じられることを示しています。

(4) 触覚提示システムへの応用展開

このシステムは化粧品や化粧品原料だけでなく、ロボットやバーチャルリアリティシステムの開発にも有用です。近年、腹腔鏡手術にロボット技術が組み合わされたロボット手術が普及しつつあり、遠隔操作で手術を行いながらも直接切開や縫合を行っているような感覚を得るための触覚フィードバック機能の付加が望まれています。わたしたちは、ハサミ型の触覚提示デバイスによって、ヒトが鉗子やハサミで物を把持・切断する時の力学刺激の再現を試みました。まず、鉗子やハサミを用いた時の物体に対する把持力と切断力を触感センシングシステムで評価しました。その結果、鉗子で硬いものや柔らかいもの、ペタペタしたものを挟んだ時の力学特性の違いやハサミで髪を切った時のパターンを区別することができただけでなく、駆動部にMR(Magneto-Rheological)流体とコイルが内蔵されているハサミ型デバイスを用いてこれらの特性を提示することができました。すなわち、粘着感や切断感を発現させる物理刺激の提示がハサミ型デバイスで可能ことが確認され、MR流体を駆動部に充填した触感デバイスは様々な力学的刺激を再現することが可能であり、次世代の手術ロボットの要素技術として有用であることが示唆されたのです。

人工皮膚・指モデルとこれらを搭載した触感センシングシステムを開発することによって、人が感じる感覚と皮膚表面で起こる物理現象をつなげ、多彩な質感が発現するメカニズムを提案することが可能になりました。今後は、触覚に着目した化粧品・情報機器・ロボットの商品設計に取り組んでいきたいと思っています。

論文

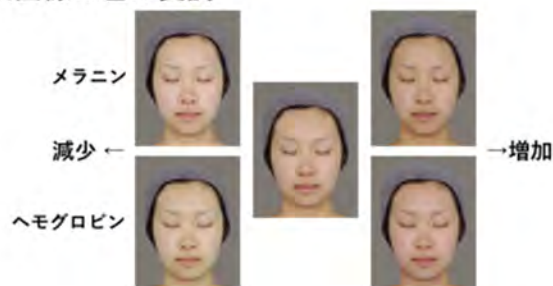
1. Shimizu R, Nonomura Y: Preparation of artificial skin that mimics human skin surface and mechanical properties. J Oleo Sci, 67 (1): 47–54, 2018.
2. Aita Y, Asanuma N, Takahashi A, Mayama H, Nonomura Y: Nonlinear friction dynamics on polymer surface under accelerated movement. AIP Advances 7: 045005, 2017.
3. Kikegawa, K, Kuhara, R, Jinhwan, K, Sakamoto, M, Tsuchiya, T, Nagatani, N, Nonomura, Y: Physical origin of a complicated tactile sensation: “Shittori feel”, R. Soc. Open Sci. 6(7): 190039, 2019.

肌色空間の構築と肌質感認識のマッピングによる解析

研究代表者 溝上 陽子（千葉大学大学院工学研究院・教授）



肌画像の色の変調



メラニン、ヘモグロビンの増減による肌色変化の様子（上図）と、顔画像上の色素斑の分布（下図）

○研究の背景と目的

肌質感（色、テクスチャ、くすみ感など）は、年齢、健康状態、顔印象などの重要な判断に関わるため、その認識特性を明らかにできれば、様々な分野で有用と考えられます。

人間は、顔の肌に対して、特有の色知覚があることが示唆されています。例えば、顔色の赤み方向の変化に敏感であるという報告があります。また、日本人女性の平均顔画像を用いた実験で、平均明度が同じでも、赤みがかった顔の方が、黄みがかった顔よりも明るく（白く）見えることが示されています。

このように、人間が肌特有の知覚特性を持つならば、肌色の見えを正確に評価するには、肌特有の色分布や、肌色を構成する色素成分（メラニン、ヘモグロビン）を考慮した「肌色空間」が必要と考えました。また、色素斑（しみ）など、肌質感にもこれ

らの色素成分が関わることから、肌色空間に肌質感認識もマッピングして表現できる可能性があります。

本研究は、肌色や色素沈着の分析と視感評価実験に基づく肌の色とテクスチャが肌質感認識に及ぼす影響の定量化、肌色空間の構築、さらに肌質感画像の肌色空間へのマッピングを目的としています。

肌色空間を定義できれば、既存の色空間では取り出せない色彩値と色知覚の関係を明らかにでき、肌質感認識の理解につながると考えられます。

○研究成果

ここでは、肌色空間を構築するための基礎的実験として、肌色を様々な色変化の方向に変化させたときの色識別（弁別）能力を調べる実験と、色素斑の個数と面積が色素斑の目立ちに与える影響を調べる実験を紹介します。

1. 肌の色弁別特性

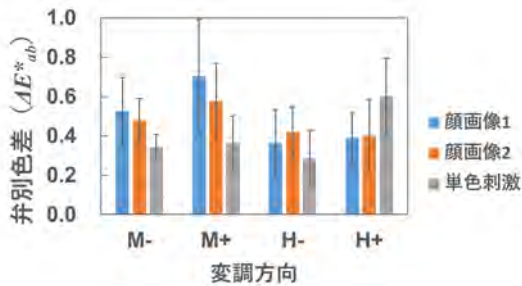
肌色を様々な色変化の方向に変化させたときの色弁別を調べました。まず、日本人の肌色分布データ（ $L^*a^*b^*$ 値）から得られた、（分布幅の大きい）第1、第2主成分方向を軸にとり、平均的な肌色を持つ肌画像とその変調画像を用いて色弁別（色の識別）実験を行いました。変調方向は肌色平均値を基準点とし、そこから第1と第2主成分ベクトルの方向4方向とそれらの間の計8方向です。その結果、色識別能力は、色変化方向によって異なる傾向が見られました。

さらに、日本人女性の顔画像2種類と単色刺激を用いて、メラニンとヘモグロビン濃度による色変化方向に対しても、同様の色弁別実験をしました。（肌色の変化は、大まかに言うと、メラニンが増加すると、黄色みが増し明度が低下します。ヘモグロビン



が増加すると、肌の赤みが増し明度が低下します。）

(a) 顔画像1 (b) 顔画像2 (c) 単色刺激
顔画像を用いた色弁別実験用の刺激



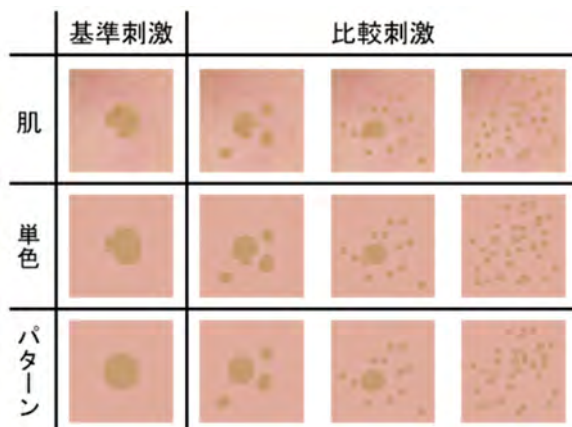
各変調方向における弁別色差 (ΔE*_{ab})

その結果、肌画像では、メラニン変化方向に比べて、ヘモグロビン色変化方向に対して弁別色差が小さい、つまり色識別の感度が高い傾向があることが示されました。しかし、単色刺激ではこの傾向は見られませんでした。ヘモグロビン方向に対する弁別能が高くなった理由として、ヘモグロビンによる色変化が、繁殖期や体調の判断など、人に有益な情報を与えることが考えられます。

本研究により、メラニン・ヘモグロビン方向に近い軸を持つ肌色空間を構築し、その軸方向で肌の色弁別特性を表せる可能性が示されました。

2. 色素斑の分布がその目立ちに与える影響

色素斑（しみ）の個数と面積が色素斑の目立ちに与える影響も調べました。頬画像に色素斑を加えた刺激を作成し、総面積を保ったまま大きい色素斑からだんだん小さく分割していくと、より目立たなくなっていきました。一方、個々の色素斑の大きさを等しくしたまま数のみ増やした場合は、個数が増加すると、より目立つようになりました。ただし、大きな色素斑を含む場合が一番目立つ傾向にありました。さらに、色素斑の弁別に色濃度が与える影響について、3種類の背景（肌画像、肌色ランダム分布、単色）を用いて比較すると、色素斑判定の正答率は色濃度の増加とともに増加する傾向が見られました。また、肌画像より単純な背景において色素斑判定の正答率が高くなりました。また、頬画像が肌らしく見えるほど色素斑は目立ちにくくなることから、肌特有の知覚特性があることが示唆されました。



色素斑の目立ち実験に用いた画像の例

さらに、顔画像を用いても実験しました。色素斑の濃度は、低・中・高の3段階、位置は、目の下・頬の外側・頬の下側の3段階で変化させました。面積は、総面積が等しい、大きい色素斑1個と小さい色素斑5個の2段階としました。条件1では位置と濃度、条件2では面積と濃度、条件3では面積と位置を変化させて実験しました。

その結果、位置と濃度どちらも目立ちに影響を及ぼし、目の下の濃い色素斑が最も目立つことがわかりました。そして、顔画像においては、色素斑の数や面積だけでなく、濃度、位置も目立ちに影響を与えることが明らかになりました。したがって、顔の形状なども考慮したさらなる検討が必要です。

○今後の展望

本研究で得られた、肌色に対する色識別特性や色素斑の目立ちの基礎データをもとに、さらに肌色知覚の特性に関するデータを積み重ね、肌色空間における適切な軸方向とスケール設定を検討していきます。また、色素斑の色変化や肌質感の見え方の特性についても、さらに検証していく予定です。

○関連する研究発表

論文

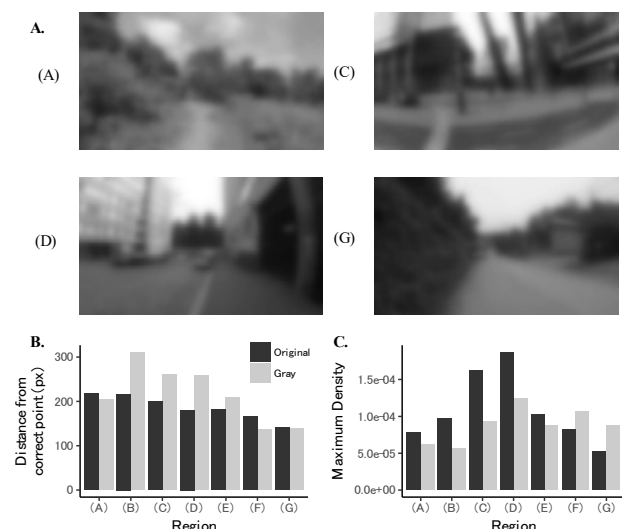
1. 濱田 一輝, 溝上 陽子, 菊地 久美子, 矢口 博久, 相津 佳永: 肌画像における肌色の弁別特性. 日本色彩学会誌 42(2):50-58, 2018.
2. Kikuchi, K, Katagiri, C, Yoshikawa, H, Mizokami, Y, Yaguchi, H: Long - term changes in Japanese women's facial skin color, Color. Research & Application 43(1):119-29, 2018.

学会発表など

1. 大塚, 溝上, 矢口: 色素斑の大きさと数が目立ちに与える影響, 日本色彩学会第48回全国大会〔東京〕'17, 東京, 2017
2. 濱田, 溝上, 矢口: 肌画像と単色刺激における肌色の弁別特性, 日本色彩学会第48回全国大会〔東京〕'17, 東京, 2017
3. Fang Y, Mizokami Y, Yaguchi H: Visual perception of pigmentation on facial skin-color distribution, the 13th Asia-Pacific Conference on Vision (APCV), Tainan, Taiwan, 2017
4. Hamada K, Mizokami Y, Kikuchi K, Yaguchi H: Discrimination thresholds for skin image and uniform color stimulus, Proc. of 13th AIC Congress 2017, Jeju, Korea, 2017
5. Otsuka C, Mizokami Y, Kikuchi K, Yaguchi H: Conspicuity of facial pigmentation influenced by its distribution, Proc. of 13th AIC Congress 2017, Jeju, Korea, 2017
6. Mizokami Y, Yoshida M, Kikuchi K, Aizu Y, Yaguchi H: Characteristics of color discrimination on a face image, Vision Sciences Society 2019 Annual Meeting, St. Pete Beach, 2019



研究代表者 高橋 康介（中京大学心理学部・准教授）



上の写真はタブレット装置を用いたフィールド実験の様子です（2017年8月、タンザニア・タンガニーカ湖畔の村にて。帝京科学大学・島田将喜氏撮影）。写真の中の人物は左から現地アシスタント、研究者（高橋）、実験参加者、現地アシスタントです。実験参加者自身がタブレットを操作して、実験を進めています。なお、この実験場面は比較的人が少ない状況で実施できたもので、他の実験場面では周囲に人だかりができるなど、状況は様々でした。下のグレースケールの写真と図は地域推定実験（研究成果1）で用いた写真と実験結果です。Aは刺激写真の例、Bは地域ごとの正解地点からの距離、Cは地域ごとの反応最大密度を示しています。地域は(A)から(G)まで順にカメルーン、カナダ郊外、カナダ都市、フィンランド、インドネシア、ラオス都市、ラオス山間部です。

○研究の背景と目的

文化や地域が異なれば環境は異なります。質感認知が「ものと環境と観察者の相互作用が生み出す（西田）」なら、文化や地域は質感認知の規定因となり得るでしょう。質感を生み出す視覚世界の情報やその認知過程は、生まれ育つ環境によらず人類共通なのでしょうか。それとも視覚環境が私たちの質感認知を育むものなのでしょうか。この問題を考える上では、欧米や東アジアなど、極めて似通った視覚環境に囲まれる都市化された地域だけではなく、世界中の様々な地域にアプローチして実証的なデータを取得する必要があります。

本研究計画では、文化人類学者や霊長類学者とのコラボレーションにより、フィールド実験という手法を通して質感認知特性を多地域間で比較し、その通文化性（どのような点が文化や地域によらず共通しているのか）及び文化依存性（どのような点が異なるのか）を検証するとともに、各地域での視覚環境を収集・解析して認知特性との関係を調べることを目指しました。このアプローチを通して、生まれ育った地域や文化の視覚環境が質感認知にどの程度、どのように寄与しているのか検討しました。

○研究成果

1) 環境映像を用いた地域推定実験

2016年度～2017年度にかけて、連携研究者（帝京科学大学・島田将喜氏、東京外国語大学・大石高典氏、九州大学・銭琨氏）の協力により、カメルーン、カナダ（都市部、郊外）、インドネシア、フィンランド、ラオス（都市部、山間部）など様々な地域へアクセスし、各地域の環境映像の取得を行いました。アクションカメラ GoPro を用いて、当該地域で生活する人の目線で映像を撮影しています。これらの各地域の映像を用いて日本人大学生を対象とした地域推定実験を実施しました。実験では、映像内に現れるオブジェクトの詳細情報がわからないように、映像から切り出した環境画像に対してぼかし（ガウシアンフィルタ）をかけて、オリジナルのままのカラー画像や、色彩を落としたグレースケール画像として呈示しています（図中の A の画像）。実験参加者はその画像の地域が世界のどこで撮影されたものなのかを地図上で回答するという課題、つまり写真の印象から地域を推定するという課題を行ってもらいました。多くの地域において正答に近い地域が選ばれる傾向があり、「地域の特色」ともいえるべき画像特徴が存在することが示唆されました（図中の B と

Cのグラフ参照)。また欧米都市部(カナダ・フィンランド)においては色情報を脱落させることで混同が起きるという興味深い結果も得られています。この結果の解釈として、欧米都市地域の自然風景画像の中では、地域推定の手がかりとして用いられる形態情報は地域間での類似度が高く、色情報が失われることで地域間の混同が生じたという可能性があります。これは都市部の視覚環境は、地域によって色合いは違うが形が似通っているということを意味しています。

2) 質感フィールド実験

2017年の7月～8月にかけて、研究者(高橋)自身で東アフリカ・タンザニアのタンガニーカ湖畔の村に滞在し、持ち運び可能な実験環境としてタブレット装置を用いて、当初より予定していた質感に関するフィールド実験を実施しました(図中の写真参照)。なお、タブレットベースの実験構築、比較用の大規模サンプルは計画班とのコレボレーションにより実現したものです。フィールド実験の制約上、実験に用いる刺激の種類を大幅に制限する必要があるため、質感カテゴリとして、「光沢の強度」「光沢の鋭さ」「不透明 vs. 半透明感」「銀 vs. ガラス」「金 vs 黄プラスチック」の5種類を使用しました。実験では4枚のオブジェクトの写真を提示し、このうち1枚の写真は上述の質感が異なっていました。例えば3枚は銀で1枚はガラス、といった具合でした。実験では、これらの複数の刺激画像の中から「仲間はずれ」を探すというユニバーサル質感課題を実施しました。実験の結果、タンザニアで実験をすると「不透明 vs. 半透明」「銀 vs. ガラス」などの間で混同が起きやすいことがわかりました。これらはどちらも材質の(半)透明感に関連する質感です。実際に村に滞在していると、(半)透明なオブジェクトというものが日本や都市部に比べて希少であるように思えます。結論づけるにはまだまだ実証的な研究を積み重ねる必要がありますが、視覚環境が質感認知を育んでいるという可能性を示唆しているのかもしれません。

3) 絵画印象フィールド実験

領域会議の議論から生まれた計画班B01-4との連携研究で、絵画の色彩による印象の研究について、上記の滞在中にフィールド実験研究を行いました。これまでの研究から、絵画の色調に変調をかけたものと原画を比較すると、原画の色彩が好まれるということがわかっていました。抽象画のような実世界の色彩とは無関係のものであっても原画の色彩が好まれます。タンザニアで行ったフィールド実験では、抽象画、植物、ポスターについて原画と3種類の色彩変更刺激の4枚を提示して、最も好みの色彩の絵を選んでもらいました。その結果、少なくとも抽象画と植物では、これまでの研究と同じように原画の

色彩が好まれるという傾向が確認されました。ただしポスターの場合には色彩に変調がかかったものの方が好まれました。実はフィールド実験を実施した村では、日常の風景の中で「絵画」を見かけることはほとんどありませんでした。また1)の環境映像の研究からも分かる通り、日常の視覚環境の色彩は地域によって大きく異なります。そのような環境でも抽象画の色彩として原画のものが好まれたという点は興味深い結果です。

○今後の展望

本研究を実施した研究チーム(コアメンバーとして中京大学・高橋康介、帝京科学大学・島田将喜氏、東京外国語大学・大石高典氏、九州大学・錢琨氏)は現在も別のプロジェクトの中で共同研究を実施しており、公募研究期間終了後もフィールド実験を継続しています。その中で、質感に関するフィールド実験のフォローアップも可能であり、研究成果をまとめるとともに、さらに深く質感認知と地域・文化の関係を調べていくことを目指したいと思います。

さらに重要なことに、本研究を通して個々の調査、実験を行うとともに、我々の研究チームでは「フィールド実験」の可能性、意味や意義について深く考え、議論する機会が数多くありました。フィールドにタブレットを持ち込んで実験するという試みは全く新しいものであり、研究の「データ」としては残らないものの今後の新しい学術的研究の中で貴重な知見を数多く得ることができました。例えばフィールド実験から参加者との相互作用が引き出され、その場を人類学的な視点で解釈し直すことの必要性などが指摘されています。質感研究、とくに質感の認識の研究では、こういった視点も役立つ可能性があります。このような議論は2020年現在でも続いていて結論は出ていませんが、質感の公募班としての2年間(正確には1年余り)が我々研究チームの大きな礎となって、さらに新しい研究へと展開しています。

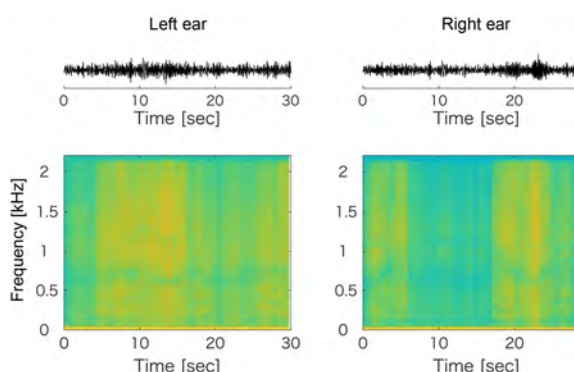
○関連する研究発表

学会発表など

1. 鍵水秀和・錢琨・大石高典・島田将喜・高橋康介:
自然風景画像からの地域推定における色情報の効果. 日本心理学会第81回大会, 久留米大学, 長崎, 9.20-22, 2017
2. Takahashi, K., Oishi, T., & Shimada, M.:
Psychological experiment all over the world: an interdisciplinary collaboration. The 23rd Congress of the International Association for Cross-Cultural Psychology (IACCP2016), Aichi, Japan, 7.30-8.3, 2016.

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

研究代表者 仲谷 正史（慶應義塾大学 環境情報学部・准教授）



バイノーラル録音した物音の音響刺激の元波形とスペクトログラム。音源が右→左→右耳へと移動する様子が見える。

○研究の背景と目的

本研究は音がもたらす質感について検討しました。物音を聴くと、その物音を立てている素材が何であるかを人間は容易に聞き分けることができます。これは、生態的に安全か危険かを察知するために備わった能力と考えられます。本研究では、物音を聴くことで生じる主観的な快・不快感とその際の生理応答を研究題材として選びました。この際、**ASMR** (**A**utonomous **S**ensory **M**eridian **R**esponse、自然と心地よくなる感覚反応)の略称で知られる現象を引き起こしやすい聴覚刺激（以下、**ASMR** 音源）にヒントを得て、実験刺激を制作しました。**ASMR** 音源を聴くと鳥肌が立つ、「くすぐったい」「リラックスする」といった内観報告をもたらすことが、**YouTube**等で広く知られています。本研究は、**ASMR** 音源が持つ特徴である、身体近傍での立体音響効果を持つ聴覚刺激に着目し、これらを実験刺激として利用することで、聴覚刺激だけでどのような体験を引き起こすことができるかを調べることにしました。

○これまでに得られた成果

聴覚刺激はバイノーラルマイクロフォンを用いて制作しました。この記録方法を利用すると立体音響を再現することが容易であり、かつ、記録した物音が空間内を移動する様子を音源から聴取者がイメージすることができます。本研究では、耳のごく近傍（耳介から 60mm 程度）で頭部周辺を移動する物音を記録し、実験に使用しました。

この聴覚刺激を、ヘッドフォンを介して提示すると、実験参加者は **Frisson** と呼ばれる「ぞくぞくし

た感じ」を内観報告します。赤ちゃんをあやすときに使うビニール袋をこすり合わせる音や、粒度の粗いビーズをこすり合わせるような音が、**Frisson** を引き起こす傾向が強いようでした。

実験に使用した聴覚刺激が身体の生理反応を引き起こしているのかを確認するために、感覚刺激に対して生じる瞳孔散大反応を生理指標として計測しました (Liao et al., 2017)。ビニール袋がこすれる近接音を聴取すると、ガラスのコップに入ったビーズ音を聴取した場合と比較して、瞳孔散大量が大きくなりました。また、立体音響（バイノーラル）条件の方が、両耳同音聴条件（モノラル音）と比較して、瞳孔径の変化が大きくなる傾向がありました。また、立体音響条件の方が、**Frisson** の評定値（主観報告）が大きくなりました。一方で、主観的な **Frisson** 強度の報告と生理指標の間では有意な相関関係は認められませんでした。

続く実験では、聴覚刺激を録音する際の物理パラメータを統制するために、移動する音源の移動速度を 0（静止）、**Low speed**, **High speed** の 3 条件を設けて録音し、その音源を用いて官能評価実験を行いました。すると、音源が静止している場合と比較して、移動している音源の方が **Frisson** 強度が有意に強まること、そして音響特徴量の 1 つである両耳間ラウドネス差の分散の大きさと **Frisson** 強度に有意な相関関係が認められました。この結果は、音が左右へ **panning** することで、聴取者の音に対する印象を変化させる現象を説明していると解釈できます。

今回の研究で明らかになった **Frisson** は、**Non musical sound** に対するものであり、音楽聴取時に得られる **Musical Frisson** とは、知覚メカニズムが異なるかもしれません、今後の研究が必要です。**ASMR** 現象をもたらす音源を解析することで、聴覚を通じた音の質感に関する新しい知見が得られることを私は期待して、研究に取り組んでいます。

○関連する研究発表

1. Liao H-I, Nakatani M, Miyazaki H, Furukawa S.: Correspondence between subjective frisson feeling and pupillary response by material sounds. 日本音響学会 2017 年秋季研究発表会, 1-7-5, 愛媛, 9.25-27, 2017.
2. Honda S, Ishikawa Y, Nakatani M et al.: Proximal binaural sound can induce subjective frisson. *Frontier in Psychology Perception Science*. doi: 10.3389/fpsyg.2020.00316

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

研究代表者 鵜木 祐史（北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科・教授）

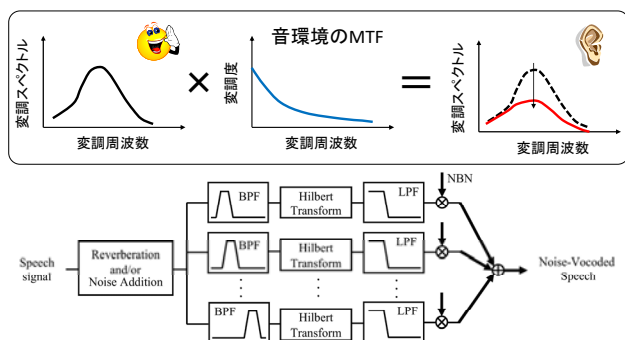


図1：音源・音環境・聴知覚の流れからみた質感認識（上）と雑音駆動音声の作成方法（下）

○研究の背景と目的

質感認識は、脳による物体の本性の解釈であるといわれています。聴覚においてもヒトは、音を聞いただけで音を発した物体の性質（例えば、生物／無生物、個体差など）を瞬時に見極めることが可能です。さらに、聴覚では、音源となる物体の性質だけでなく、音がどのような環境で発せられたかという環境の性質も、同じ音から同時に認識することができます。例えば、リビングで聞いた声と風呂場で聞いた声の質感は異なりますが、声を発したヒトが誰であるのか、どういった感情で話したのかといった音源の性質はきちんと見極めることができます。

本研究の目的は、音環境の質感認識にターゲットを絞り、「振幅変調」の概念に基づいて、その物体の発する音の質感だけでなく、それが耳に到達するまでに通った伝送経路の質感も認識するメカニズム（図1上）を理解することです。そのため、本研究課題では、雑音駆動音声（図1下）を利用して、振幅包絡線の変調周波数上限の制御による話者弁別ならびに感情認識への影響を調査します。

○これまでに得られた成果

雑音や残響が言語情報の知覚、特に音声明瞭度・了解度に大きく影響を与えることが知られています。しかし、これらが非言語情報の知覚に与える影響に関しては未だ明らかになっていません。本研究では、これらの外乱が雑音駆動音声の非言語情報（個人性や感情）の知覚にどのような影響を与えるのか調査しました。ここでは雑音・残響環境を想定して雑音駆動音声の話者弁別と感情認識の実験を行いました。

実験刺激は、雑音、残響、あるいはその両方を付加した音声をもとに作成した雑音駆動音声としまし

た。実験条件は、雑音条件（7種類の信号対雑音比（SNR）；SNR= 1, 20, 15, 10, 5, 0, -5 dB）と残響条件（6種類の残響時間；TR=0.0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 s）の二つでした。個人性知覚に関しては、XAB法を利用して話者弁別実験を行い、感情知覚に関しては、五つの感情カテゴリーから一つの感情を強制選択する聴取実験を行いました。

実験の結果、話者弁別（図2～図4）と感情認識（図5～図7）において、雑音・残響の主効果がそれぞれ認められましたが、交互作用は認められませんでした。雑音と残響が同時に存在する環境でも同様な結果が得られ、さらに、雑音駆動音声の個人性と感情知覚に対して、雑音と残響の交互作用がないことも示されました。これらの結果から、音声聴取に対して極めて劣悪な条件を除く、日常的な雑音・残響環境（SNRで10 dB以上でかつ残響で1.0 s未満）では、今回の実験の有意水準内で雑音や残響が雑音駆動音声の個人性・感情知覚に影響を与えないことがわかりました。

非言語情報知覚を質感知覚の一つと解釈すれば、音源と伝送経路を切り分けて音の質感を認識していると考えることができるものと考えられます。

○関連する研究発表

論文

1. 朱治, 川村美帆, 鵜木祐史, “雑音・残響環境における雑音駆動音声の非言語情報の知覚に関する検討,” 日本音響学会誌, 2020 (in press).
2. Z. Peng, X. Li, Z. Zhu, M. Unoki, J. Dang, M. Akagi, “Speech Emotion Recognition Using 3D Convolutions and Attention-Based Sliding Recurrent Networks with Auditory Front-Ends,” IEEE Access, 8, 16560 – 16572, Jan. 2020.
3. 鵜木祐史, “雑音残響環境における音声伝送指標のブラインド推定法,” 騒音制御, 43(2), 80-84, 2019.
4. Z. Zhu, Y. Araki, R. Miyauchi and M. Unoki, “Contribution of modulation spectral features on the perception of vocal-emotion using noise-vocoded speech,” Acoustical Science and Technology, 39(6), 379-386, Nov. 2018.

学会発表など

1. 朱治, 川村美帆, 鵜木祐史, “雑音残響環境における雑音駆動音声の非言語情報知覚の検討,” 日本音響学会聴覚研究会資料, 東北大学, August 2019.

2. Z. Zhi, R. Miyauchi, Y. Araki, and M. Unoki, "Study on the relationship between modulation spectral features and the perception of vocal emotion with noise-vocoded speech," J. Acoust. Soc. Am., 144, 1804, Nov. 2018.

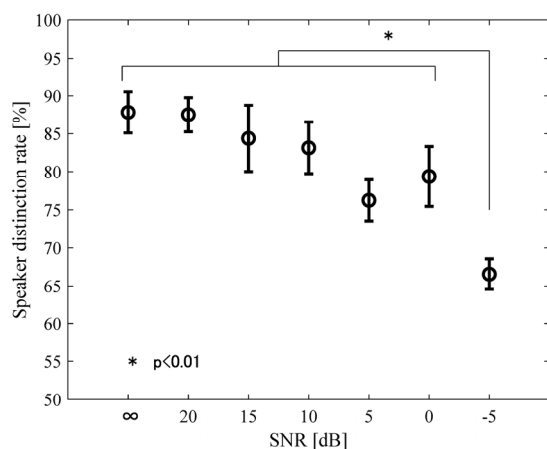


図 2：音声の非言語情報知覚（話者性）に対する雑音環境の影響（日本語母語話者 8 名の結果）

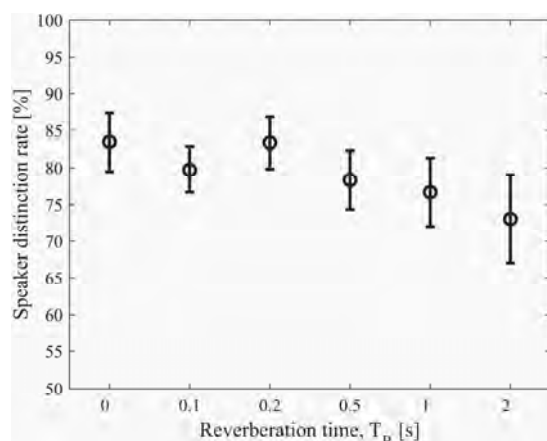


図 3：音声の非言語情報知覚（話者性）に対する残響環境の影響（日本語母語話者 9 名の結果）

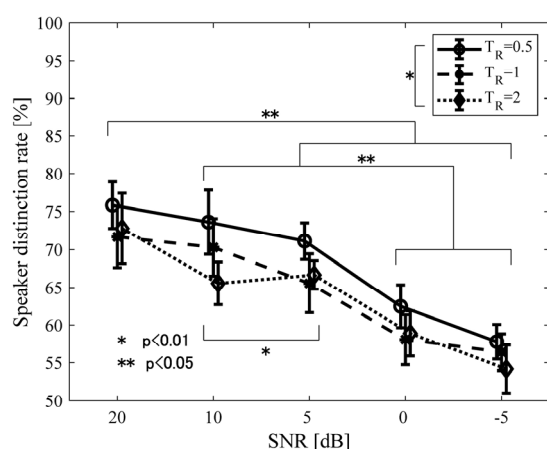


図 4：音声の非言語情報知覚（話者性）に対する雑音残響環境の影響（日本語母語話者 9 名の結果）

3. Z. Zhi, R. Miyauchi, Y. Araki, and M. Unoki, "Important role of temporal cues in speaker identification for simulated cochlear implants," Proc. 1st International Workshop on Challenges in Hearing Assistive Technology, 51-55, 2017.

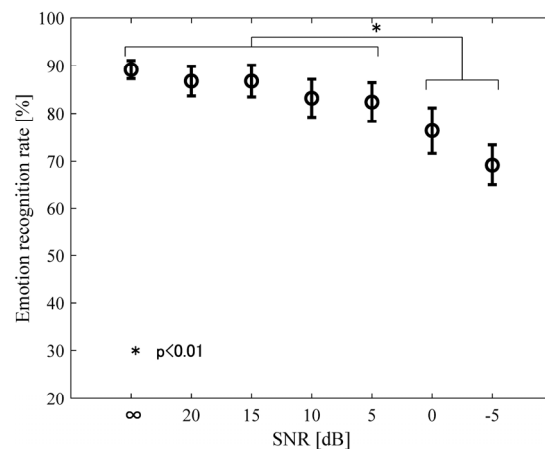


図 5：音声の非言語情報知覚（感情）に対する雑音環境の影響（日本語母語話者 10 名の結果）

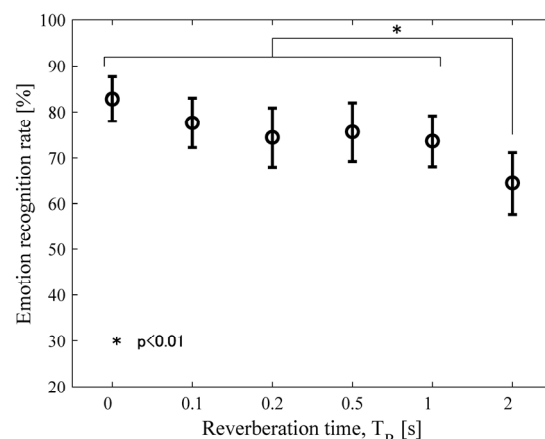


図 6：音声の非言語情報知覚（感情）に対する残響環境の影響（日本語母語話者 10 名の結果）

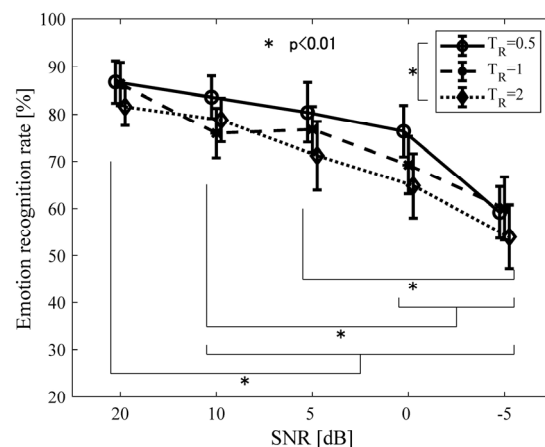


図 7：音声の非言語情報知覚（感情）に対する雑音残響環境の影響（日本語母語話者 10 名の結果）

おいしさをつくりだす神経細胞集団の同定

研究代表者 村田 航志（福井大学医学部脳形態機能学分野・助教）

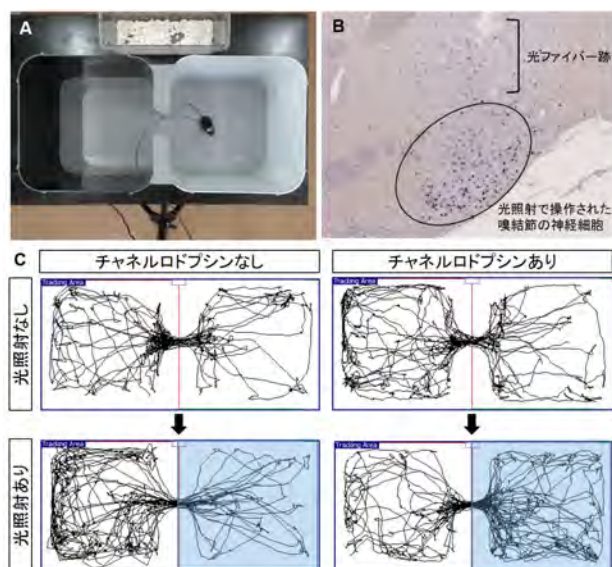


図. 嗅結節の神経細胞の操作による場所嗜好性の変化 (A) 場所嗜好性試験の様子。光ファイバーを嗅結節に留置し、マウスが明るい部屋に滞在しているときに青色光を照射して神経細胞を操作する。(B) 光照射により嗅結節の神経細胞が活動したことを最初期遺伝子 *c-fos* の発現で確認した。(C) マウスは通常では暗い部屋を好み長時間滞在するが、嗅結節の神経操作によって明るい部屋の滞在時間が長くなった。黒い線はマウスの移動の様子を表わす。

○研究の背景と目的

私達は五感を通じて食事を楽しむことができます。しかし、食事を楽しむときに感じる「おいしさ」を脳がどのようにしてつくりだすのかはまだよくわかっていません。おいしさには舌で感じる味覚だけではなく、鼻で感じる嗅覚も実は関わっています。鼻をつまんでもものを食べると風味が感じらなくなり、おいしさがよくわからなくなります。これは口の中の食べ物の匂いが鼻に伝わらなくなるためであり、匂いの感覚はおいしさを感じるための大事な感覚だといえます。本研究ではおいしさ、すなわち「食べたものを好きになってしまう気分のよさ」が食べ物の特に匂いの感覚から生じる神経メカニズムを解明します。そのためにマウスを用いた実験で、マウスがおいしいエサを食べたときに活性化する神経回路を見つけ、見つかった神経回路を操作したときにマウスの行動やエサの好みがどう変化するか、エサを人為的に好きにさせられるかを評価します。

○研究成果

マウスがおいしいエサを食べたときに活性化する神経回路として、嗅結節という脳の底のほうにある場所が見つかりました。実験では、マウスにフレーバー付きのエサを食べさせ、脳標本を作製し、最初期遺伝子 *c-fos* という神経細胞が活性化したときに発現する遺伝子の量を測定しました。嗅結節は匂いの感覚が伝わる場所でもあります。マウスがエサを食べるとき、嗅結節では前内側ドメインで *c-fos* 発現が増加しており、エサを好んで食べる行動にこの領域が関わる可能性が考えられました。

c-fos 発現が見られた嗅結節の前内側ドメインの神経細胞は、マウスに気分のよさをもたらすのでしょうか。神経細胞が動物の行動に与える影響を調べる方法として、オプトジェネティクスと呼ばれる神経細胞を操作する手法が用いられます。オプトジェネティクスでは、光を当てると開くイオンチャネルであるチャンネルロドプシンを神経細胞に発現させて、脳に光ファイバーを留置することで、実験者の任意のタイミングで神経細胞を活動させることができます。マウス脳手術によって嗅結節の前内側ドメインにウイルスベクターを局所注入し、嗅結節神経細胞にチャンネルロドプシンを発現させます。同時に嗅結節前内側ドメインに光ファイバーを留置しました。マウスが気分のよさを感じているかどうかは、場所嗜好性試験によって評価しました。この試験では、神経細胞を操作した際に、部屋の滞在時間が長くなるかまたは短くなるかを評価します。滞在時間が長くなった場合は、神経細胞の操作が動物にとって誘引的に作用し、滞在時間が短くなった場合は忌避的に作用していると判断します。嗅結節前内側ドメインの神経細胞の操作によって、部屋の滞在時間が長くなったことから、これらの神経細胞にはマウスにいい気分をもたらす作用がある可能性が示唆されました。

嗅結節以外の嗅覚神経回路も摂食行動に関わる可能性があります。マウスの嗅覚神経回路を蛍光色素で標識し、神経細胞どうしのつながりを観察したところ、摂食行動に関わる脳領域である視床下部外側野に軸索を投射する嗅覚中枢領域が新たに見つかりました。

マウスの視床下部外側野に軸索を投射する嗅覚中

中枢領域を探索するため、軸索から取り込まれて神経細胞を標識する逆行性トレーサー（コレラ毒素 B サブユニット、CTB）を視床下部外側野に局所注入しました。嗅覚神経回路において CTB で標識された神経細胞を評価したところ、先行研究で報告されていない領域が見いだされました。この新しい嗅覚神経回路の役割はまだわかりませんが、摂食行動への関与があるかもしれません。

○今後の展望

今後は嗅結節の操作によって、人為的にエサを好きにさせられるかどうかを評価します。オプトジェネティクスを用いて嗅結節前内側ドメインを操作し、そのときに食べたエサに対して嗜好性を強力に獲得するかどうかについて検討し、おいしさの形成に関わる神経回路であるかどうかを検証します。

嗅結節の研究に加えて、今回新しく見いだされた視床下部外側野に投射する嗅覚神経回路の機能と特に摂食行動における役割についても研究を進めていきます。

○関連する研究発表

日本語総説

1. 村田航志

嗅結節から探る匂いの質感形成の脳神経メカニズム
Is the olfactory tubercle involved in creating odor quality? : AROMA RESEARCH 17(3):224-229, 2016

学会発表など

1. Koshi Murata, Masamichi Mikame, Wataru Murofushi, Kazuto Kobayashi, Kensaku Mori, Masahiro Yamaguchi

Involvement of the mouse olfactory tubercle in adaptation of learned odor-induced food-seeking behavior

17th International Symposium on Olfaction and Taste (ISOT2016), Yokohama, Japan, June 2016

2. 村田航志

嗅覚で誘起されるモチベーション行動への嗅結節の関与 Involvement of the olfactory tubercle in odor-induced motivated behaviors: 日本味と匂学会第 51 回大会 若手の会シンポジウム「化学感覚と動物の生きる仕組み」、神戸、2017 年 9 月

3. 村田航志、小林憲太、深澤有吾、山口正洋、森憲作、眞部寛之

Identification of a novel subregion of the olfactory cortex projecting to the lateral hypothalamus in mice

視床下部外側野に投射する嗅皮質亜領域の同定

第 40 回日本神経科学大会、幕張、2017 年 7 月

4. 木下智貴、村田航志、小林憲太、深澤有吾、山口正洋、森憲作、眞部寛之

視床下部外側野に投射するマウス嗅皮質領域の発見
日本解剖学会 第 77 会中部支部学術集会、愛知・豊明、2017 年 10 月

5. 村田航志

マウス脳で探る匂いの誘引性と忌避性が生じる神経メカニズム シンポジウム 2「食と基礎心理学の接点」、日本基礎心理学会第 36 回大会、大阪、2017 年 12 月

高精度視覚質感記憶の心理学的基盤と神経機構の解明



研究代表者 齋木 潤（京都大学大学院人間・環境学研究科・教授）



図1. 光沢感の視覚性短期記憶の実験で用いた物体。同じ質感を持つ物体を異なる照明環境下でレンダリングしたもの。

○研究の背景と目的

われわれは、様々な物体の質感を詳細に知覚することができますが、過去に見たものの質感を言語的に表現しようとしたときに大きな困難を感じます。また、記憶の中では物体の質感のリアリティが再現できないと感じます。しかし、これまでの我々の研究で短期記憶においては、物体の光沢感の情報はきわめて正確に保持されていることが示されました。本研究では、視覚性短期記憶において高精度の質感情報の保持を可能にしている心理学的基盤と神経機構を明らかにすることを目的としました。

具体的には、物体の表面質感のうち光沢感と粗さに焦点を当て、これらの視覚性短期記憶の特徴を心理物理学実験によって検討しました。特に、照明環境が変化しても物体の持つ光沢感や粗さの情報を正確に再現できるのかという点に着目しました。

もう一つは照明変化に対する恒常性を持つ質感の視覚性短期記憶の神経基盤を明らかにするために粗さの記憶を対象として、短期記憶時の脳活動をfMRIによって計測し、粗さの視覚性短期記憶を支える脳領域の同定を試みました。その際、特に、初期視覚情報の処理に関与する部位、質感情報の知覚に関与する部位、視覚性短期記憶に関与する部位の役割に着目しました。

○研究成果

(1) 光沢と粗さの視覚性短期記憶

物体表面の光沢感や粗さといった質感の知覚は照明環境の変化に対してある程度の恒常性を持つことが知られています。恒常性の機能は知覚研究の領域で多くの研究がなされてきた一方で、記憶系との関係については研究が少なく多くが未解明です。目にした物体の質感を記憶の中の他の物体の質感と比較

する場合においても照明条件の違いを考慮した上での判断が必要になるため、記憶を調べることは恒常性の働きを理解する上で重要です。

そこで本研究では、目にした質感を記憶した時とは異なる照明環境下で正しく再現することができるか、すなわち、記憶における質感の恒常性について検討しました。実験参加者はディスプレイに提示されたサンプル物体の質感（光沢や粗さ）を記憶し、1秒の遅延時間の後に、再度ディスプレイに表示されたテスト物体の光沢や粗さを自分で調整することで、記憶した質感を再現することを求められました。この際、記憶する時と回答する時で物体を照らす照明環境が異なるように課題状況が設定されました。対照条件として、サンプルとテストの両物体が左右に同時に提示された状況で質感の調整を行う条件（知覚条件）も設定されました。

実験参加者が回答（調整）した質感が正解からどれだけ乖離しているか、つまり回答誤差の大きさを成績の指標として結果を分析したところ、記憶を使って回答した条件での成績は知覚条件での成績からさほど大きく低下しないことがわかりました。これは、記憶された質感情報は照明の変化に対して頑健性を持つことを示唆します。加えて、光沢の回答誤差と粗さの回答誤差は無相関であることも明らかになりました。これは、光沢と粗さという2種類の質感情報の記憶における独立性を示唆します。すなわち、もし光沢と粗さが結合されて記憶されていた場合には一方の質感情報が忘却された場合は他方も失われることになり、光沢と粗さの回答誤差に相関が見られたはずですが、先行研究において光沢と粗さは知覚的にある程度独立した次元であることが指摘されており、記憶過程においてもその独立性が維持されていることは質感記憶が知覚の情報表現をよく保存していることを示唆します。

以上の結果から、記憶した質感にも恒常性の機能があり、照明環境の変動に依存せず質感情報を想起することが可能であることが示されました。ただし、質感記憶の恒常性は今回の実験条件に特有なのか、他の質感や照明条件においても再現可能な一般性の高い現象であるのか、さらに調査することが必要でしょう。また、私たちが素材の識別ができるのは経験や学習の結果であると考えられますが、どのようにして質感に関する長期記憶や知識が獲得されるのか、興味深い今後の検討課題と言えます。

さらに、回答におけるバイアスを分析した結果、

記憶再生に規則的なバイアスがある可能性が示唆されました。このことは、短期記憶において情報が単にそのまま保持されているのではなく、何らかの変容を伴う可能性を示唆しており、今度の研究課題といえます。

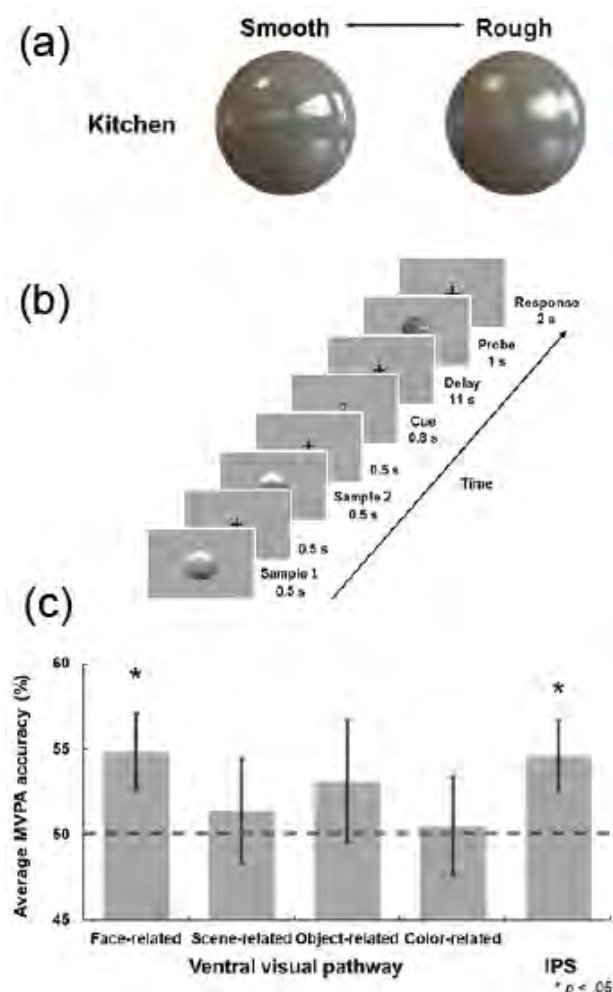


図 2. 粗さの視覚性短期記憶に関する fMRI 実験。(a) 物体の表面粗さを操作した視覚刺激。キッチン風景の正面環境でレンダリング。(b) 実験課題。呈示された 2 物体のうち手がかりと一致するものを記憶した。(c) 各脳領域における MVPA の正答率。

(2) 粗さの視覚性短期記憶の神経基盤

研究成果 (1) で示された照明変化に対する恒常性を持つ質感の短期記憶の神経基盤を検討するために fMRI 実験を実施しました。実験では粗さの記憶に絞り、初期視覚特徴を処理する領域である一次視覚野 (V1)、質感の知覚に関与する腹側高次視覚野、視覚性短期記憶に関与する頭頂間溝の働きに着目し、脳活動のパターンを解析するマルチボクセルパターン解析 (MVPA) を用いて分析を行いました。

方法 粗さを記憶する課題を行い、その時の脳活動を fMRI で測定しました。参加者はつるつるした刺激あるいはざらざらした刺激を記憶しました(図 2a)。そして試行の最後に呈示されるテスト刺激と比較し

て、記憶した刺激とテスト刺激のどちらがつるつるしていたのかを判断しました (図 2b)。照明変化に対する恒常性を検討するために記憶刺激とテスト刺激は異なる照明条件のものを用いました。

結果・考察 本研究では参加者が刺激を視覚性短期記憶の中に保持している間の脳活動に対して MVPA を適用して、参加者が刺激を記憶する際に関与する神経基盤を検討しました。その結果、腹側高次視覚野と頭頂間溝が質感の記憶に関与していることを明らかにしました (図 2c)。このことは、質感の記憶に質感の知覚を担う腹側高次視覚野と視覚性短期記憶を担う頭頂間溝が重要な役割を果たしている可能性を示しています。一方、初期視覚特徴を処理する V1 の関与はみられませんでした。

○今後の展望

高精度の視覚質感記憶は照明変化に対する恒常性を持ち、それは高次の視覚野の活動に支えられていることがわかりましたが、こうした記憶は単に視覚情報をそのまま保持するのではなく、保持期間中に変容し、記憶のバイアスを生成している可能性があります。記憶バイアスの背後にある記憶の変容機構を今後詳細に検討する必要があります。

○関連する研究発表

論文

1. Tsuda, H., & Saiki, J. (2018). Constancy of visual working memory of glossiness under real-world illuminations. *Journal of Vision*, 18(8):14, 1–16.

学会発表など

1. Tsuda, H., & Saiki, J. (2017). Image Statistics and Visual Working Memory of Glossiness. *Poster Presentation at 40th European Conference on Visual Perception*, Henry Ford Building, Berlin, Germany, Aug 27-31.
2. Tsuda, H., & Saiki, J. (2015). Visual Working Memory for Surface Roughness. *Poster Presentation at Psychonomic Society's 56th Annual Meeting*, Hilton Chicago, Illinois, November 19-22.
3. 藤道宗人・津田裕之・山本洋紀・齋木潤, 物体表面の粗さの視覚性ワーキングメモリに関わる脳内機構, 日本心理学会第 83 回大会, 大阪, 2019 年 9 月.
4. Fujimichi, M., Tsuda, H., Yamamoto, H., & Saiki, J. Decoding objects' roughness held in visual working memory. *The Annual Meeting of Vision Sciences Society*, Florida, USA, May, 2019.



研究代表者 藤田 一郎（大阪大学大学院生命機能研究科・教授）

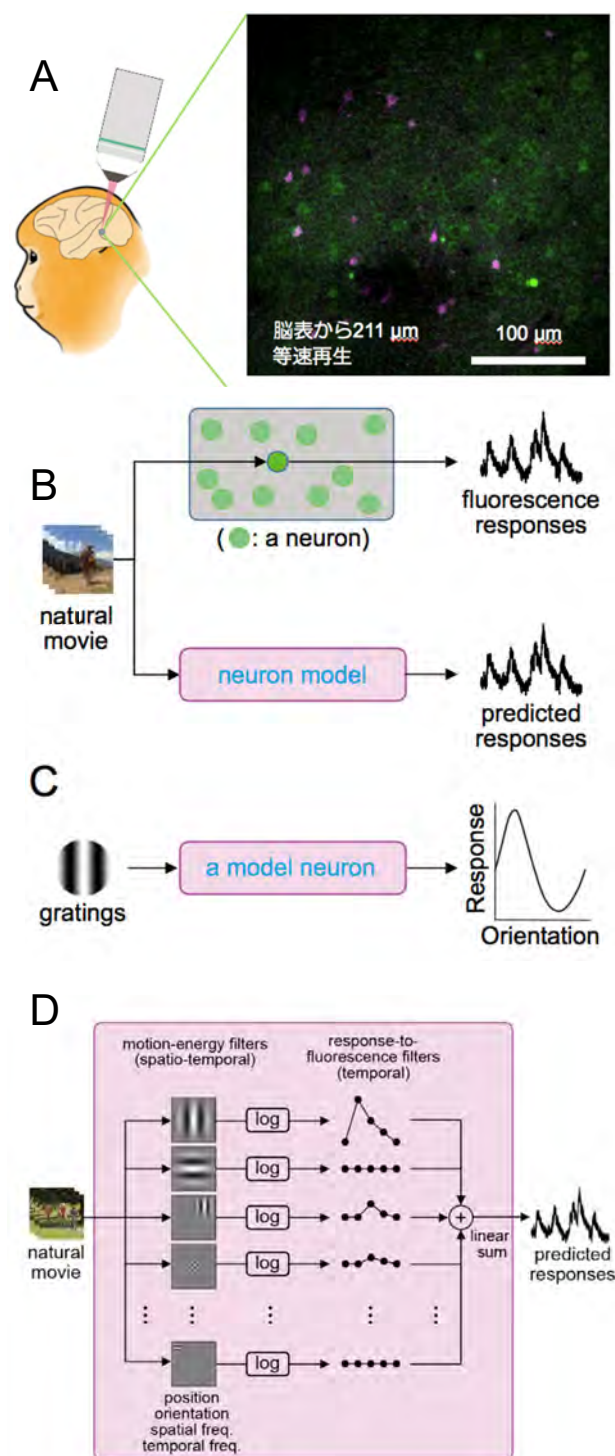


図1 サルの大脳皮質における2光子イメージング (A) と符号化モデル解析 (B-D)

○研究の背景と目的

私たちが見ている世界やそれを構成する物体は、形、色、奥行き、動き、大きさに加えて、テクスチャー（見て感じる手触り感）と呼ばれる視覚的特徴を持っており、視覚認識や視覚に基づく行動にとって重要な情報となっています。たとえば、ザラザラ感、すべすべ感といった表面の視覚的な様子から物体の手触りや材質などを知ることができます。また、砂利道や石畳における石の大きさは遠くに行くほど小さく見え、その変化の様子から遠近や道の傾きを知ることができます。このようにテクスチャーは、手触り感、材質、3次元面の傾きを知覚し、さらに物体を背景から分離することなどに役に立つ視覚情報です。テクスチャーは、網膜に投影された物体表面の像の統計的な性質によって決まります。

テクスチャーの情報は、人やサルなど霊長類においては、大脳皮質の腹側経路で処理されます。腹側経路は一次視覚野 V1 野から中期視覚野 V2 野、V4 野を経て、側頭葉視覚連合野 TE0 野、TE 野へと至る神経経路です。現在、この経路に沿ってテクスチャー情報が抽出されていく様子が明らかになりつつあります。

私たちの研究プロジェクトでは、この神経経路におけるテクスチャー情報処理について二つの点に注目して研究を行いました。第一は、サルの V1 野と V4 野における神経細胞のテクスチャーに対する反応の比較です。個々の神経細胞が発する活動電位を記録する手法を用いた従来研究とは違い、私たちは、2光子カルシウムイメージング法を用いることで、多数の神経細胞の活動を同時にかつ実験者のサンプリングバイアスなしに記録し、V1 野と V4 野の比較を行い、テクスチャーの情報の処理がどのように進展するかを明らかにすることを目指しました（図 1 A）。第二は、これらテクスチャーに反応する神経細胞の V1 野、V4 野内における分布の様子の解明です。2光子カルシウムイメージング法の最大の利点は反応を調べている細胞の位置を正確に特定できることです。この利点を生かし、V1 野、V4 野におけるテクスチャーに反応する神経細胞の分布を調べ、これらの領域の中でテクスチャーを処理している機能的な構造がどのようなものであるかを検討しました。

○研究成果

1. 2光子カルシウムイメージングデータへの符号化モデル解析法の適用

今回の私たちの研究においては、自然情景を映し

た動画をサルに提示し、その際の神経細胞の反応（カルシウム反応）を記録します（図1A）。次に、その反応を再現できるような神経回路モデル（符号化モデル）を作成します（図1B）。この符号化モデルが十分な精度で、動物の神経細胞の反応を模倣（再現）できるようであれば、そのモデルに統制された様々な視覚刺激（例えば、刺激の傾きや像の粗さを変化させた縞模様）を入力し、その出力を調べることで、問題としている細胞の性質（どのような傾きの情報を送るか、どのような粗さのフィルターとなっているかなど）を系統的に調べることができます（図1C）。

符号化モデルとして様々なモデルを適用して試すことができます。私たちは、まず、V1野細胞の反応を記述する運動エネルギーモデル（Adelson & Bergen, 1985）に色フィルターを合わせ持たせモデルを作成し、V1野とV4野の2光子カルシウムイメージングデータに適用しました（図1D）。その結果、V1野で得た2光子カルシウムイメージングデータにおいても、単一神経細胞の電気活動を記録したデータに適用した時と同じ精度でカルシウム反応を記述することができました（論文3）。しかし、V4野神経細胞の反応に対しては、V1野神経細胞の時よりも精度は低くなりました。このことは、V4野神経細胞は運動エネルギーモデルでは捉えることのできない反応の性質を持っていることを意味します。

2. V1野、V4野の神経細胞のテクスチャーに対する反応の相違

そこで、次の解析では、テクスチャーの評価・合成に使われているPortilla-Simoncelli (PS)統計量を取り込んだ符号化モデルを用いました。PS統計量は、画像中の輝度の分布についての統計量（平均値、標準偏差、最大値、最小値、尖度、歪度）に加え、画像中の方位・空間周波数を抽出するフィルター（V1野細胞をモデル化）の出力、およびパラメーターが異なるフィルターの出力間の相関を含んでおり、これらの多様な特徴量群によって画像を定量的に記述します。2光子イメージングにより記録したそれぞれの神経細胞の自然動画に対する反応を最もよく記述するように、それぞれのフィルターやフィルターの間の相関の出力の寄与度（重み）を変化させてモデルを作成します。個々の神経細胞において、その細胞の反応を決定する重みの大きいフィルターやフィルター相関が何であるかを、調べました。

この方法をV1野とV4野の神経細胞に適用したところ、V1野神経細胞のほとんどは方位・空間周波数のような単純な画像特徴が主に検出しているのに対し、V4野においては、より複雑な特徴（方位フィルター間の相関など）を抽出する神経細胞が多いことが判明しました（論文2；学会発表1、2）。同様に、色に関する情報処理もV1野からV4野に向けて、反対色表現から限局した色受容野表現への変換が起きていました。テクスチャーや色という物体の表面特

徴の抽出・変換が、V1野からV4野に向けて進展していくことが、大規模な神経細胞活動データに基づいて確認されました。

3. V1野、V4野におけるテクスチャー選択性細胞の空間分布

V1野はほとんどの神経細胞が方位・空間周波数など低次画像特徴量を検出しているため、どの計測領域においてもこれらの細胞が占めていました。一方、V4野では、高次画像特徴量（フィルター間相関など）を伝える神経細胞が大半を占める領域もあれば、低次画像特徴量を伝える神経細胞が多数を占める領域もあり、記録する場所によって大きな違いが見られました。このことは、選択性を持つ画像特徴量の複雑さに応じて、神経細胞がV4野の中で分かれて分布することを示唆しています。V4野は、色や方位そしてテクスチャーのような異なる視覚特徴の処理を担う領域が数モザイク状に分布するような機能的構造を持つのではないかと予想されます。

論文・受賞

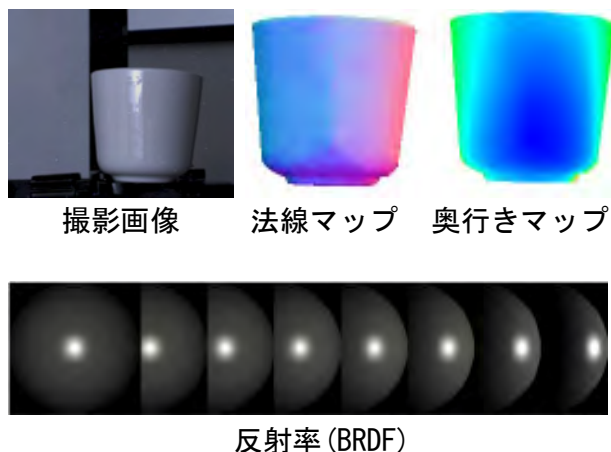
1. Ikezo K, Amano M, Nishimoto S, Fujita I: Mapping stimulus feature selectivity in macaque V1 by two-photon Ca^{2+} imaging: encoding-model approach of fluorescence responses to natural movies. *NeuroImage* 180 (Pt A): 312-323, 2018.
2. Hatanaka G, Ikezo K, Takeuchi RF, Inagaki M, Fujita I: Relationship between image statistics in neural movie and responses of neurons in visual areas V1 and V4. *IEICE Tech Rep NC2016-89 (2017-03)*: 149-154.
3. Ito J, Yamane Y, Suzuki M, Maldonado P, Fujita I, Tamura H, Gruen S: Switch from ambient to focal processing mode explains the dynamics of free viewing eye movements. *Sci Rep* 7 (1082): 1-14, 2017.

学会発表など

1. Hatanaka G, Ikezo K, Takeuchi RF, Inagaki M, Nishimoto S, Fujita I: Functional architecture of image statistics in macaque V4. *Neuroscience 2017 (The 40th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Makuhari, Japan, 7.20-23, 2017)*.
Hatanaka G, Ikezo K, Takeuchi RF, Inagaki M, Fujita I: 「自然動画に含まれる画像特徴量に対するサルV1野およびV4野の神経細胞群の応答」 ニューロコンピューティング研究会、東京、3.13-14, 2017.（論文2は本発表の抄録。本発表は、2018年度日本神経回路学会最優秀研究賞およびIEEE CIS Japan Chapter Young Researcher Award (YRA) (IEICE Neuro-computing)を受賞。

ワンショット BRDF 計測と質感解析

研究代表者 長原 一（大阪大学データビリティフロンティア機構・教授）



本手法は、撮影画像から法線と奥行きマップと反射率を同時推定する。

○研究の背景と目的

本研究では、ライトフィールド(LF)カメラを用いたワンショット BRDF 計測とその質感解析を目的としています。提案手法では物体表面による複数の反射光線の生成と LF カメラによるそれら光線の観測をモデル化します。実際のカメラから得られる計測画像と生成モデルで得られる画像の比較を行うことで、物体形状と反射特性である BRDF を同時推定します。提案手法により未知形状の物体であっても、LF 画像から BRDF を推定することが可能となります。また本手法により得られる BRDF と質感の関連を調べることで、質感の定量化や判別を可能にする手法を提案します。提案手法は、工学的な新規性や独創性のみならず、通常はラボ環境で計測時間のかかっていた BRDF 計測の問題を解決し、簡便な方法による BRDF 計測を提供できることから、他の応用分野への貢献や波及効果が期待できます。

○これまでに得られた成果

画像から物体の反射率や物体の形状を推定する方法は、インバースレンダリングと呼ばれています。図に示すような撮影画像中の輝度は、物体の形状のみならず、物体表面の反射率や照明の影響を受け結果としてあらわれます。そのため、画像のみから物体形状や反射率分布である BRDF を求めることは一般的には困難な問題とされてきました。一般的には、物体形状を求めるためには、物体の反射特性が既知であるか。また逆に反射率を求めるためには物体形状が既知である必要がありました。これに対して、LF カメラと呼ばれる多視点の画像が同時記録可能

なカメラを用いることで、この問題を解決しようとしてきました。提案手法では物体表面による複数の反射光線の生成と LF カメラによるそれら光線の観測をモデル化することで、実際のカメラにより撮影される複数視点画像がどのように得られるかを考えました。このような、モデルから得られる予測画像と計測画像と比較を行うことで、物体形状と反射特性である BRDF を画像のみから同時推定することを可能としました。つまり、計測結果と同じ見かけの推定画像が得られるよう、つじつまのあう物体形状と反射率を最適化問題として解くことでこの問題を解決しました。この提案アルゴリズムにより、未知形状の物体であっても、図のように物体の表面形状を表す法線マップやカメラからの距離を表す奥行きマップ、さらに物体の反射率を表す BRDF を推定することが可能となりました。

○関連する研究発表

学会発表など

1. Trung Thanh Ngo, Hajime Nagahara, Ko Nishino, Rin-ichiro Taniguchi, Yasushi Yagi, "Reflectance and Shape Estimation with a Light Field Camera under Natural Illumination", British Machine Vision Conference, London, UK, Sep, 2017.
2. Thanh Trung Ngo, Hajime Nagahara, Ko Nishino, Rin-ichiro Taniguchi, Yasushi Yagi, "Reflectance and Shape Estimation with a Light Field Camera under Natural Illumination", 情報処理学会研究報告, CVIM209-20, Nov., 2017.
3. Thanh Trung Ngo, Hajime Nagahara, Ko Nishino, Rin-ichiro Taniguchi, Yasushi Yagi, "Reflectance and Shape Estimation with a Light Field Camera under Natural Illumination", The 12th International Workshop on Robust Computer Vision, Nara, Japan, Jan., 2018,.
4. Thanh Trung Ngo, Hajime Nagahara, Ko Nishino, Rin-ichiro Taniguchi, Yasushi Yagi, "Reflectance and Shape Estimation" with a Light Field Camera under Natural Illumination, The 21st SANKEN International Symposium, Osaka, Japan Jan., 2018.
5. Trung Thanh Ngo, Hajime Nagahara, Ko Nishino, Rin-ichiro Taniguchi, Yasushi Yagi, "Reflectance and Shape Estimation with a Light Field Camera under Natural Illumination, International Journal of Computer Vision, pp.1-16, Feb., 2019.



研究代表者 山口 真美（中央大学文学部・教授）

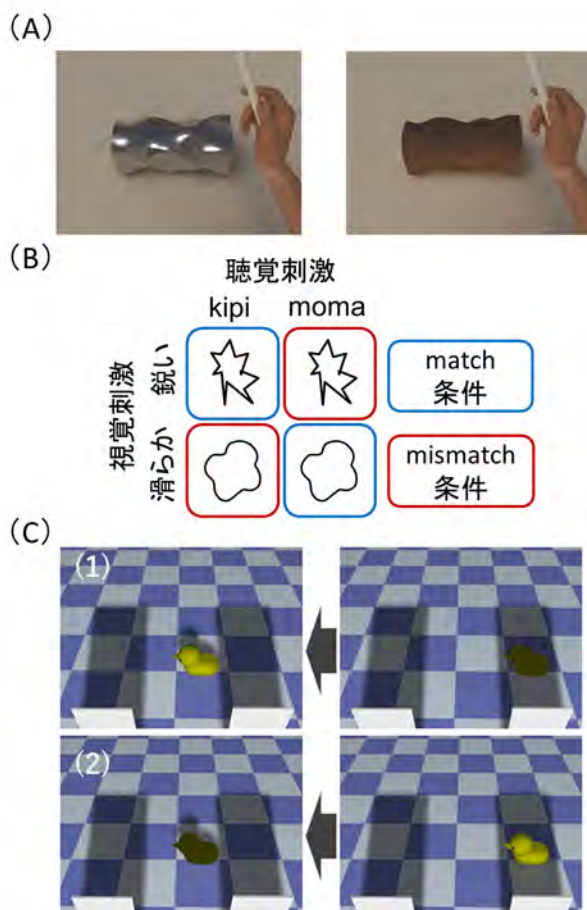


図 1. (A) 木と金属の素材質感の視聴覚統合の脳内処理（研究 1）(B) ブーバキキ効果を用いた音象徴の脳内処理（研究 2）(C) 影による物体の明るさ変化の知覚（研究 3）

○研究の背景と目的

ヒトは多様な感覚情報を統合し、現実の環境で様々な物体を認識します。発達初期において、どのように異なるモダリティから得られる質感情報が統合されるのか、また、どのように現実の環境世界の物体が認識され、言語獲得に至るのかは明らかになっていません。本研究では、多様な感覚による質感認知の発達過程を、言語獲得前後の乳児を対象に実験的に検討しました。まず、現実のリアルな質感を持った素材に基づく「物体」に多様な感覚が統合される発達過程を検討するために、4-8 ヶ月児を対象に、近赤外分光法（NIRS）を用いて、素材質感の視聴覚統合に関連した脳内処理の発達過程を調べました。次に、言語獲得直前の 11 ヶ月児を対象に、視覚

と聴覚の印象が一致する「ブーバ/キキ効果（bouba/kiki effect）」を用いた検討を行いました。音象徴に重要な right posterior STS（上側頭溝）の活動がブーバ/キキ効果に関与するかを調べ、視覚と聴覚の統合が言語表象へと進む過程を検討しました。さらに、照明環境の変化が 5-8 ヶ月児の質感知覚にどのような影響を与えるかを検討するため、影による物体明るさの変化を乳児が知覚できるかを調べました。

○研究成果

研究 1：乳児における素材質感の視聴覚統合の発達（藤崎班との共同研究）

本研究では、言語獲得以前の乳児（生後 4-8 ヶ月児）を対象に、近赤外分光法（NIRS）を使用して、素材質感の視聴覚統合に関連した脳内処理の発達過程を調べました。実験では、木や金属を叩く音とその表面材質（視覚刺激）が一致した刺激と不一致の刺激を観察している際の（図 1A）、左右側頭領域の脳血流反応を NIRS によって計測しました。

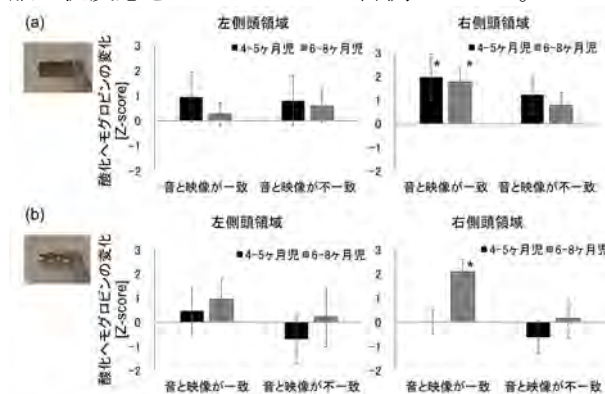


図 2. 音と視覚の一致した刺激と不一致の刺激での左右側頭の酸化ヘモグロビン (Oxy-Hb) の変化：(a) 木の素材の刺激条件、(b) 金属の素材の刺激条件

計測の結果（図 2）、右半球の側頭領域では、素材を叩く音と映像が一致した刺激に対して脳活動が上昇しましたが、素材の音と映像が不一致の刺激では脳活動の上昇はみられませんでした。一方、左半球では、どちらの刺激に対しても活動が上昇しないことが分かりました。このことから、乳児が視覚と聴覚を通して、モノの素材を認識する際には、脳の右側頭領域の処理が関わっていると考えられます。さらに、このような脳内処理は、木の素材に対しては生後 4 ヶ月から、金属の素材では生後 6 ヶ月からみ

られ、素材によって獲得時期が異なることがわかりました。このことは、その素材が乳児にとってどの程度身近であったか、その接触経験が、素材質感の視聴覚統合の獲得時期に影響すると考えられます。

研究 2：乳児の音象徴処理の脳活動

音象徴とは、音と特定のイメージとの特定の結びつきを指します。例えば、/b/や/m/などを含む語 /bouba/を丸みの帯びた図形と、/k/や/t/などを含む語 /kiki/を角張った図形と結びつける傾向があることが知られています。近年、音象徴が乳幼児の語意学習を促進することが報告されていますが、その脳内処理の発達過程は明らかにされていません。本研究は、言語獲得前の 11 ヶ月児を対象に、音象徴が一致する新奇視聴覚刺激と一致しない刺激を呈示するときの両側頭の脳活動を近赤外分光法によって測定しました。具体的には、尖った図形と /kiki/ 新奇語音声、または丸みを帯びた図形と /moma/ 新奇語音声、という音象徴一致刺激と、逆の組み合わせの音象徴不一致刺激を呈示しました (図 1B)。実験の結果、音象徴不一致刺激に比べ、音象徴一致刺激観察中に、右側頭において Oxy-Hb が上昇しました。ただし、この上昇は「moma」刺激ペアのみで観察されました。さらに、成人の音象徴処理に重要な役割を果たしている右上側頭溝付近で有意な活動が見られました (図 3)。これらの結果は、言語獲得前の乳児が音象徴を処理する多感覚統合の脳内基盤をもつことを示唆しています。

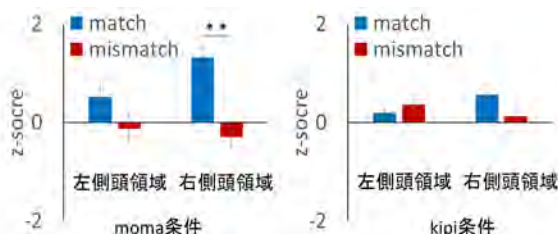


図 3. moma 条件と kipi 条件の左右側頭の酸化ヘモグロビン (Oxy-Hb) の変化

研究 3：乳児は「影の中は暗い」とみるか

本研究では、影を横切る物体を目にした時に、「影の中は照明量の減少した暗い領域」という前提から影の中の物体表面の明るさを知覚する能力が、乳児期から発達するかを検討しました。実験では、物体が影を通過する CG 動画を 2 条件作成しました。自然条件では、物体(ひよこ)表面の明るさは影を通過する際に暗く変化しました。一方、不自然条件では、物体表面の明るさは、影領域では明るく影領域外では暗く、通常と異なる不自然に変化しました (図 1C)。親近化法を用い、5-8 ヶ月児は不自然さを検出するかを調べました。CG 動画に慣れさせるため影の外側を通過する物体の動画を繰り返し提示して親近化させた後、自然条件と不自然条件を経時提示し注視時間を比較した結果、7-8 ヶ月児は不自然条件を有

意に選好することがわかりました。このことから 7-8 ヶ月児は「影の中は暗い」という前提に反した明るさ変化をする動画から、成人と同じように不自然さを検出できる可能性が考えられます。

○今後の展望

物体の質感を評価するときに、日本語では形容詞よりもオノマトペ表現の方が多く用いられます。今後の研究では、これまでの成果を発展させ、音象徴を獲得した乳児を対象とし、オノマトペの音象徴性と物体の質感知覚との関連を調べることで、言語獲得の発達までを見越した、質感知覚のメカニズムを解明する一端を担えると考えます。さらに、統合の障害を検討するため、共同研究先の病院で発達障害児を対象としたデータを取ることも考えられます。

○関連する研究発表

論文

1. [Yang J](#), [Asano M](#), [Kanazawa S](#), [Yamaguchi M K](#), [Imai M](#): Sound symbolism processing is lateralized to the right temporal region in the prelinguistic infant brain. *Scientific Reports* 9: 13435, 2019.
2. [Ujiie Y](#), [Yamashita W](#), [Fujisaki W](#), [Kanazawa S](#), [Yamaguchi MK](#): Crossmodal association of auditory and visual material properties in infants. *Scientific Reports* 8: 9301, 2018.
3. [Sato K](#), [Kanazawa S](#), [Yamaguchi MK](#): Infants' perception of lightness changes related to cast shadows. *PLoS ONE* 12(3): e0173591. 2017

学会発表など

1. [Ujiie Y](#), [Yamashita W](#), [Fujisaki W](#), [Kanazawa S](#), [Yamaguchi MK](#): Crossmodal association of auditory and visual material properties in infants. *The International Multisensory Research Forum*, Toronto, Canada, 6.14-17, 2018
2. [Yang J](#), [Asano M](#), [Kanazawa S](#), [Yamaguchi M K](#), [Imai M](#): Representation of sound symbolism in the infant brain: Investigation using the near-infrared spectroscopy. *The International Multisensory Research Forum*, Tennessee, USA, 5.19-22, 2017
3. [Sato K](#), [Kanazawa S](#), [Yamaguchi MK](#): Infants can recognize the lightness change in cast shadows. *Vision Sciences Society 16th Annual Meeting*, Florida, USA, 5.19-24, 2016

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

研究代表者 伊村 知子（日本女子大学・人間社会学部・准教授）



図（上）キャベツの葉の画像のセットを見比べて、より鮮度の高い方を選択する課題に取り組むチンパンジー。（下）アイトラッカーを用いて、チンパンジーが、メスの性皮の最大腫脹と最小腫脹のいずれを長く注視しているかを調べる実験。

○研究の背景と目的

私たちは、対象表面の光沢のような質感の違いを単に見わけるだけでなく、野菜や果物のツヤやハリからは鮮度の良さ、肌のツヤやハリからは健康状態や年齢に関する情報などのように、行動を選択する上で必要な価値評価をおこなっています。このような豊かな質感の世界に暮らすのは人間だけなのでしょうか。近年、人間に近縁な霊長類のオマキザルが、視覚のみから素材の違いを識別することや、ハチなどの昆虫類が、ハイビスカスやチューリップの花弁の表面に見られる玉虫色の光沢（iridescence）に惹きつけられることなどがわかってきました。このことから、質感の知覚は、人間以外の動物においても環境の認識や食物選択、配偶者選択など生存にとって重要な役割を果たしていることがわかります。ま

た、人間の質感の知覚もまた、もともとは生存や繁殖に有利なものとして進化してきたのかもしれませんが。本研究では、人間とその他の霊長類に共通な基盤とその発達過程を探るため、人間に最も近縁なチンパンジーや成人や児童を対象に光沢の質感知覚について検討しました。特に、チンパンジーでは、生存と関わりのある食物の光沢や、繁殖のシグナルとなる皮膚の色や光沢の知覚、選好について検討しました。

○これまでに得られた成果

（1）キャベツの葉の鮮度の識別

キャベツの葉の表面を見ると、新鮮なキャベツの葉には、ツヤやハリがあり、表面の凹凸がはっきりしているのに対し、古いキャベツの葉は、しなびていて、シワがあります。それぞれの画像の輝度の分布をヒストグラムに表すと、新鮮なキャベツの葉は明るい方になだらかに広がった分布となるのに対して、古いキャベツの葉は、左右対称に近い尖った山型の分布となります。人間は、このような輝度の分布の違いから、キャベツの表面の鮮度の違いを見分けています。飼育下のチンパンジーにとっても、キャベツは馴染みのある食物の1つですが、チンパンジーは、見た目のみからキャベツの写真の新鮮さの違いを識別することができるのでしょうか。人間のように輝度の分布の手がかりを利用することができるのかについても調べました。また、視覚による鮮度の判断は、どのような条件下でも利用可能なのでしょうか。写真を1つずつ見比べる条件だけでなく、複数のキャベツの写真を比較する条件においても正確な鮮度の判断がなされるのかどうかについて調べました。

まず、京都大学霊長類研究所の6個体のチンパンジーを対象に、キャベツの葉が時間経過に伴い劣化していく様子を撮影した10枚の写真（購入後1時間後、2時間後、3時間後、5時間後、8時間後、15時間後、19時間後、23時間後、27時間後、32時間後）の中から2つをタッチパネルモニタ上に提示し、より新鮮な方の画像を選択できるかを調べました。その結果、チンパンジーは、より新鮮なキャベツの写真の方を選択することができました。さらに、チンパンジーがどのような手がかりを利用して「鮮度」の違いを識別しているのかについて検討したところ、人間と同様に、輝度の分布に関する情報を手がかりとしていることがわかりました。

続いて、複数のキャベツの画像の全体の「鮮度」の「平均」の違いを見分けることができるかについ

て調べました (図(上)).

2 個体のチンパンジーと 8 名の成人を対象に、タッチパネルモニタ上の左右に提示された 1 枚ずつ、あるいは 6 枚ずつのキャベツの表面の画像のうち、より新鮮な方を選び、触れるという課題をおこないました。画像は 1 秒間のみ提示されました。

その結果、人間もチンパンジーも、複数の画像セットでも、より新鮮な方を選択できることが示されました。このことから、人間もチンパンジーも、「鮮度」の違いを 1 つずつ見比べて識別するだけでなく、複数の対象の鮮度の違いも瞬時に識別することが示唆されました。これまで、人間もチンパンジーも、複数の対象の大きさの違いのような特徴を識別できることは知られていましたが、鮮度のような輝度分布の情報の違いも識別できる可能性が示されました。

(2) チンパンジーの性皮の色や光沢に対する選好

チンパンジーにとって、食物の選択と並んで重要な行動の 1 つとして配偶者の選択があげられます。人間以外の霊長類では、配偶者選択においてオスがメスの顔色や性皮の色、大きさといった視覚情報が性周期を予測する手がかりとして機能していることが知られており、そうした視覚的特徴に選好注視を示すことも報告されています。チンパンジーでは性皮の腫脹が大きくなると同時に皮膚表面の色と光沢に変化が見られることから、色や光沢に対して選好が見られるかどうかについて調べました。

京都大学霊長類研究所のチンパンジーの成体 (オス 3 個体, メス 6 個体) を対象に、メスの性皮の最大腫脹と最小腫脹の画像のペア 10 枚を 1 枚ずつ 3 秒間提示し、画像提示中のチンパンジーの視線をアイトラッカーにより計測しました (図 (下))。性皮の写真は、熊本サンクチュアリの 2 個体のメス (撮影当時、11-12 歳と 8-9 歳) を対象に、午前 8 時から 9 時の間に毎日撮影したものから、最大腫脹と最小腫脹のものを 5 枚ずつ選び、性皮の部分のみが見えるように加工したものを使用しました。1 日 10 試行を 1 セッションとし、カラー画像とグレースケール画像の条件をそれぞれ 2 セッションずつ、合計 4 日間実施しました。

その結果、すべてのチンパンジーにおいて、最小腫脹よりも最大腫脹の画像の方をより長く注視する傾向が見られました。また、カラー画像、グレースケール画像にかかわらず、同様の傾向が認められたことから、少なくとも色情報のみが選好を引き起こしている訳ではないことが明らかになりました。今後、光沢の強度や大きさと選好の関係についてもさらに検討する必要があります。

(3) 児童における光沢の強さの識別

乳児を対象とした発達研究から、物体の光沢の有無を見わける能力自体は、生後 7 ヶ月頃から発達することが報告されています。一方、生後 5 ヶ月の乳

児では、輝度のパタンの違いとして区別することはできるものの、それを光沢のような質感の違いとして区別できないということも示されてきました。このことから考えると、光沢の違いを識別する能力は、必ずしも生まれもった能力ではなく、生後の経験をととして獲得していくものなのかもしれません。そこで、光沢の強さの違いを識別する能力が、乳児期以降の発達過程においてどのように変化するかを調べるため、6 歳から 12 歳の児童を対象に、CG 画像を用いて光沢の強さの違いを識別する能力について調べました。

タッチパネルモニタの画面上に呈示された 4 枚の物体画像の中から 1 枚だけ異なる光沢を持つ物体の画像を選択する課題をおこないました。物体には 2 種類の形のものをを用い、光沢の強度の違いは 3 段階用意しました。

その結果、6 歳から 9 歳半の児童よりも 9 歳半から 12 歳の児童の方が正答率は高く、9 歳半から 12 歳の児童と成人の正答率には差がないことが示されました。また、すべての年齢グループにおいて、物体の形状による正答率の違いは見られず、光沢の強度の違いが大きくなるほど、正答率は高くなりました。これらの結果から、光沢の強さの識別能力は、児童期まで発達し、成人と同じレベルに達する可能性が示唆されました。

○今後の展望

本研究の成果から、食物選択や配偶者選択のような生存や繁殖に関わる光沢の質感認知の一部は、チンパンジーにも共有されていることがわかりました。今後は、輝度情報に加えて色情報が、霊長類の食物や他者の状態の認知にどのような影響を及ぼしているのかについても検討し、霊長類の色覚の進化を理解することを目指しています。また、本研究のもう一つの成果として、光沢の質感認知の能力は、乳児期から発達し、児童期にかけて変化することがわかりました。今後、光沢以外の質感、素材の識別の発達過程についても調べることで、人間の質感認知の文化的、社会的な経験の影響についても明らかにすることが期待されます。

○関連する研究発表

論文

1. Imura T, Masuda T, Wada Y, Tomonaga M, Okajima K: Chimpanzees can visually perceive differences in the freshness of foods. *Scientific Reports* 6:34685, 2016.

学会発表

1. 伊村知子: チンパンジーにおけるアンサンブル知覚 比較認知科学の視点から. 日本心理学会第 81 回大会, 久留米大学, 9.20-22, 2017.

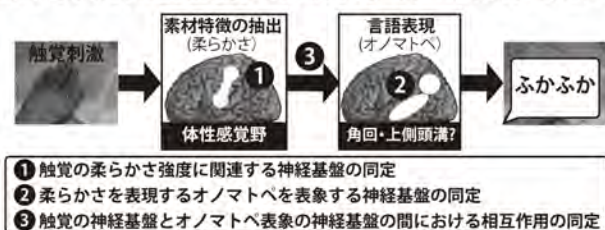
2. 伊村知子・澤山正貴・白井述・友永雅己・西田眞也: ヒト児童における光沢質感の知覚. 日本基礎心理学会第 36 回大会, 立命館大学, 12.1-3, 2017.

触覚の質感を表現するオノマトペの神経基盤

研究代表者 北田 亮 (Nanyang Technological University・Associate Professor)



脳はどのように触れた素材を解釈しオノマトペで表現するのか?



① 触れた素材の柔らかさ強度に関連した脳活動

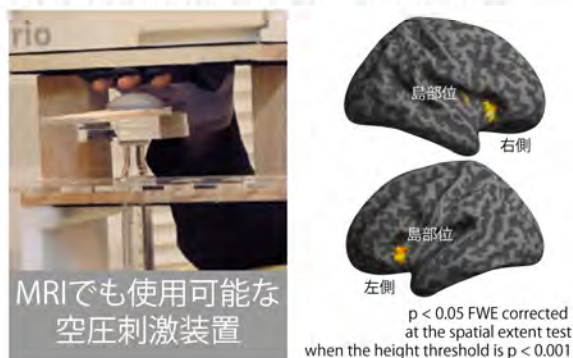


図 1. 本研究では脳が触覚から得た素材の情報をどのようにオノマトペに変えていくのかを知るため、3つのサブテーマに関する実験を実施しました(上部). 素材の柔らかさの強度に関わる脳部位を同定しました(下部).

○研究の背景と目的

私たちは物体に触れることで、その質感を直に経験することができます。従来の心理物理学研究において触覚の素材感は、粗さや柔らかさといった知覚単位で説明できるとされています。しかし実際に知覚する素材感は、多様でかつ複雑なため、知覚単位の量ではなく、「ふかふか」のようなオノマトペで直感的に表現されます。現実には即した素材の触知覚メカニズムを理解するには、素材感とオノマトペの関係性を知る必要がありますが、オノマトペを表象する神経基盤は未解明であり、触感とオノマトペの関係性を調べた脳科学研究は行われていません。この背景に基づき本研究は「脳は触れた素材の柔らかさをどのように解釈し、オノマトペとして表現するのか」について認知脳科学的に明らかにすることを目的とし、触覚の質感認知に関する認知脳科学的モデルの構築を目指します。

○これまでに得られた成果

本研究の目的を達成するためには、まず触覚によっ

て得た情報から、素材の柔らかさ強度を抽出する脳部位を同定する必要があります。これまでの研究では、物体の方位や粗さの知覚に関わる脳内ネットワークが明らかにされています。しかし柔らかさに関連する神経基盤についてはほとんど調べられていませんでした。そこで磁気共鳴画像装置(MRI)の高磁場環境下の中でも使用可能な空圧刺激装置を、計画研究の梶本班(電気通信大学)と坂本班と共同で開発しました。これらの装置を用いて、硬さの異なる3つのポリウレタンゲルを35名の参加者の中指に呈示し、参加者が硬さを推定しているときの脳活動(BOLD信号)を計測しました。その結果、両側の上前頭回・島部・右側の上前頭回内側部の活動は素材の柔らかさに応じて増加することが分かりました。さらにこれらの活動は、指に呈示される圧力に対して大きく変化することはありませんでした。つまりこの結果は、これらの脳部位が柔らかさに関する情報を抽出および表現している可能性を示唆しています。過去の研究では、島部と頭頂弁蓋部と呼ばれる脳部位が、粗さ強度や温度に関連していることが明らかにされています。今回の結果は島部が物体の素材の特徴抽出に関与するという仮説を支持しています。その一方で、一次体性感覚野が本当に柔らかさの情報の抽出や表現に関わらないのかどうか、機械学習による解析を進めていきます。

次に柔らかさの情報をオノマトペに変換するメカニズムを調べるため、2つの実験を実施しました。最初の実験ではオノマトペの処理と表現に関する脳部位について、第2の実験ではオノマトペと触覚の情報の比較に関する脳部位について調べました。今後はこれらの実験データを解析し、言葉と感覚情報の関係性について明らかにしていく予定です。

○関連する研究発表

論文

1. Yang J, **Kitada R**, Kochiyama T, Yu Y, Makita K, Araki Y, Wu J, Sadato N: Brain networks involved in tactile speed classification of moving dot patterns: the effects of speed and dot periodicity. Sci Rep 7:40931, 2017.

2. **Kitada R**, Doizaki R, Kwon J, Nakagawa E, Kajimoto H, Sakamoto M, Sadato N: Brain networks underlying tactile softness perception: a functional magnetic resonance imaging study. NeuroImage, 197:156-166, 2019.

液体粘性知覚の神経メカニズムの解明

研究代表者 眞田 尚久（関西医科大学 医学部・助教）

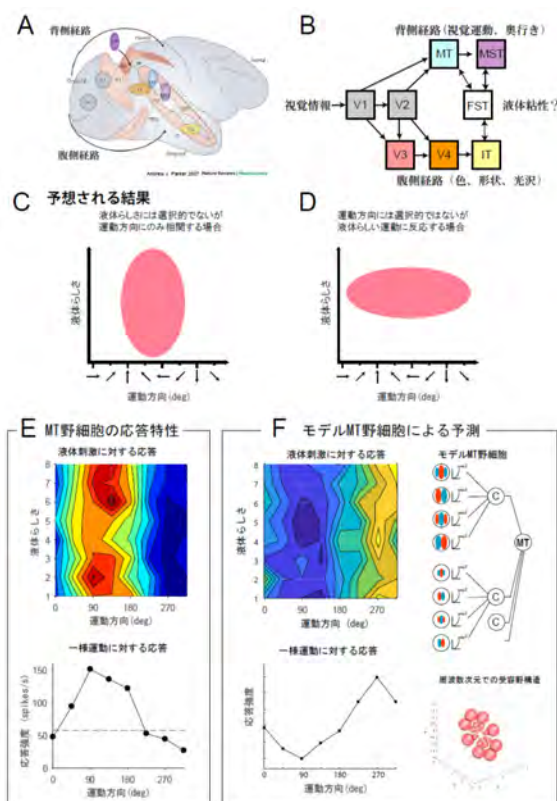


図1 A,B:大脳皮質視覚野と視覚情報処理経路の模式図。C,D:「液体らしさー運動方向」の刺激空間と、予想される神経細胞の応答特性。運動方向のみに選択性を示す場合は縦長に(C)、液体らしさに選択性を示す場合は横長のパターンとなる(D)。E:MT野神経細胞から実際に計測した、液体粘性刺激に対する応答特性と、一様運動に対する応答特性。液体らしさには感受性を持たないため、縦長の応答パターンが観察された。F:モデルMT野細胞を構築し、液体粘性刺激に対する応答を予測した。Eで示した結果と同様、縦方向に伸びた応答パターンが観察された。

○研究の背景と目的

大脳皮質における視覚情報処理は、背側経路と腹側経路の二つの経路で処理され(図1A)、これまでの研究から背側経路では視覚運動や奥行きが、腹側経路は色や形状などの情報が処理されていると考えられてきました(図1B)。

近年、視覚生理学研究分野では、素材や光沢感など物体の質感の脳内表現が調べられるようになってきています。腹側経路V4野やIT野における研究で、素材やテクスチャ、光沢感などの物体の質感に選択

的に反応する細胞の報告がされました(Okazawa et al. 2014, Nishio et al. 2011, 2014)、これらの質感情報処理の研究では静止画像が主に用いられてきました。質感知覚は、液体運動など動きの情報からも得ることができますが、視覚生理学の運動視研究は従来、ランダムドット運動などの単純な視覚刺激を用いて調べられてきており、液体運動の様な複雑運動がどのように表現されているのかはあまり研究されてきませんでした。

本研究では、運動による質感知覚(液体粘性知覚)が脳内でどのように表現されているかを調べるために、近年報告された液体粘性の知覚判断と相関する高次運動統計量(Kawabe et al. 2015)を視覚刺激生成に適用することで、液体粘性知覚が高次視覚領野でどのように表現されているかを明らかにします。

視覚運動情報は、大脳皮質視覚運動関連領野MT野で処理されていることが知られており、さらに高次の視覚領域と考えられるFST野も複雑運動情報処理に関わっていると考えられています。

MT野神経細胞の応答特性を調べた過去の研究では、ランダムドットパターンが一定の方向/速度に運動する視覚刺激(一様運動)をサルに見せることで神経細胞の運動パラメータに対する選択性が調べられてきました。高次皮質FST野細胞は、複数の運動ベクトルの組み合わせに選択的に応答することが知られており(Rosenberg et al. 2008, Mysore et al. 2010)、液体粘性運動がFST野で表現されている可能性が考えられます。

○研究成果

まず、Kawabeら(2015)が報告した高次運動統計量を用い「液体らしさ」の刺激軸を作成しました。運動方向ごとに液体らしさが異なる刺激を生成することで、「液体らしさー運動方向」の刺激空間を作り、個々の刺激条件に対する神経細胞の応答特性を電気生理学的に記録しました。運動方向選択的に応答するタイプの神経細胞であれば、「液体らしさー運動方向」の刺激空間で、縦方向に伸びたような応答パターンが観察されるはず(図1C)。それに対して、液体らしさに感受性を示す場合は横方向に伸びた応答特性が得られると予想できます(図1D)。一様運動の情報処理を担っていると考えられるMT野の神経細胞から記録を行った結果、縦に伸びた応答パターンが観察されました。運動方向には選択的な応答を示しましたが、液体らしさには感受性がないことが分かりました(図1E)。この縦方向に伸び

た応答特性は、MT 野神経細胞モデルによって再現できることが確認できました(図 1F)。

○今後の展望

MT 野から更に神経応答を記録し、液体粘性の情報表現を明らかにします。さらに、FST 野から同様の刺激で記録を行い、MT 野神経細胞とどのような違いがあるのかを明らかにしていきます。

○関連する研究発表

論文

1. Sanada T.M., Namima T., Komatsu H., Comparison of the color selectivity of macaque V4 neurons in different color spaces., J Neurophysiol. 2016 Nov 1;116(5):2163-2172. doi: 10.1152/jn.00108.2016

学会発表など

1. Sanada T., M., Komatsu H., Chromatic interaction profile in macaque area V4, 46th Annual Meeting of the Society for

Neuroscience, San Diego, Oct, 2016. (Poster presentation)

2. 眞田尚久, 河邊隆寛, 西田 眞也, 小松英彦, 視覚運動による質感表現への生理学的アプローチ, 質感のつどい第3回公開フォーラム, 大阪, 2017年11月22日(ポスター発表)
3. 眞田尚久, 河邊隆寛, 西田 眞也, 小松英彦, 複雑運動刺激に対する MT 野細胞の応答特性, 第21回視覚科学フォーラム, 豊橋, 2017年9月28日(ポスター発表)
4. Sanada T., M., Komatsu H., Responses to single colors cannot predict chromatic interaction profile in macaque area V4, V4 野細胞における色の相互作用特性は単色に対する応答では説明できない, 第39回 日本神経科学学会, 横浜, 2016 (口頭発表)
5. 眞田尚久, 小松英彦, 大脳皮質 V4 野神経細胞の色の組み合わせに対する反応特性, 第63回中部生理学会, 2016, 岡崎(口頭発表)

新奇食品に対する感性的質感認知の解明 ー食用昆虫を例としてー

研究代表者 和田 有史（立命館大学食マネジメント学部・教授）

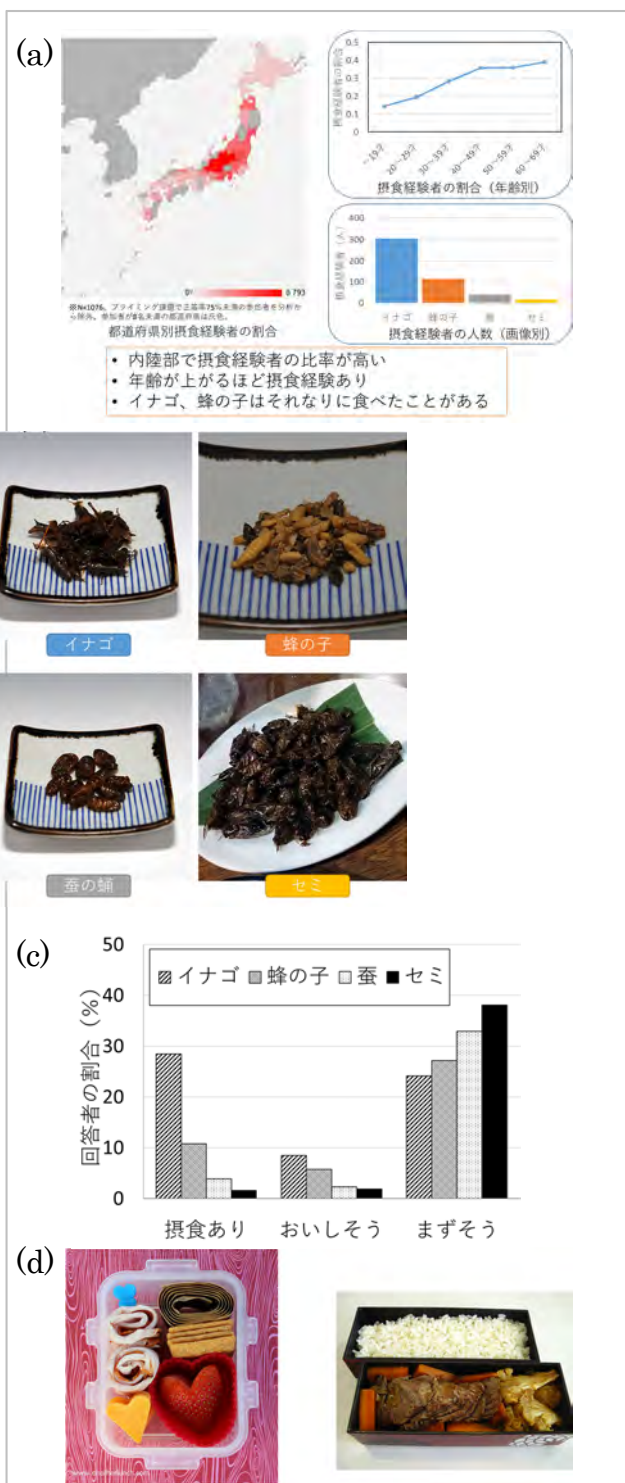


図1 (a)食用昆虫調査参加者の統計. (b)食用食品の画像の例. (c)食品に対する印象.(d)調査対象になった弁当画像の例.

○研究の背景と目的

我が国の多くの地域でイナゴの佃煮は消費されてきた一方で、昆虫の摂食経験がなく、昆虫を見るだけでも嫌悪感を抱く方もいます。対象に対して生じる嫌悪や嗜好のような感情を、本領域では感性的質感と呼んでいます。この公募研究では、同じ昆虫食画像でも、それによる感性的質感が経験によって大きく異なることを数値化して表すことを目的としています。例えば、昆虫食が盛んな地域では普通の食習慣として食用昆虫が存在するため、昆虫が調理されて皿にのっている状態は嫌悪対象にならない一方で、そのような習慣が少ない地域では、嫌悪対象になるでしょう。本研究では、こうした経験によって生じる食品に対する感性的な質感の違いを計量的に捉えようとしていました。

また、一般的な食品でも食事の外観から受ける印象に個人差が存在すると思われます。人の属性によって好みが変わるというステレオタイプもありますが（例えば、女性よりも男性はお肉が好きそう、など）、それは実際に皆さんと共通しているのでしょうか？またそのような偏りは写真から得られる統計量と相関するのでしょうか？それらを検討するために、弁当画像の印象について調査も行いました。

○これまでに得られた成果

現在の日本の各地域の方たちがどの程度、昆虫食の経験があるのかを探るためにクラウドソーシングによる実験を行いました。実験参加者 1,057 名についての結果を集計しました。参加者の県別の被験者割合はほぼ人口統計の割合と一致しました（相関係数=0.98）。これは、本調査の結果が我が国の人口分布を反映したものであることを示しています。アンケート調査の結果を見ると、昆虫食経験者は内陸部に多く存在することが示されました（図 1a）。また、摂食経験者の割合は 10 代では 15%程度ですが年齢が上がるにつれて増えて、40 代以上では 30%を越えました。これは現状において、若年であるほど昆虫食経験が少ない傾向にあることを示しています。各昆虫の摂食経験については、イナゴについては 28.4%、蜂の子 10.8%、蚕の蛹 4.0%、セミ 1.6%の方が食べたことがあると答えました。

各昆虫食食品画像（図 1b）を参加者に見せて“おいしいそう”に見えると答える人数は、摂食経験と比例しています。すなわち、イナゴにおいて“おいしいそう”と答える割合が高く、蜂の子、蚕、セミの順に減

少しします。その一方で、ネガティブな評価は摂食経験に反比例します (図 1c)。これは摂食経験と、食品に感じる好悪という感性的な質感に強い関係があることをはっきりと示しています。

また、昆虫食画像が食品としての認識がされやすいかどうかを、意味的プライミング課題という潜在的な態度を測定する手法で測定しました。まず先行刺激としてコンピューターの画面に食品画像、動物画像、昆虫食画像のどれかを参加者に見せました (0.5 秒間)。その後食品名か動物名を画面に出して、参加者に食品か動物かをできるだけ早く正確に答えてもらいました。この課題では、先行刺激と単語が心の中で関連が強い場合は正確に答えられる一方で、関連が弱いと不正解が多いといわれています。この結果、先行刺激が食品、動物の場合は単語の判断については、先行刺激と対応した単語の時に正答率が高かった一方で、昆虫食の時は動物と食品の単語の正答率に差はありませんでした。これは、昆虫食品は一般の食品とは異なるものとして認識されている可能性があることを示唆しています。

実食を伴う調査では、多くの未経験者は見た目だけで調理済みの昆虫を観察した印象では、ふやけた食感やくさみを予想していましたが、実食後はそれらが払拭されることが分かりました。また、食味の印象も向上しますが、外観の嗜好性については目立った変化はありませんでした。これらは未経験者にとって昆虫食は外観と、その後に経験した食味にギャップが存在し、実際に食べてみると予想よりもおいしく感じる人が多いが、外観の嗜好性は少ない経験では変化しないことを示唆しています。

弁当画像の印象調査についてはクラウドソーシングを利用して、2,120 名の参加者に弁当画像についてのアンケート調査を行いました。弁当画像はインターネットで公開されている画像を収集し、1,900 枚の弁当画像を選定しました。これらの画像について画像統計量を計算し、 L^* 、 a^* 、 b^* 、彩度 (a^2+b^2 の平方根)、それぞれの平均、標準偏差、歪度、尖度、さらに平均色相と色相の一致度 ($4 \times 4 + 2$ 変数) について、第一、第二主成分をもとに 19 カテゴリに画像を分類しました。図 1(d) は調査に用いた画像の例です。このように画像のピクセル情報から得られる統計量から得られた各カテゴリから 40 枚ずつを実験に用いました。クラウドソーシングを利用し、一人の参加者は各カテゴリからランダムに選択した 2 枚と、全参加者に共通で 3 枚、合計 41 枚の画像を評価しました。

画像統計量と評価の間の相関を分析した結果、 $L^*a^*b^*$ 表色系における L^* 、 a^* 、 b^* の標準偏差と「女性向け」、「若者向け」という評価との相関が高いなどの傾向が見出されました。この傾向は色合いが多彩であるほど「女性向け」、「若者向け」という評価が高まることを示しています。このことから、画像統計量と弁当の画像の評価の間に関連がある可能性を

示しています。その一方で単純に「おいしそう」という評価につながる画像統計変数はみつかりませんでした。その他の要因を探り出すにはより複雑な変数を分析する必要があるでしょう。

○関連する研究発表

論文

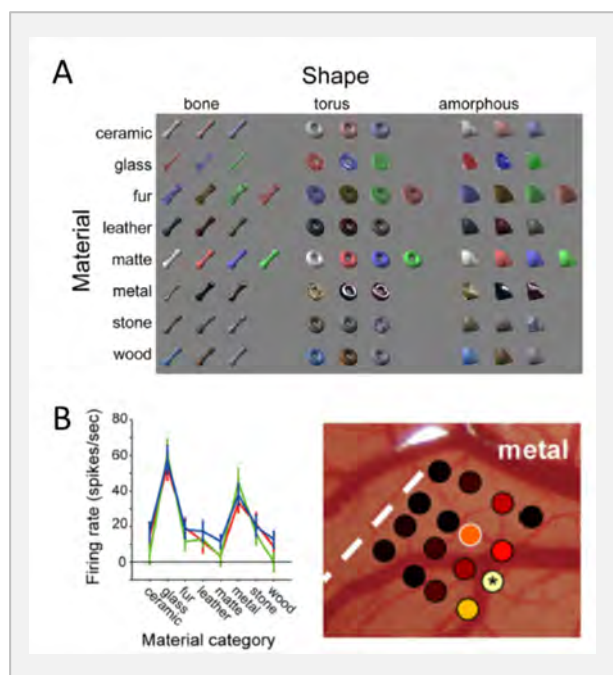
1. Kakutani, Y., Narumi, T., Kobayakawa, T., Kawai, T., Kusakabe, Y., Kunieda, S., Wada, Y., Taste of breath: the temporal order of taste and smell synchronized with breathing as a determinant for taste and olfactory integration, *Scientific Reports*, 7:8922, 2017.
2. 松原和也・和田有史. 食品の非破壊評価技術 (第 6 回) 画像の分析, 食品と容器, 55(12): 716-720, 2017.

学会発表

1. 松原和也, 角谷雄哉, 山田祐樹, 木村敦, 曲山幸生, 宮ノ下明大, 日下部裕子, 和田有史: 昆虫の可食性に関する顕在的・潜在的態度, 日本視覚学会 2017 年冬季大会, NHK 放送技術研究所, 2017.
2. 松原和也・角谷雄哉・山田祐樹・木村敦・曲山幸生・宮ノ下明大・日下部裕子・和田有史: 昆虫食の摂食経験と潜在的態度に関するインターネット調査を用いた検討, 日本官能評価学会 2017 年度大会, 東京家政大学, 2017.
3. 角谷雄哉・鳴海拓志・小早川達・河合崇行・日下部裕子・國枝里美・和田有史: 呼吸と連動した後鼻腔経路嗅覚刺激による味覚強度増強効果—味質による効果の違い—, 日本官能評価学会 2017 年度大会, 東京家政大学, 2017.
4. 松原和也・角谷雄哉・和田有史: 昆虫食に関するインターネット調査と介入試験, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 2018, 東北大学, 2018.
5. Matout, H., Wang, H., Hatori, Y. Sato, Y., Matsubara, K., Wada, Y., Tseng, C., Kuriki, I., Shioiri, S.: Convolutional Neural Networks for humanlike Image Assessment, The 15th Asia-Pacific Conference on Vision, Ritsumeikan University, 2019.

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

研究代表者 宮川尚久 (量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 主任研究員)



図説 1: A) 様々な表面素材感と 3 次元形状を持つ刺激画像。B 左) 計測された代表的な刺激画像の選択性グラフ。線の色は形状を表す(赤:骨型、緑:ドーナツ型、青非定型)。B 右) 金属刺激に対する反応性マップ(論文 1 より改変)。

○研究の背景と目的

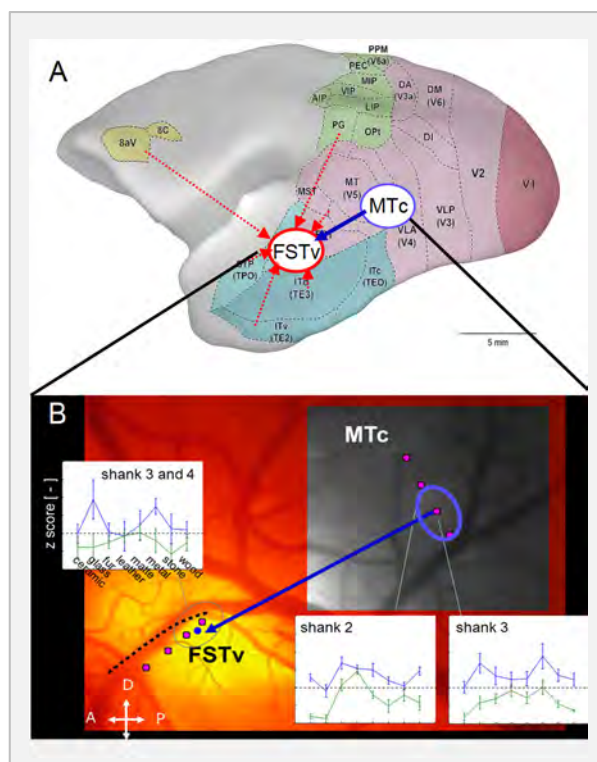
光沢感の知覚は物体の材質や表面状態の認知において重要な役割を持ち、実際に霊長類で光沢に反応する特別な脳領域の存在が先行研究で知られていました(Okazawa ら 2012, Nishio ら 2012)。小型霊長類のマーモセットは、高い視覚認知能力を持ちながら溝の少ない大脳皮質を持つため、神経回路の生きた状態で可視化や(図 2B)、その回路の選択的な活動操作に向けた実験動物です。我々は、マーモセットで上記の方法を用い、光沢に反応する神経ネットワークの同定を目的として研究を行いました。

○これまでに得られた成果

これまで我々は麻酔下のマーモセットに、ガラスや金属など光沢を持った画像を含む視覚刺激セットを提示しながら、側頭葉の高次視覚皮質より神経活動を計測し、領域 FSTv に光沢画像に選択的に反応する神経細胞があることを初めて報告しました(論文 1: Miyakawa et al., 2017)。また FSTv へ投射する神経細胞を逆行性蛍光トレーサーで標識し、脳溝が

少ない新世界ザルの特徴を生かして *in vivo* で同定しました。図 2A において矢印で示した複数の領域から FSTv への神経軸索投射があること、そのうち領域 MTc では FSTv の光沢選択性領域に投射する部位(図 2B 青○)には同じく光沢に反応する神経細胞があり、そこを外れると光沢選択性の神経細胞が存在しないことを発見しました。MTc 光沢応答性神経細胞群は、FSTv の細胞群とは異なり、視覚応答の大部分が低次元な画像特徴量の線形的な組み合わせで説明できることを見出しました(図 2B, 学会発表 1: Miyakawa et al. 北米神経科学会 2016)。

しかし、FSTv 光沢選択性部位は MTc 以外にも腹側経路のより高次の領域および前頭葉外側からも大量のフィードバック入力を受けており(学会発表 1: 北米神経科学会 2016)、また MTc から FSTv への神



図説 2: マーモセット側頭葉の光沢選択性神経回路 A) マーモセット大脳視覚関連領域(Solomon and Rosa 2014 より改変)。FSTv に光沢選択性神経細胞があり、矢印で示した領域から FSTv への神経投射があることを発見しました。B) MTc の中で FSTv の光沢(ガラスと金属)選択性領域に投射する部位は光沢に反応するが、そこを外れた部位は光沢に反応しないことを発見しました(学会発表 1 より改変)。

経投射を光遺伝学的手法で抑制しても FSTv 神経細胞の光沢選択性は有意に影響されないという予備的な結果も得られました。

これらの研究を行う上での技術開発の一環として、神経トレーサーで可視化した遠距離軸索投射を 3 次元的に可視化する手法を開発しました。大脳皮質に蛍光トレーサーを注入したマーモセットの脳を、薄切切片化して超高解像度で撮像し、切片のゆがみを補正して 3 次元再構成することで、3 次元での可視化が可能となりました(論文 2 : Abe et al., 2017)。

○今後の展望

学会発表 1: 北米神経科学会 2016 では、FSTv へ投射する神経細胞の逆行性投射を、動物が生きた状態で蛍光により可視化しましたが、薄切脳切片による免疫染色という、より信頼度の高い染色方法によりこれを確認し、論文へとまとめます。

○関連する研究発表

論文

1. ***Miyakawa N**, *Banno T, Abe H, Tani T, Suzuki W, Ichinohe N (*co-first authors): Representation of glossy material surface in ventral superior temporal sulcal area of common marmosets, *Frontiers in neural circuits*, 11 17, (2017)

2. Abe H, Tani T, Mashiko H, Kitamura N, **Miyakawa N**, Mimura K, Sakai K, Suzuki W, Kurotani T, Mizukami H, Watakabe A, Yamamori T, Ichinohe N: 3D reconstruction of brain section images for creating axonal projection maps in marmosets, *Journal of neuroscience methods*, 286 102-113, (2018)

学会発表

1. **Miyakawa N**, Banno T, Abe H, Tani T, Suzuki W, Ichinohe N: Representation of glossy material surface in common marmoset temporal visual cortex, *Society for Neuroscience 16th Annual Meeting*, San Diego, USA, 6.6-10, 201, (2016)

顔の質感情報の時間的コーディングの研究

研究代表者 菅生 康子（産業技術総合研究所・人間情報研究部門・主任研究員）

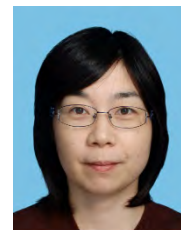


図1 A、実験背景についての概念図。B、実験に用いた質感の異なる顔画像例。質感の変化では、光沢を強調または減弱させる、あるいはスタイル変換の手法で顔の質感を織物の質感へと変化させました。C、顔応答性ニューロンの活動例。横軸は刺激提示（0 ms、縦黒線）からの時間経過。この例の場合、スタイル変換した顔画像を見せた際の活動強度は弱く、刺激提示後の活動開始も遅れています。すなわち、スタイル変換の影響が時間的に早くから観察されます。D、Cのニューロン活動について、顔表情の選択性を顔の質感の違いで比較しました。光沢の強調（2行目）・減弱（3行目）では、表情の選択性（口を閉じた顔に応答が強い）が保たれています。一方、スタイル変換（4行目）では、表情の選択性が異なっています（応答は弱くなり、口を大きく開けた顔にやや強くなる）。

○研究の背景と目的

質感は、我々が外界の事物の状態を見分けるため

に重要な情報です。日常生活に存在する自然な物体についての質感認知を理解することを目指し、社会生活に重要な顔の質感をコードする脳の仕組みを明らかにすることを目的としています。私たちが顔を見るとき、眼、鼻、口などの形やそれら相互の距離など造作の形態情報から個体や表情を認知します。また、肌や眼、髪などの質感情報から、年齢や体調などを推し量ることができます。この能力は、肌や目、髪などの材質に対してより詳しく質感を見分ける、という、形態情報処理と質感情報処理を統合する脳の仕組みによって可能になると考えられます。

顔の形態情報の処理については、これまでの研究から、一次視覚野で顔要素の輪郭が処理され、その情報が腹側視覚経路の二次および四次視覚野で順に処理され、最終段階の側頭皮質では顔として識別されたと考えられています。側頭皮質には顔の造作要素（目鼻口など）間の距離を表現するニューロンが存在します（Yamane et al., 1985; Freiwald et al., 2009）。また、側頭皮質のニューロンは、ヒトかサルかを分類する情報に遅れて個体・表情を分類する情報をコードします（Sugase et al., 1999）。さらに機能的核磁気共鳴画像（fMRI）を用いた実験により、腹側視覚経路にそって顔画像に対して活動を上昇させる複数の顔領域が特定されました（図1AのML、AL、およびAM。Tsao et al., 2006, 2008）。側頭皮質の最前部顔領域AMが顔の向きに依らない個体識別についての情報を時間的に遅れて表現することが報告されています（Freiwald and Tsao, 2010）。

質感情報については、fMRIを用いた研究により、サルの下側頭皮質後部および中部に、材質や光沢の情報をコードする領域があることが明らかになりました（図1AのPITおよびCIT、Okazawa et al., 2012, Goda et al., 2014）。これらの部位と顔領域には重なりや寄与が多少あることが報告されています。すなわち顔の情報処理に、質感の情報処理が関わることが示唆されていますが、その詳細は明らかではありません。

本研究では、顔の質感の知覚について、情報の時間的コーディングという観点から研究を進めています。サルの側頭皮質からニューロン活動を記録し、顔に対する応答を調べます。顔応答性ニューロンは、個体や表情の情報に加えて、顔の質感情報をどのようにコードしているのか、それら情報処理の時間的ダイナミクスについて明らかにします。

○研究成果

質感の異なる顔画像セットを作成しました (図 1 B)。画像の輝度チャンネルの正の成分を変更し

(Boyadzhiev et al., 2015)、光沢を強調または減弱させた顔画像、および、スタイル変換の手法で顔の質感を織物へと変化した画像です (Matsuo and Yanai, 2016)。これらの顔画像セットを用いて、サル 1 頭の側頭皮質から 51 個の単一ニューロン活動を記録しました。

その結果、側頭皮質の顔応答性ニューロン活動の強度に、顔の質感変化の影響が観察されることが分かってきました。図 1 C の例は、スタイル変換の影響を受けるニューロン活動の例です。スタイル変換した顔画像を見せた際には、活動強度が弱くなり (水色曲線)、刺激提示後の活動開始も遅れます。また、顔表情に対する選択性を質感の違いで比較すると

(図 1D)、光沢変化では表情の選択性が保たれますが、スタイル変換では異なる表情に選択性を示していました。他のニューロンについても、元の顔画像に対する選択性と質感を変化させた画像に対する選択性とを比較したところ、スタイル変換では光沢変化よりも、選択性が異なるニューロンの割合が多いことが分かりました。相互情報量としても算出したところ、スタイル変換画像は表情についての情報量を減少させることが分かりました。

時間的ダイナミクスについては、光沢の違いの影響は画像提示後の遅いタイミングで、スタイル変換の影響は画像提示後の早いタイミングから観察され

ました。以上の結果から、光沢の違いとスタイル変換は、異なるメカニズムで顔表情の情報処理に影響を与えることが示唆されます。

○今後の展望

側頭皮質の顔応答性ニューロンの活動における顔の質感変化の影響を、複数頭の実験動物で確認するとともに、顔以外の物体や物体の質感変化に対するニューロン活動も調べ、顔画像に特異的に観察される情報処理かどうかを明らかにしたいと思います。

○関連する研究発表

論文

1. Kuboki R, Sugase-Miyamoto Y, Matsumoto N, Richmond BJ, Shidara M. Information accumulation over time in monkey inferior temporal cortex neurons explains pattern recognition reaction time under visual noise. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, doi: 10.3389/fnint.2016.00043, 2017.

学会発表など

1. Sugase-Miyamoto Y, Matsumoto N, Mototake Y, Kawano K, Okada M: Upright and inverted faces are separately represented in feed-forward processing in the visual cortex, *Neuroscience* 2017, Washington DC, USA, 11.14, 2017

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

研究代表者 藤崎 和香（日本女子大学 人間社会学部・准教授）



咀嚼筋電音フィードバックによる食質感の変容

○研究の背景と目的

食感知覚は予測、意思決定、身体制御、感覚運動フィードバックなどを含んだ、多感覚的、適応的、能動的なプロセスの結果としても生じます。食質感知覚はこのようなプロセスについて考える最適の題材です。それは食質感知覚には「食べる」という能動的な動作によってもたらされる感覚フィードバックの情報が大きく貢献しているためです。

これまで咀嚼音をフィードバックして食質感を変容させる様々な研究が行われてきましたが、フィードバックの時間ずれや利用できる食品の物性上の制約が課題でした。私たちは近年、咀嚼に完全に同期したフィードバック音をあらゆる物性の食品について返すことができる画期的な手法を考案しました。それは咀嚼音そのものではなく咀嚼時の咬筋の筋電波形を音に変換したものをフィードバックするという手法です。

本研究ではこの手法を発展させた一連の研究により多様な食質感を認識する人間の情報処理の仕組みを解明することを目的とします。

○これまでに得られた成果

まずは単純に筋電波形をそのまま音に変換してリアルタイムにフィードバックしただけでも、噛みごたえやざらざら感といった食質感が変化すること、さらに高次質感（高級感、新鮮さなど）や行為主体感（食べている実感など）が変化することを示しました。この成果は *Physiology & Behavior* 誌に掲載されました (Endo, Ino & Fujisaki, 2016)。

次に、咬筋の筋電波形のエンベロープを取り出して任意の音信号を振幅変調して出力できるように装置を改良し、漬物の音を連続的に繋いだ音信号を筋電波形のエンベロープで振幅変調してフィードバック

クする実験を行いました。その結果、筋電音をそのままフィードバックするよりも、介護食の漬物を噛んだ時の違和感を減少させることに成功しました。この成果はヒューマンインターフェースシンポジウム 2016 で優秀プレゼンテーション賞を受賞し（遠藤・金子・井野・藤崎, 2016）、また同内容の論文が、*Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics* 誌に掲載されました (Endo, Kaneko, Ino & Fujisaki, 2017)。

さらに、健常高齢者を対象にした実験を行い、高齢者であっても一般成人と同様に、咀嚼筋電音フィードバックによる食質感の変容効果が生じることを示しました。この成果は、*Appetite* 誌に掲載されました (Endo, Ino & Fujisaki, 2017)。

現在は、疑似咀嚼音の種類を 14 種類に増やすと同時に、評価軸に形容詞対だけでなくオノマトペを加えた実験を行い、結果について詳細な分析を進めています。また、さらなる装置の改良を進めています。

○関連する研究発表

論文

1. Endo H, Ino S, Fujisaki W: The effect of a crunchy pseudo-chewing sound on perceived texture of softened foods., *Physiol Behav.*, 167:324-331, 2016.
2. Endo H, Kaneko H, Ino S, Fujisaki W: An attempt to improve food/sound congruity using an electromyogram pseudo-chewing sound presentation, *JACIII*, 21(2), 342-349, 2017.
3. Endo H, Ino S, Fujisaki W: Texture-dependent effects of pseudo-chewing sound on perceived food texture and evoked feelings in response to nursing care foods, *Appetite*, 116,493-501, 2017.

学会発表など

1. Fujisaki, W, Ino, S, & Endo, H: Auditory modulation of material properties of food by pseudo-mastication feedback sound generated from EMG signal, 31st International Congress of Psychology, July 24-29, 2016, Yokohama, Japan
2. Endo, H, Ino, S & Fujisaki, W: Improving the palatability of nursing care food using a pseudo-chewing sound generated by an EMG signal, HCI International 2016, July 17-22, Tronto, Canada

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

研究代表者 嵯峨 智（熊本大学大学院先端科学研究部・准教授）



図 1 触覚情報収集システムと機械学習による分類
目指します。

○これまでに得られた成果

触覚の知覚強度と触感の評価実験を行うことで入力波形と知覚刺激との関連性を調査し、評価結果と波形の特徴を比較し考察を行いました。この結果、知覚強度は波形とその周波数成分によって変化すること、触感はどの波形や周波数を変えても粗いや硬いといったテクスチャ表現のオノマトペに集中することがわかりました。今後は、波形に対する知覚強度と触感をモデル化と、指の動きに合わせた触覚提示による触感表現の拡張を目指します。

また、ZigBee を用いた手軽に日常の触覚情報を収集できるシステムを実装し、本システムによる触覚情報収集を実現しました。また、収集した触覚情報のための畳み込みニューラルネットワークの構築と分類を実施し、30 種の異なるテクスチャの分類において、精度約 90%を達成しました。今後は、触覚速度が分類に与える影響を考察してゆきます。

○関連する研究発表

学会発表など

1. Hirobumi Tomita, Satoshi Saga & Hiroyuki Kajimoto. Onomatopoeic-based Classification of Generated Sensation on Electrostatic Tactile Display. In *Proceedings of IEEE WorldHaptics 2017*, WIP-26, 2017.
2. Shotaro Agatsuma, Shinji Nakagawa, Tomoyoshi Ono, Satoshi Saga, Simona Vasilache & Shin Takahashi. Classification Method of Unknown Haptic Information Using Convolutional Neural Network. In *Proceedings of International Conference, HCI International 2018*, 2018. (in press)

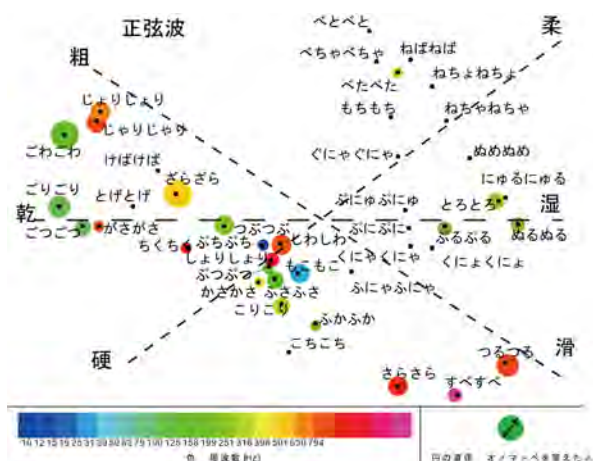


図 2 静電気力による触覚ディスプレイ(上)と、さまざまな入力波形に対するオノマトペ表現(下)

○研究の背景と目的

近年、スマートフォンの普及とともに触覚技術への期待が増大しています。しかし未だ表示された仮想物体そのものに触れるインタラクションは、直感的とは言えないものに留まっています。これは触覚そのものが入力と出力を同時に備えた感覚にもかかわらず、入力装置としてのタッチパネルのみが普及していることに起因します。そこで我々はタッチパネル上での仮想物体との触覚フィードバックを伴う直感的かつインタラクティブな操作の実現を目指します。

また、こういったさまざまな触覚を提示する触覚ディスプレイの普及に伴い、提示すべき触覚情報を効率的に収集分類し、適切な触覚コンテンツデザインをすることが必要になってきました。これにあわせ我々は、さまざまな日常的な触覚情報をコピキタスセンサにて収集し、機械学習による分類を通じて、さまざまな触覚コンテンツを生成する手法の実現を

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の基盤技術の構築



研究代表者 小泉 直也（電気通信大学 大学院 情報理工学研究科・助教）

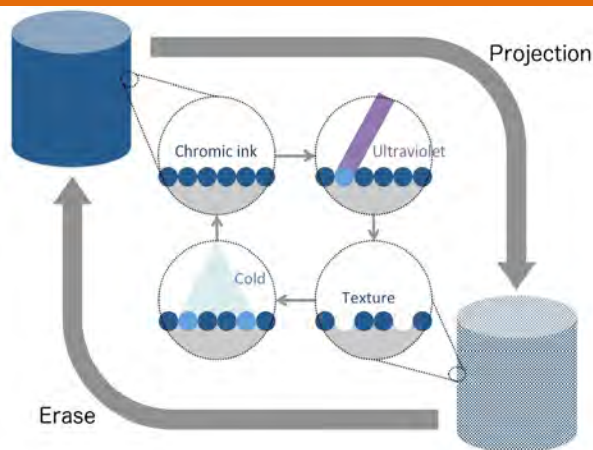


図1 発色型情報提示の原理

○研究の背景と目的

本研究の目的は、質感プロジェクタの実現に向けた光線制御型エネルギー投影手法の試験的実装を行うことです。コンピュータグラフィックスの中では、テクスチャマッピングによって質感を容易に書き換えることができます。このような方法を実世界で実現することができれば、物理世界と情報世界の融合を実現する有力な手法になります。そこで本研究では書き換え可能な実物体質感制御の実現を目指すことにしました。本提案の基本概念は、物体の表面に化学反応の生じる物質を塗布し、そこにエネルギーを投影して化学変化を生じさせることで、表面の繰り返し書き換えを実現するものです（図1）。研究目的を達成するために、レーザーをエネルギー源として光学系によって投影することで、対象に質感を投影できる手法を開発します。本研究ではこれまでの技術を発展させ、質感の書き換えを繰り返し実施できる手法を目指します。

○これまでに得られた成果

提案する発色制御層・色彩層・対象物・レジストレーション層の多層構造を提案しました。人の目に近い方から、発色制御層・色彩層・対象物・レジストレーション層と並べます。発色制御層には黒色の双安定性クロミックインクを塗布し、可視光の発色または吸光の調整を行いました。このインクは、65度以上で消色し、-10度以下で復色する特性を持ちます。そこへレーザーによって熱を加え、発色制御層の黒色を消色し、可視光の吸光から透過へと切り替えます。これによって、その下層に配置された色彩層の色が見えるようになります。この色彩層

に CMY などの多色ドットパターンをあらかじめ印刷しておき、色彩の提示を行いました。本提案手法では、色彩層の印刷対象として赤外線透過素材を使用しました。さらに最下層にレジストレーション層に赤外線を吸収するインクで印刷しておくことで、両面印刷情報を用いて位置合わせができます。これによって赤外線を用いてレジストレーションパターンを認識できるようになりました。この多層構造を図2に示します。

試験的実装として、赤外線を透過する黒色クロミックとインクジェットプリンタカラーインク、赤外線を吸収するインクジェットプリンタ黒色インクを使い分け、発色と位置合わせを実施するための構造設計を行い、実際に選択的に発色内容を変更した様子を図3に示します。

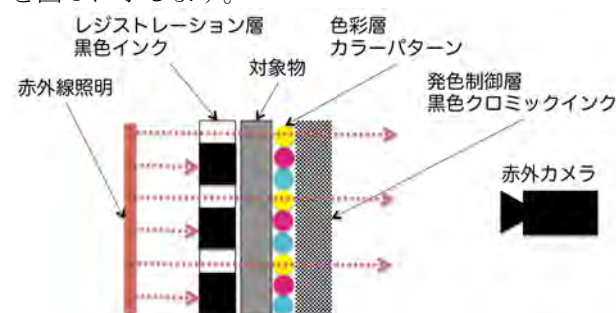


図2 多層構造による多発色の発色型情報提示技術

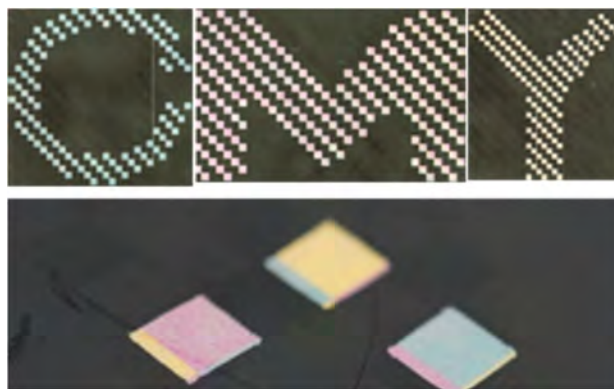
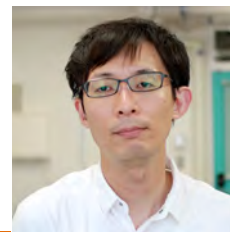


図3 選択的発色の様子

○関連する研究発表

学会発表

1. 小泉 直也, 水原 遼. 多層印刷による多発色型情報提示手法の基礎検討. 情報処理学会 インタラクシオン 2017, インタラクシオン 2017 論文集, pp. 397 - 400, 2017



研究代表者 渡辺 義浩（東京工業大学 工学院 情報通信系・准教授）

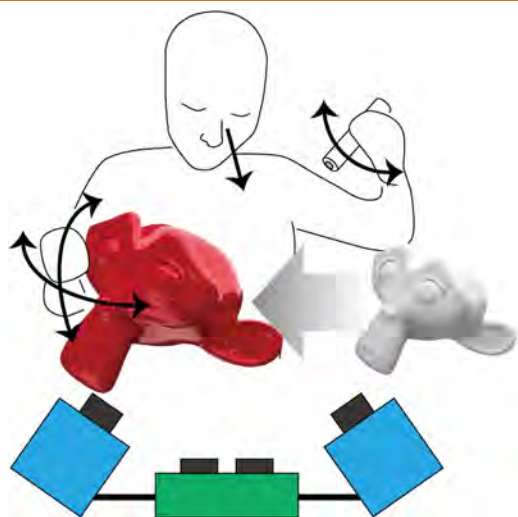


図 1. 動的質感再現のコンセプト。高速なカメラによって、運動する物体を認識し、高速なプロジェクタによってその形状・運動に応じた質感を遅れなく投影します。これによって、現実の物体と仮想的な質感を融合させます。

○研究の背景と目的

視点と物体と光源の配置を人間が能動的に変化させることで知覚される視覚情報は、質感の理解を深める上で重要な役割を担っています。しかし、このような動的に変化する視覚情報を、実世界上に自在に再現する技術の実現は困難でした。ボトルネックは、実世界や体性感覚と仮想的な再現情報の間で、時空間的整合性が崩れていることにあります。本研究では、この限界を高速なセンシング・ディスプレイ技術によって打破します。具体的には、1,000fps・ms オーダ遅延の超高速視覚センシングとプロジェクタ技術を基盤として、動的に変化する実世界と仮想質感を、人間の知覚レベルで完全に融合させるシステム技術を創出します。人間の知覚限界を超える高速な性能を駆使するとともに、無拘束・非接触の要請を満たしたシステム技術を構築することで、静的・準静的環境に制限されていた質感再現技術を次のレベルへ引き上げることを目指します。

○研究成果

対象の 3 次元位置と姿勢を高速に取得可能なマーカ

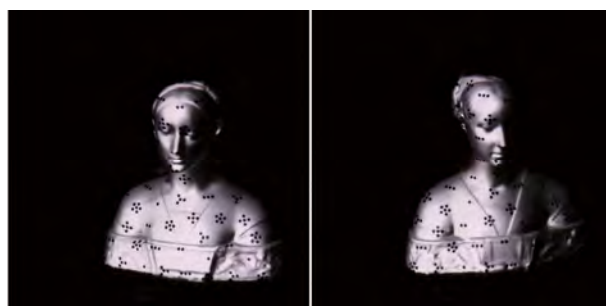
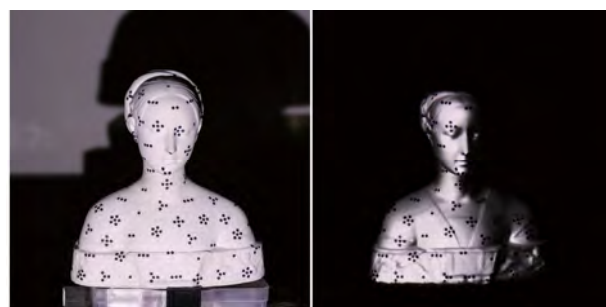
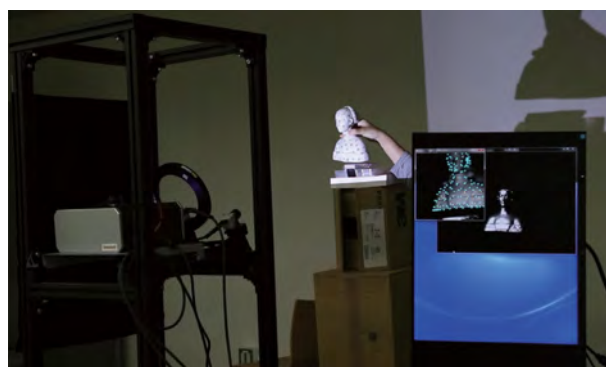


図 2. プロジェクションマッピングに基づく動的質感再現。上段：システム。中段左：投影前の対象物体。他：投影結果

型 3 次元トラッキング技術を開発しました。本技術は速度性能が高いだけでなく、人間とのインタラクションによって遮蔽が生じる状況下でもこのようなトラッキングを維持することができます。新たに開発したトラッキングと高速プロジェクタを用いて、プロジェクションマッピングに基づく動的質感再現を実現しました。左写真に示されるように、石膏製の対象物が光沢をもつ金属製の物体に見えることが確認できます。

このほかにも、プロジェクションマッピングとは異なるアプローチに基づいた動的質感再現も実現しま

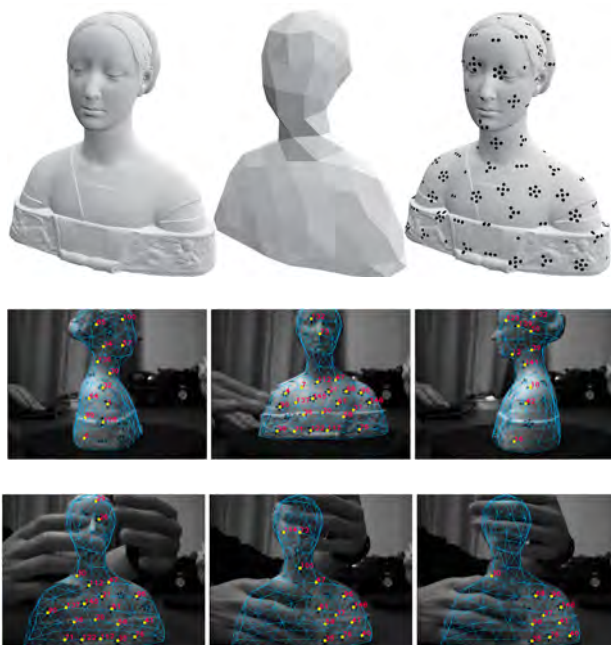


図 3. 3次元位置姿勢の高速トラッキング。上段：トラッキングのためのマーカデザイン。中・下段：トラッキングによって得られた位置姿勢を青いメッシュで写真上に表示

した。これは、人間の臨界融合周波数を超える速度で変調された構造化光を利用することで、実物体を自由に再配置できるディスプレイとなっています。左写真のように、裸眼で視聴できる毛糸を用いたアニメーションを生成することに成功しています。

○今後の展望

動的質感再現は強力な効果を持っていることが分かってきました。プロトタイピング、デザイン、広告、エンターテインメント、ファッションなど多くの応用展開が考えられます。しかし、まだ課題も残されています。

例えば、この研究で使用されていたプロジェクタは白黒に限定されていました。このような高速プロジェクタを今後はカラー化し、新たな質感再現を実証していくことが重要です。

また、実物体を用いた動的質感再現では、呈示される像が平面的でした。今後は、より立体的な形状の提示においても、同様のアプローチが導入できる可能性を探る必要があると考えられます。

○関連する研究発表

論文

1. 吉田貴寿, 渡辺義浩, 石川正俊: 周期運動する実物体と高速時分割構造化光を用いたリアステ

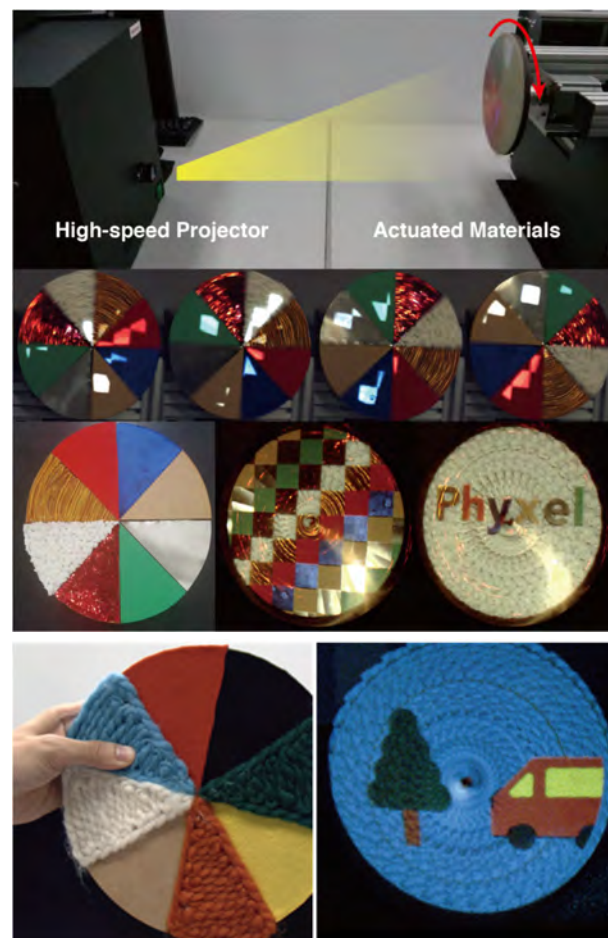


図 4. 実物体を用いた動的質感提示。残像効果を利用することで、実物体を自由に空間配置したディスプレイを実現しました。

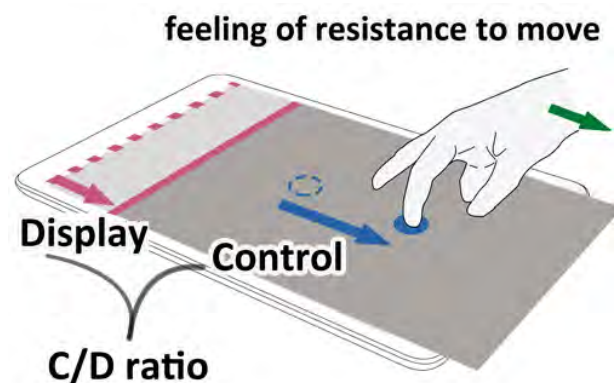
ックディスプレイの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 22(9):229-240, 2017.

学会発表など

1. Yoshihiro Watanabe, Toshiyuki Kato, Masatoshi Ishikawa: Extended Dot Cluster Marker for High-speed 3D Tracking in Dynamic Projection Mapping, IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Nantes, France, 52-61, 2017.
2. Takatoshi Yoshida, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa: Phyxel: Realistic Display of Shape and Appearance using Physical Objects with High-speed Pixelated Lighting, Annual Symposium on User Interface Software and Technology, Tokyo, Japan, 453-460, 2016.

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

研究代表者 鳴海 拓志（東京大学大学院情報理工学系研究科・准教授）



操作量（Control）と背景移動量（Display）の比である C/D 比を場所に応じて変更することでタッチパネル操作に対して触力覚を付与することができる

○研究の背景と目的

タッチパネルは指を使って画面に表示された情報を直観的に操作可能なインタフェースとして、近年さまざまな場面で用いられています。日常的にも多くの人々がスマートフォンやタブレット等のタッチパネル搭載デバイスを用いて、メールを確認したり、web ページやソーシャルネットワーキングサービス(SNS) 等を閲覧したりするように、われわれの生活には欠かせないテクノロジーと言えるでしょう。一方で、タッチパネルの欠点として、触覚フィードバックが乏しいことが問題視されてきました。キーボードやボタン等のインタフェースは操作時に物理的な触感が得られますが、一般的なタッチパネルにおいては、操作時に得られるのはガラス表面の触感のみです。こうした触覚フィードバックの欠如は、操作の正確性を低下させ、さまざまなタスクの効率を下げる事が明らかにされてきました。この問題に対し、タッチパネルにおいて触力覚提示を可能にする方法が研究されてきました。タッチパネルにおいて触力覚提示が可能になれば、細かい入力の操作性を高められるだけでなく、触感やそこから立ち上がる質感をも含めた情報伝達が可能な新しいメディアが創出可能になります。

これまで、タッチパネルに触覚フィードバックを付与する研究では、タッチパネルに機械的振動を加えたり、操作する指に電気刺激を与えたりするといった、新たに触覚提示用のデバイスを追加する方法が追求されてきました。それに対し本研究では、Pseudo-haptics という、視覚フィードバックに工夫をするだけで擬似的に触覚を表現することが可能な手法を用いることで、一般的なタッチパネルでも触

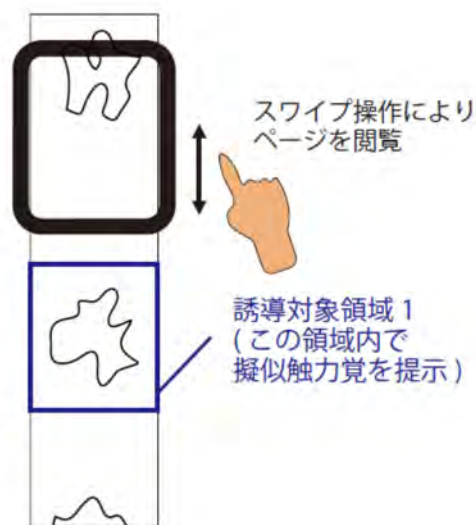
覚を提示できる手法を提案しています。先行研究では、マウスとカーソルを使う状況等、操作する手と視覚フィードバックが離れた場所にある場合には Pseudo-haptics が生起するものの、近い場合には生起させることが難しいとされてきました。他方、本研究では、指の運動にあわせてポインタではなく背景を運動させるという新しいアプローチから、視触覚間相互作用である Pseudo-haptics を生起させることが可能なことを発見しました。この発見を精緻化し、タッチパネルでも Pseudo-haptics によって多様な触質感を提示可能にすることを目的に研究を進めました。

○これまでに得られた成果

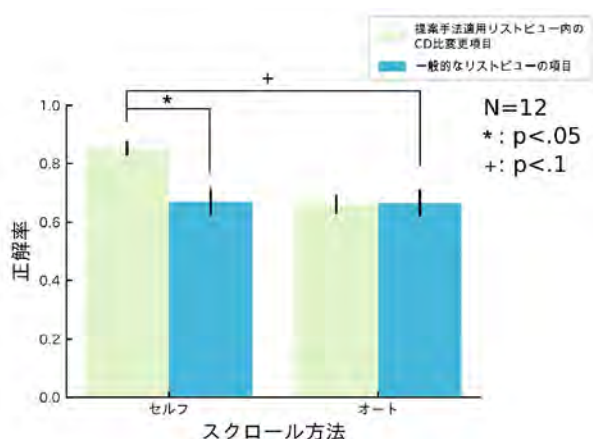
先に述べたように、従来研究では、マウスとカーソルを利用するデスクトップ環境やバーチャルリアリティ環境を利用し、ポインタと手の動きのずれを意識させないことが Pseudo-haptics 生起に必要だとされてきました。そのため、既存手法をタッチパネルに適用すると、ユーザは指とポインタの双方を直視してずれを意識するため、Pseudo-haptics は生起しません。

これに対し、本研究では、指で小さなポインタを操作するのではなく、背景等画面全体をスクロールさせる場合には、タッチパネルにおいても Pseudo-haptics を生起できることを発見しました。スワイプ操作量（Control）と背景移動量（Display）の比である C/D 比を 1 より小さくすることで抵抗感を強く知覚させることができること、1 より大きくした場合には、若干自然さが損なわれるものの、摩擦が弱い、滑るような感覚が知覚されることを確認しました。また、従来の擬似触力覚提示手法では、触力覚を提示するためには C/D 比を動的に変化させる必要があるものの、提案手法では C/D 比が一定の場合にも抵抗感の違いを提示できることを明らかにしました。これは提案手法が従来の擬似触力覚提示手法とは異なるメカニズムに依拠することを示唆しています。

こうした知見を踏まえた上で、スワイプ操作の繰り返し擬似触力覚知覚に影響を与えるかを検証しました。従来の擬似触力覚提示手法では、C/D 比を動的に変化させる必要があるために、入力操作量が少ない場合には触力覚が感じられにくいという特徴がありました。他方、タッチパネルのスワイプ操作では、指による短い移動操作が繰り返されるという特



実験で用いた触覚フィードバックのある画像閲覧システム。タッチパネルで複数の画像を閲覧する際に、特定の画像が画面に入ったときだけスクロールを遅くする（C/D 比を下げる）。そうすることで、特定の画像をスクロールする際に手に触覚フィードバックがかかるようになる。



画像閲覧実験の結果。自動的に画面がスクロールする場合や、普通通り自分の指でスクロールする場合と比べて、自分の指でスクロールをして C/D 比の変化により触覚を感じられる場合には、触覚フィードバックをおこなった画像がより記憶に残るようになった。

徴があり、従来手法のこの特徴は望ましくありません。これに対し、提案手法では 1 度しか触らない条件下での抵抗感の丁度可知差異（Pseudo-haptics によって生じる触覚に気付かない最小の刺激量）よりも、5 度繰り返し触る条件下での丁度可知差異のほうが小さくなることを明らかにしました。これは、提案手法では操作量が小さい場合であっても、操作の反復によって抵抗感の違いを感じやすくなることを意味します。

さらに、擬似触力覚の付与がタッチパネルを用いて閲覧した情報の認知に影響を与えるかを検討しました。提案手法を用いてタブレット端末上で画像を閲覧するアプリケーションにおいて、特定の画像が表示されているときのみ C/D 比を小さくし、抵抗を付与するようにしました。

実験では、2 種類のリストビュー条件(提案手法を使用して画像のリストを見る条件と一般的な画像のリストを見る条件) と、2 つのスクロール方法(セルフスクロールとオートスクロール) を用意し、各条件における記憶課題の結果を比べることで、自分でスクロール操作をした際に感じられる触覚フィードバックの違いが記憶定着に影響を与えるかを調べました。その結果、C/D 比を変化させた画像と変化させていない画像の注視時間は変わらなかった（C/D 比が小さい場合にはユーザがスクロール速度を早めるために注視時間が一定となった）にもかかわらず、C/D 比を変化させた画像の記憶への定着率が有意に高まるという結果が得られました。これらの結果から、実際にスクロールを行っているときに C/D 比を変更することで生じる擬似触力覚が、情報閲覧時の記憶に影響を与えていることを明らかにし、触質感の提示は記憶等の高次認知にも影響を与えることを示しました。

本研究の成果は、触質感の設計・提示を可能にするだけに留まらず、触質感の設計を通じて学習や印象形成の効果を設計できると考えられます。これは広告、教育、ユーザインタフェース等の分野で展開可能な効果であり、質感表現の重要性和新たなアプリケーション分野の開拓に繋がるものです。

○関連する研究発表

論文

1. 宇治土公雄介, 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 広田光一, 廣瀬通孝: 背景移動量操作を利用した視触覚間相互作用生起によるタッチパネルでの擬似触力覚提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 22 (3): 305-313, 2017. (日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞)
2. 橋本健, 鳴海拓志, 長尾涼平, 谷川智洋, 廣瀬通孝: タッチスクリーンでの擬似触力覚提示による注意誘導, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.23, No.3, pp.139-148, 2018年9月.

学会発表など

1. Narumi T, Ujitoko Y, Ban Y, Tanikawa T, Hirota K, Hirose M: Resistive Swipe: Visuo-Haptic Interaction during Swipe Gestures to Scroll Background Images on Touch Interfaces, World Haptics 2017, 334-339, 2017.

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

研究代表者 天野 敏之（和歌山大学システム工学研究科・教授）

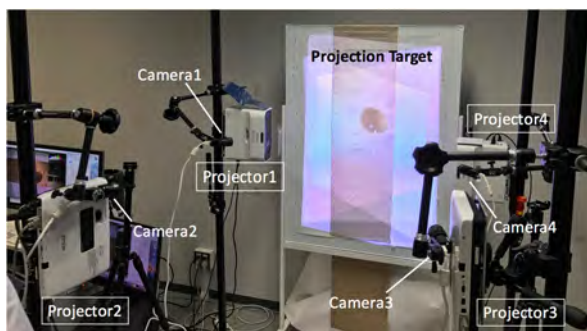


図1. 4対のプロジェクタカメラで構成される質感編集装置。鏡面反射を仮定して対面のプロジェクタとカメラを組合せ、視線毎独立に制御を行います。

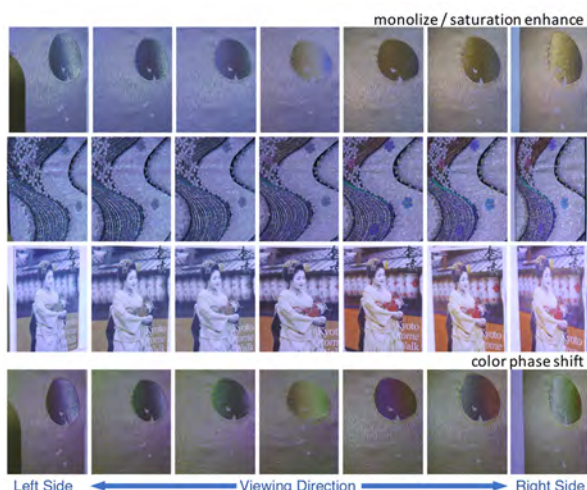


図2. 左側はモノクロ化、右側は彩度強調を目標として制御を行うことで、視線方向ごとに異なる鮮やかさにすることができます。1, 2 段目の引箔のような複雑な反射特性を持つものだけでなく、インクの光沢を利用すれば、3 段目のように新聞紙にも適用できます。また、色相の操作を行うことで、4 段目のように構造色の質感へ変化させることもできます。

○研究の背景と目的

映像を投影することで光沢や色彩を変化させ、物体の質感を自在に変化させる質感操作は、劣化した美術品の美観回復や演出、商品展示、プロダクトデザイン補助など、革新的なディスプレイ技術として様々な分野での応用が期待できます。

そこで本研究では、図1に示す装置のように、複数の方向から映像を重畳投影することで、物体の質感を別の物体の質感へと変化させる質感編集を実現することを目指しています。特に本研究では、引箔を施した西陣織を題材として、光投影による質感編

集の技術について研究しました。

○これまでに得られた成果

ある視点での外観だけでなく、視点や照明の変化で生じるスペキュラの動きや色彩の変化は、質感を認識するための大きな手がかりとなります。本研究では、この手がかりを複数のプロジェクタからの映像投影で置き換える「質感編集」を試みました。

視線方向や照明の向きによる物体表面上の反射特性は、双方向反射率分布関数（BRDF）で表すことができます。この研究では、図1のように様々な方向から光線を投影することで、通常の照明環境とは異なる反射光の分布へ変化させ、鑑賞者が知覚するBRDFを置き換える質感編集を研究しました。

具体的には、本研究では質感編集を実現する簡便な方法として、独立した閉ループ処理を同時に行うことで、視点ごとに光沢や色彩に変化させる技術を確立しました。それぞれの視点ごとに異なる色彩に変化させるためには、指向性のある反射特性が必要です。本研究はそのような反射特性を持つ操作対象として、引箔が施された帯地を題材とし、帯地のBRDFを考慮して構成した4対のプロジェクタカメラ系で同時に見かけの制御を行うことで、図2に示す視線毎に異なる鮮やかさに変化させる色彩の操作を実現しました（1 段目、2 段目）。

このような操作を行うためには、必ずしも引箔のような複雑な反射特性は必要ではなく、新聞紙のようなマットな素材でも、インクなどによる光沢があれば、この鏡面反射成分を利用することで視線毎に異なる色彩へ変化させる操作ができます（3 段目）。また、それぞれの視点ごとに異なるパラメータを設定した色彩操作を適用すれば、構造色の質感提示（4 段目）など、様々な質感編集が実現できます。

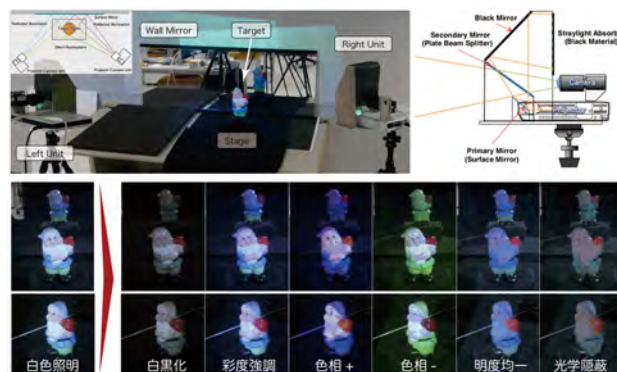


図3. 立体物の全周囲に対する見かけの操作

本研究では、複数の閉ループ処理を用いた方法の他に、操作対象の反射特性をあらかじめ取得し、解析的に投影する映像を求める方法についても研究しました。また、このような解析技術の研究を通じて、プロジェクタカメラ系による蛍光成分を考慮した分光画像解析技術についても研究しました。この研究では、プロジェクタとカメラの間の光学的な応答を表す色混合行列を分解することで、閉ループ処理で適応的に蛍光成分を分離する手法を確立しました。

さらに、閉ループ処理を同時に行う質感編集に関連する研究として、複数のプロジェクタカメラ系を用いることで、人形などの立体物の全周囲の色彩を操作する技術も研究しました(図3)。この技術を用いると、投影映像の生成や位置合わせなどの事前の準備は不要で、即興的に物体の全周囲の色彩を切れ目なく変えることができます。



図4. 日本橋三越本店天女像音と光のインスタレーション. 5 階吹き抜けのホールに鎮座する天女像に対して3 階フロアから上, 中, 下に投影を分割することで、質感編集による巨大で複雑な形状の天女像の演出を実現しました。

○アウトリーチ活動

本研究では社会実装として、様々なイベントにて研究成果を応用した演出を行なっています。

2016 年 12 月には、富士通ソーシャルサイエンスラボラトリと TOPPAN の協力により、日本橋三越本店にある、まごころ(天女)像のインスタレーションを行いました(図4)。

天女像は木彫の巨匠である佐藤玄々が樹齢 500 年の檜を用い、10 年の歳月をかけて 1960 年に完成させた彫像で、台座を除いた大きさがおよそ 11m もあります。形状が複雑ですし、また売り場の営業を妨げないように明るい照明環境で演出を行う必要があるなど、一般的なプロジェクションマッピングを行

うことは困難な対象です。しかし、研究を通して実現した質感操作技術は、プロジェクタとカメラを用いた閉ループ処理によって即興的に映像を作り出すことができますので、このような条件でも演出を実現することができました。

この演出は「三越の第九」の日にも行われ、東京メトロポリタンテレビジョンで報道されました。また、2017 年 11 月には最先端表現技術利用推進協会より第 1 回羽倉賞映像奨励賞を受賞しました。

○関連する研究発表

論文

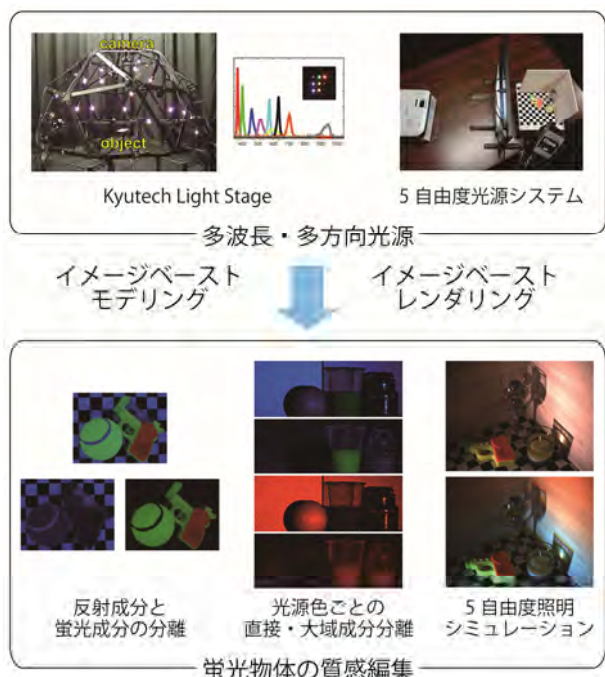
1. 島名功, 天野敏之, 牛田俊: プロジェクタカメラ系による全周囲の見かけの操作, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 21(2):363-371, 2016.6.
2. 天野敏之, 裕人磯翔: プロジェクションマッピングによる質感知覚の操作と箔工芸品の美の表現, 映像情報メディア学会誌, 71(1):30-35, 2017. 1.
3. 島名功, 天野敏之, プロジェクタカメラ系を用いた蛍光分離と見かけの操作, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 22(3):421-429, 2017.9.
4. 天野敏之: プロジェクションマッピングを用いた質感の提示と編集, 日本画像学会誌, 57(2):214-224, 2018.4.
5. 天野敏之: モデリングを必要としない即興的なプロジェクションマッピング, 映像情報メディア学会誌, 72(3):326-331, 2018.5.

学会発表など

1. 天野敏之: 光学フィードバックを用いた見かけの質感操作および構造色提示, 日本光学会光設計研究グループ第 59 回研究会, 招待講演, 京都, 2016.7.
2. 南研介, 天野敏之: ライトフィールド投影による見かけの BRDF 制御, 画像の認識・理解シンポジウム, 浜松, 2016.8.
3. 島名功, 天野敏之: プロジェクタとカメラによる蛍光を考慮した分光画像解析, 画像の認識・理解シンポジウム, 浜松, 2016.8.
4. 天野敏之: プロジェクタカメラ系による見かけの操作とその応用, 公開セミナー「質感とプロジェクション」, 招待講演, 東京, 2016. 9.
5. Isao Shimana, Toshiyuki Amano: Separation of Reflective and Fluorescent Components using the Color Mixing Matrix, IEEE VR, LA USA, 2017.3.
6. T. Amano: Adaptive Appearance Manipulation for the Installation Art, JSAP-OSA Joint Symposium, 招待講演, Fukuoka, 2017.9.
7. 天野敏之: 光学フィードバックを用いた質感操作とインスタレーションアート, 第 3 回質感のつどい公開フォーラム, 招待講演, 大阪, 2017.11.
8. T. Amano, S. Ushida, Y. Miyabayashi: Viewpoint-Dependent Appearance-Manipulation with Multiple Projector-Camera Systems, ICAT-EGVE, Adelaide, Australia, 2017.11.

多波長・多方向光源による蛍光物体の質感編集

研究代表者 岡部 孝弘（九州工業大学 大学院情報工学研究院・教授）



多波長・多方向光源下の実写画像に基づくモデリング・レンダリング技術により蛍光物体の質感を編集

○研究の背景と目的

蛍光物質は、身の回りの植物・鉱物などの自然物や衣服・紙などの人工物に含まれるありふれた物質です。ある波長の光で物体を照らしたときに、拡散反射や鏡面反射などの反射成分の波長が入射光の波長に等しいのに対して、蛍光成分の波長は入射光とは異なり、長波長側にシフトすることが知られています。そのため、蛍光物質を含む蛍光物体は、自発光物体のような独特な質感を有します。

本研究の目的は、蛍光物体の質感編集（写実的な画像の生成・加工）技術を開発することです。具体的には、蛍光物体の見えが入射光と反射光の方向だけでなく波長にも依存することから、様々な波長で様々な方向から被写体を照らして撮影した実写画像に基づいた、幾何学的・分光学的モデルの獲得や反射成分と蛍光成分の分離、および、任意照明環境における画像生成などの研究に取り組みます。

○研究成果

多波長・多方向光源装置を用いた研究

蛍光物体の形状（法線）、分光反射率、蛍光吸収スペクトル、および、蛍光発光色相を推定する技術を開発しました。具体的には、様々な色（分光強度）

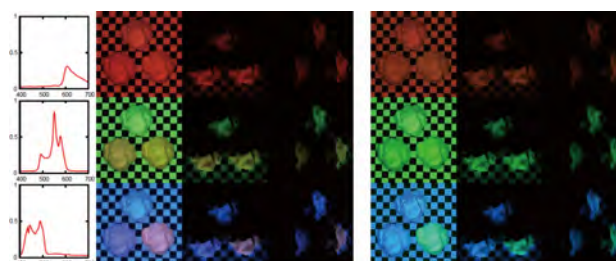


図 1 蛍光物体の形状・分光特性の推定による、任意照明環境における蛍光物体の写実的画像生成（左）、および、質感編集（右）

の LED からなる光源クラスタをドーム状に配置した多波長・多方向光源装置を用いて撮影された実写画像に基づいて、光源方向の変化に伴う物体の明るさの変化を手掛かりにして法線を、光源色の変化に伴う物体の色の变化を手掛かりにして分光特性を推定しています。

この技術は、蛍光物体の形状と分光特性の両方を獲得できることから、空間分布も分光分布も任意の照明環境における蛍光物体の写実的画像の生成を可能にします（図 1 左）。また、推定した蛍光吸収スペクトル、および、蛍光発光色相を編集することで、蛍光物体の写実的な質感編集も可能になります（図 1 右）。

また、多波長・多方向光源下の反射成分を拡散反射成分と鏡面反射成分（つや）に分離する技術も開発しました。これらの成分を任意の重みで組み合わせることにより、任意照明環境における写実的画像の生成だけでなく、鏡面反射成分を強調したり除去したりするような編集も可能になります。拡散反射成分と鏡面反射成分の分離に関しては、ライトフィールド（多視点画像）を手掛かりとした技術も開発しています。

さらに、多波長・多方向光源装置を用いた材質識別の研究にも取り組んでいます。具体的には、光源色の違いにより材質の分光反射率の違いを、光源方向の違いにより材質の表面粗さの違いを捉えることができることに着目して、材質識別のために照明環境を最適化する技術を開発しました。

多層ディスプレイを用いた研究

多層ディスプレイを用いた照明シミュレーション技術を開発しました。具体的には、光線を 5 自由度（位置 2 自由度＋方向 2 自由度＋色 1 自由度）で制御する、リアプロジェクションディスプレイと透過



図 2 多層ディスプレイを用いた蛍光物体の照明シミュレーション

型液晶からなる光源装置を作成しました。そして、光線の位置・方向・色を変化させながら撮影した大量の実写画像を任意の重みで組み合わせることにより、所望の 5 自由度光線空間が与えられたときのシーンの写実的な画像を生成しています。

この技術は、実写画像ベースであることから、透明物体・半透明物体の写実的な照明シミュレーションを可能にします(図 2 上)。また、光線の位置・方向だけでなく色も制御することから、ある波長の光を吸収してそれよりも長い波長の光を放出する蛍光物体の照明シミュレーションも可能にします。図 2 下の画像では、青色の光源に照らされたときに水鉄砲とテニスボールが蛍光を発している様子が再現されています。

多原色 DLP プロジェクタを用いた研究

プロジェクタ・カメラシステムを用いて、光源色ごとに直接成分(拡散反射・鏡面反射・蛍光など)と大域成分(散乱・相互反射など)を分離する技術を開発しました。具体的には、多原色 DLP プロジェクタと通常のカラーカメラ(短時間露光設定)を用いたシステムにより、静的なシーンを対象としたマルチスペクトルな成分分離を実現しています。例えば、図 3 のシーンでは、青色の光源下の直接成分に蛍光が含まれていることが分かります。また、DLP プロジェクタと高速度カメラを用いたシステムにより、動的シーンを対象とした成分分離への拡張にも取り組んでいます。

○今後の展望

本稿では、蛍光物体のモデリング、照明シミュレーション、質感編集などに関して、多波長・多方向光源装置、多層ディスプレイ、多原色 DLP プロジェクタを用いた研究成果を紹介しました。今後は、蛍光物体と同様に波長が鍵となる、透明物体・半透明

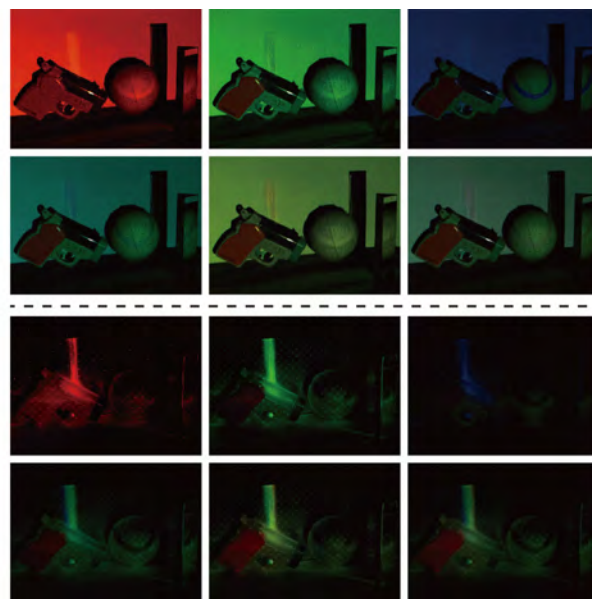


図 3 多原色 DLP プロジェクタを用いた光源色ごとの直接成分(上)と大域成分(下)の分離

物体の質感編集に取り組みたいと考えています。また、動的シーンの質感編集も今後の課題です。

○関連する研究発表

1. Oya S, Okabe T: Image-based relighting with 5-D incident light fields, In Proc. CPCV2017, Venice, Italy, 10. 2017
2. Takechi K, Okabe T: Diffuse-specular separation of multi-view images under varying illumination, In Proc. ICIP2017, pp.2632-2636, Beijing, China, 9. 2017
3. 北原, 岡部: 蛍光物体のモデリングとその任意照明下画像の生成・編集への応用, FIT2017, H-016, 東京, 9. 2017 (FIT 奨励賞)
4. Wang C, Okabe T: Joint optimization of coded illumination and grayscale conversion for one-shot raw material classification, In Proc. BMVC2017, London, UK, 9. 2017
5. 鳥居, 岡部: 動的シーンにおける光源色ごとの直接・大域成分の分離, MIRU2017, OS1-2, 広島, 8. 2017 (MIRU 学生奨励賞)
6. Maeda K, Okabe T: Acquiring multispectral light transport using multi-primary DLP projector, In Proc. IPTA2016, No.127, Oulu, Finland, 12. 2016
7. Kobayashi N, Okabe T: Separating reflection components in images under multispectral and multidirectional light sources, In Proc. ICPR2016, pp.3199-3204, Cancun, Mexico, 12. 2016

公募研究

- 後期 -



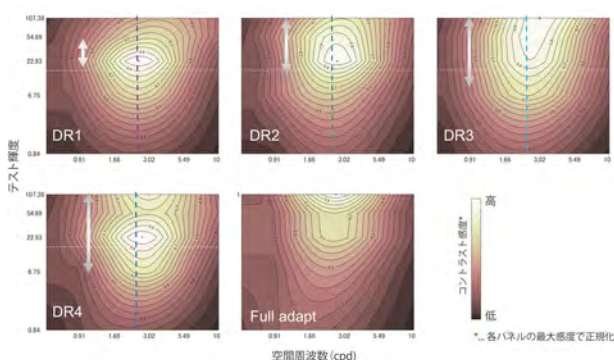


図1. 様々なダイナミックレンジ(DR1～DR4；図3A)におけるコントラスト感度。パネルの違いは背景DRの広さの違いを示しています。下段中央は従来法。

○研究の背景と目的

近年、情報機器の画面の最大/最小の輝度比（輝度ダイナミックレンジ）が広がり、有機 EL 画面では1:10万から1:100万のダイナミックレンジ(DR)を持っています。こうした広ダイナミックレンジの画面では質感の再現性が高いと言われています。単に画面に表示できる輝度範囲が広がっただけではなく、人間の視覚の感度とも適合していなければ、適切な質感の知覚には結びつきません。本研究では、ダイナミックレンジによる視覚感度の変化と、質感知覚への影響について研究を行いました。

前期の公募研究では、質感知覚を得るのに必要な輝度の帯域を調べる実験を試みました。画像の輝度ヒストグラムの操作に伴う輝度特徴の変化により、視覚系の順応状態が同時に変化していた場合、単に質感知覚に寄与する画像の輝度帯域だけを求めても意味がありません。質感を与える視覚手がかりである光沢や木目、織り目を知覚するには、それらの手がかりを見出すコントラスト感度や明度知覚が必要になります。

そこで本研究では、ディスプレイのダイナミックレンジとコントラスト感度（後述）、および明度知覚の関係について調べました。

○研究成果

(1) 輝度ダイナミックレンジとコントラスト感度

織物の織り目など、細かなパターンを知覚するには、織り目の明暗を知覚する必要があります。明暗を見分ける能力を「コントラスト感度」と言います。画像背景やディスプレ



図2 織り目

イの輝度 DR のコントラスト感度への影響について心理物理実験で調べました。

様々な輝度ダイナミックレンジの背景（図3A）の中で、Gabor パターンという縞状の刺激図形を用いて、コントラスト感度を測定しました。被験者は、背景の上に呈示された四角形のテスト領域の中で、左右どちらにパターンが見えるかを答える実験を行いました。背景を一樣（16.4 cd/m²）から、0～134 cd/m² の範囲までの4段階にダイナミックレンジ (DR)を変えて感度を測定しました。

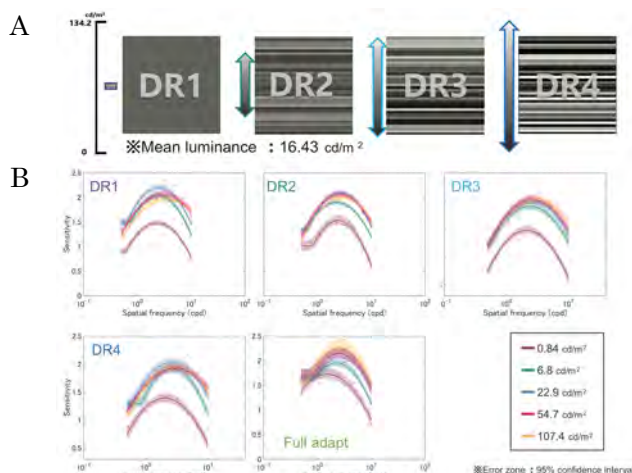


図3. コントラスト感度の測定。

従来型の測定法（図3B,下段中央:“Full adapt”）では、検査する輝度レベルが上がるに従い感度も常勝していました。しかし我々の結果は従来法と異なり、DR の範囲内で感度ピークが重なる（図3B, DR1～DR4）パターンを示しました。図1は同じ結果を等高線で示したものです。背景の輝度 DR が広くなると、感度ピークの高い輝度範囲（縦の矢印）が広がる様子が見えます。テスト輝度に応じて感度が上がる従来の測定法（下段中央）とは異なります。

この結果は、画像のもつ輝度範囲に合わせて人間の視覚系が感度調整を行い、画像に含まれる情報を均一な感度で観察していることを表しています。従来法の結果（図1と図3の下段中央）では、視対象の輝度が高いほど感度が上がる傾向を示していましたが、それは実態と異なることを明らかにしました。

(2) 輝度ダイナミックレンジと明度知覚

コントラスト感度は、見えるか見えないかギリギリの閾値における感度です。しかし、我々が物体の質感を知覚するときには、検出だけでなく「どのくらい明るい／暗いか」を評価して質感を知覚してい

ます。そこで、我々は背景の DR が変化した時の明度知覚について、心理物理学的に調べました。

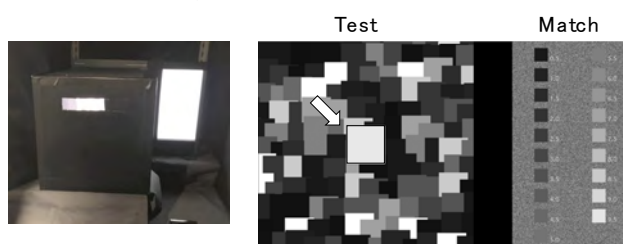


図 4. 明度実験の装置

図 4 左は、実験装置の全体像を示しています。広輝度ダイナミックレンジをもつ有機 EL ディスプレイを用いています。画面を 2 分割し、図 4 右の“Test”側では背景にランダムに配置された視覚系の輝度範囲を 1:30 (low DR; LDR), 1:1,000 (standard DR; SDR), 1:100,000 (high DR; HDR) の 3 段階に変化させました。Test 側は、図 4 左に示すような覗き窓を通して独立した DR 環境として観察します。中央に示されたテスト刺激(矢印)の明るさ知覚について、窓の右側にある“Matching”側に示された黒から白までのパッチと照合し、近い明度を回答します。

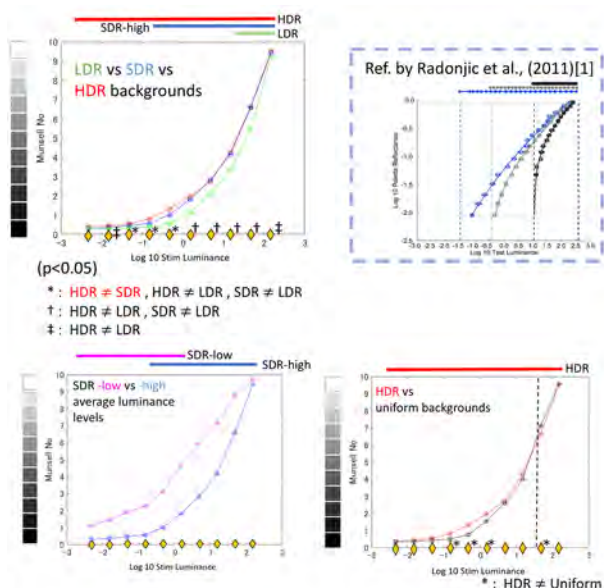


図 5. 背景 DR が明度知覚に与える影響。

図 5 は実験結果を示しています。各パネルの上に示された横棒が、背景の DR の違い (LDR, SDR, HDR) を示しています。SDR には、最大輝度が低い条件 (low-SDR) と HDR と同じ条件 (high-SDR) の 2 種類があります。横軸はテストした輝度です。

まず、左下のパネルに見られるように、最大輝度は明度知覚に大きな影響を与えます。次に、左上のパネルを見ると、背景条件による明度知覚の変化は小さいように見えます。しかし、低い輝度の対象物に対しては、HDR 背景 (赤線) では曲線の傾きが大きく、LDR 背景 (緑線) では傾きが平らになっています。この結果は、背景 DR が広いほど、暗い部分の明度の見分けが明瞭についていることを示してい

ます。つまり、質感の手がかりとなる編み目や木目などを見分けるのに適していると考えられます。

一方で、Radnijic ら(2011)の先行研究(図 5 右上)で行われた同様の実験と我々の結果を比較すると、カーブの湾曲する方向など、顕著な違いが見られます。特に先行研究では、明度知覚が背景 DR (グラフ上の横線の範囲) の暗い側の端で黒と一致し、視覚系が画面 DR に正確に追従して明度の感度を変化させている点が大きく異なります。これらの相違点については、今後も検討を重ねる必要があると考えています。

我々は、さらに HDR 背景に提示する輝度の分布を明るい方/暗い方に偏らせた場合の明度知覚の変化や、背景パッチの大きさが明度知覚に及ぼす影響について、心理物理学的に調べる実験を行なっています。

○今後の展望

我々が明らかにした、背景ダイナミックレンジによって生じるコントラスト感度の変化や明度知覚の変化が、質感知覚に影響を及ぼすのは明らかですが、知覚に与える影響について、画像を用いた実験を準備しています。こうした実験を通して、ダイナミックレンジの違いによる質感知覚が、これらの基礎的な感度変化とどのように結びついているかを検討し、明らかにしたいと考えています。

○関連する研究発表

学会発表など

1. Hayasaka M., Nagai T., Sato T., Tomonori Tashiro, Yasuki Yamauchi & Ichiro Kuriki. Contrast sensitivity functions measured on luminance-variegated background, *Optical Society of America Fall Vision Meeting 2018*, Reno, NV, U.S.A., Sep 21, 2018.
2. Watanabe G., Kuriki I., Hatori Y, Tseng C.H., Shioiri S. Influence of the HDR environment on Shitsukan perception. *Asia-Pacific Conference on Vision 2019*, Osaka, Japan, July 29-Aug.1, 2019.
3. Hayasaka M., Nagai T., Sato T., Tashiro T., Yamauchi Y., Kuriki I. Contrast sensitivity functions measured under different dynamic range widths. *Asia-Pacific Conference on Vision 2019*, Osaka, Japan, July 29-Aug.1, 2019.

「脳ならではの」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

研究代表者 永井 岳大（東京工業大学工学院・准教授）

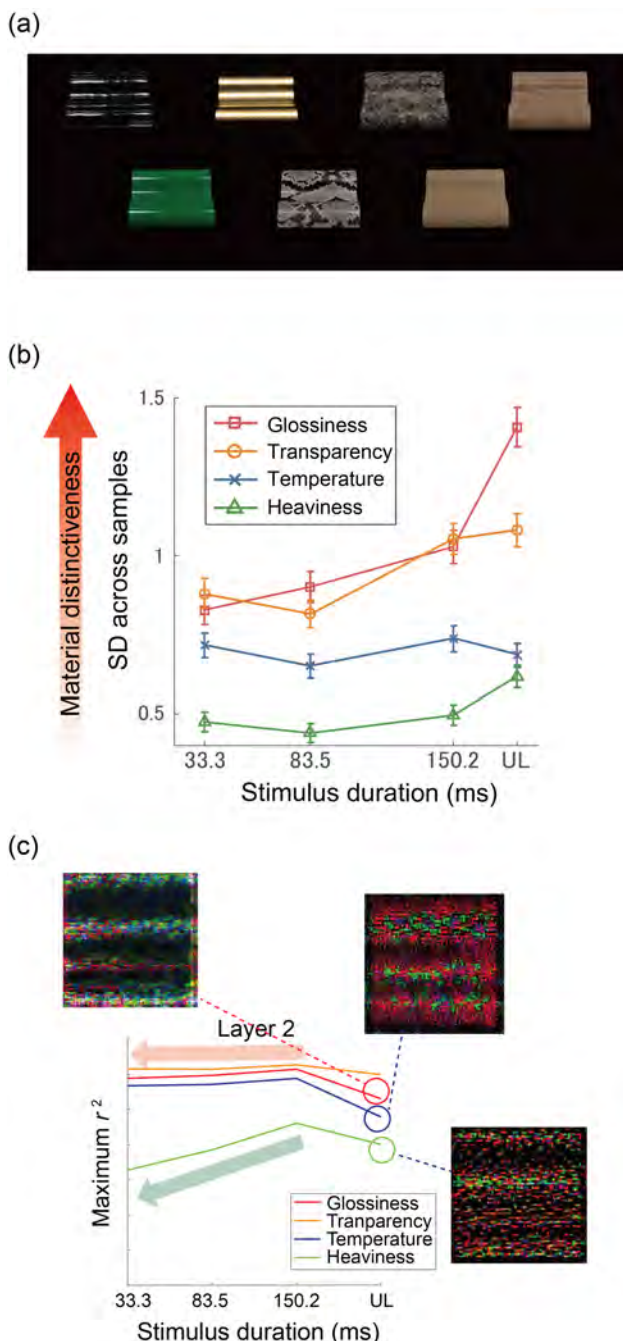


図 1 (a) 心理物理実験で用いた質感サンプルセット。前領域である「質感脳情報学」で開発されたもので、これらの写真を刺激として使いました。(b) 心理物理実験の結果。様々な時間で呈示された刺激に対して被験者が質感（光沢感、透明感、温度感、重さ感）を判断した結果、今回用意したサンプルに対して各

質感をどれくらい区別できたか（質感識別度）を示しています。特に重さ感と温度感を比較すると、呈示時間が長いときは同じ程度の識別度である一方で、呈示時間が短くなってくると差が顕著に開きます。(c) 被験者の応答結果と Convolutional Neural Network (CNN) の情報表現の対応。折れ線グラフは、CNN の一種である AlexNet の第二層の情報を用いたモデルで(b)に示した被験者の応答特性がどの程度説明できるかを示しています。重さ感以外の質感では、呈示時間が短い場合でもよく説明できますが、重さ感では呈示時間が短くなると説明力が急激に劣化します。図中のノイズのような画像は、各質感の応答を説明するモデルにとっての最適反応画像を示しています。

○研究の背景と目的

これまでの心理物理学的な研究によって、視覚情報の中の比較的単純な画像特徴とヒト（脳）の質感知覚に関連する可能性が示されてきました。このことは、複雑な光学プロセスから生じる視覚情報からでも、単純な機序で質感を知覚できるという脳の情報処理の巧妙さを示唆しています。では、脳はなぜ質感知覚において低次画像特徴への依存性を有しているのでしょうか。一つの有力な考えは、発展著しい深層学習と同様に、物体の質感を把握する上で有用な情報を画像から学習し、脳内処理を最適化したというものです。一方で、生存に必要な質感的な情報に対しては、多少精度が落ちてでも素早く処理できる機序を獲得した、という脳（生体）ならではの方略も影響する可能性があります。

この問いに答えるため、本研究課題では、1. 脳が低次画像特徴に基づいて判断する質感とは何なのか、2. その低次画像特徴と機械学習が用いる画像特徴の類似性・相似性はどこにあるのか、を明らかにすることを目的としています。

○研究成果

本研究では、質感知覚に関する心理物理実験と、そのデータと機械学習の対応性の解析という2つのアプローチを取りました。

心理物理実験では、図1(a)に示すような「質感サンプルセット」の写真を被験者に見せる実験刺激として用いました。このサンプルセットは131種類の素材でできており、プラスチックや布、皮、石など様々なものが含まれています。実験中では、刺激

呈示時間を 33.3 ms から無制限まで様々に変化させて、それぞれの刺激呈示時間における質感知覚の精度を測定しました。ここでは精度の指標として、サンプル間での質感の識別のしやすさ（識別度）を採用します。また、対象とした質感は、光沢感、透明感、温度感、重さ感の 4 種類です。

その結果が図 1(b) に示されています。まず、呈示時間が無制限（図中の UL）のように長いときには、光沢感や透明感の識別度が温度感や重さ感よりもはるかに高いです。これは、温度感や重さ感、本来は触覚や体性感覚によって把握すべき質感で、視覚情報からはあくまで推定しかできないことから容易に予想できる結果です。一方、呈示時間が例えば 33.3 ms のように短くなると、重さ感だけが識別度が顕著に低くなります。これは、重さ感以外の質感では、呈示時間が短いときでも単純な画像特徴に基づいた判断ができる可能性を示しています。特に温度感については、呈示時間の影響をほとんど受けずに識別度が極めて安定していることがわかります。

続いて、この心理物理実験の結果と機械学習の対応関係を解析してみました。ここでは、画像認識用の Convolutional Neural Network の一種である AlexNet を解析対象としました。AlexNet は大きく分けて 8 層からなるネットワーク構造を持ちますが、このうち単純な画像特徴を取り扱っていると考えられる初期の層に着目します。AlexNet に心理物理実験の刺激を入力することで、各層の応答がわかります。この各層の応答を説明変数として、部分的最小二乗回帰により被験者の質感知覚量を推定するモデルを作成しました。

その結果が図 1(c) に示されています。この図では、第二層を用いた結果を例として示しています。グラフの傾向は、光沢感、透明感、温度感と重さ感では大きく異なっています。まず、光沢感、透明感、温度感に着目すると、呈示時間が無制限のときよりも呈示時間が区切られた場合の方が決定係数、すなわちモデルによる説明の度合いが高く、また決定係数は呈示時間が短くなってもほとんど変化していません。この結果から、これらの質感においては、呈示時間が短くても AlexNet の第二層で表現されているような比較的シンプルな画像特徴だけで被験者の応答が説明できる一方で、呈示時間が長いときの被験者の応答ではもっと複雑な画像特徴が使われている可能性があることがわかります。言い換えれば、これらの質感では、呈示時間が長いときと短いときで質感の知覚に用いられる画像特徴が変化していると考えられます。また、呈示時間が短くても質感の識別度が保たれ CNN 初期層との関連性が高いことを考慮すると、これらの質感の知覚は少なくとも部分的には単純な画像特徴に基づくことが示唆されます。

一方で、重さ感では傾向が大きく異なります。重さ感では、決定係数が 150.2 ms で最大であり、呈示時間が短くなるにつれ決定係数も小さくなります。さ

らに、どの呈示時間においても、決定係数は他の質感よりも顕著に小さいことがわかります。この結果は、重さ感の知覚判断はどの呈示時間でも単純な画像特徴との関連性が薄いことを示唆しています。逆に言えば、重さ感の判断においては他の質感よりも複雑な画像特徴が必要となるため、刺激呈示時間が短い場合にはその複雑な画像特徴が取得できずに識別度が大幅に劣化したと考えることができます。

これらの結果をまとめると、重さ感以外の質感においては、質感知覚における多様な手がかりが画像に含まれて、ヒトは入手可能な画像特徴に応じて戦略を臨機応変に変化させながら質感を知覚していると考えられます。この質感知覚の戦略の柔軟性の高さがヒトの質感知覚の本質の一つかもしれません。

本研究課題では、画像特徴と質感知覚の関連について、呈示時間操作以外のアプローチからも検討しています。例えば、光沢感知覚には一般的には高輝度の鏡面反射成分である鏡面ハイライトが有効であると考えられていますが、鏡面ハイライト以外に低輝度部にも含まれる輝度エッジ情報も有効な手がかりであることを見出しました。輝度エッジ情報を操作することで光沢感を変化させられることを示すとともに、その際に重要な空間周波数成分についても検討を続けています。また、色情報と光沢感の相互作用についても様々な側面から調べています。例えば、光沢ハイライトの色度成分が色恒常性に大きく作用し色の見えが変化すること、また輝度が同一でも色度により光沢感が大きく変化し、その影響が色相間で大きく異なることも見出しています。

○今後の展望

これまで述べてきた実験では、用いたサンプルの数が 131、対象とした質感の数が 4 と、結果の一般性を保証する意味では十分とは言えません。そこで、サンプル数を質感の数を大幅に増やすための web 実験環境の構築も合わせて行っています。この web 実験により単純な画像特徴と様々な質感の対応関係を捉えることにより、「ぱっと見の質感印象」を操作する技術へつなげていければと思っています。

○関連する研究発表

論文

1. Kiyokawa H, Tashiro T, Yamauchi Y, Nagai T: Luminance edge is a cue for glossiness perception based on low-luminance specular components, J Vision, 19(12):5, 1-22, 2019.

学会発表など

1. Seno R, Tashiro T, Yamauchi Y, Nagai T: Relationship between image statistics and psychophysical dynamics of perception of various surface qualities, The 15th Asia-Pacific Conference on Vision, Osaka, Japan, 7.31, 2019.

匂いの質感の神経基盤： ヒト脳機能計測によるアプローチ

研究代表者 岡本 雅子（東京大学大学院農学生命科学研究科・特任准教授）

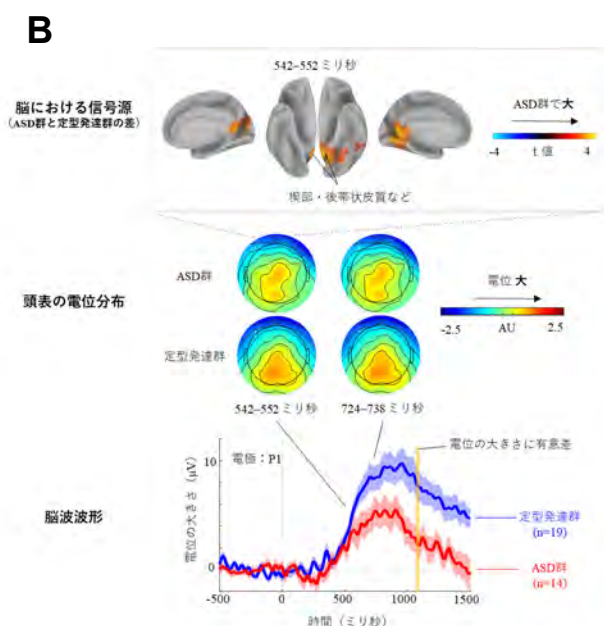


図1. 脳機能イメージングを用いた香りの研究
A. 脳活動計測に基づく香りの脳内表象のモデル化
B. 嗅覚誘発脳波を用いた自閉症 (ASD) の研究

○研究の背景と目的

香りは、揮発性の化学物質が、鼻腔に存在する嗅覚受容体において受容され、その信号が脳において処理されることで生じます。このように、化学物質を受容して生じる感覚は、「化学感覚」と呼ばれますが、五感の他の感覚より進化的な起源が古いとされており、受容機構、情報処理に関わる脳領域の構造、知覚の特性など、様々なレベルで、他の感覚とは異なる特徴を持つことが知られています。また、近年、パーキンソン病などの神経疾患において、嗅覚の異常が病気の初期症状として表れることが明らかになり、嗅覚の神経基盤の理解が望まれています。

このように興味深い点を持つ嗅覚ですが、ヒトの脳における情報表現の解明は、五感の他の感覚に比べて遅れています。その理由のひとつは、嗅覚処理に関わる脳の領域が、副鼻腔と隣接する、脳の深い場所に存在しており、ヒトの脳活動を非侵襲的に計測する手法である、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI)、脳磁図計測、脳波計測のいずれの手法においても良好な信号を得ることが難しい点にあります。もう一つの理由は、香りを呈する化学物質の種類は数千～数万と膨大であると推察されている（正確な数は分かっていません）一方で、化学物質と嗅覚受容体、嗅覚受容体と知覚の対応関係は、研究途上であり、香りの特性を数値化したり、香りを効率よく再現したりするのが難しいことです。そのため、脳活動計測においても、音や光などであれば、バーチャルに多様な刺激を提示できるのに対し、香りの場合は、呈示したい香りを呈する物質を、実際に実験参加者の鼻元へ送り届ける必要があります。

こうした困難があるため、これまで、ヒトの嗅覚の脳内表象の研究では、数種類の香りを用いて、限られた香りの特徴の表象を調べるという方法が取られてきました。そのような研究によって、一次嗅覚野を有する側頭葉内側の領域や、二次嗅覚野である前頭眼窩野の活動と、香り物質の化学構、知覚的特徴との関係が明らかにされてきましたが、まだ、香りがもたらす多様な知覚や印象が、脳のどのような領域のしりによって、いつ発生するのか、不明な点が多く残されています。

そこで私たちは、①空間的分解能に優れ、脳の領域について調べることでできる fMRI と、時間分解能に優れ、情報処理のタイミングについて調べることでできる脳波、それぞれについて、嗅覚処理に関わる脳活動を、よりよく計測できる条件を設定すること、②香り呈示方法の改良により、より多くの種

類の香りを呈示できるようにすること、③大規模な官能評価の情報や、現在解明が進みつつある嗅覚受容体と香り物質の対応関係などの情報を含めて、香りの特性を定量化すること、の3点を実現することによって、脳活動と香りの特性の関係を予測するモデルを構築し、ヒトの脳における香りの表象を、より詳細に明らかにすることを目指しています（図1 A）。

○研究成果

嗅覚の脳波計測は数十年にわたる研究の歴史があり、従来から、香りを呈示した直後の数秒間に発生する脳の活動を、10 ミリ秒程度の時間分解能で分析できることが知られていました。但し、このような高い時間精度の計測においては、香りの呈示の時間的制御を厳密にする必要があります。従来から用いられてきた方法では、香りの呈示のタイミングが、実験参加者の呼吸のタイミングと同期させないため、香りを嗅ぐ条件としては、不自然であることが懸念されていました。私たちは、呼吸と同期した香り呈示条件で嗅覚誘発脳波を計測できる環境を整備しました。これによって、香りの快さに注意を向けているときは、単に香りを嗅いでいるときより、香りを呈示してから 700 ミリ秒以降の脳の活動が高いこと、その変化は、右脳の中側頭回や、左脳の下前頭回、島などの領域の活動に由来することを示唆する結果を得ました（「関連する研究発表」1）。また、感覚処理に非典型性を持つ可能性が示唆されている、自閉症を持つ方を対象とした計測を行うことにより、自閉症を持つ方では、持たない方と比べて、香りを嗅いでから 542 ミリ秒以降に脳の活動に違いが生じること、その違いは楔部や後帯状皮質などの領域の活動に由来することが推定されることも分かりました（「関連する研究発表」2、図1 B）。

これらの研究成果を基盤とし、ひとつの実験で呈示できる香りの種類を、4 種類から 30 種類へと拡張しました。新しい香り呈示環境において、嗅覚誘発脳波が計測できることを確認したのち、香りの質や快さの度合いの異なる複数の香りを呈示した際の脳波を計測し、脳波データから、その時嗅いでいた香りの知覚を予測する、エンコーディングモデルを構築しました。その結果はまだ予備的なものですが、特定の周期で生じる周期的な脳活動の大きさ（周波数解析を行った際の、特定の周波数帯域のパワー）が、香りの知覚の表象に関わることが示唆されました。

一方、fMRI による脳機能計測については、fMRI の信号（BOLD 信号）を乱す原因となる、副鼻腔という解剖学的構造が、一次および二次嗅覚野に隣接していることから、これらの領域の活動の信号対ノイズ（SN）比が低いことが知られています。私たちは、香りの脳内表象のより詳細な分析を可能にするために、国立研究開発法人情報通信研究機構の西本

主任研究員、黄田主任研究員、中井研究員らのご協力を得て、より SN 比の高い撮像条件を探索してきました。現在、設定した撮像条件および、先に述べた香り呈示装置を用いて、香りに対する脳活動を計測し、脳における香りの表象の空間的な特徴を調べています。

脳波、および fMRI で得られた脳活動と、香りの特徴の関係をモデル化する上では、香りの特徴を定量化する必要があります。香りの特徴のうち、ヒトが主観的に感じる知覚的特徴については、香りの質を表す言葉（記述子）を用いた官能評価によって、定量化することが出来ます。しかし、従来から用いられている記述子には、香りの専門家でないとは理解しにくい言葉が含まれています。そこで私たちは、一般の日本人に分かりやすい記述子セットを作成するために、日本科学未来館・メディアラボで実施したアンケート調査、インターネットを用いたアンケート調査、および文献調査を通じて、約 800 語の用語を収集してきました。今後、予備的な官能評価実験などを通じて、これらの用語を整理した上で、脳活動計測に用いた香りの知覚的特徴を定量化していく予定です。また、知覚が生じる前の段階における香りの特徴を定量化するために、協力研究者である東京大学農学生命科学研究科の東原教授らの研究を通じて、嗅覚受容体の応答パターンに基づく香りの定量化にも取り組んでいます。

○今後の展望

2 年間の研究期間において、脳活動計測条件と香り呈示条件の改良、および香りの特徴の定量化を進めてきました。今後も引き続き、これらを用いた計測や解析を行い、香りの特徴と脳活動を対応付けるエンコーディングおよびデコーディングモデルを構築し、香りの脳内表象を明らかにしていきます。

また、本研究の成果は、嗅覚の異常を伴う疾患の理解にも役立てたいと考えています。例えば、図1B に示す研究では、1 種類の香りに対する脳の反応の評価に留まりました。今後、多数の香りを用いた計測を行ったり、香りの脳内表象に関する知見を援用したりすることにより、自閉症を持つ方の嗅覚処理の特徴を、より詳しく理解することへとつなげたいと考えています。

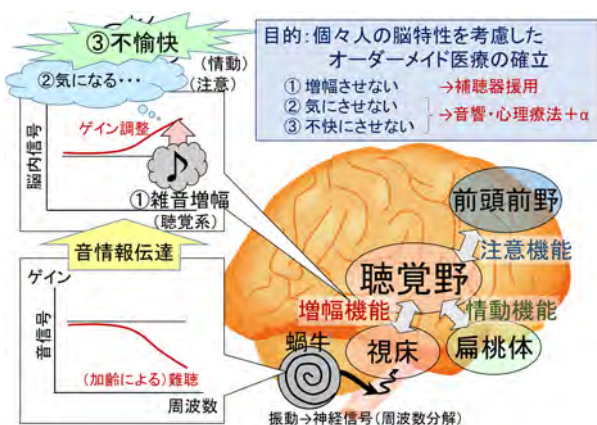
○関連する研究発表

論文

1. Singh AK, Touhara K, Okamoto M, Electrophysiological correlates of top-down attentional modulation in olfaction. *Scientific Reports* 9: article number 4953, 2019.
2. Okumura T, Kumazaki H, Singh AK, Touhara T, Okamoto M: Individuals with autism spectrum disorder show altered event-related potentials in the late stages of olfactory processing. *Chemical Senses*, *in press*.

耳鳴の脳活動の解明と質感制御

研究代表者 高橋 宏知（東京大学大学院情報理工学系研究科・准教授）



耳鳴の脳内メカニズム解明に基づく治療戦略

○研究の背景と目的

国内の 100 万人以上が、深刻な耳鳴による QOL 低下に苦しんでいます。耳鳴は、静音な環境の確保を阻害するため、安らぎや集中力を奪い、しばしば不眠症や抑うつ症状を併発し、最悪の場合、自殺に至らしめます。耳鳴は、実際には存在しない音の知覚なので、その原因が脳の情報処理にあることは疑いありません。

近年、耳鳴の原因は、「聞こえ」に対する脳の機能補償である可能性が指摘されています。その根拠として、耳鳴患者の 9 割は難聴を伴います。難聴の主な原因は、聴覚系の末梢部（たとえば蝸牛）の損傷であり、加齢とともに難聴の発症リスクは増加するとされています。ただし、難聴患者が必ず慢性的な耳鳴症状を呈するわけではなく、耳鳴を伴う難聴患者の割合は 4 割にとどまります。このような難聴と耳鳴の関係から、脳は難聴症状を緩和させようとするが、この補償作用が不適切だと耳鳴に陥ることが示唆されています。

そこで応募者らは、不適切な補償作用は、どのような脳活動パターンを生み出し、耳鳴を発生させるのか、さらには、この耳鳴の脳活動パターンは、なぜ、不快感を生み出すのかを明らかにすべきと考えました。そこで本研究は、① 耳鳴の知覚にに関する脳活動パターンを同定し、② 音提示、音学習、投薬により、脳活動パターンを変え、耳鳴の質感制御を実現できる手法を探索することを目的としました。

○研究成果

【耳鳴の動物モデル】 耳鳴の脳活動を明らかにするために、まず、ラットをモデル動物として用い、耳

鳴症状を呈する処置を施し、同症状を定量化できる実験系を構築しました。具体的にはラットの聴力と耳鳴症状は、それぞれ、プレパルス・ギャップ抑制と呼ばれる反射行動を利用し、定量化しました。まず、動物のプレパルス抑制とオペラント学習による聴力推定の比較し、プレパルス抑制による聴力推定の妥当性を示しました。次に、10 kHz, 110 dB SPL の純音を片耳に 60 分間に渡り曝露し、実験動物の片耳を難聴にしました。ギャップ・プレパルス抑制の実験系を用いて、音響曝露群の耳鳴症状を調べたところ、正常な純音聴力を保ったまま、32 kHz 付近の耳鳴症状を認めました（図 1）。

【耳鳴に相関する脳活動】 耳鳴モデル動物を対象に、聴覚野の電気生理計測を実施し、以下の 3 つの解析を行いました。

第 1 に、聴覚野の活動状態は、各神経集団への同時的な情報入力によって成立するという仮定のもと、メゾスケールの神経指標である局所電場電位 (Local Field Potential; LFP) の相互相関パターン

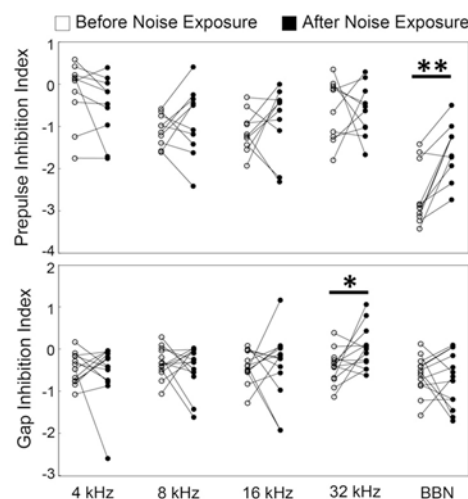


図 1 プレパルス・ギャップ抑制

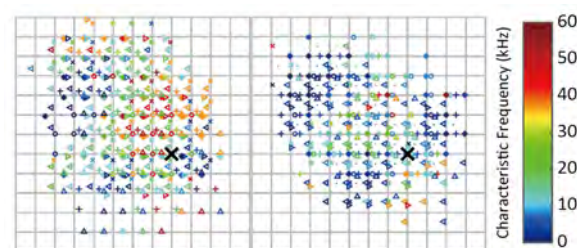


図 2 聴覚野の周波数マップ

を特徴量とし、持続的な音刺激を入力した際の神経活動をデコードしました。その結果、音響曝露群・統制群ともに、LFPの相互相関パターンから刺激周波数の情報を安定して取り出すことができました。この結果は、持続的な音の情報がメゾスケールの神経活動に表現されること、また、その情報は音響曝露後も失われないことを示しました。

第2に、メゾスケールの神経活動間の相互作用に刺激情報が表現されるという知見を受け、自発活動のLFP間の同期強度と耳鳴指標との関係性を調べました。まず聴覚野の各神経細胞群について、最も敏感に反応する音の周波数を調べました(図2)。この特徴周波数(characteristic frequency; CF)の情報を空間にマップすることで、聴覚野の周波数マップを得たところ、音響曝露群では、曝露音の周波数付近の刺激に対して敏感に反応するマップ領域が増大しました。このマップ変化の結果を受け、各神経活動をCFの属性で分類し、自発活動において、異なるCFを持つ神経活動間の活動同期強度を調べました。その結果、曝露音の周波数付近にCFを持つ神経活動と、耳鳴周波数(32 kHz)付近にCFを持つ神経活動の間の活動同期強度が曝露群では増加し、この同期強度は耳鳴指標と相関しました(図3)。

第3に、耳鳴と強い関連性があることが知られている聴覚過敏が、皮質内のどのような神経メカニズムに支えられているかを調べました。視床から皮質第4層への情報入力の指標となるLFPの振幅と、皮質第4層の出力情報を示す発火頻度との関係性を定量化しました。その結果、音刺激に応じたLFPの振幅と発火頻度の割合は、プレパルス抑制で定量化した聴覚過敏の指標と相関しました。この結果は、音響曝露に伴う皮質内の活動特性の変化が、聴覚過敏と関連する可能性を示しています。

【音の嗜好性テスト】 ラットの選択聴取行動から、音への嗜好性を定量化する実験系を構築しました(図4)。行動実験装置内を8つの仮想的な小領域に区切り、場所に応じて4種類の音条件、(i) 音提示無し(無音)、(ii) 10 kHz、(iii) 20 kHz、(iv) 40 kHzの純音(60 dB SPL)を割り当てました。20秒間を1試行として、試行間を5秒間のホワイトノイズ(30 dB SPL)で区切り、1日24または25試行を行いました。その結果、ラットは、無音環境を好むこと、また、40 kHzの純音を他の音よりも好むことを示しました。さらに、報酬系の腹側被蓋野と20 kHzの純音を連合すると、音の嗜好性を変えられること、また、耳鳴症状を呈するラットは統制群とは異なる嗜好性を示すことを示しました。

○今後の展望

本研究は、特定の脳活動が耳鳴症状に相関することと、耳鳴や条件付けにより音の嗜好性を変えられることを示しました。これらの成果を踏まえ、今後

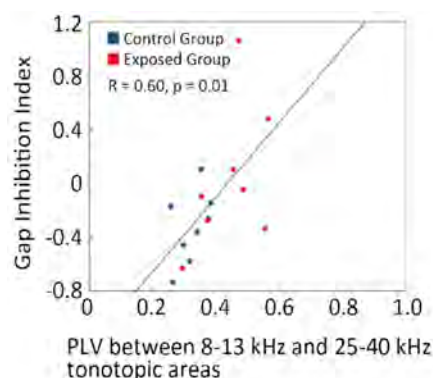


図3 自発活動の位相同期と耳鳴症状との相関

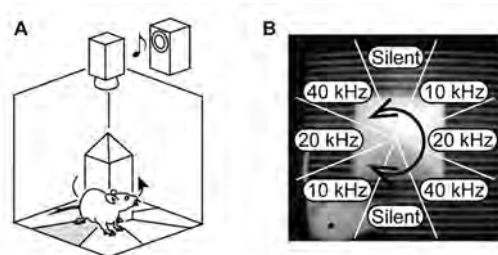


図4 音の嗜好テスト。

A 概念図。B 上から見た実験の様子。

は、音提示(音響療法)、音学習(行動療法)、投薬などにより、耳鳴知覚の質感を変え、症状を改善できる手法の開発が期待されます。

○関連する研究発表

論文

1. Soga R, Shiramatsu T. I., and Takahashi H.: “Preference test of sound among multiple alternatives in rats.” PLOS ONE 13 (6): e0197361, 2018 (13 pp).

2. Wake N., Shiramatsu T. I., and Takahashi H.: “Tone frequency representation beyond the tonotopic map: Cross-correlation between ongoing activity in the rat auditory cortex.” Neuroscience 409: 35-42, 2019

3. Takahashi H.: “Darwinian computation with functional map in auditory cortex.” Acoustical Science and Technology 41 (1): 39-47, 2020

学会発表など

1. Takahashi H.: Decoding of Darwinian neural activities in the auditory cortex.” The 6th CiNet Conference: Brain-Machine Interface - Medical Engineering based on Neuroscience -, Osaka, Japan, 2.5, 2020

2. Takahashi H. and Wake N.: “Neural correlates of tinnitus in the auditory cortex of rat.” 第97回日本生理学会大会, 2020 (別府, 2020年3月17日)

視覚障害者・盲ろう者に固有な質感のメカニズム解明と提示方法開発

研究代表者 三浦 貴大（産業技術総合研究所 人間拡張研究センター・研究員）

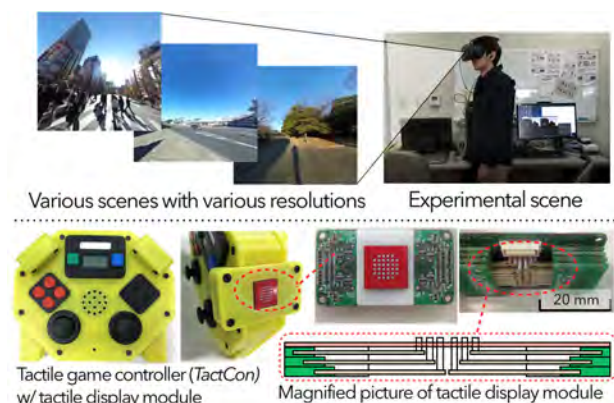
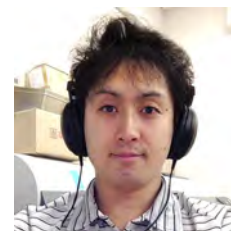


図 1. 本研究での代表的な成果. 上図: 弱視者における臨場感を調べるための全天球映像提示実験の様子, 下図: 視覚障害者のための触覚ディスプレイとその実装例としての触覚ゲームコントローラ

1. 研究の背景と目的

2016 年の障害者差別解消法の制定に伴って, 障害当事者への合理的配慮が行政機関で義務化されました. この結果, 視覚障害者・盲ろう者への支援・情報補償方法の発展・普及の必要性が増しています. 一方で, これまで開発された数々の感覚代行手法において, 障害当事者への提示情報の質を高める手法は発展途上でした. また, 視覚障害者や盲ろう者は, 独特な感覚・知覚・認識系を持っており, 晴眼者への提示手法がそのまま使えるとは限りません. さらに, 彼ら固有の知覚形態に関するメカニズム解明は進んでいないため, 具体的な提示手法も未発達でした.

このために本研究の目的を, 視覚障害者・盲ろう者に固有な質感のメカニズム解明とその提示方法・指針の開発を行うこととしました. 具体的には, 図 2 に示すように, 障害状況ごとに視覚・聴覚・触覚提示の方法について検討するというものです.

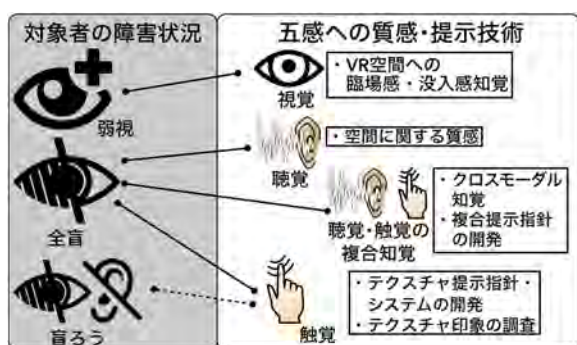


図 2. 当初の研究開発対象

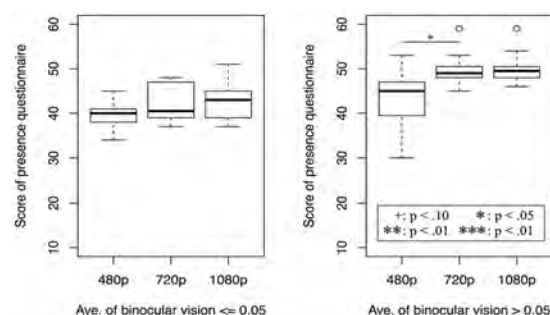


図 3. 視力ごとの臨場感の感じ方

2. 研究成果

2.1. 弱視者が臨場感を感じやすい VR 空間の特性

本課題では, 弱視者におけるヘッドマウントディスプレイ (HMD) での全天球映像 VR (Virtual Reality) コンテンツ提示時における没入感の発生要件の解明を目的として, 実験的に調査しました[1].

図 1 の上図に提示映像コンテンツをお示しします. 1 映像につき 2 分間, 3 つの VR 環境 (図 1) を用意し, それぞれに加工を施し提示しました. 参加者 (弱視者 6 名) には, 映像提示中に 360 度見回してもらい, Presence Questionnaire (PQ) (Witmer ら, 1998) という質問表で没入感を評価してもらいました. 加工条件は, 画質 (1080p, 720p, 480p の 3 種), フレームレート (10, 15, 24, 29.97 fps の 4 種), 色 (24 bit カラー, 8 bit グレースケールの 2 種), 映像と音の遅延 (0 s, 1.0 s, 1.5 s の 3 種) としました.

代表的な結果を述べます. フレームレートや解像度の向上と共に没入感が上がる傾向が確認できました. 図 3 は解像度に関する結果です. 両眼の平均視力が 0.05 以下の人では解像度が変わっても臨場感に変化はありませんでした. 一方で, 視力が 0.05 ~ 0.10 の人では, 480p と 720p・1080p の解像度では臨場感に差がありましたが, 720p と 1080p では差がありませんでした. また, VR 酔いが発生する人もおり, 解像度が 720p の条件の方が 1080p よりも没入感が高いと回答していました.

以上から, 弱視者が臨場感を感じやすい VR 空間を作るためには, その人の視力状況に合わせた解像度の設定が必要だと分かりました. この成果は, 文献 1. として今年の 3 月に発表される予定です.

2.2. 触覚ディスプレイを用いたゲーム支援

本課題では, 視覚障害者のコンピュータゲーム内の情報の獲得を容易化するための触覚提示方法を探



図 4. (上図)インクルーシブゲームの画面表示の例
(下図)出展中のゲーム画面. 左図: 視覚・聴覚・触覚情報がある状況, 右図が聴覚・触覚情報のみの状況

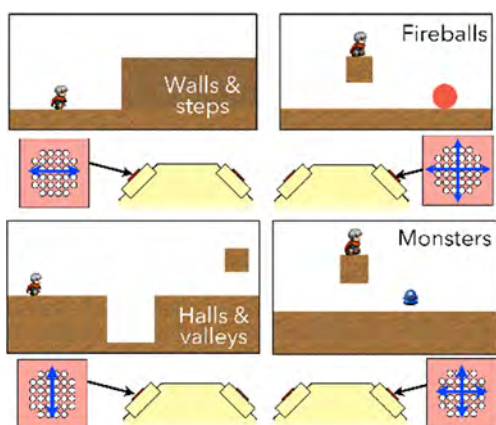


図 5. 触覚ゲームコントローラでの情報提示

ることを目的としました[2,3].

図 4 に評価対象としたサイドスクロールアクションゲームの画面表示の例を示し, 図 1 下図に作成した触覚ゲームコントローラ TactCon (Tactile game controller)の概観を示します. このコントローラには, 側面上部にピンディスプレイを装着してあります. このピンディスプレイは USB 5.0V で動かせるよう設計してあります. また, 広い周波数帯域での提示が可能になるよう, ピエゾ素子の共振周波数を約 1,2 kHz に設定しました. このピンディスプレイはゲーム内のイベント情報を提示可能です. 具体的には, 図 5 に示すような触覚提示を行えるように設定しました. 主に止まった物体の提示は左側ディスプレイ, 動く物体やモンスターは右側ディスプレイで触覚提示しました.

このゲームとコントローラとを 3 ヶ月間, 博物館で展示し, ゲームの行いやすさを評価しました. このとき, 遊んでくれた人達には, 前半は視覚・聴覚・触覚情報が全てある状況でプレイしてもらい, 後半は聴覚・触覚情報のみでプレイしてもらいました. 後半の遊び方は, 聴覚情報だけ (Audio play), 聴覚情報と TactCon を使った場合, 聴覚情報と点図ディスプレイ (DotView, 図 4 右上) を使った場合 (Touch play) のいずれかを選択してもらいました.

図 6 に 225 名分における後半のプレイ方法ごとの

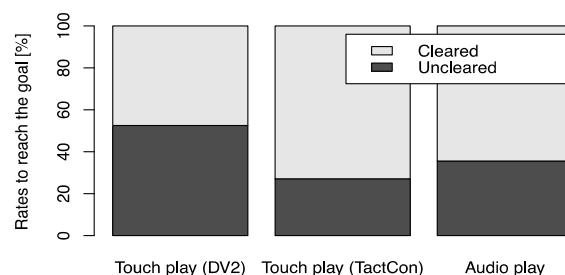


図 6. プレイスタイルごとのクリア率

クリア率をお示しします. 単に点図ディスプレイを使うよりも, TactCon を用いた方が高いクリア率となりました. また, 概して全盲者の方が弱視者・晴眼者よりも触覚提示によるゲーム内情報を分かりやすいと回答しました. 晴眼者だけで見ると, TactCon での提示方法が分かりやすいと回答した人ほど, クリア率が高い傾向にありました. 以上から, 触覚情報を適切に提示することで, リアルタイムコンテンツにおける操作性を, 視覚障害者のみならず晴眼者でも確保できる可能性が示唆されました. 現在は, より良い触覚提示方法の他, ゲームコンテンツの評価法・設計法についても検討を進めています.

3. 今後の展望

本稿では, 弱視者が臨場感を感じやすい VR 空間の特性の他, USB 5V で駆動する触覚ディスプレイを開発の上でゲームコンテンツでの操作支援の可能性について検討しました. この他, 視覚障害者における音による空間知覚の他, 視覚障害者スポーツにおける聴覚利用方法とその訓練支援方策の開発, 聴覚・触覚のマルチモーダル提示技術の開発, 盲ろう者の情報支援のためのボランティアスキーム・その支援のための触覚ディスプレイ開発を私達は進めています. このような成果を総合することで, 視覚障害者・盲ろう者の社会参加支援を総合的に助けるシステム開発・社会創出に繋がりたいと考えています.

関連する研究発表 (論文・学会発表など)

1. [Miura T](#), [Izumi T](#), [Onishi J](#), [Matsuo M](#), [Sakajiri M](#): Reality varied by visions: Requirements of immersive VR contents for people with low vision. J Tech & PwD 8, 2020 (Accepted).
2. [Miura T](#), [Katagiri A](#), [Yabu K](#), [Matsuo M](#), [Sakajiri M](#), [Ifukube T](#): Tactule: Tactile display modules utilizing multilayer-bimorph piezoelectric vibrators -Their applications in tactile game controllers (TactCon)-. IEEE World Haptics 2019, 2 pages, 2019.07.
3. 松尾 政輝, 三浦 貴大, 藪 謙一郎, 片桐 淳, 坂尻 正次, 大西 淳児, 蔵田 武志, 伊福部 達, 「リアルタイム多感覚提示を行うインクルーシブアクションゲーム: 触覚提示付きゲームコントローラ (TactCon) を導入したゲームの開発と利用時の評価」, 情報処理学会 アクセシビリティ研究会, 2019-AAC-10, 15:1-7, 2019.07

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



研究代表者 鵜木 祐史（北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科・教授）

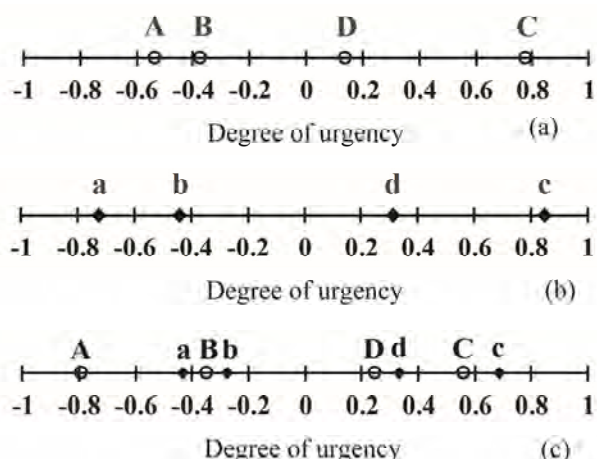


図1：緊迫感知覚の結果：(a) 原信号の場合、(b) 雑音駆動音声の場合、(c) すべての刺激の場合

○研究の背景と目的

質感認識は、脳による物体の本性の解釈であるといわれています。聴覚においてもヒトは、音を聞いただけで音を発した物体の性質（例えば、生物／無生物、個体差など）を瞬時に見極めることが可能です。さらに、聴覚では、音源となる物体の性質だけでなく、音がどのような環境で発せられたかという環境の性質も、同じ音から同時に認識することができます。例えば、リビングで聞いた声と風呂場で聞いた声の質感は異なりますが、声を発したヒトが誰であるのか、こういった感情で話したのかといった音源の性質はきちんと見極めることができます。

本研究の目的は、音声の質感（緊迫性といった情動）知覚における時間的な振幅包絡線情報の役割を解明することです。そこで、次の4点を検討するために、雑音駆動音声の緊迫感知覚に関する四つの実験を行いました。

- (1) 原音声とその雑音駆動音声をそれぞれ利用して、音声の時間的な振幅包絡線が緊迫感知覚の手がかりを含むかどうか検討すること。
- (2) 原音声と雑音駆動音声を混合した音声を利用して、音声の時間的な振幅包絡線が緊迫感知覚の手がかりを含むかどうか検討すること。
- (3) 音声の振幅包絡線の変調周波数成分の上限・下限を制御することで、音声のどの変調周波数成分が緊迫感知覚の手がかりとなっているか検討すること。
- (4) 時間反転させた音声の振幅包絡線においても同様に緊迫感知覚に影響を与えるか検討すること。

表1 シャープネスの違い

刺激ラベル	A (a)	B (b)	C (c)	D (d)
原音声	1.45	1.55	1.55	1.51
雑音駆動音声	1.73	1.84	1.82	1.77
差分	0.28	0.29	0.27	0.26

○これまでに得られた成果

本課題では、雑音駆動音声を利用した知覚実験から、音声の振幅包絡線に緊迫感知覚に関わる情報がどの変調周波数帯域に存在するか調査しました。ここでは、緊迫感の程度の異なる避難呼びかけ音声（アナウンサー1名）の原音声（4種類の発話 A, B, C, D）ならびに雑音駆動音声（4種類の発話 a, b, c, d）に対し、シェッフェの一対比較法を利用して緊迫感の心理距離ならびに緊迫感知覚の程度を調べました。その結果、図1(a)と図1(b)に示すように、緊迫感知覚の程度の順位が原信号と雑音駆動音声の間で一致し、音声の振幅包絡線に緊迫感知覚に関わる情報が含まれていることがわかりました。また、図1(c)の結果から、緊迫感の程度は、c, C, d, D, b, B, a, A の順番に並ぶことがわかりました。原信号と雑音駆動音声の緊迫感で違いがみられましたが、これはシャープネスの違い（表1）に影響を受けた可能性が示唆されています。

音声の振幅包絡線に対し、低域通過フィルタ（LPF）ならびに高域通過フィルタ（HPF）を利用して変調周波数成分の上限・下限を制御し、緊迫感知覚の程度の順位ならびに閾値を求め、緊迫感知覚に係わる変調周波数範囲を調査しました（図2(a)と図2(b)）。その結果、6 Hz～8 Hz の変調周波数成分が緊迫感知覚に重要であることが明らかになりました。これらの結果は、音声の時間的な振幅包絡線が緊迫感知覚で重要な役割を果たしていることを示唆しています。

この結果を踏まえると、パラ言語情報は言語情報とは無関係なものであることがわかります。そのため、時間反転した音声の時間的な振幅包絡線情報における緊迫感知覚においても、6 Hz～8 Hz の変調周波数成分が重要なものになることが予想されます。そこで、これらの点を確認するために、時間反転した雑音駆動音声に対し、LPF と HPF を利用して緊迫感知覚の実験を行いました（図2(c)と図2(d)）。その結果、いずれも先の結果とは異なり、緊迫感の程度はほとんど同じものであり、さらに LPF ならびに HPF のカットオフ周波数の変化とは関係なく、緊迫感の程度が0付近にあることがわかりました。

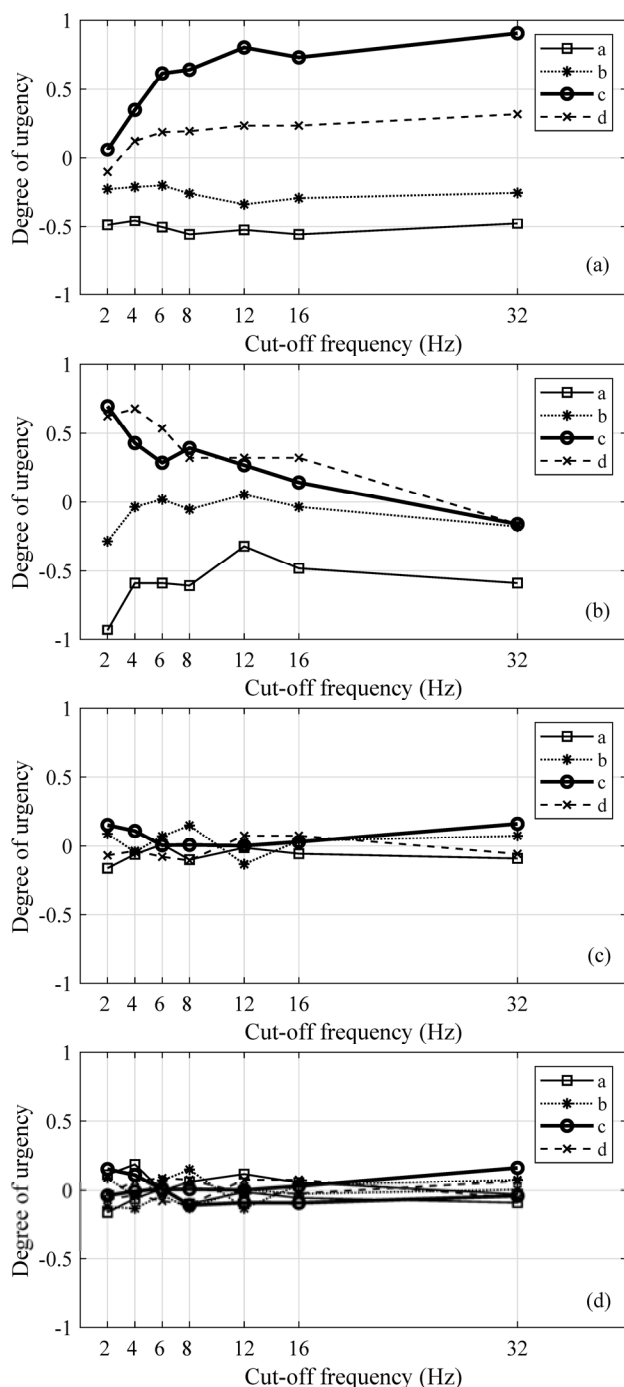


図 2：雑音駆動音声の緊迫感知覚の結果：(a) 低域通過フィルタで変調周波数の上限を制限された振幅包絡線情報の場合、(b) 高域通過フィルタで変調周波数の下限を制限された振幅包絡線情報の場合、(c) 低域通過フィルタで変調周波数の上限を制限された時間反転の振幅包絡線情報の場合、(d) 高域通過フィルタで変調周波数の上限を制限された時間反転の振幅包絡線情報の場合

本研究では、音声の時間的な振幅包絡線が緊迫感の知覚に及ぼす影響について実験的に検討しました。その結果、次のようなことが明らかになりました。

- (1) 雑音駆動音声の緊迫感は、原音声の緊迫感と同程度に知覚されること
- (2) 雑音駆動音声の緊迫感知覚に重要な変調周波数成分の下限が 6 Hz 程度であること
- (3) 雑音駆動音声の緊迫感知覚に重要な変調周波数成分の上限が 8 Hz 程度であること
- (4) 時間反転した音声の時間的な振幅包絡線には緊迫感知覚に重要な手がかりが含まれていない可能性が高いこと。言い換えると、長時間平均の意味での変調周波数ではなく瞬時的な変調周波数（あるいは変調周波数の時間変化パターンの非対称など）が緊迫感知覚に重要であるかもしれないこと

これらの結果は、音声の時間的な振幅包絡線が緊迫感知覚で重要な役割を果たしていることを示唆しています。

○関連する研究発表

論文

1. Masashi Unoki and Zhi Zhu, "Relationship between contributions of temporal amplitude envelope of speech and modulation transfer function in room acoustics to perception of noise-vocoded speech," *Acoustical Science and Technology*, 41(1), 233-244, Jan. 2020.
2. Zhi Zhu, Yukiko Araki, Ryota Miyauchi and Masashi Unoki, "Contribution of modulation spectral features on the perception of vocal-emotion using noise-vocoded speech," *Acoustical Science and Technology*, 39(6), 379-386, Nov. 2018.
3. Zhi Zhu, Yukiko Araki, Ryota Miyauchi and Masashi Unoki, "Contributions of Temporal Cue on the Perception of Speaker Individuality and Vocal Emotion for Noise-Vocoded Speech," *Acoustical Science and Technology*, 39(3), 234-242, 2018.

学会発表など

1. Masashi Unoki, Yukina Hosaka, and Shunsuke Kidani, "Pitch perception of noise-vocoded harmonic complex tones mimicking musical instruments", *Proc. Forum Acusticum 2020*, Lyon 2020.
2. 鷗木祐史, 川村美帆, 木谷俊介, 小林まおり, 赤木正人, "緊迫感知覚に寄与する音声の振幅包絡線情報の検討," 日本音響学会騒音振動研究会資料, 金沢工大, Nov. 2019.
2. Masashi Unoki, Miho Kawamura, Maori Kobayashi, Shunsuke Kidani, Masato Akagi, "How the temporal amplitude envelope of speech contributes to urgency perception," *Proceedings of 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, Germany, ICA 2019, 1739-1744, Sept. 2019.

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

研究代表者 村田 航志（福井大学医学部脳形態機能学分野・助教）

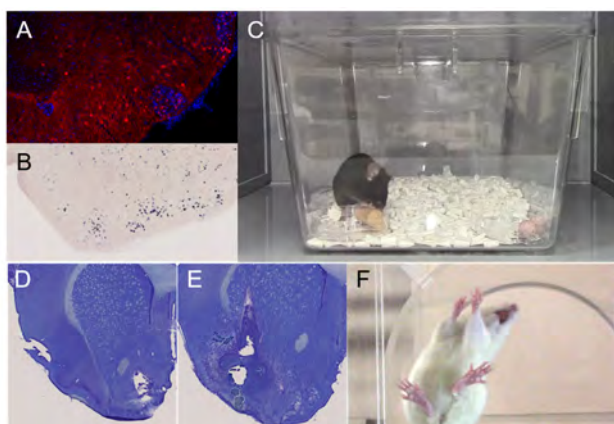


図. 嗅結節の神経細胞の操作による食行動の変化
(A) 特定の薬剤 CNO の投与で活性化する人工受容体 DREADD を発現した嗅結節の神経細胞。(B) 嗅結節の神経細胞が CNO の投与により活性化して最初期遺伝子 c-fos を発現した様子。(C) マウスの食嗜好性のテスト。嗅結節の神経細胞を操作したときに食べた飼料を好むかどうかを評価している。(D), (E) ラット嗅結節の内側(D)または外側(E)にカニューレを留置し、カニューレの位置を組織標本で確認した。カニューレを通して薬液を局所的に投与し、嗅結節の神経細胞を操作する。(F) ラットの口腔内にカニューレを留置し、味刺激（砂糖水、キニーネ水）を提示する。ラットの口の動きから、味刺激を好むか嫌がるかを評価する。

○研究の背景と目的

私達が食事を楽しむときに感じる「おいしさ」を脳がどのようにしてつくりだすのかは実はまだよくわかっていません。鼻をつまんでものを食べると風味が感じらなくなり、おいしさがよくわからなくなります。匂いの感覚はおいしさを感じるための大事な感覚だといえます。この研究ではおいしさ、すなわち「食べたものを好きになってしまう気分のよさ」が食べ物の特に匂いの感覚から生じる神経メカニズムを解明します。

これまでのマウスを用いた研究で、食べ物の匂いと食べる行為を結びつける機能が、脳の深部に位置する嗅結節と呼ばれる領域に備わっている可能性が示唆されました。嗅結節以外にも嗅覚神経回路にはその働きが十分には解明されていない領域があります。本研究では、神経回路を操作・標識し、食行動に関わる嗅覚神経回路を明らかにします。

○研究成果

1. オプトジェネティクスによるマウス嗅結節の操作と場所嗜好・嫌悪の表出

これまでの研究で、マウス嗅結節には領域と神経細胞の種類で規定される機能ドメインがあることが示唆されました。嗅結節の前内側部では、ドーパミン受容体の D1 を発現する神経細胞と D2 を発現する神経細胞は、マウスが匂いに対して誘引的な行動、または忌避的な行動を示すときにそれぞれ活性化することが示されました。そこで本研究では、D1 発現細胞と D2 発現細胞を区別して操作し、マウスにどのような影響がでるかを評価しました。

オプトジェネティクスでは、光を当てると開くイオンチャネルであるチャネルロドプシンを神経細胞に発現させて、脳に光ファイバーを留置することで、実験者の任意のタイミングで神経細胞を活動させることができます。嗅結節前内側部の D1 発現細胞と D2 発現細胞がそれぞれチャネルロドプシンを発言するマウスを用意し、場所嗜好性試験によって行動変化を評価しました。この試験では、神経細胞を操作した際に、部屋の滞在時間が長くなるかまたは短くなるかを評価します。D1 発現細胞を操作した場合は滞在時間が長くなり、D2 発現細胞を操作した場合は滞在時間が短くなりました。この結果から、嗅結節前内側部の神経細胞には、D1 発現細胞にはいい気分を、D2 発現細胞にはいやな気分をもたらす作用があることが示唆されました。（関連する研究発表・原著論文 1）

2. ケモジェネティクスによるマウス嗅結節の操作と食嗜好性の変化

嗅結節前内側部の D1 発現細胞が、食べ物の好き嫌いの獲得に関わるかどうかを検討しています。D1 発現細胞に人工受容体をさせることで、マウスに特定の薬剤 CNO を投与したタイミングで活性化させることができます。D1 発現細胞が活性化した状態で食べた飼料は通常よりもより好きになる可能性が見られています。（図 A-C, 論文未発表）

3. ラット嗅結節の薬理的な操作による味刺激への応答変化

嗅結節は解剖学的には腹側線条体の一部です。嗅結節とともに腹側線条体を構成する側坐核は、味刺激への好きと嫌いという情動を作り出すことが知られています。側坐核の前内側部にムシモールという

薬剤を局所注入すると味刺激を好む反応が増え、後内側部に局所注入すると味刺激を嫌がる反応が増えます。本研究では、嗅結節も同様にムシモール注入によって味刺激を好む・嫌う反応が変化するかどうかを検討しています。嗅結節の前内側部にムシモールを注入すると味刺激を好む反応が増加し、外側部に注入すると味刺激を嫌う反応が増加する傾向が見られています (図 D-F, 論文未発表)。

4. 離乳期におけるマウス嗅結節の機能発達

哺乳類は生まれてしばらくは授乳で栄養をとりますが、成長とともに自立してエサを食べようになります。離乳期の動物は環境の中から食べられる物を判断し一種の学習をしますが、その神経メカニズムはよくわかってませんでした。本研究では嗅結節の生後発達を観察し、マウス嗅結節は生後直後に発達が完了しているわけではなく、離乳期に入る頃にドーパミン受容体の発現量が増加すること、離乳後期にかけて応答性が成熟することを発見しました。離乳行動と嗅結節の神経活動の因果関係はまだわかりませんが、マウスがエサを認識し、自ら食べるようになるときに嗅結節に関わる可能性が示唆されました。(関連する研究発表・原著論文 2)

5. マウス視床下部外側野に投射する嗅覚神経回路の発見

嗅結節以外にも摂食行動に関わる嗅覚神経回路があるかもしれません。摂食行動に関わる脳領域である視床下部外側野への嗅覚神経回路からのつながりを探索したところ、新たな嗅覚中枢領域が見つかりました。

実験では、軸索から取り込まれて神経細胞を標識する逆行性色素を視床下部外側野に注入し、嗅覚中枢領域で標識された神経細胞が見つかりました。私たちはこの領域を腹嗅核 (ventral olfactory nucleus) と名付けました。(関連する研究発表・原著論文 3)

○今後の展望

匂いの感覚は食べ物を口に入れたあとも風味・フレーバー感覚としておいしさを作り出します。おいしさの感覚は嗅覚だけではなく、味と舌触りが一体となって形成されます。今後は嗅覚と味覚、口腔触覚が脳の中で、特に嗅結節においていかにして統合されておいしさを作り出すかを明らかにしていきたいと思います。

○関連する研究発表

原著論文

1. Wataru Murofushi, Kensaku Mori, Koshi Murata*, and Masahiro Yamaguchi*
Functional development of olfactory tubercle domains during weaning period in mice

Scientific Reports 8, Article number: 13204 (2018)

2. Koshi Murata*, Tomoki Kinoshita, Yugo Fukazawa, Kenta Kobayashi, Akihiro Yamanaka, Takatoshi Hikida, Hiroyuki Manabe, and Masahiro Yamaguchi

Opposing roles of dopamine receptor D1- and D2-expressing neurons of the anteromedial olfactory tubercle in acquisition of place preference

Frontiers in Behavioral Neuroscience, Volume 13 Article 50 (2019)

3. Koshi Murata, Tomoki Kinoshita, Yugo Fukazawa, Kenta Kobayashi, Kazuto Kobayashi, Kazunari Miyamichi, Hiroyuki Okuno, Haruhiko Bito, Yoshio Sakurai, Masahiro Yamaguchi, Kensaku Mori, and Hiroyuki Manabe

GABAergic neurons in the olfactory cortex projecting to the lateral hypothalamus in mice
Scientific Reports 9, Article number: 7132 (2019)

4. Kazuki Shiotani, Hiroyuki Manabe, Yuta Tanisumi, Koshi Murata, Junya Hirokawa, Yoshio Sakurai, Kensaku Mori

Tuning of ventral tenia tecta neurons of the olfactory cortex to distinct scenes of feeding behavior

bioRxiv 455089

日本語総説

1. 村田 航志

マウス脳で探る匂いの誘引性と忌避性が生じる神経メカニズム

基礎心理学研究 2018 年 37 巻 1 号 p. 72-76

2. 村田 航志

食の満足感を生み出す脳神経メカニズム

AROMA RESEARCH (フレグランスジャーナル社) No. 76
10-11 (Vol. 19 / No. 4 2018)

学会発表など

1. Koshi Murata and Hiroyuki Manabe
Identification of GABAergic neurons in the olfactory cortex projecting to the lateral hypothalamus in mice

The 48th Naito Conference, Sapporo, Japan, October 2019



研究代表者 齋木 潤（京都大学大学院人間・環境学研究科・教授）

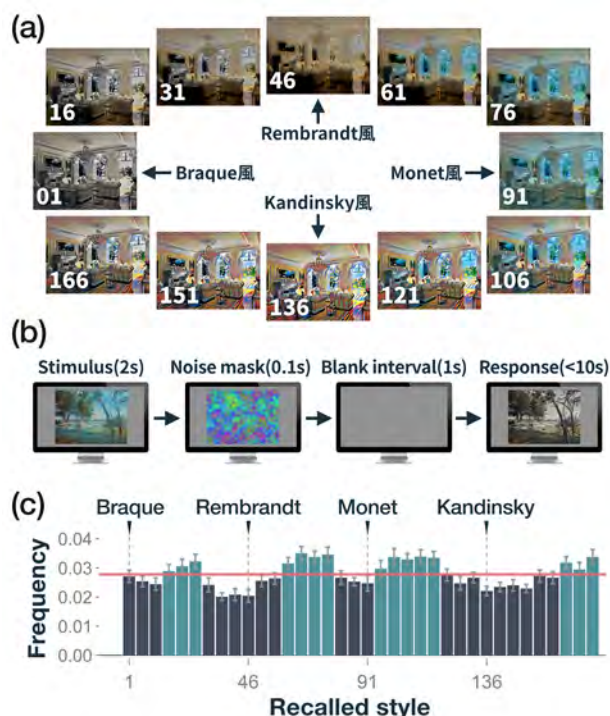


図1. (a) 実験で用いた画像 (b) 課題手続き (c) 回答されたスタイルの頻度の偏り

○研究の背景と目的

われわれは質感記憶の研究を進め、これまでに、①光沢感の記憶精度は知覚とほぼ変わらない、②光沢感の記憶にはバイアスが存在する、③光沢感の短期記憶は腹側高次視覚野と頭頂間溝領域によって担われている、ことを明らかにしてきました。本研究では、特に質感記憶のバイアスの問題に着目します。視覚記憶のバイアスは、記憶が知覚情報をそのまま保持しているのではなく変容を伴うことを示唆し、質感記憶の性質の理解に重要な手がかりを提供します。

このために、質感画像変換技術を利用し、風景写真、絵画などの複雑な画像刺激を用いて、厳密で定量的な記憶変容メカニズムの心理物理学的測定を行いました。また、粗さの視覚性短期記憶課題を用いたfMRI実験を改変して、記憶保持期間に干渉刺激を提示することにより、干渉による視覚性短期記憶の変容の神経基盤の検討を行いました。

○研究成果

(1) 絵画質感の短期記憶バイアス

従来の研究から、視覚記憶は特定のバイアスを持つことが知られています。例えば、記憶した色は青や緑などのカテゴリの中心へと歪むことが報告されています。色を題材とした記憶バイアスの既存研究は単色刺激を用いてきましたが、本研究では風景画像を刺激として用い、複雑な色分布を持った刺激においても記憶のバイアスが生じるか否かを検討しました。

風景画像の色分布を操作するため、深層スタイル転写の方法を利用しました。自然風景写真に対し、4つの絵画作品（Rembrandt, Monet, Braque, Kandinsky）のスタイルを様々な混合比で適用することで、画像の絵画的スタイルが連続的に変化する画像系列を作成しました。実験参加者は提示されたサンプル画像を記憶し、1秒の遅延時間の後に、テスト画像のスタイルを調整することで記憶した画像のスタイルを回答しました。

全ての絵画スタイルは等頻度で提示されたため、もし回答が正確であれば実験参加者の回答スタイルも等頻度になると予想されます。しかし、実際の結果では、回答されたスタイルの出現頻度には系統的な歪みが見られました。すなわち、複数の絵画スタイルが混合されたスタイルの回答頻度が高くなることを見出されました（逆に、単一スタイルの回答が減少）。追加実験として、サンプル刺激とテスト刺激を同時に見ながら調整を行う知覚条件でのデータを取ったところ、この場合には逆にオリジナルのスタイルに回答が偏るという結果が得られました。

以上の結果は、風景画像の質感に対して知覚と記憶が異なるバイアスを持つことを示唆します。また、同じ視覚性短期記憶課題でも単色の場合と風景画像の場合にはその歪みの特徴が逆になることから、短期記憶において常にカテゴリ中心への記憶変容が生じるわけではないことがわかりました。

(2) 絵画質感の長期記憶

上述の絵画スタイルの記憶課題を改変して、長期記憶を測定する実験を行いました。すなわち、実験参加者ははじめに72枚の画像を各10秒ずつ連続して学習し、その後にスタイルの回答が求められました。学習時には各画像に対して7段階の美しさ評価を行いました。

回答されたスタイルの頻度を分析すると、短期記憶の場合とは逆に、単一スタイルへの回答が増加し、混合スタイルの回答は減少していました。また、美しさの評価値と回答頻度の間には正の相関が見られ

ました ($r=.35$)。

長期記憶と短期記憶での結果の相違をどう解釈すべきかは今後の検討課題です。記憶された内容の違いや変容を反映している可能性や、課題構造の違いによる反応バイアスの影響などが考えられます。美的評定値と回答頻度の間の正の相関は、画像の美的印象が記憶バイアスや反応バイアスの規定因のひとつである可能性を示唆します。

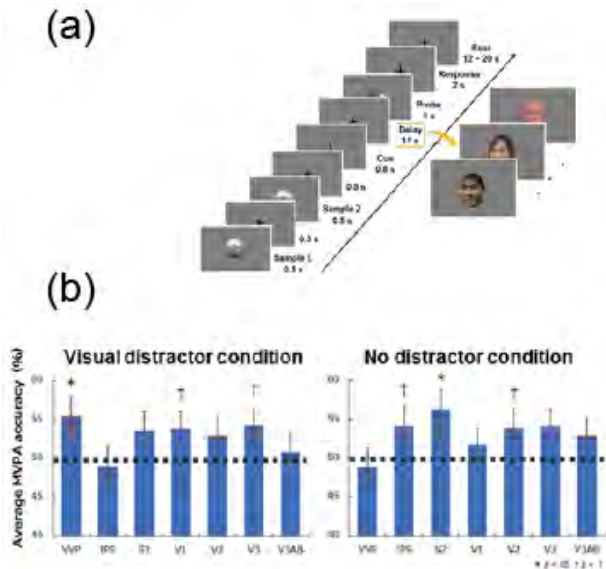


図2. 視覚性短期記憶における干渉効果の神経基盤。

(a) 実験課題：呈示された2個の物体のうち手がかりと一致する1個を記憶し、保持期間中に顔画像が干渉刺激として呈示される。その後、テスト刺激と記憶刺激の粗さを比較判断する。(b) 各脳領域におけるMVPAの正答率。左は干渉あり、右は干渉なし条件。*は統計的に有意な条件。

(3) 記憶変容の神経基盤

これまでの私たちの研究により、腹側高次視覚野と頭頂間溝が人間の質感の記憶メカニズムを支えていることが明らかになりました。しかし、これまでの研究では保持中に視覚的な干渉を処理する場合については検討できていませんでした。私たちは質感に限らず、日常的に何かを記憶している際には、記憶だけに集中することはほとんどないと思います。つまり、常に何らかの視覚情報を処理しながら記憶も同時に行っていると考えられます。そこで、記憶しながら視覚的な情報を処理するという現実場面を模した実験を行い、その際にどのような神経基盤が関与するかを検討しました。干渉効果は単に記憶成績の低下や向上という視点のみならず、視覚記憶の変容という観点からとらえることができ、絵画スタイルにおける記憶バイアスの研究とも密接な関連を持つものです。

方法 粗さを記憶する課題を行い、その時の脳活動をfMRIで測定しました。参加者はつるつるした刺激あるいはざらざらした刺激を記憶しました。そして

試行の最後に呈示されるテスト刺激と比較して、記憶した刺激とテスト刺激のどちらがつるつるしていたのかを判断しました。ランダムに選択された半数の試行において保持期間中に視覚的干渉(顔)が呈示されました(図2a)。

結果・考察 保持期間中の脳活動に対してマルチボクセルパターン解析を適用しました。その結果、視覚的干渉の呈示条件では腹側高次視覚野、視覚的干渉の非呈示条件では二次体性感覚野の関与が見られました(図2b)。この結果には粗さの特性と参加者の方略が関与すると考えられます。粗さは視覚よりも触覚との結びつきが強く、従来触覚的特性として考えられてきました。さらに、本実験ではランダムな試行で視覚的干渉が呈示されることを参加者は事前に理解しています。したがって、記憶された粗さの視覚情報は、粗さがもつ特性と視覚的干渉により、脳内で触覚情報として特に保持されていたと考えられます。視覚的干渉の呈示条件では顔刺激が呈示されていたため、顔刺激の処理にも関わる腹側高次視覚野が賦活してしまった可能性があります。そこで、顔刺激の処理を抑えて正確な質感情報を喚起させるために腹側高次視覚野の関与が顕在化したと思われる。視覚的干渉の非呈示条件では触覚的に重みづけられた状態が維持されるため、触覚情報の保持に関与する二次体性感覚野の関与がそのまま抽出されたと考えられます。

○今後の展望

絵画の質感記憶の心理物理実験から視覚記憶の変容はカテゴリ中心へのバイアスというような単純なものではなく、短期記憶か長期記憶か、或いは課題の構造によって異なるパターンを示すことがわかりました。また、スタイル変換の手法が記憶の変容を定量的に調べるために極めて有効であることも示されました。さらに、fMRIを使った実験の結果は視覚記憶の変容は視覚情報処理に限定されるものではなく、多感覚的なものであることを示唆しています。今後は、スタイル変換と脳機能計測の連携なども視野に入れて、質感記憶が多感覚的な情報の相互作用により時間的に変容するメカニズムの解明に向けた研究の展開が望まれます。

○関連する研究発表

学会発表など

1. 津田裕之, 武田侑樹, 藤道宗人, 齋木潤. (2019). 画像の絵画的スタイルの視覚記憶. 日本基礎心理学会第38回大会, ポスター発表, 神戸大学, 11月29日-12月01日(発表日12月01日).
2. Fujimichi, M., Tsuda, H., Yamamoto, H., & Saiki, J. Visual distractor modulates neural representation of objects' roughness held in visual working memory. The 15th Annual Meeting of Asia-Pacific Conference on Vision, Osaka, Japan, July, 2019.

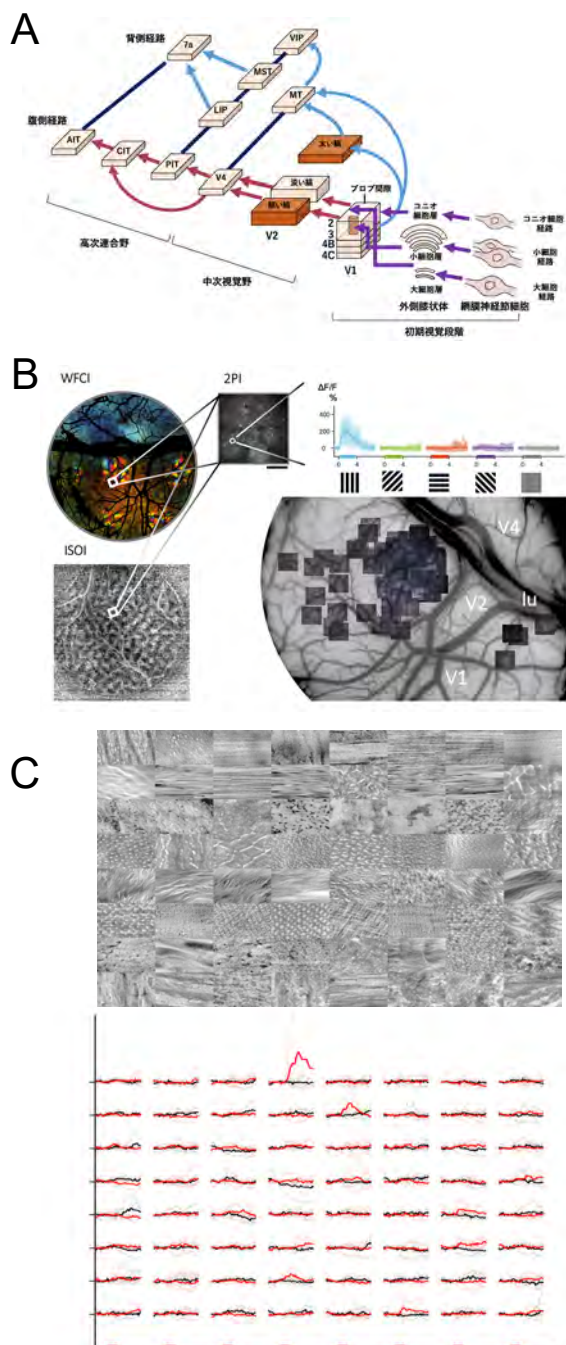


図1 (A) 霊長類視覚経路の概略図（カンデル神経科学の図を改変）、(B) 大域イメージング（WFCI、広域カルシウムイメージング；ISOI、内因性シグナル光学測定）と局所イメージング（2PI、2光子カルシウムイメージング）の併用、(C) テクスチャー刺激セット(上)に対するV2野「細い縞」細胞の反応例(下)。

○ 研究の目的と背景

物体の表面は、その構造的/光学的特徴である質感を備えています。質感の主要な要素であるテクスチャー（材質感を与える肌理や模様）は、大脳皮質において、V1野を出発してV2野、V4野へと進む腹側経路で処理されます。V1野細胞の視覚応答の大部分は方位・空間周波数等の基本的な画像統計量で説明されるのに対し、V2野とV4野の視覚応答には高次統計量（複数フィルタ間の相関等）の影響が強く現れます。私たちは前期の公募研究において、V4野においてテクスチャー高次統計量の抽出がV1野に比べて進んでいることを確認すると共に、V4野内に、テクスチャー高次統計量の抽出に特化した機能構造が存在する予備的証拠を得ました。

腹側経路は、テクスチャーのみならず、見ているものの形、色、奥行き、そして運動方向までも処理しています。色の情報の処理はV1野のチトクロムオキシダーゼ（C0）高活性プロブ、V2野のC0高活性「細い」ストライプ、V4野の色ドメインと呼ばれる構造が行なっています。色はV1プロブ、V2細いストライプ、V4色ドメインという経路が担っていると推定されます。このことは、腹側経路内に機能構造を結ぶ並列内部回路が異なる視覚属性の処理を分担している可能性を示しています（図1A）。しかし、テクスチャーの処理を行っている細胞がV1野、V2野、V4野それぞれの中でどのように分布し、上で述べた機能構造とどのような関係にあるかは不明です。私たちは、この未解明問題に答えることを目標に研究を進めました。この研究はさらには、テクスチャーとその他の視覚属性の情報がどのように統合されるか（相互作用を持っているか）にも結びついていきます。これらの解析を通して、質感知覚、物体認識の脳内機構の理解を進めることを目指しました。

○研究成果

1. 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の開発

V1野のC0高活性プロブ、V2野のC0縞、V4野の色ドメインなどの機能構造は数百マイクロメートルの大きさを持った構造で、それらの配置を知るには数ミリメートル四方の範囲の脳の活動を計測する必要があります。そのような手法として内因性シグナル光学測定法（ISOI）と1光子広域カルシウムイメージング（WFCI）という2つの手法があります（図1B）。しかし、これらの手法は一つ一つの神経細胞

の活動を個別に観測することはできず、たくさんの神経細胞の活動の合算を観測しています。一方、2光子カルシウムイメージング法(2PI)は個別の神経細胞の活動を個別に計測できますが、一度に観測できるのは500マイクロメートル四方程度の範囲に限られます。個々の神経細胞のテクスチャーへの反応を調べると同時に、それらの神経細胞がどの領野機能構造に属しているかを知るには、ISOIやWFCIと、2PIを併用しなくてはなりません。これを実現するには2つの技術が必要です。一つは脳表を広く露出し、その表面から安定してISOIやWFCIを行う技術です。もう一つは、こうして露出した脳表面からのWFCIや2PTを可能にするため、長期間にわたってカルシウム感受性蛍光シグナルを出す遺伝子を開発することです。

私たちは北京大学でISOI用に開発されたイメージングチャンバーをサル(V1野、V2野、V4野を含む広い領域(直径16ミリメートル)に適切に装着することで、ISOIのみならず、WFCIや2PIも安定して行う技術を開発しました(図1B)。また、京都大学霊長類研究所の共同研究者たちとともに、カルシウム感受性蛍光シグナル分子の遺伝子を持つ新規ウイルスベクターを用いることでV1野、V2野、V4野での2PIに成功しました。ウイルスベクターの注入濃度を調整することで、同一観測領域から6ヶ月以上にわたる2PIを実現しました。

2. 2光子カルシウムイメージングによるテクスチャーへの反応の解析

以上の技術を用いて、現在、V2野におけるテクスチャー感受性細胞の分布を調べています。V2野は先行研究からテクスチャーに関係する高次統計量を情報として伝える神経細胞が腹側経路で初めて現れる脳部位とされています。V2野は3種類のコンパートメント(細い縞、太い縞、淡い縞)が存在しますが(図1A)、テクスチャー情報を伝える神経細胞がそのどれに属しているのか、どのように分布しているのか(クラスター状に集まっているのか、テクスチャーのカテゴリーによって分かれて分布しているのか、など)は不明です。

そこで、ISOIとWFCIによりV2野でのコンパートメントを可視化して3つの縞を特定した後、同定された縞の個々の神経細胞のテクスチャーに対する反応を調べました。テクスチャー刺激として、本誌異記で開発された画像データベース(Okazaki Synthetic Texture Image (OSTI) database)を用いました。図1Cに用いた刺激64枚を示します。木や石や布など8つのカテゴリー(各列が一つのカテゴリー)の表面画像それぞれから8つの例が選ばれています。この64枚のテクスチャー画像を順にサルに提示した時の、V2野の神経細胞の反応を調べたところ、特定のテクスチャー画像に反応するものがあることが判明しました。

図1C下パネルは、淡い縞に属するある一つのV2野細胞の反応を示します。この神経細胞は最上段左から4つ目の画像に対して強い反応を示しましたが、その他の画像にはほとんど反応しませんでした(赤線)。この反応は、画像の位相を崩した刺激(方位や空間周波数は元のまま)に対しては反応しませんでした(黒線)。すなわち、この神経細胞の反応は方位・空間周波数に対するものではなく、何らかの高次統計量によるものであると推定されます。

現在のところ、私たちが用いたテクスチャー画像に反応する神経細胞の数は限られており、テクスチャー処理を行う機能構造がどれであるかや、テクスチャー反応性細胞の分布の様子を明らかにするに至っていません。

○今後の展望

今回のプロジェクトにおいて、広域イメージングと局所イメージングの同時適用を霊長類大脳皮質において可能にしたが、当初目的である「テクスチャーの処理を行っている細胞がV1野、V2野、V4野それぞれの中でどのように分布し、これら領域の中の機能構造とどのような関係にあるかに答えを得る」ためには、さらに実験を積み重ねる必要があります。特に、実験に用いる刺激画像の様々なパラメーター(大きさ、輝度、コントラストなど)を操作して、適切な刺激条件を見いだすことが必要です。

。

○関連する研究発表論文

1. Ikezo K, Amano M, Nishimoto S, Fujita I: Mapping stimulus feature selectivity in macaque V1 by two-photon Ca^{2+} imaging: encoding-model analysis of fluorescence responses to natural movies. *NeuroImage* 180(Pt A): 312-323, 2018.

学会発表など

1. Hatanaka G, Fang Y, Inagaki M, Takeuchi R, Inoue K, Takada M, Fujita I: Combined application of multiscale calcium imaging with GCaMP6s and intrinsic optical imaging in macaque visual cortex. *Neuroscience* 2019 (The 42nd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society), Niigata, Japan, 7.25-28, 2019.
2. Fang Y, Hatanaka G, Inagaki M, Takeuchi R, Inoue K, Takada M, Fujita I: Combined use of intrinsic optical imaging and 2-photon Ca^{2+} imaging for determining the distribution of stimulus-specific responses across macro-architecture in macaque visual cortex. *APCV2019 (The 15th Asia-Pacific Conference on Vision)*, Suita, Japan, 7.29-8.1, 2019.

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

研究代表者 楊 家家（岡山大学大学院ヘルスシステム統合科学研究科・助教）

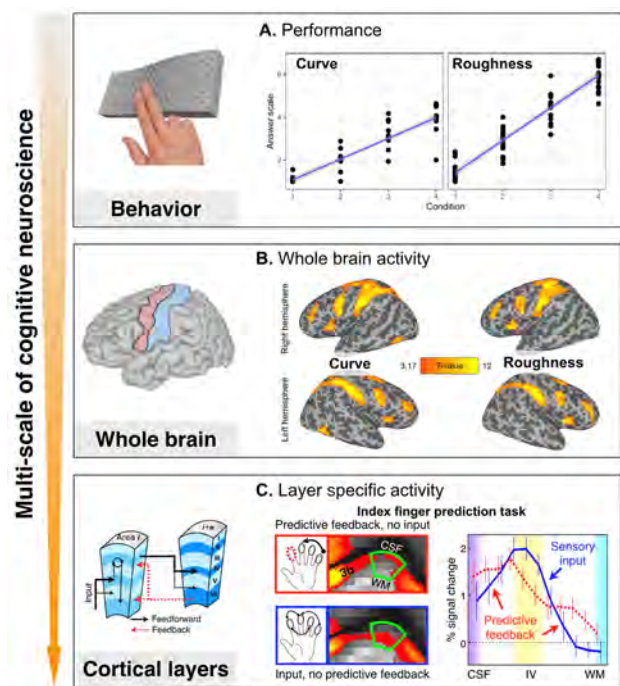


図1. マルチスケールな認知脳機能解明の研究アプローチ

(A) 能動的触覚による対象表面のカーブ（グローバル情報）と粗さ（ローカル情報）認知特性の認知的心理学的検討。(B) 3T-fMRI を用いたカーブと粗さ評価の全脳活動ネットワークの脳科学的検討。(C) 7T レイヤーfMRI を用いた第一次体性感覚皮質の各層の情報処理に関する脳科学的検討。

○研究の背景と目的

立体覚とは、ものを手にした際に対象の質感・形態、用途や名称などの統覚を意味している広義の触覚です。立体覚失認は触覚失認とも呼ばれ、基本的感覚（圧覚、材質感など）に障害がないにも拘わらず、手にした物体が解らない病態を指しています。一方で、触覚受容器からの情報は、脳幹や大脳辺縁系を經由して第一次体性感覚皮質の3b野に到達し、さらに他の高次領野と交互作用して対象を認識することが知られています。多くの立体覚障害患者は、末梢神経から大脳辺縁系までの情報伝達、そして3b野での触覚情報の初期統合処理などは正常であると考えられ、臨床的には頭頂葉損傷と結びつけられて研究が進められてきました。しかし、頭頂葉に器質的損傷のない認知症患者に立体覚障害が見られる事

から、立体覚障害は記憶・学習・言語処理を司る前頭-頭頂ネットワークが重要であることが示唆され、認知症の診断やリハビリで立体覚を用いることの有効であると考えられます。そこで、本研究は、立体覚に焦点を当てて、触覚による物体認識過程を明らかにし、その知見を認知症早期発見のための医学的診断への展開を目指しています。

○研究アプローチ

我々の脳は、神経細胞が多段階の階層構造をもつ複雑な生体情報処理システムであり、その機能素子となる神経細胞間や脳皮質層間の高度な相互作用によって情報処理を行い、多様な脳機能を実現しています。近年、機能的磁気共鳴機能画像法（fMRI）を中心とする非侵襲脳活動計測技術の急速な発達には、図1A, Bに示すように、さまざまな精神活動を脳のマクロな機能に結びつけて理解することが可能になりました。また、7テスラ（7T）MRIを用いることにより、高精細かつコントラストの高い脳画像を撮像できるようになり、従来困難であった百マイクロ単位でのヒト大脳皮質の微細構造に迫ることを可能になりました。さらに、2015年ごろから大脳皮質層レベルの機能的活動を計測する7TレイヤーfMRI技術の実用ができるようになり（図1C）、新しい視点からヒトの認知脳機能解明への展開が期待されています。本研究では、基礎研究である物体・素材認知機構の立体覚の解明において、図1に示すようなマルチスケールな認知脳機能解明の研究アプローチを取っています。さらに、これらの基礎研究の知見に基づいて、認知症の進行に伴う記憶や理解・判断力などの認知脳機能の低下を検出できるタスクを考案して、認知症早期発見装置の開発も進めてきました。

○研究成果

1) 受動的触覚による対象弁別のトレーニング効果

まず、受動的触覚による知覚できる2次元角度弁別特性を検討しました。これまでの研究により、ヒトは指先に接触する“く”の字の形をしている角度がはっきりと認識でき、二つの角度刺激の差がわずか5度程度（識別閾値）でその差異が識別できることが明らかにしました。さらに、ヒトは安定して角度識別タスクを実施できる条件を検証するため、健康者を用いた触覚角度識別のトレーニング効果を検討する研究を進めてきました。図2Aに示すように、タスクの実施間隔（一日間か一週間）によらず、同

様な角度刺激別タスクが3回以上実施することで、角度刺激別閾値が安定することがわかりました。さらに、図2Bのピンク色プロットに示すように、2回目以後のトレーニングタスクが触覚方向識別タスクに変えても一定のトレーニング効果が認められています。

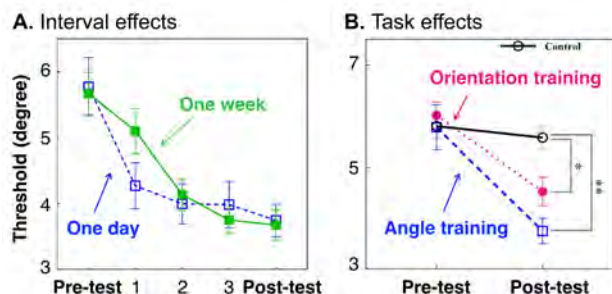


図2. 角度弁別のトレーニング効果

2) 能動的触覚による対象形状と表面粗さ認知の脳内処理の差異

次に、ヒトは自ら対象を触る際の脳活動を計測して、対象のグローバルな情報とローカルな情報の脳内処理機序の違いを検討しました。実験刺激として、3Dプリンタを用いて、長さ10cm×幅4cmのブロックの表面にグローバルな情報として、ブロックの表面全体に1から4までの4種類カーブ(図1A)を作成しました。さらに、それぞれのカーブ刺激の表面に分布密度が異なる4種類の凸状ドットパターンをプリントしました。そして、被験者は、fMRIによる脳活動を計測していると同時に、画面の指示に従って、対象のカーブあるいは表面粗さのいずれかを評価してもらいました。その結果は、図3に示すように、カーブの増加に従って青色の領域の活動が強くなっていることがわかり、粗さの場合は同様な活動が見られませんでした。この結果は、触覚による対象グローバルな情報とローカルな情報処理が異なる脳内処理プロセスであることが検証しました。

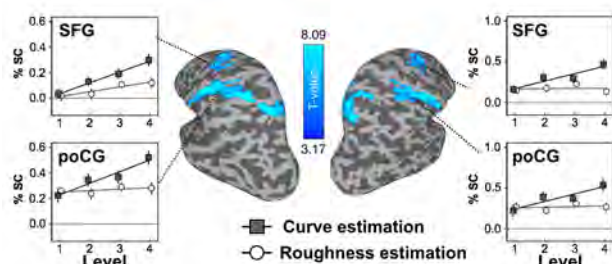


図3. 触覚による対象形状と表面粗さ認知の脳活動

3) 7T レイヤーfMRI によるヒト 3b 野の各層の機能的役割の検討

これまで解明してきた触覚情報の脳内処理過程に関する知見をさらに深めるために、第一次体性感覚皮質 3b 野の各層間でどのような情報交換が行なわれているかに関する研究も進めてきました。具体的に、まず動物研究の知見に基づいて、ヒト 3b 野のレイヤー情報処理モデルを提案しました。実験タスクとして、図4Aに示すように、被験者の左手の小指か

ら人差し指に向けてリズムカルに刺激することにより、被験者に「人差し指が刺激されるタイミング」を予測させるパラダイムを用いて、予測フィードバック信号が 3b 野の上層と深層へ投射されることを明らかにしました。一方で、4本指をランダムに刺激することで、人差し指の刺激タイミングが予測できなくなるパラダイムを用いて、予測過程が働かない触覚感覚情報のみの場合には、3b 野の中間層が活動すること(図4B)を明らかにしました。

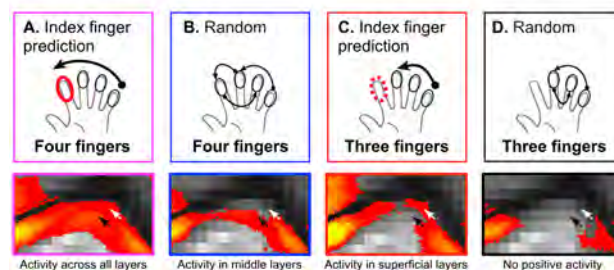


図4. ヒト第一次体性感覚皮質 3b 野の各層の活動

4) 触覚認知能力検査装置の改良

また、前記の基礎研究を行うと同時に、認知症早期診断用の触覚認知機能検査装置の改良も取り込めました。現行の触覚認知機能検査装置の最大の問題点は、検査時間が長い(約15分)ことでした。その理由は、現行の装置で用いた一対比較の角度刺激弁別パラダイムにあると考えられます。検査時間を短縮するために、新たに10枚の角度刺激並び替えるパラダイムを考案し、その有効性も検証できました。この改善により、検査時間が5分間以内にまで短縮でき、健常高齢者と認知症患者を用いた評価実験を行なっています。

○今後の展望

基礎研究について、認知心理学的手法によるマクロなヒトの認知行動特性の解明から、レイヤーfMRI技術によるミクロレベルでの皮質層間神経回路機能の解明までの研究アプローチを基本として、認知脳機能の解明を継続して進めていきます。

応用研究について、これまで認知症早期診断の取り組みを進展すると同時に、認知症と診断された後に「どのように認知症による脳機能低下を防ぐか」も視野に入れて研究を進めていきます。

○関連する研究発表

1. Yu Y, Huber L, Yang J, Jangraw DC, Handwerker DA, Molfese P, Chen G, Ejima Y, Wu J, Bandettini PA: Layer-specific Activation of Sensory Input and Predictive Feedback in the Human Primary Somatosensory Cortex. Science Advances 5:eaav9053. 2019
2. Wang W, Yang J, Yu Y, Wu Q, Yu J, Takahashi S, Ejima Y, Wu J: Tactile angle discriminability improvement: roles of training time intervals and different types of training tasks. Journal of Neurophysiology 122:1918-1927. 2019



研究代表者 金沢 創（日本女子大学人間社会学部心理学科・教授）

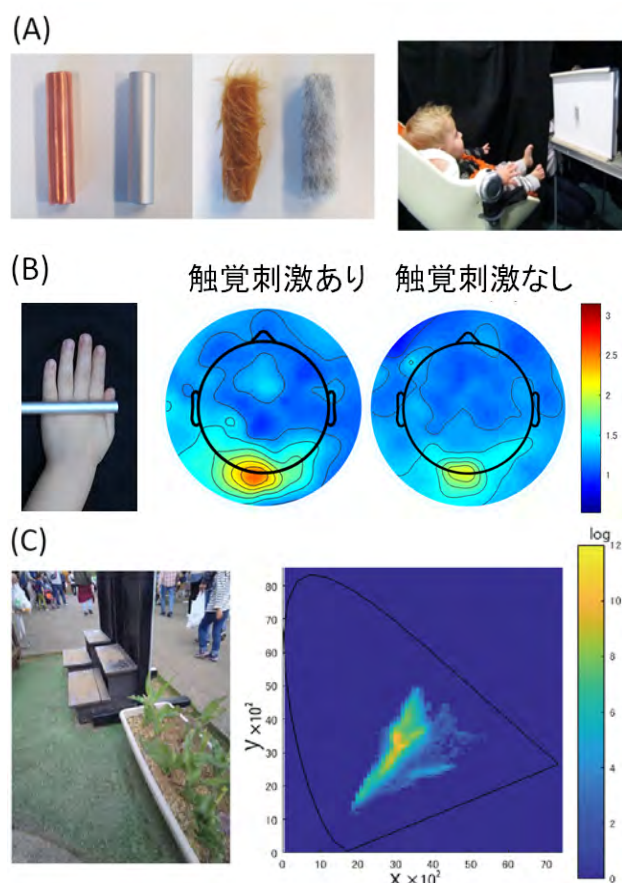


図 1：(A) 左図：視覚・触覚による素材弁別実験で使われた金属と毛布刺激。右図：視覚弁別の実験風景（研究成果 1）。(B) 左図：視触覚相互作用の脳波計測実験で使われた映像刺激。右図：生後 8 ヶ月児の脳波の結果（研究成果 2）。(C) 左図：日常生活における乳幼児視点のサンプル画像。右図：左画像の xy 色度分布図（研究成果 3）。

○研究の背景と目的

私たちは、現実世界に存在する様々な物体や素材の違いを質感情報をもとに見分けることができます。このような質感知覚は、物体認識能力が獲得される乳児期に環境の影響を受けながら発達していくと考えられます。本研究では、1 歳前後の乳幼児を対象に、質感知覚の発達過程を多方面から検討します。具体的には、触覚と視覚の質感知覚の発達過程、質感知覚の発達に関わる乳幼児の知覚環境の個人差、質感情報処理を支えるより基礎的な受容野機能の発達過程について検討しました。方法論としては、選

好注視法や馴化法を用いた行動実験、および EEG を用いた脳活動の計測を行っています。また、乳幼児の知覚環境の検討のために、wearable camera を用いて日常環境の画像を撮影し、その統計的性質を検討します。

○研究成果

(1) 視触覚による素材弁別の発達

私たちの過去の研究では、物体の質感に関する視覚認知の発達は、比較的遅い生後 7・8 ヶ月頃であることが示されました。例えば、物体の光沢について、光沢のあるものとないものを区別する能力は生後 7・8 ヶ月頃に発達します (Yang et al., 2011)。一方で、発達初期の乳児は様々なモダリティから物体の質感情報を得ているため、マルチモーダルな情報が質感知覚の発達に寄与する可能性があり、各モダリティの質感知覚の発達過程は異なる可能性が考えられます。この可能性を探るために、本研究では視覚と触覚による素材認知の発達過程を比較しました。乳児はあるものが繰り返し呈示された後では、見慣れたもの、あるいは触り慣れたものよりも、新奇なものに興味を示す特性があります。この乳児の特性を利用し、視覚と触覚による素材認知能力を調べることができます。実験では、4 ヶ月児と 8 ヶ月児に金属あるいは毛布で作られた棒を視覚もしくは触覚で繰り返し呈示した後に、新奇素材にどのくらい興味を示したかを調べました。乳児が繰り返し呈示した素材と新奇素材を区別できれば、新奇素材への注視時間あるいは把握時間がより長くなると考えられます。実験の結果、8 ヶ月児は視覚・触覚ともに金属と毛布を弁別できるものの、4 ヶ月児は触覚でのみ金属と毛布を弁別できることが分かりました。これらの結果から、素材知覚においては視覚より触覚が早く発達することが示唆されました。

(2) 視触覚相互作用の脳内メカニズムの発達

成人では、モダリティ間で得られる質感情報が密接につながりを持ち、触覚情報から素材の見た目を予想できるといったクロスモーダルな情報処理が行われています。こうした感覚間統合の神経基盤の発達を調べるため、定常状態視覚誘発電位 (Steady State Visual Evoked Potentials: SSVEP) を用い、乳児において視覚情報と触覚情報の一致が視覚処理を促進するかを検討しました。SSVEP とは周期的に点滅するフリッカ刺激によって誘発される脳波成分のことであり、フリッカ刺激と同じ周波数を持つ電

位が誘発されます。実験では、金属で作られた棒で乳児の手の甲を擦る動きを 7.5Hz で点滅させたフリッカ映像を視覚刺激として呈示しました。フリッカ映像を乳児に観察させ、映像に同期して実際に金属の棒で乳児の手の甲を擦る条件（触覚刺激あり条件）と、映像だけの条件（触覚刺激なし条件）で SSVEP 誘発量を比較しました。その結果、生後 8 ヶ月児では、触覚刺激なし条件より触覚刺激あり条件の方が、SSVEP 誘発量が高いことがわかりました。一方で、4 ヶ月児では条件間の差がありませんでした。これらの結果から、8 ヶ月児において視触覚情報の同期による視覚処理の促進がみられ、このような視触覚相互作用が生後 4 - 8 ヶ月の間に発達することが示唆されました。

(3) 乳幼児における日常の照明環境および色環境の調査

これまでの私たちの研究では実験室実験を実施することによって様々な知覚発達の研究を行ってきました。知覚発達は、物体認識能力が獲得される乳児期に、環境の影響を受けながら発達していくと考えられます。そこで、乳幼児が生活している環境の調査を実施しています。本研究では、乳幼児の頭部に wearable camera を設定し日常生活における乳幼児視点の風景を撮影し、得られた画像から乳幼児の日常の照明環境や色環境を調べています。画像取得は、乳幼児だけでなくその養育者からも同時に行っています。乳幼児が育つ環境をその養育者の視点から得た環境画像と比較することによって、私たち成人の生活環境とどのような違いがあるのか、あるいは同じかを調べる予定です。現時点で 11 家族から画像を取得することができています。得られた画像から xy 色度座標における分布を調べ、親子の同じ時間のデータで比較したり、家族間でデータを比較したりすることによって日常における視覚環境の個人差がどの程度なのかを検討しています。また、今後も継続して画像を取得し整備し、発達における環境要因を調査するための乳幼児視点での画像データベース構築を進めます。

(4) 運動視における周辺抑制の発達

視覚的な運動刺激を知覚するとき、刺激のサイズが大きくなるほど運動方向の知覚が困難になることが知られています。これは周辺抑制という視覚野ニューロンの受容野メカニズムを反映した知覚現象であると考えられています。この抑制メカニズムは、物体の動きを背景の動きから区別するために必要だとされています。一方、高齢者では刺激のサイズが大きくなっても運動知覚の成績が低下せず、大きい刺激を見る場合はむしろ若年者より運動知覚能力が高くなります。これは、高齢者では周辺抑制の機能が低下していることを示唆しています。本研究では、生後 3 ヶ月から 8 ヶ月の乳児に対してこの知覚現象

を適用することにより、発達にしたがって周辺抑制がどのように獲得されていくかを検討しました。乳児の大小の運動刺激への方向弁別感度を測定して比較した結果、生後 6 ヶ月以降の乳児では、小さい刺激の方が運動方向をよく知覚できていました。これは若年成人と同じ傾向です。一方、生後 6 ヶ月未満の乳児では、大きい刺激の方が運動方向をよく知覚できるという 6 ヶ月以降の乳児とは逆のパターンが観察されました。これは高齢者と同じ傾向です。これらの結果から、生後 6 ヶ月未満の乳児は周辺抑制が未発達なために、高齢者と同じように大きい物体の運動知覚が得意ですが、6 ヶ月以降になると周辺抑制を獲得することによって、小さい物体の運動知覚が得意になり、成人の知覚特性に近づいていくことがわかりました。

○今後の展望

視触覚相互作用の発達の研究に関しては、今後、視触覚相互作用と深い関わりがある身体所有感 (sense of ownership) の発達について、ラバーハンド錯覚を用いて検討します。ラバーハンド錯覚は視覚情報と触覚情報の同期によって自己身体以外へ身体所有感が移動する錯視です。これを乳児に適用して、身体所有感は生後いつ頃獲得されるか、発達初期においては視触覚統合が身体所有感にどのように影響を及ぼすかを検討します。

日常の色環境の調査の研究に関しては、取得した画像の色情報を統計的に解析する方法の確立を第一に目指します。さらに最終的には、乳幼児の色環境の個人差と行動実験や脳計測実験で測定した色知覚の個人差を比較します。これにより、色知覚のメカニズムの発達過程において、環境要因がどのような影響を及ぼすかを明らかにできると考えられます。

運動視における周辺抑制の研究に関しては、行動実験での結果をもとに、脳波測定を用いて周辺抑制機能の発達の神経基盤を検討する予定です。

○関連する研究発表

論文

1. Nakashima Y, Yamaguchi MK, Kanazawa S: Development of center-surround suppression in infant motion processing. *Current Biology* 29(18):3059-64, 2019

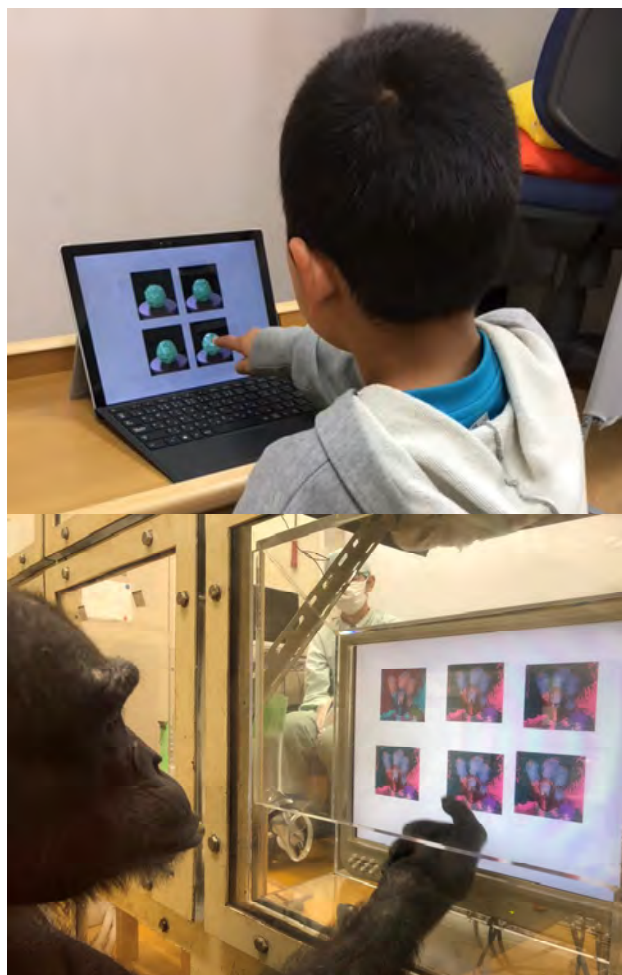
学会発表など

1. Yang J, Natasa G, Kanazawa S, Yamaguchi MK, Bremner A: Tactile influences on visual processing of bodily information in infants. *Vision Sciences Society 19th Annual Meeting*, Florida, USA, 2019

2. Yang J, Natasa G, Kanazawa S, Yamaguchi MK, Bremner A: The development of haptic-visual interactions underlying material perception in infancy. *The International Congress of Infant Studies 2018 Congress*, Philadelphia, USA, 2018

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

研究代表者 伊村 知子（日本女子大学・人間社会学部・准教授）



図（上）児童の質感識別の実験の様子. 4枚の物体画像のうち、質感の異なるものを1つ選び、触れると正解となる.（下）チンパンジーが、6枚の絵画画像の中から、色彩の異なるものを1つ選び、触れようとしているところ.

○研究の背景と目的

質感の認知には、多様な対象の質感を識別するだけでなく、その質感に対する好みなどの価値判断も含まれます。何らかの質感に対する選好や美的評価などを含めた感性的な認知には、文化的要因も影響すると考えられます。このような質感に対する識別能力や感性的な認知は、生後どのように獲得されるのでしょうか。

本研究では、基本的な素材の識別能力や光沢感や色彩に対する選好が、社会的な環境のもと、どのように発達するのかを明らかにするために、小学生を

対象とした認知実験をおこないました。具体的には、対象の光沢と塗装の違いや、金やプラスチックといった多様な素材の違いを識別する能力について調べると同時に、絵画の色彩に対する選好の一般的な傾向についても調べました。

さらに、上記のような質感の認知は、人間に固有の能力なのか、それとも、近縁な動物種と連続性を持った普遍的な能力であるのかを確かめるために、チンパンジーを対象とした認知実験をおこない、人間との違いについても調べました。

○研究成果

（1）光沢や素材の質感の識別能力

6歳から12歳までのヒトの児童と成人、チンパンジーの成体を対象に、光沢と塗装の違い、金とプラスチックを識別する能力について調べました。

参加者は、タッチパネルの画面上に提示された4枚の物体のCG画像の中から他とは異なる「仲間はずれ」を1つ選んで触れるように教示を与えられました（図（上））。4つの物体は同じ物体をそれぞれ異なる角度から撮影したものであり、表面のハイライトのパターンや物体の輪郭の違いなど、質感以外の手がかりから「仲間はずれ」を見つけることができないようになっていました。また、参加者には、実験中に学習をしないよう、正解したかどうかを知らせないようにしました。物体には2種類の形のものを用い、光沢と塗装、金とプラスチックともに類似度の異なる3つの条件を設けました。それぞれの形、類似度の条件について4回ずつ、合計24回の試行を1セッションとして、1名の参加者につき2セッションをおこないました。

その結果、光沢と塗装を識別する能力は、12歳においても成人に比べて成績が低いことがわかりました。これまでの我々の研究から、光沢の強さの差異を識別する能力は、9歳半頃には成人と同程度にまで到達することが示されています。それに対して、光沢と塗装を識別するためには、光沢の強さの識別に加えて、物体の3次元構造とハイライトとのズレを推定する必要があるため、12歳以降にならないと、成人と同程度の成績には到達しないことが考えられます。さらに、金とプラスチックの違いを識別する能力は、6歳頃からすでに成人と同程度にまで到達することから、識別能力の発達には質感の種類により違いがあることも示されました。

一方で、チンパンジーを対象に同じCG画像を用いて同様の課題をおこなったところ、光沢の有無の違いを見分けられるという証拠は得られませんでした。

た。チンパンジーでは、少なくとも、本研究で用いたような馴染みのない物体の CG 画像において、表面のハイライトのパターンや物体の輪郭の違いを無視した上で、光沢の有無の違いを手がかりに仲間はずれを探すことは難しかったようです。

(2) 絵画の色彩に対する選好

私たちの色の好みは、文化や社会の影響を受けて形成され、その好みには大きな個人差が見られます。一方で、文化や社会の違いを超えた色の好みの普遍性にも関心が寄せられてきました。たとえば、生後 3 ヶ月の乳児が赤、黄色、青緑よりも青や紫に対して好みの偏りを示すことや、人間以外の霊長類（チンパンジー、ゴリラ）においても、赤より青や緑に対して好みの偏りが見られるなどが報告されています。このことから、人間の持つ色への好みには、ある程度の普遍性が存在する可能性も考えられます。

本研究では、これまで調べられてきた単色の好みではなく、複数の色からなるパターンの配色に対する好みを調べるため、絵画の配色に対する選好を成人と児童で比較しました。また、人間と近縁な霊長類とも比較するため、チンパンジーを対象に、絵画の配色の違いが識別能力に及ぼす影響を調べました。

これまでの絵画の配色に対する成人の好みを調べた研究から、配色に対する好みについても、ある程度の普遍性が見られることが報告されています。西洋画や日本画などの画像の色相を原画から少しずつ変化させて、最も好ましいと感じる配色を参加者に報告させると、初めて観る絵画であっても原画の配色とほぼ同じ配色を選択する傾向が見られました。そのような傾向は、日本人やポルトガル人でも同様に見られています。また、静物画や抽象画、ポスターといった複数のカテゴリの絵画で共通して同様の傾向が見られること、学芸員のように絵画に対して特別な視覚経験を持つ人でなくとも同じ傾向が見られることもわかってきました。

そこで、このような絵画の配色に対する選好の発達過程を探るため、6 歳から 12 歳までの児童を対象に、原画の配色への選好がいつ頃から生じるかについて調べました。

参加者は、タブレット端末の画面上に提示された 4 枚の絵画の画像の中から、一番好きな色づかいのものを 1 つ選んで触れるように教示を受けました。4 枚の絵画の画像は、色相のみが異なるよう、原画の色相から色相角を 90 度ずつ回転させて作成されました。児童においても成人と同じような選好が見られるならば、原画（0 度）の配色を選択する割合が最も高くなることが予想されます。絵画の画像は、静物画、抽象画、ポスターの 3 種類のカテゴリのものを 8 種類ずつ用意しました。それぞれの参加者は、24 回の試行をおこないました。

その結果、6 歳から 9 歳半の児童では、すべての絵画のカテゴリにおいて、原画の配色を選択する傾向

は見られませんでした。一方、9 歳半から 12 歳の児童では、ポスターや静物画の絵画において、成人と同様に、原画の配色への有意な選好が見られました。児童期の前半では、原画の配色への選好が示されなかった理由については、文化的要因の影響のほか、絵画全体の配色の認知する能力の影響も考えられるため、今後さらなる検討が必要だと考えられます。

さらに、人間の絵画の配色に対する選好の普遍性を明らかにすべく、文化的な要因を排除するため、チンパンジー 6 個体を対象に、絵画の配色を識別させる実験をおこないました。

チンパンジーは、タッチパネルの画面に提示された 6 枚の絵画の画像の中から、1 つだけ他とは異なる配色のものをを見つけ、触れました（図（下））。絵画の画像は、児童の課題と同様、静物画、抽象画、ポスターの 3 種類のカテゴリのものを 8 種類ずつとし、色相のみが異なるよう、原画の色相から色相角を 90 度ずつ回転させた 4 種類（0, 90, 180, 270 度）を使用しました。原画の配色に対して、識別のしやすさが示されるかどうかを調べるため、原画（0 度）を反転させた配色（180 度）の中から検出する条件と、原画の配色を 90 度回転させた絵画（90 度）を反転させた配色（270 度）から検出する条件を設けて、正答率を分析しました。その結果、チンパンジーにおいて、静物画、抽象画、ポスターのすべてのカテゴリで原画の配色を見つける条件の方が、原画でない配色を見つけるより条件よりも正答率が高くなることが示されました。今後、人間を対象に同様の実験をおこない、配色に対する選好と識別のしやすさとの関係を明らかにする必要があります。

○今後の展望

本研究の成果から、人間に特徴的な光沢の識別能力の高さが示されたのに対し、光沢の識別能力や配色への選好は児童期にわたる発達をとおして獲得されることがわかりました。今後は、これまでの質感認知の発達的变化や種を超えた普遍性の検討に加えて、異なる文化間でも比較することにより、人間の質感認知における文化や社会の影響を多角的な視点から明らかにすることを目指しています。

○関連する研究発表

学会発表など

1. Imura T, Kondo T, Shirai N, Nakauchi S: Preference for chromatic composition of art paintings by children aged 6- to 12-year old, 41st European Conference on Visual Perception, Trieste, Italy, 8.26-30, 2018.

2. Imura T, Nakauchi S, Shirai N, Masaki Tomonaga: Visual search for chromatic composition of art paintings by chimpanzees. 42nd European Conference on Visual Perception, Leuven, Belgium, 8.25-29, 2019.



研究代表者 眞田 尚久（関西医科大学 医学部・助教）

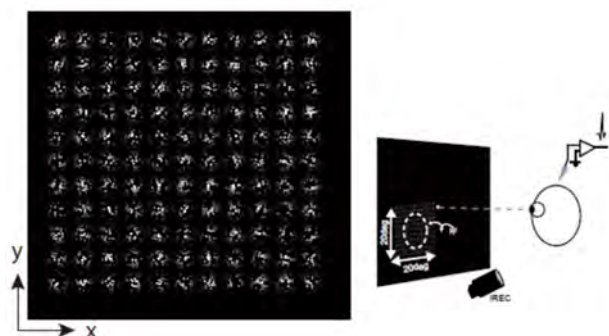


Figure 1 液体らしさと運動方向のパラメータを独立に操作する為に作成した視覚刺激。小さなランダムドット運動刺激をグリッド状に配置し、個々のランダムドットパッチが独立に運動方向と速度の成分を持つ。運動ベクトルの空間配置を操作することで、液体らしい刺激を表現できる。

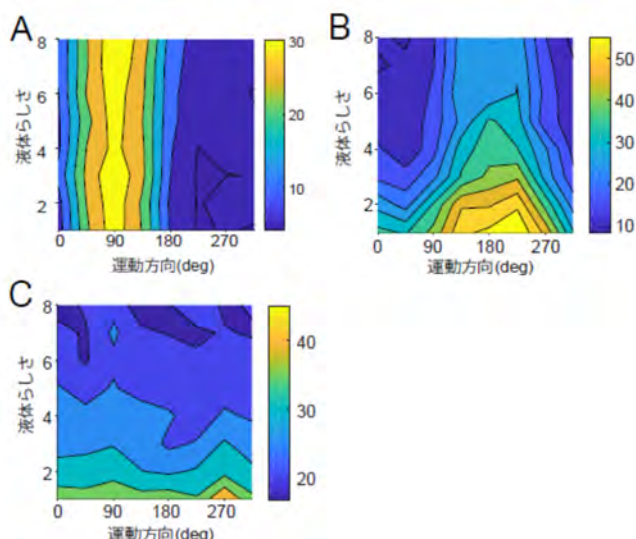


Figure 2 MT野、FST野の神経細胞から記録した液体粘性刺激に対する応答特性の例。A: 運動方向のみに選択性を示した細胞例。B: 運動方向と液体らしさの両方に選択性を示した細胞例。C: 運動方向によらず液体らしさのパラメータのみに選択性を示した神経細胞の応答特性。活動の強さが色で示されている。

○研究の背景と目的

液体粘性などの、視覚運動によって定義される質感情報がどのように脳内で符号化され、私たちの知覚にのぼるのかはまだ解明されていません。液体粘性運動の知覚には、局所的な運動の空間的配置が重要であることが分かってきましたが（Kawabe et al. 2015）、脳の視覚システムで運動情報の空間統合がどのように行われているのかは分かっていません。

視覚運動情報が、大脳皮質 MT 野で処理されていることがこれまでの多くの研究から知られています。網膜で得られた視覚情報は視床を経て一次視覚野で処理されたのち、一次視覚野の出力を空間統合する形で MT 野に伝達されます。MT 野細胞では物体の運動方向や速度を検出していると考えられています。

視覚生理学の運動視研究は従来、ランダムドット運動刺激などの単純な視覚刺激を用いて調べられてきており、液体運動の様な複雑な運動情報がどのように表現されているのかについてはあまり研究されてきませんでした。

MT 野と神経結合がある高次皮質領野である FST 野では、複数の視覚運動刺激が同時呈示されたときによく応答を示すことが報告されており

（Rosenberg et al. 2008, Mysore et al. 2010）、MT 野で検出された局所的な視覚運動情報が FST 野で統合され、複雑運動情報が符号化されている可能性が考えられます。

そこで本研究では MT 野と FST 野での液体粘性運動の情報表現がどのように異なるのかを複雑運動刺激を用いて明らかにすることを目的としました。

○研究成果

小さなパッチ状のランダムドット刺激をグリッド状に配置することで、局所的な視覚運動情報と全体的な空間配置の両方を同時に操作することができる視覚刺激を作成しました（Figure 1）。この刺激を用い、液体粘性の情報表現と視覚運動の情報表現を切り分けるために、「運動方向」と、「液体らしさ」という独立したパラメータを定義しました。

「液体らしさ」のパラメータには、心理学研究で近年報告された液体粘性知覚と相関する高次運動統計量を用いました（Kawabe et al. 2015）。また、個々のランダムドット平均の運動方向を変えることで「運動方向」のパラメータを定義しました。

もし、液体らしいかどうかにかかわらず特定の運動方向に神経細胞が応答を示すのであれば、「液体ら

しさ×運動方向」のパラメータ空間では、運動方向にのみ選択性を示すはずですが。それに対して、運動方向によらず、液体らしさが符号化されているのであれば、液体らしさのパラメータのみに関連した活動パターンが見られるはずですが。

MT 野、FST 野両方からそれぞれ単一神経活動を記録した結果、MT 野では運動方向のみに関連した活動を示すタイプの神経細胞 (Figure2 A) と、両パラメータに選択性を示す神経細胞が見つかりました (Figure2B)。FST 野では、これら二つのタイプに加えて、運動方向によらず液体らしさのみに選択性を示すタイプの神経細胞がいることが明らかになりました (Figure2C)。FST 野には、MT 野で見つかった二つのタイプの神経細胞が存在し、且つ新たなタイプの神経細胞ができていることから、MT 野神経細胞で処理された情報が、さらに FST 野で統合されることで、液体粘性情報が符号化されていると考えられます。

○今後の展望

本研究から、大脳皮質高次視覚領野 MT 野、FST 野において、液体粘性情報がどのように表現されているか明らかにすることができました。しかし、どのような時空間受容野特性によってこれらの情報表現が実現されているのかはまだ不明です。

本研究で用いた視覚刺激では、高次運動統計量を用いることで複雑運動を表現しています。この刺激を用い、神経細胞の高次受容野特性を明らかにすることによって、私たちが知覚している視覚運動を伴う質感情報の情報表現の詳細を明らかにしていきたいと考えています。

○関連する研究発表

学会発表など

1. Sanada T., M., Representation of spatial feature of complex motion in areas MT and FST., APCV 2019 Asia-Pacific Conference on Vision, Osaka, July 29th, 2019. (ポスター発表)
2. Sanada T. M., Kawabe T., Nishida S., Komatsu H., Neural response to complex motion in macaque area FST, サル FST 野における複雑運動刺激に対する反応特性, 第 42 回日本神経科学学会, 新潟, 2019/7/25-26 (ポスター発表)
3. Sanada T. M., Kawabe T., Nishida S., Komatsu H., Neural response to complex motion in macaque area MT, サル MT 野における複雑運動刺激に対する反応特性, 第 41 回日本神経科学学会, 神戸, 2018 (ポスター発表)

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

研究代表者 近添 淳一（生理学研究所・生体機能情報解析室・准教授）

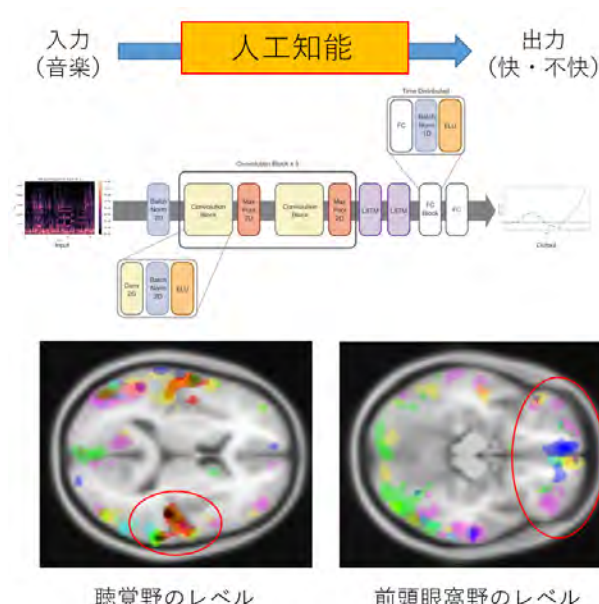


図 1. (上部) この研究で作成した、音楽の情報を個人の感情的価値（快・不快）に変換する人工知能の構造。音楽の情報は最初に畳み込み層で処理され、次に再帰層、全結合層での情報処理を経て、感情的価値の時間的変化に変換される。

(下部) 人工知能のそれぞれの階層と対応している脳領域。赤色：音波情報の変化そのものに対応する脳領域、黄色：畳み込み層（音波の変化の情報処理）に対応する脳領域、緑色：低次の回帰層（音波情報と価値情報の中間的処理）と対応する脳領域、水色：高次の回帰層（音波情報と価値情報の中間的処理）と対応する脳領域、青色：全結合層（価値情報に非常に近い情報の処理）と対応する脳領域、紫色：最終的な出力である価値情報と対応する脳領域

○研究の背景と目的

わたしたちの脳は外の世界を捉えるために、目や耳といった感覚器を使っています。感覚器によって捉えられた視覚や聴覚の情報は、脳内の情報処理を受けて、快さや不快さの感覚を生み出します。この快・不快の感覚に基づいて、私たちは適切な行動を決定することができます。

全く同じ絵、全く同じ楽曲であっても、人によって好ましく感じられることもあれば、人によっては不快に感じられることもあるように、絵や音楽の嗜好には大きな個人差があります。このような嗜好の個

人差は、感覚情報が快・不快の感情的価値情報に変換される過程の個人差として捉えることができます。人間を対象とした機能的 MRI 研究（MRI を用いて脳活動の変化を捉える研究）によって、前頭眼窩野、側坐核、線条体などの脳領域が感情的価値情報の処理に関連することが明らかにされていますが、感覚情報からどのような過程を経て価値の情報が生じるかは明らかにされていません。近年、発展の目覚ましい人工知能研究において、視覚情報からカテゴリ情報への変換処理が、哺乳類の視覚処理回路である腹側視覚路の情報処理と非常によく似ているという報告が様々な研究室からされており（Güçlü et al., 2015; Yamins et al., 2014; Khaligh-Razavi & Kriegeskorte, 2014）、人工知能と脳の対応関係は、神経科学の研究者の間で大きな話題となっています。これらの発見にインスパイアされて、視覚のみでなく、聴覚においても、人工知能をモデルとして使いながら、感覚情報を価値の情報に変換する脳領域を見つけることができるのではないかと考え、この研究をスタートしました。

○研究成果

健康な若年男性・女性の被験者を対象に機能的 MRI 実験を行いました。まず、楽曲に慣れてもらう目的で、実験参加者には、MRI の外で 128 種類の楽曲を聴いてもらい、曲の好き嫌いを点数で回答してもらいました。次に、MRI の中で脳活動の画像を撮像しながら、同じ 128 種類の楽曲を聴いてもらって好き嫌いを点数で回答してもらいました。MRI 実験終了後には、別室に移動してもらって、再度同じ楽曲を聴いてもらいましたが、ここでは楽曲のどのタイミングが快い、または不快なフレーズであるかを回答してもらいました。この一連の実験によって、個人の楽曲の嗜好を詳しく調べることができました。

次に、個人の楽曲の嗜好を予測するような人工知能を個人毎に作成しました。楽曲は全体として好き・嫌いの判断をすることもできますが、一つの楽曲の中でも、特に好みの部分と気に入らない部分があると、私たちは考えました。そのような、時間的変化の情報を人工知能や機能的 MRI で捉えることは技術的な挑戦ではありますが、これに成功すれば、人工知能の個人最適化を、非常に高いレベルで行うことができると考えられます。そこで私たちは、それぞれの楽曲に対して、被験者に回答してもらった、快・不快の時系列情報を用いて人工知能の作成を行いま

した（図1上部）。

その結果、参加した被験者の約半数で、新しい楽曲に対しても嗜好の時系列を正確に予測できるような人工知能を作成することができました。

次にこの人工知能の内部の情報表現を使って、人工知能のどのレベルが人間のどの脳領域と対応を持つかを調べました。その結果、入力（音楽刺激）に近い情報を処理する階層は、人間の聴覚野と対応していたのに対し、出力（快・不快の感情）に近い、より上位の階層は前頭眼窩野や、楔前部と呼ばれる、より抽象的な情報を処理する領域と対応していることが明らかになりました（図1下部）。

これらの結果は、視覚の情報処理でみられたような、人工知能と脳の対応関係が、聴覚の情報処理でもみられることを示しています。従来の研究では、より単純な聴覚刺激判断を行う人工知能と聴覚野の対応関係が示されていましたが（Kell et al., 2018）、今回のように、音楽の好き嫌いの判断のような複雑な情報処理においても、人工知能で模倣可能であることが示された点で、新しい発見であると言えます。さらに興味深いことに、低次の情報処理（音そのものの情報処理）から高次の情報処理（感情的価値判断）に至る階層的な情報処理構造は、近年提唱されている皮質上の機能勾配（Principal Gradient）（Margulies et al., 2016）に沿ったものであることが示されました。

この結果は、私たちのグループが行った絵画の実験から得られた結果と一致する結果であり、上述の皮質上の機能勾配は、感覚から価値へ至る情報処理において普遍的な役割を果たしていることが示唆されました。

○今後の展望

私たちの実験では、音楽から感情的価値（快・不快）が生じる過程を人工知能と機能的MRIによって明らかにしました。しかしながら、今回の実験で明らかになったことの一つは、快・不快の感情の時間的な変化を報告することが必ずしも簡単な課題ではないことです。我々が作成した人工知能の成績から判断すると、被験者の半数は、ある程度正確に感情の時間的な変化を報告できていますが、残りの半数に関しては、非常に困難な課題であったように見受けられます。逆に、快・不快の感情の時間的な変化の情報は脳活動の中に観察されるべきものであるため、この情報を脳活動から読み取り、これを用いて人工知能に個人の楽曲の嗜好を学習させる、という手続きを取れば、今回うまく行かなかった被験者においても、よりよい人工知能モデルが作成できるかもしれません。このような、人工知能と機能的MRIという2つの異なる研究分野を有機的につなげる研究を私たちのグループでは目指しています。

また、私たちの研究結果からは、視覚を価値に変換する脳領域と、聴覚を価値に変換する脳領域は、部

分的に重なっていることが示されています。特に、最終的な情報処理の結果である主観的価値の情報は、感覚入力（視覚であるか、または聴覚である）の違いによらず、前頭眼窩皮質において処理されていることが明らかになっています。今後は、同じ被験者に視覚情報の価値評価実験と聴覚情報の価値評価実験に参加してもらい、感覚入力の違いを超えた価値の情報を表現するような、ある種ユニバーサルな価値評価システムを表現するような人工知能を作成したいと考えています。

これは神経科学的の領域における重要な挑戦であるだけでなく、産業応用に向けた挑戦であると言えます。例えば、今回の実験で作成した人工知能を用いれば、個人の好みの曲を、より正確に推定できるかもしれません。さらに、感覚入力の違いを超えた価値評価システムを作成することができれば、音楽の好みの情報から絵画や洋服の好みを推定することも部分的に可能になるかもしれません。

私たちは、個人の感情的価値判断を代理で行ってくれるような人工知能を作成することで、精度の高いレコメンド・システム（例：Spotifyにおける好みに合うであろうアーティストの提案や、Amazonにおける買い物の提案）を実装できると考えています。

また、個人の価値判断を代理で行ってくれる人工知能を作成することができれば、様々な作業を人工知能に任せることができるようになります。例えば、好みの風景や好みの絵の情報を学習することで、旅行先やお勧めの美術館を提案するようなシステムを作成可能です。また、製品デザインの最適化やマーケティングなどへの応用も可能です。

私たちは、基礎研究にとどまらず、広く産業応用につながるような研究を進めていきたいと考えています。

私たちのグループの研究に興味を持たれた学生の方、または企業の方の訪問は、いつでも受け付けておりますので、研究代表者までお気軽にお問い合わせください。

○関連する研究発表

論文

1. Todd RM, Miskovic V, Chikazoe J, Anderson AK: Emotional Objectivity: Neural Representations of Emotions and Their Interaction with Cognition. Annual review of psychology 71, 25-48

学会発表など

1. Pham TQ, Chikazoe J, Yoshimoto T, Niwa H, Sadato N: Novel insight into the neural basis of vision-value conversion in human brain, 3rd Japanese Meeting for Human Brain Imaging, Tamagawa, Kanagawa, Japan, 9.6-7, 2019

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



研究代表者 宮川尚久(量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 主任研究員)

○研究の背景と目的

見ている物体の質的特徴やカテゴリ情報を処理する霊長類の腹側視覚野は、フィードバック型と呼ばれる皮質内の神経結合に富み、扁桃体など皮質下の構造からも多くの直接的なフィードバックを受けることが知られています。しかしこの腹側視覚皮質の機能は、一般的に低次視覚野から高次視覚野へのフィードフォワード型と呼ばれる結合が階層的に連なる結合モデルで記述されることが多く、扁桃体などからの直接的なフィードバック入力の影響について見逃されている可能性が有ります。

本研究では広範囲から神経活動を計測する表面脳波電極：Electrocorticogram (ECoG) による記録法と、神経活動を操作する最新の化学遺伝学、またそれを可視化するイメージングの融合技術により、

扁桃体からのフィードバック入力が腹側視覚経路における質感神経表現に及ぼす影響を特定することを目的としました(図 1)。

○これまでに得られた成果

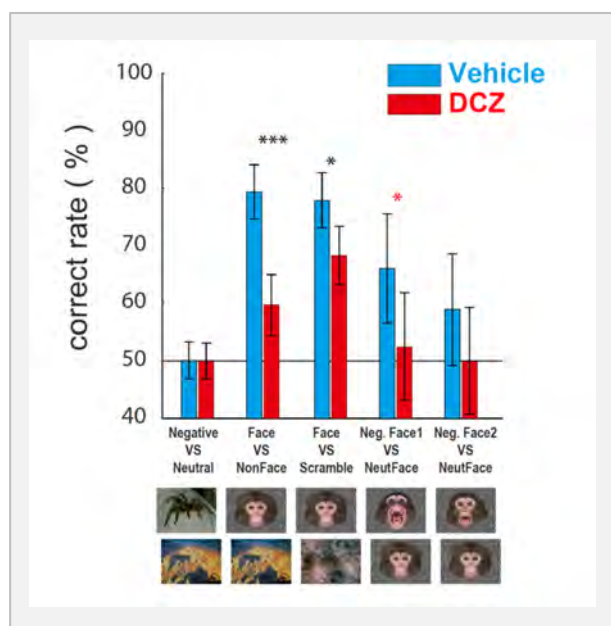
本研究で使用する ECoG 記録法において、霊長類の腹側視覚野から読み出せる情報の細かさを、他の記録法との比較で詳細に調べました。ECoG は、見ている画像が特定の人物 A か別の人物 B か、という細かな情報を読み出すのは難しいものの、その画像が『顔か顔以外か』という粗い情報、『ヒトかサルか』や、『どの角度から見た顔か』、などの中間的な細かさの情報は読み出すことが可能であることを報告しました(論文 1、Miyakawa et al. 2018)。

次に、本研究で使用する化学遺伝学による神経操作法において、他のグループより発表された最新の研究で DREADD 技術の根幹となる選択的薬剤の作用に疑義が生じたため、新規の選択的作用薬の開発と評価を行いました。新しい人工受容体作動薬 Deschloroclozapine(DCZ)を見出し、この DCZ が今までの薬と比べて、高効率で血管から脳内に移行し、高い受容体選択性と活性化能を持つこと(どちらも副作用の少なさに繋がります)、霊長類とげっ歯類の双方で有用であること(研究分野での有用性の高さに繋がります)を報告しました(論文 2(preprint), Nagai and Miyakawa et al. 2019)。

最後に、この新規アゴニスト DCZ および興奮性化学遺伝学受容体 hM3Dq を用いてマカクザル扁桃体の神経活動を賦活化させようと、腹側視覚皮質に生じる視覚情報処理の変容について解析しました(図 1A)。サルの腹側視覚皮質を広範囲で覆う ECoG 電極を留置し、恐怖などの情動を惹起する視覚刺激を注視している際の神経活動を計測したところ(図 1B)、扁桃体神経活動の持続的な賦活化により、腹側視覚皮質の視覚入力依存的な神経活動のうち、顔画像に特徴的な成分が減弱すること、また顔の表情に依存した成分が消失することを見出しました(図 2; 学会発表 1:日本神経科学会 2019)。またこれらの影響は、扁桃体で処理される社会的・情動的なカテゴリとされる『顔や表情』の視覚情報には影響しても、色や形といった、非社会的・情動的とされるカテゴリの視覚情報については、ほぼ影響が有りませんでした。



図説 1: A) 目的の概要。扁桃体が腹側視覚野と連関して、顔や表情、視線の視覚情報処理と情動身体反応の相互作用を実現する仕組みについて明らかにします。B) 方法の概要。腹側視覚皮質に ECoG を留置した個体に顔カテゴリ弁別課題を課し、扁桃体神経活動を抑制した際に、個体の認知と腹側視覚皮質の神経活動に生じる変化を検証します。



図説 2: 扁桃体賦活化と腹側視覚野のカテゴリ表現
腹側視覚野神経活動による画像カテゴリ(顔 vs 顔以外, 中立顔 vs 感情的な顔)弁別能が、コントロール条件(青: *Vehicle*)と比べて、扁桃体神経細胞の活動を持続的に賦活化する条件(赤: *DCZ*)において、有意に下降しました。

○今後の展望

この語の展望としては、扁桃体神経活動の持続的な賦活化が、実際に腹側視覚皮質神経活動の選択性や、刺激応答性を低下させるか検証するため、扁桃体と腹側視覚皮質の神経活動を同時に計測・解析します。また扁桃体神経活動の持続的な賦活化により、実際に実験個体のサルが中立顔と感情的な顔を見分ける能力が落ちるのか、行動実験により確認します。具体的には自由視覚探索課題で、嫌うとされる感情的な顔を眺める時間の割合に変化が生じるかを検証します。

○関連する研究発表

論文

1. Miyakawa N, Majima K, Sawahata H, Kawasaki K, Matsuo K, Kotake N, Suzuki T, Kamitani Y, *Hasegawa I : Heterogeneous Redistribution of Facial Subcategory Information Within and Outside the Face-Selective Domain in Primate Inferior Temporal Cortex, *Cerebral Cortex* 28(4):1416-31 (2018)

2. *Nagai Y, *Miyakawa N, Takuwa H, Hori Y, Oyama K, Ji B, Takahashi M, Huang XP, Slocum S, DiBerto JF, Xiong Y, Urushihata T, Hirabayashi T, Fujimoto F, Mimura K, English JG, Liu J, Inoue

K, Kumata K, Seki C, Ono M, Shimojo M, Zhang MR, Tomita Y, Suhara T, Takada M, Higuchi M, Jin J, Roth BL, Minamimoto T (*co-first authors) : Deschloroclozapine: a potent and selective chemogenetic actuator enables rapid neuronal and behavioral modulations in mice and monkeys *bioRxiv* (preprint) <https://doi.org/10.1101/854513>, (2019)

学会発表

1. 宮川 尚久、永井 裕司、堀 由紀子、松尾 健、鈴木 隆文、井上 謙一、高田 昌彦、須原 哲也、川寄 圭佑、南本 敬史: Chemogenetic activation of the amygdala specifically disrupts the representation of socio-emotional information in the macaque ventral visual cortex, 第42回 日本神経科学学会大会, 新潟, (2019)

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

研究代表者 林 隆介（産業技術総合研究所人間情報研究部門・主任研究員）

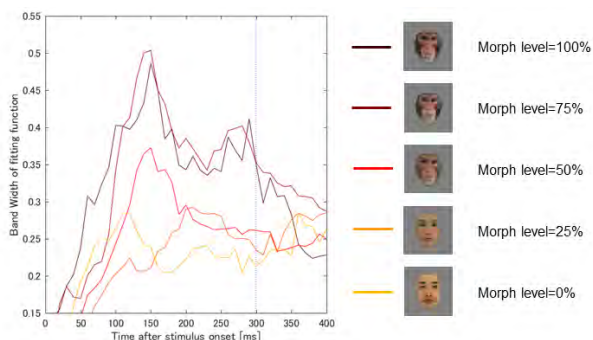


図1：サル顔ーヒト顔間のモーフィング画像に対応する下側頭葉ニューロンの神経応答を解析した結果。サルの顔かヒトの顔かに依存して神経情報表現の時間変化が大きく異なることが明らかに。

○研究の背景と目的

私たちは、普通と異なる質感をもつ物体に対し、違和感を覚えます。とりわけ顔に対する質感上の不自然さに敏感であり（不気味の谷現象として知られています）、ロボット工学や映像メディア産業において回避すべき課題となっています。関連する認知機能としては、物体認識におけるカテゴリ手がかりの不協和があげられます(Moore, 2012; Ferrey et al., 2015)。不気味の谷に代表される、質感上の不協和に対する忌避は、乳児(Matsuda et al., 2012)やサル(Steckenfinger & Ghazanfar, 2009)でも観察される根源的な現象であるにも関わらず、その視覚神経メカニズムはいまだ明らかではありません。これまでに、異なる物体間を連続的にモーフィング操作した画像を使い、物体カテゴリの変化に伴う神経活動を調べる研究は行われてきましたが(Sigala et al., 2011)、質感認知上のカテゴリ形成と、その不協和に注目した研究は行われていませんでした。

一方、深層ニューラルネットワーク研究の進展により、すでに一般物体認識が高い精度で実現し(Krizhevsky et al., 2012)、近年は、画像処理と言語処理を統合した研究がすすみ、言葉が表象する意味内容と画像表現とのマッピングが実現しています(Kiros et al., 2014)。このことは、画像を符号化している脳の視覚領域の神経情報もまた、深層ニューラルネットワークを介して質感的な語彙表現と接地化可能であることを示唆しています。

本研究では、画像上の質感変異にともなう神経活

動の変化を、マカクザルの視覚野から記録・解析するとともに、深層ニューラルネットワークの画像表象ならびに語彙概念体系内の表象変化と対応づけることにより、質感をふくめたカテゴリ化プロセスとその不協和の神経メカニズムを解明することを目指しました。

○研究成果

異なる物体の3Dモデル間のモーフィングによって質感的な不協和画像のデータベースを作成しました。そして、実験動物の下側頭葉の3か所に微小電極アレイを埋め込み、288chの電極から、モーフィング操作された画像観察中に生じる神経活動記録を行いました。実験では、サルの顔とヒトの顔の間でモーフィング操作をおこなった画像を使い、種の情報や顔の向き情報、個体別の顔情報の神経表現を解析しました。その結果、サルの顔かヒトの顔かに依存して、神経情報表現が大きく異なり、モーフィング操作によって連続的に変化することが明らかになりました(図1)。顔の向き情報、個体別の顔情報の神経表現についても、種ごとに異なる時間変化を辿ることが示唆されました。研究成果は国際学会で発表されました。

また、画像処理を行う深層ニューラルネットワークを元に、画像の内容を言語的語彙表現として出力する深層ニューラルネットワークの開発を進めたほか、物体カテゴリのモーフィング変化に伴う、言語表象の変化を解析しました。モーフィング操作によって、推定される物体カテゴリが混乱していることが確認でき(図2)、ネガティブな情動に対応する形容詞の出力値への影響が示唆されました。

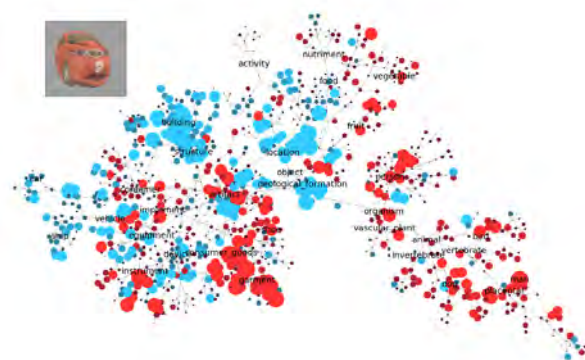


図2：質感的な不協和を引き起こすモーフィング画像に対する深層ニューラルネットワークの言語スコア出力を語彙概念グラフ上にプロットしたもの。

この他、物体カテゴリの代表例である顔画像に注目し、顔画像処理に関わる心理物理学的研究を行い、その研究成果を国際論文誌に発表しました。

また、本新学術領域のメンバー（西田班、岡谷班）と共同研究を進め、ノイズ下の物体材質判断を人間と深層ニューラルネットワーク間で比較検討を行い、「ノイズのない元の画像を推定するプロセス」と「ノイズがある状況下で材質判断するプロセス」の両方が、人間の材質判断に関わる可能性があることを示しました。研究成果は国際学会で発表されました。

○今後の展望

今後、神経情報表現と言語的表象の対応関係の解析をすすめ、質感的不協和の神経メカニズムの解明を進めていきたいと考えています。

○関連する研究発表論文

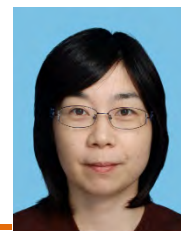
1. Hayashi R, Murakami: Distinct mechanism of temporal binding in generalized and cross-modal flash-lag effects. Scientific Reports, 9(3829):1-12, 2019.

学会発表など

1. Hayashi R: Neural ensemble representation of view orientation in monkey inferior temporal cortex: A comparison between face and object processing, APCV2019, Ibaraki, Japan, July 30th, 2019.

2. Liu X, Sawayama M, Hayashi R, Ozay M, Okatani T, Nishida S: Perturbation Tolerance of Deep Neural Networks and Humans in Material Recognition, Annual Meeting of the Vision Sciences Society (VSS), May 21, 2018.

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



研究代表者 菅生 康子（産業技術総合研究所・人間情報研究部門・主任研究員）

視覚刺激

顔の質感変化



物体の質感変化



果物の質感変化



ニューロン活動の記録部位

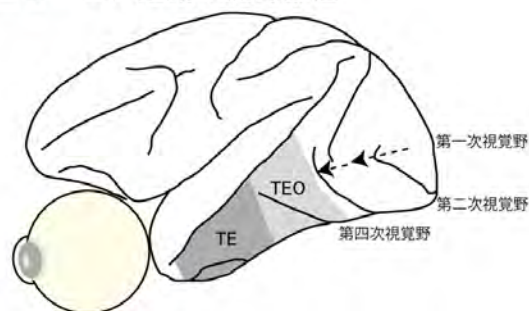


図1 上段：視覚刺激。実験に用いた質感の異なる顔画像例と、物体画像例（感認知標準画像、澤山ら、より）、および果物の画像例（Nishino et al., 2018）。顔画像の質感の変化では、光沢を強調または減弱させる、あるいはスタイル変換の手法で顔の質感を織物の質感へと変化させました。

下段：ニューロン活動の記録部位をサル左大脳半球の側面図に図示しました。側頭皮質のTE野およびTEO野からニューロン活動を記録しました。

○研究の背景と目的

質感は、我々が外界の事物の状態を見分けるために重要な情報です。日常生活に存在する自然な物体についての質感認知を理解することを目指し、社会生活に重要な顔の質感をコードする脳の仕組みを明らかにすることを目的としています。私たちが顔を見るとき、眼、鼻、口などの形やそれら相互の距離など造作の形態情報から個体や表情を認知します。また、肌や眼、髪などの質感情報から、年齢や体調

などを推し量ることができます。この能力は、肌や目、髪などの材質に対してより詳しく質感を見分ける、という、形態情報処理と質感情報処理を統合する脳の仕組みによって可能になると考えられます。

顔の形態情報の処理については、これまでの研究から、一次視覚野で顔要素の輪郭が処理され、その情報が腹側視覚経路の二次および四次視覚野で順に処理され、最終段階の側頭皮質では顔として識別され则认为られています。側頭皮質には顔の造作要素（目鼻口など）間の距離を表現するニューロンが存在します（Yamane et al., 1985; Freiwald et al., 2009）。また、側頭皮質のニューロンは、ヒトかサルかを分類する情報に遅れて個体・表情を分類する情報をコードします（Sugase et al., 1999）。さらに機能的核磁気共鳴画像（fMRI）を用いた実験により、腹側視覚経路にそって顔画像に対して活動を上昇させる複数の顔領域が特定されました（Tsao et al., 2006, 2008）。側頭皮質の最前部顔領域が顔の向きに依らない個体識別についての情報を時間的に遅れて表現することが報告されています（Freiwald and Tsao, 2010）。

質感情報については、fMRIを用いた研究により、サルの下側頭皮質後部および中部に、材質や光沢の情報をコードする領域があることが明らかになりました（Okazawa et al., 2012, Goda et al., 2014）。これらの部位と顔領域には重なりや寄与が多少あることが報告されています。すなわち顔の情報処理に、質感の情報処理が関わることを示唆されていますが、その詳細は明らかではありません。

本研究では、顔の質感の知覚について、情報の時間的コーディングという観点から研究を進めています。サルの側頭皮質からニューロン活動を記録し、顔に対する応答を調べ、顔の質感情報をどのようにコードしているのか、それら情報処理の時間的ダイナミクスについて明らかにします。また、顔以外の物体や物体の質感変化に対するニューロン活動も調べ、顔画像に特異的に観察される情報処理かどうかを明らかにします。

○研究成果

質感の異なる顔画像セットとして、画像の輝度チャンネルの正の成分を変更（Boyadzhiev et al., 2015）して光沢を強調または減弱させた顔画像、および、スタイル変換の手法（Matsuo and Yanai, 2016）で顔の質感を織物の質感へと変化させた画像セットを

用いています。平成 28・29 年度の公募研究では、サル 1 頭の側頭皮質から 51 個の単一ニューロン活動を記録しました。今回は、サル 2 頭を用いて、側頭皮質に 98 チャンネルの多電極アレイを 3 個あるいは 4 個を埋め込み、側頭皮質（TE 野および TE0 野）から複数のニューロン活動を同時記録しました。

光沢増強・減弱、あるいは、スタイル変換は、ニューロンの顔画像に対する応答の強さに影響を与えていました。光沢の違いは時間的に画像提示後の遅いタイミングで現れ、顔表情の情報処理を乱さない一方、スタイル変換の影響は時間的に早くからみられ、表情の情報処理を弱めていました。光沢の違いとスタイル変換は、異なるメカニズムで顔の情報処理に影響を与えることが示唆されます。質感のコードを顔画像と物体画像で比較することを目的として、顔画像に加えて質感認知標準画像（澤山ら）および果物などの撮影画像（Nishino et al., 2018）も用いました。物体の質感の違いがいくつかのニューロンの応答の強さに影響を与えることも観察されています。

○今後の展望

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ました。また、顔の光沢の違いが表情の情報よりも時間的に遅れてコードされることが分かってきました。今後、これら側頭皮質のコーディングと質感知覚との関係を明らかにしていきたいと思います。

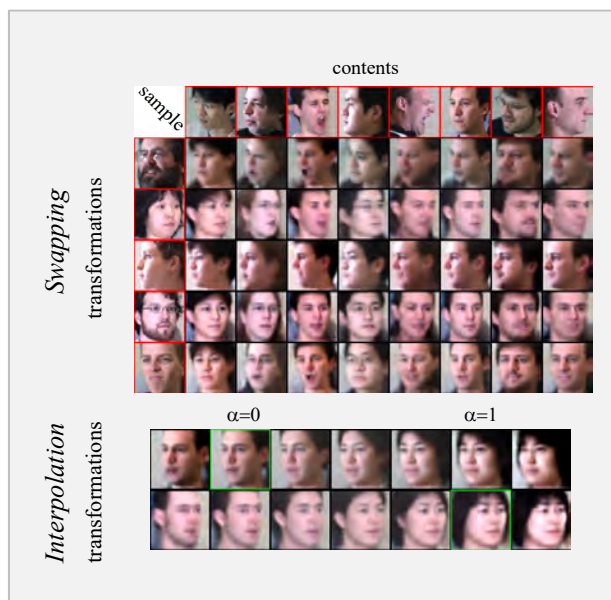
○関連する研究発表

学会発表など

1. Hayashi K, Matsumoto N, Matsuda K, Miura K, Yamane S, Matsuo S, Yanai K, Eldridge MA, Saunders RC, Richmond BJ, Nagai Y, Miyakawa N, Minamimoto T, Okada M, Kawano K, Sugase-Miyamoto Y: Neural coding of facial images with different skin textures in the temporal lobe of macaque monkeys, the 42nd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Niigata, Japan, 7.25-28, 2019



研究代表者 細谷 晴夫（株式会社国際電気通信基礎技術研究所（ATR）、主任研究員）



Multi-PIE データセット（顔画像）に対して GVAE 法を適用した内容変形分離の例。(A) Swapping 行列：各要素の画像は、第 1 行のサンプル画像の内容因子と第 1 列のサンプル画像の変形因子から再構成しました。(B) Interpolation 行列：各要素は、2 つのサンプル画像の内容因子の内挿か外挿、および一方の画像の変形因子から再構成しました。訓練データでなく、内容が新規（訓練時にモデルがこれらの人を見たことがない）であるテストデータで分離が成功していることが重要です。

○研究の背景と目的

我々が素材や物体などの質感を知覚するとき、刺激のもつ何らかの統計学的構造を捉えていると考えられます。そのような知覚の法則を明らかにするため、様々なドメインで心理物理学・神経科学研究が進められていますが、刺激をシステムティックに生成できる「生成モデル」の理論の存在が鍵になります。しかし既存研究では、テクスチャなど、特定ドメインに限定した生成モデルの理論はあっても、それを他のドメインに適用は難しかったのです。そのため本研究では、近年の機械学習アプローチである「深層生成学習モデル」というニューラルネットワークを生成過程に用いるアプローチを取り入れながら「汎用的な生成モデル」を開発することを目指しました。

○研究成果

本研究では、感覚系データには、独立した内容因子と変形因子から成っているものが多いことに着眼し、これらの因子をデータから分離して推定したいと考えました。既存研究では、その目的で disentangling と呼ばれる技術が提案されています。しかし多くの手法では、訓練データにない新規の内容をもつデータ（未知の人物の顔など）へ一般化することは難しかったのです。本研究では、新しく group-based variational autoencoder (GVAE) を提案しました [1]。この手法は、近年深層生成学習の手法として提案された variational autoencoder (VAE) を基本にしており、潜在変数をニューラルネットワークで近似します。本研究では、これを拡張し、訓練データセットにグループ構造、すなわち同一内容をもつデータがグループ化されていると仮定します。これにより、グループに共通な因子を内容として、グループのメンバーに固有の因子を変形として推定できます。この手法では、連続的な内容空間を表現できるため、新規の内容も、訓練データにあった内容の内挿や外挿として表現できると考えられます。本手法を、3 次元の顔や物体画像など 5 つのデータセットにそれぞれ適用したところ、内容変形分離と、新規内容への汎化に成功しました（左図）。また、訓練されたモデルを、既存手法によるモデルと定量的に比較したところ、4 つのデータセットでより高い性能を示しました。さらに、内容の潜在変数を詳細に解析し、本手法がなぜ変形に関する恒常性と汎化能力を獲得できたかを明らかにしました。特に、既存手法では変形因子に内容因子が混入することがあるのに対し、本手法ではほとんど見られないという点が解明されました。

また、この学習法は、脳の視覚皮質に広く見られる恒常性という神経科学的な性質と関係があると考えられます。そのため、本研究では具体的にそれを確かめるため、高次視覚野の顔領域の性質と比較することにしました。具体的には、2 階層のネットワークを組み、下の階層には標準的な VAE、上の層には本研究で開発した GVAE を組み込み、全体を顔画像で学習しました。さらに、このモデルに対し、顔にサルの神経科学研究で行われた実験プロトコルをシミュレートし、結果を実験事実と比較したところ、下層には顔領域 ML の性質（顔の部品特徴のチューニング）と、上層には AM 領域の性質（向きに関する恒常

性) と似た性質が見られました [2]。この結果は、同領域の神経計算に関する一つの可能性を提示します。

○今後の展望

本研究では上記に加え、GVAE のさらなる性能向上のために、adversarial learning という正則化手法を組み合わせることも試みましたが、性能向上は見られませんでした。また、本研究の動機となった、素材などの質感画像データも適用を試みましたが、意味のある因子の分解は見られませんでした。この後は、これらの結果も踏まえ、新たな深層生成学習モデルの開発に挑みたいと考えます。

○関連する研究発表

1. Hosoya, H. Group-based learning of disentangled representations with generalizability for novel contents. The International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI) , Aug, 2019.
2. H. Hosoya. A deep generative model explaining tuning properties of monkey face processing patches, in Computational Cognitive Neuroscience, Sep, 2019.

流体状食品のシミュレーションと物性推定

研究代表者 楽 詠瀬（青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科・准教授）

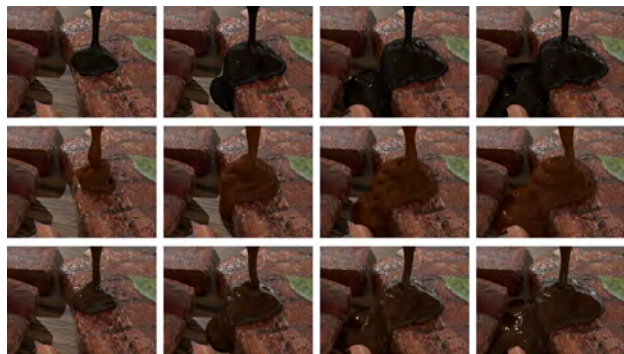
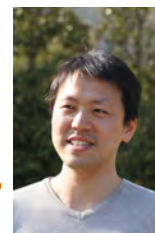


図 1. 提案法でステーキにソースをかける様子をシミュレートしました。ソースは上から順に、トンカツソース、バーベキューソース、それらの 1 対 1 混合物です。



図 2. 提案法でセロリのディップソースをシミュレートしました。ソースは上から順に、マスタード、マヨネーズ、それらの 1 対 1 混合物です。



図 3. 提案法によってソースをスプーンで混合する様子をシミュレートしました。

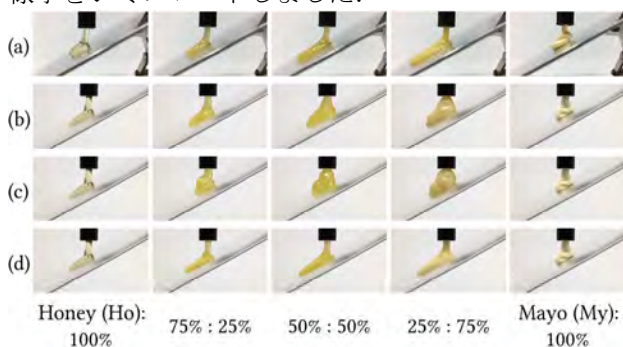


図 4. はちみつとマヨネーズ（両端）およびそれらの混合物。(a)実写, (b)物性パラメータの線形混合, (c)実効粘性の線形混合によるシミュレーション, (d)提案モデルを用いたシミュレーション。

○研究の背景と目的

本研究では、流体のネバネバやサラサラといった流動性の質感を、コンピュータグラフィックスで図 1-4 に示すように写実的に表現するための方法を扱います。私たちの身の回りには、食品のソース等で見られるように様々な複雑流体と呼ばれる流体が存在します。複雑流体は一般に、剪断速度に応じてその粘性が変化することで、液体のように粘性流動する特徴と、固体のように弾性によって形を保つ特徴を併せ持ちます。食品のソースのような複雑流体は、しばしば混合されて利用され、混合体の流動性は混合比に応じて非線形に変化して興味深い挙動を示します（図 4(a)の例では単体よりも混合体の方が高い流動性を持ちます）。そこで、複雑流体のこの非自明な流動性変化をモデル化する方法を開発し、ネバネバ、トロトロ、ドバドバ、サラサラなどの質感を持つ流体状食品の写実的な混合アニメーションの生成に応用することを目指します。

混合体の流動性を表現する方法として、様々な混合比での物性を計測してデータベース化することも考えられますが、組合せ爆発的に必要な計測数が増えてしまいます。そこで本研究では、単体の物性と混合比のみから、混合体の流動性を特徴付ける粘性のモデル化を試みます。考えられる最も単純なモデルは、混合比に応じて物性パラメータや粘性を図 4(b)や(c)のように線形に混合するものですが、図 4(a)で観察された特徴的な挙動は表現できません。このことは非線形な混合モデルの必要性を示唆しており、その構築が本研究の目的です。

○研究成果

本研究ではまず、複雑流体の流動性を調べるため、レオメータ（Anton Paar Modular Compact Rheometer MCR92）という実験装置を用いて、様々な単体の流体状食品や、それらの混合体を対象に流動性を測定し、剪断速度 $\dot{\gamma}$ と剪断応力 σ の対応を得ました（図 5 点）。剪断応力と剪断速度の比は、その剪断速度における実効粘性を表します。次に、測定結果を表現できるモデル（流動曲線） $\sigma = \sigma(\dot{\gamma})$ を検討した結果、降伏応力（ σ_Y ）、整合性定数（ η ）、H-B 指数（ h ）という 3 つのパラメータを持つ Herschel-Bulkley (H-B) モデル

$$\sigma = \sigma_Y + \eta \dot{\gamma}^h$$

によって、単体および混合体の流動性を図 5 実線のように精度よく説明できることがわかりました。このことは、計測対象の物性がこれら 3 つのパラメータで表現できることを示しており、混合体の物性が

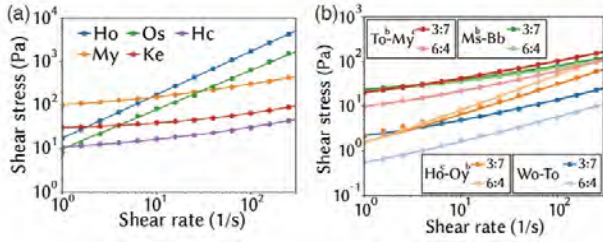


図 5. (a)単体の流動曲線, (b)混合体の流動曲線. Ho: はちみつ, My:マヨネーズ, Os:オリゴ糖シロップ, Ke:ケチャップ, To:とんかつソース, Bb:バーベキューソース, Oy:オイスターソース, Wo:ウスターソース.

H-B モデルで表せる物性空間の中で閉じることを示唆します. そこで混合体の物性を表現するモデルとして, H-B のパラメータ空間において閉じる非線形な混合モデルを考案しました.

非線形な混合モデルを設計するため, 私たちはまず, 混合体の物性が満たすべき性質を公理系として記述することを考えました. 具体的には, 混合操作を混合演算子 $\otimes$ として定式化し, 混ぜる順番に対して混合体の性質が変わらないといった条件を, 交換律, 分配率, ゼロ律, 恒等律, 結合律, 質量保存律の形で公理系を定めます. こうすることで, 混合演算子 $\otimes$ は単体の物性 M_A, M_B と, 混合比 α の一般混合関数系 $G = G(M_A, M_B, \alpha)$ として記述できることがわかりました. さらに, この一般混合関数系は, 逆像を持つ写像 F を用いて

$$G = F^{-1}(\alpha F(M_A) + (1 - \alpha)F(M_B))$$

と書き下せることがわかりました. つまり, 混合モデルの自由度は F の形のみとなります. そこで提案法では, 物性 M を H-B モデルのパラメータにより $M = (\sigma_Y, \eta, h)$ と表現し, 混合体の測定データを入力として, そのデータをよく再現できる F をデータ駆動アプローチによって設計することで, 非線形混合モデルを決定することを目指します.

事前に F のモデル族を定め, 蜂蜜/マヨネーズやオイスターソース/蜂蜜, マヨネーズ/とんかつソース, バーベキューソース/マスタード, ウスターソース/とんかつソースの 5 種類の混合体に対して物性測定を行い F の同定を試みたところ, $F(\sigma_Y, \eta, h) = (\ln \sigma_Y, h^{1.4}, \eta^{0.12-3.2h+2.7h^2})$ という形が測定結果を最もよく表現できることがわかりました.

混合体の流動曲線の測定結果 (図 6 緑点線) と, 上記の方法論で得られた混合モデルによる物性の推定曲線 (図 6 緑実線) を比較すると, 図 6 上段左 (My^b-Ho^b 混合) において, 単体の流動曲線である赤線と青線の交点の下側を混合体の流動曲線が通る特徴的挙動を再現できていることがわかります. また, 他の混合体においても実測結果の特徴を定性的に再現できています.

このように, 提案法では公理系による記述によって混合の関数系が特定の形に制限されるという事実を利用することで, 探索すべき関数空間を効果的に

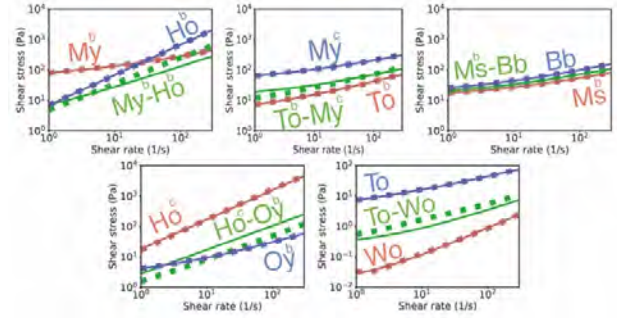


図 6. 実測結果 (点線) と提案混合モデルによる推定曲線 (実線) の比較図. 赤, 青線は単体, 緑線は混合体を示しています.

限定し, 実測データに基づいた混合モデルのデータ駆動的な同定を可能にしました.

さらに, 本研究で得られた混合モデルを, 物質点法を用いたシミュレーション手法に組み込みました. その際, 時間発展に応じた混合比の動的な変化を次のように扱います. ここでは, 溶解現象は無視し, 空間的に混合される様子のみをモデル化しました.

粒子点には初期混合比 α_p (混合体を構成する単体の体積分率からなるベクトル) を持たせ, 各ステップにおいて, 各格子点 i における単体の混合比 $\hat{\alpha}_i$ を

$$\hat{\alpha}_i = \frac{\sum_p V_p w_{pi} \alpha_p}{\sum_p V_p w_{pi}}$$

と推定します. ここで, V_p は粒子点 p の体積, w_{pi} は物質点法の形状関数を用いて計算される粒子点 p と格子点 i 間の重みを表します. 次に各格子点の推定混合比 $\hat{\alpha}_i$ を用いて, 各粒子点の混合比 $\hat{\alpha}_p$ を内挿 $\hat{\alpha}_p = \sum_i w_{pi} \hat{\alpha}_i$ により求め, 混合モデルに適用し, 各粒子点での混合体の物性を推定します.

この手法によってシミュレートした結果 (図 4(d)) と, 実際の流体を斜面に流した結果 (図 4(a)) を比較すると, 流体の先端位置に見られるように, 単体に比べて混合体が流れやすくなる挙動が再現できました. また, 図 1-2 のように各種ソースやその混合体, および図 3 のように混合比が動的に変化する際の流体の流動性の質感を表現できました.

○今後の展望

本研究で計測した流体は, H-B 指数が $0.4 \leq h < 1$ の範囲内にあり, これに含まれない流体についてはさらなる検討が必要です. また, 本研究では化学変化はなく, 温度一定の場合を考えましたが, 温度変化や化学変化への対応は興味深い課題です. さらに, 光学特性の混合への拡張も有意義な課題です.

○関連する研究発表

1. Nagasawa K, Suzuki T, Seto R, Okada M, Yue Y: Mixing sauces: a viscosity blending model for shear thinning fluids. ACM Transactions on Graphics 38(4) (Proc. of SIGGRAPH 2019), 95:1-95:17, 2019.

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

研究代表者 鳴海 拓志（東京大学大学院情報理工学系研究科・准教授）



食品に対して動きのある質感を投影することで、食に関連する知覚（味、匂い、おいしさ等）や認知（快不快、価値判断、価格等）、食行動を制御する新たな動的質感プロジェクションマッピング技術

○研究の背景と目的

認知科学・心理学・マーケティング等の多様な研究分野において、多感覚情報が食に関連する知覚（味、匂い、おいしさ等）や認知（快不快、価値判断、価格等）にどのような影響を与えるかが研究されてきました。特に、食体験に対する視覚の影響は大きく、食品の見た目が食の知覚や認知に強い影響を与えることが明らかにされてきています。他方、これらの研究では、色や形など変化しない静的な質感のみを扱っており、食品特有の湯気の揺らぎや油はね、沸騰によるぐつぐつとした動きといった、動的な質感の影響についてはほとんど研究がされていません。この理由の一つとして、動的質感のみを取り出して操作し、その影響を調べることが可能な実験系を実現することが難しいことがあげられます。

これに対し本研究では、プロジェクションマッピングを用いることで、対象物に動的質感を与えることが可能な新技術を開発し、これを用いて食品に付与された動的質感（特にぐつぐつとした動き）が食の知覚・認知、そして食行動にどのような影響を与えるかを明らかにすることを目的とした研究を展開しました。

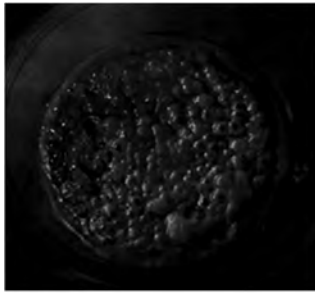
これまでの類似の研究では、例えば岡嶋らは、プロジェクションマッピングを用いてカステラの色の彩度をリアルタイムに変調させることで、摂食時の甘味が変化することを示しました（M. Nishizawa et al., 2016）。われわれも、食品の周囲に投影する皿の映像のサイズを変えることで間接的に任意の食品のボリュームの推定を変化させ、摂食量を変化させられることを示しています（S. Sakurai et al., 2015）。この種の、食品の質感をリアルタイムに変化させる投影技術を活用することで、ユーザが何も身につける必要がなく、食品の種類にも依存しない手法を実

現でき、多様な食環境で利用可能な食知覚・食行動変容手法を構築できると考えられます。視覚的質感の変化が多感覚知覚に加えて行動や認知をも変化させるという現象を、最も多感覚を活用する食行動に適用して考えることで、味（味覚）・香り（嗅覚）・食感（触覚）等のより広範な知覚に対して視覚的質感の変化が与える影響をモデル化することを狙って研究をおこなっています。この知見を元に、食品への動的質感のプロジェクションマッピングによって食のおいしさや喜び、健康増進や新たなマーケティング手法を実現する工学的手法の実現を目指します。

○これまでに得られた成果

変幻灯（T. Kawabe et al., 2016）の知見を活かし、加温されていない食品に対して、その食品がぐつぐつ煮える際の動きの運動情報のみを抽出して投影することで、その食品がぐつぐつしているように見ることが可能な動的質感投影技術を構築しました。この技術を使った評価実験では、カレーを評価対象として採用し、ぐつぐつとした動的質感が投影された食品の試食前後において、味覚や温度等に対する評価が変化するかを調査しました。実験では、提示する条件として、ぐつぐつとした動きのある映像と動きのない映像（発色の統一を図るための一様なテクスチャ）を投影した2種の映像条件と、カレーの温度2種の温度条件の組み合わせを用い、それぞれの条件下でどのように評価が変化するかを比較することで、動的質感の投影が与える効果を検証しました。その結果、動的質感を投影することで、実食前の温度や香り、おいしさの評価が向上することが示されたものの、実食後にはそれらの差異が認められないという結果が得られました。このことから、ぐつぐつとした動的質感の付与は、食品を実際に食べる前の期待をさまざまな面において変化させるものの、実食した際の食品への評価に与える影響は限定的であることが明らかになりました。一方で、動的質感を投影する条件では、実食前後ともその食品に対する食欲の評価が増すことが示され、食欲を喚起する効果が高いことがわかりました。

そこで、こうした効果が実際の食品の購買行動に影響を与えるかを調査するために、レストランにおいて実験をおこないました。この実験は、日本科学未来館のレストランにおいて、企画展示「マンモス展」にあわせて提供されていた雪原カレーを対象としておこなわれました。ショーケース内の食品にぐ



抽出した動き



投影前



投影後

沸騰した食品の映像からぐつぐつとした動的質感の運動情報だけを抽出し、静止した食品に対してプロジェクションマッピングをおこなうことで、実際には沸騰していない食品をぐつぐつしているように見せることができる。



未来館のレストランで実験をおこなった際の様子。マンモスカレーに対してぐつぐつとした動的質感の投影をおこなった。

	注文数	全利用者数	注文率
動的質感投影	141	1355	10.4%
単色画像投影	75	998	7.5%

レストランでの実験におけるマンモスカレーの注文率の変化。ぐつぐつとした動的質感を投影することで食欲が喚起され、注文率が増加した。

ぐつぐつとした煮える動きの運動情報（動的質感）を投影する日を2日、色味を揃えるために運動情報のない単色の画像（単色画像）を投影する日を2日設け、期間中のレストラン利用者の購買行動データを取得しました。

その結果、単色画像を投影した場合には雪原カレーの注文率が7.5%（998名中75名が注文）であったのに対し、動的質感を投影した場合には雪原カレーの注文率が10.4%（1355名中141名が注文）となり、有意に注文率が増加しました。雪原カレーは1020円と、レストランで扱われている他の食品の価

格（平均約650円）よりも高いにもかかわらず注文率が増加する結果となっており、動的質感を付与して見せることで、多くの人が価格に見合う価値があると判断して購買を決定したと考えられます。この結果から、プロジェクションマッピングによる動的質感の付与によって増進された対象の食品に対する食欲が、実際の購買行動にも結びつくことを示しました。

これらの知見は、食品ディスプレイでの活用の他にも、動的質感の操作を活用したさまざまな領域におけるアプリケーションへ応用できると考えられます。

○関連する研究発表

論文

1. 鳴海拓志, 松尾宇人, 櫻井翔, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 食卓へのプロジェクションマッピングによる食の知覚と認知の変容 ～天ぷらを例題として～, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.23, No.2, pp.65-74, 2018年6月. (日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞)

学会発表など

1. 鈴木佑司, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 食品への動的質感付加が食体験に与える効果の検討, 第24回バーチャルリアリティ学会大会, 2D-6, 2019.

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

研究代表者 渡辺 義浩（東京工業大学 工学院 情報通信系・准教授）

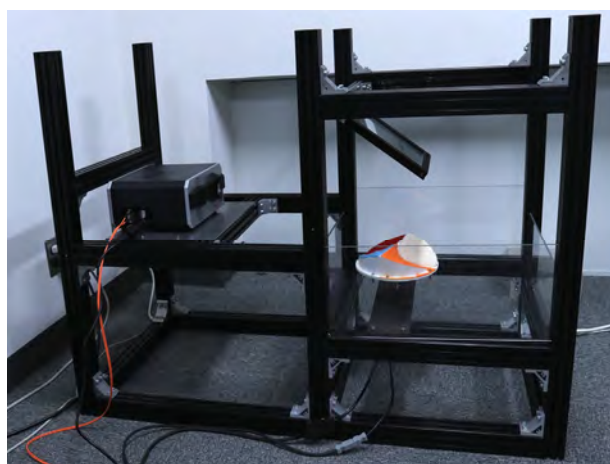
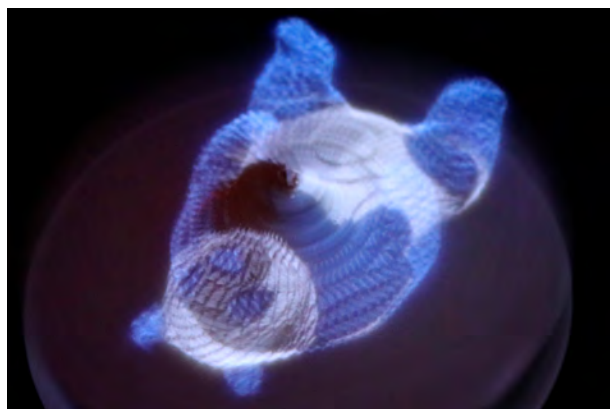


図 1. 実物体を用いた 3 次元ディスプレイ。上段：毛糸で生成された立体視可能なパンダの提示結果。中段：構築したポリュメトリックディスプレイシステム。下段：システムで利用されたスクリーン

○研究の背景と目的

本研究では、新たな視覚的質感の再現技術に取り組みます。特に、モニター中のコンピュータグラフィックスではなく、実世界上で質感を再現する技術に着目します。このタイプの技術構想には、数多くの興味深いチャレンジが内包されています。このチャレンジを生み出す源泉となっているのは、質感が人間の知覚的な尺度に作用される部分が大きいう点です。すなわち、物理的な同一性ではなく、知覚上での同一性に基づいて、リアリティを追求することができます。質感再現の核は、虚構でありながら本物に極めて近い実在性＝ハイパーリアルを目指す工学的デザインにあり、デバイスから心理物理までを横断する重要なテーマであると考えられます。このような背景のもと、実世界上での質感再現技術は次々にその可能性を塗り替えています。同技術の戦略には大まかに 3 つの軸があります。第 1 軸が 3 次元プリンタ技術をベースとしたファブリケーションタイプ、第 2 軸がデジタルなテクスチャとして質感を投影するプロジェクションタイプ、第 3 軸がダイナミクスやライティングとの組み合わせによって実在する物体の質感をそのまま利用するタイプです。特に、後者 2 つは自在に質感を変化させることができます。代表者は、これら 2 つの軸において高速性が質感再現にもたらす効果を明らかにし、その技術を大きく進化させてきました。

本研究では、第 2 の軸のダイナミックプロジェクションマッピングによる質感再現と、第 3 の軸の実物体を組み込む質感再現の 2 つを組み合わせることを新たに考えます。これによって、形も質感も自在に変化させ得るディスプレイの実現に取り組みます。

○研究成果

具体的な戦略として、古典的な 3 次元ディスプレイの 1 つであるポリュメトリックディスプレイの進化に着手しました。ポリュメトリックディスプレイは、回転する物体に対して、所望のタイミングで瞬時的な光を放つことで、残像効果をもとに形を再現するものです。3 次元ディスプレイ分野では数多くの技術が試されてきていますが、同ディスプレイは視聴範囲・輻輳調節・裸眼・動画化などの観点で他の構成より優れています。

一方、表面の質感は十分な再現性能を達成できていません。理由として、システム構成上、ディスプレ



図 2. 本研究のコンセプト

品質を維持するために、投射される光は μs オーダの極端に短い時間しか許容されません。このため、再現できる質感の階調には限界があり、細やかな質感再現が難しかったと考えられます。しかし、質感再現のボトルネックが解消されれば、強力なディスプレイとして進化できると期待できます。

そこで、現実の物体の反射特性をダイレクトに用いる技術を、本ディスプレイの被反射物体に取り込むことでリアリティを上げる研究を実施しました。具体的には、再現したい実物体でポリュメトリックディスプレイの走査スクリーンを作る構成を提案しました。これによって、立体提示と質感再現の両者の性能を同時に高めることを可能としました。実験の結果、毛糸を用いたパンダの立体像などを提示できることを確かめました。

○今後の展望

提示できる立体像のさらなる品質向上に向けて、用いる実物体の種類を増やすとともに、インタラクティブな提示もできるようにする予定です。

○関連する研究発表

学会発表など

1. 朝比奈 怜, 吉田 貴寿, 渡辺 義浩: 周期運動する実素材を用いたリアリスティックな 3 次元ディスプレイの試作, 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 1C-3, 2019.
2. 朝比奈 怜, 吉田 貴寿, 渡辺 義浩: 周期運動する実素材を使ったリアリスティックな 3 次元ディスプレイの解像度向上, 第 60 回複合現実感研究会, 2020.

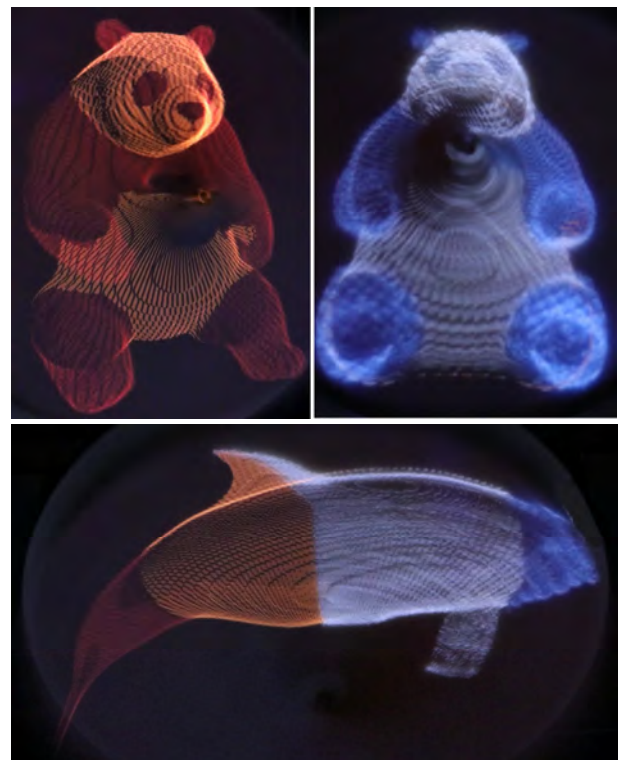


図 3. 図 1 のシステムを用いた提示結果



研究代表者 天野 敏之（和歌山大学システム工学研究科・教授）

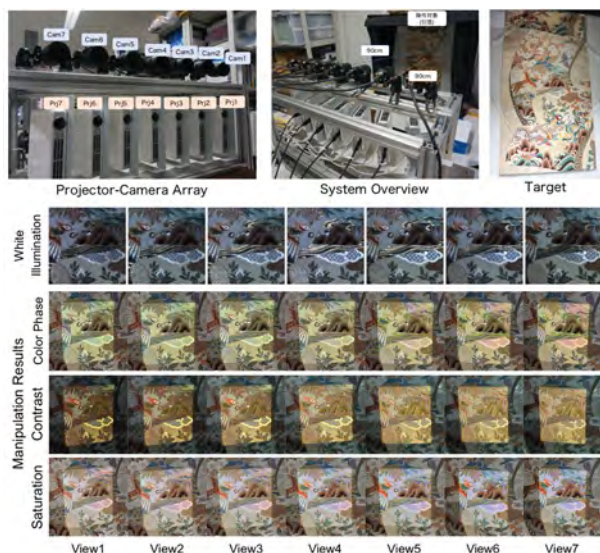


図 1. 視点依存の色彩操作. システムによって取得された反射特性より計算された光線場を、プロジェクタから投影することで、視線方向ごとに物体の見かけの色彩を変化させることができます.

○研究の背景と目的

視覚情報から質感を理解する場合、物体の色彩や輝きだけではなく、視線を移動した際のそれらの変化も重要な手がかりになります. この色彩や輝きは、物体固有の反射特性だけではなく、物体へ照射される光線にも依存します. したがって、光線場を精巧に設計することで、光学的な制約の範囲内で物体の質感を置き換えることができます.

我々は、光線場投影によって知覚される質感を光学的に置き換えることを質感編集と定義し、この実現を目標としています. そこで、本研究では多様な反射特性を持つ帯地を題材とし、プロジェクタカメラアレイを用いた反射解析とそれに基づく光線場投影による視点依存の色彩操作を試みました.

○これまでに得られた成果

コンピュータグラフィックスなどで用いられる双方向反射率分布関数 (BRDF) は、視線方向や照明の向きによって変化する物体表面上の反射特性を表します. 視覚的な質感がこの BRDF によって説明できるとして、我々は BRDF を知覚的に変化させる視点依存の色彩操作を提案しています.

具体的には、図 1 に示した装置の各プロジェクタ (Prj1, Prj2, ..., Prj7) から様々な色彩の光を操作対象 (Target) へ投影し、その様子をすべてのカメ

ラ (Cam1, Cam2, ..., Cam7) で撮影することで、BRDF に相当する反射特性を取得します. その後、視線方向ごとに設定された提示目標の色彩に変化させる投影映像を解析的に求め、それらを各々のプロジェクタから重畳投影します. このような投影で、視点ごとに色彩を変化させる知覚的な BRDF 操作を実現しました.

この方法を適用するためには、すべてのプロジェクタおよびカメラで、投影の遮断や撮影の隠蔽が生じることが必要でした. しかし、複雑な凹凸がある対象ではこの条件を満たすことが困難です. また、図 2(a) に示すように、この技術を博物館や美術館などへ応用では、鑑賞者によって投影が遮られる状況も想定されます. 質感編集は、鑑賞する人がいてこそ意味を持つ技術ですから、このような隠蔽によって意図した操作ができないのでは意味を成しません.

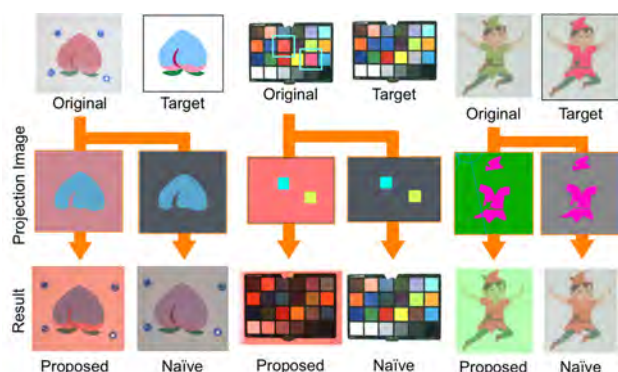


図 2. 複雑形状に対応した BRDF 操作

そこで、本研究では鑑賞者主体 (「ヒューマンセントリック」) という観点からも、投影の遮蔽や撮影の隠蔽が部分的に生じた場合にも対応可能な視点依存の色彩操作を検討しました. 提案手法では、複数のカメラと複数のプロジェクタを使用しますので、隠蔽が起きている組み合わせが判ればその要素を除いた解析ができます. また、あるプロジェクタの投影が隠蔽されても、投影可能なプロジェクタだけを用

いて投影を最適化することで、影が発生しない視点依存の色相操作(b)や彩度操作(c)が実現できます。

この「ヒューマンセントリック」は、光学的な状態よりも鑑賞者の知覚を重視する概念とも言えます。この考えに基づけば、光学的に実現不可能な色彩操作も可能にします。例えば、純粋な赤色の物体を光学的にその補色のシアンへ置き換えることはできません。また、プロジェクタの光量はマットな物体の上で金属光沢の輝度を再現するには不十分で、また、無投影時の明るさより暗くすることもできません。このような問題に対して、我々は視覚特性や錯視を応用した質感操作にも取り組んでいます。



(a) 色恒常性を利用した色彩操作



(b) グレア錯視を誘発させる光沢感強調

図3. 光学的な限界を超える質感操作

補色への色操作では、図3(a)に示す色恒常性を応用した方法を提案しています。この方法では、操作する対象領域の周辺に操作目標の色彩と反対の色の投影を行います。この周辺の投影が環境照明の色彩と知覚されれば、ターゲットの色彩が光学的な限界の灰色にしかなくとも、色恒常性によって補色に知覚させることができます。また、投影性能を超える光沢感強調として、図3(b)に示すグレア錯視を応用した手法を研究しています。グレア錯視は、ターゲットの周辺に明度勾配を提示することで、ターゲットがもとよりも明るく知覚される錯視現象です。この研究では、シーン中のスペキュラ部分のみを明るくする(Naïve enhancement)よりも、その周囲にグレア錯視を誘発するグラデーションも投影

(Glare illusion based) する提案手法の方が、より光沢感が強調できることがわかりました。

○今後の展開

光線場投影による質感の置き換えには、操作対象の色彩だけでなく、反射の拡散による光学的な制約もあります。今後の研究では、視点依存の色彩操作に錯視を誘発する照明を組み合わせることで、さらに高度な質感編集を実現する予定です。

○関連する研究発表

論文

1. Art Subpa-asa, Ying Fu, Yinqiang Zheng, **Toshiyuki Amano**, Imari Sato: Separating the Direct and Global Components of a Single Image, *Journal of Information Processing*, 26: 755-767, 2018.11.
2. 天野敏之: 適応的な見かけの操作による色彩インスタレーション, 日本色彩学会学会誌, 「デジタル自動彩色の現在」特集, 43(6): 313-316, 2019.11.
3. Ryo Akiyama, Goshiro Yamamoto, **Toshiyuki Amano**, Takafumi Taketomi, Alexander Plopski, Christian Sandor, Hirokazu Kato: Robust Reflectance Estimation for Projection-Based Appearance Control in a Dynamic Light Environment, *IEEE TVCG*, in Press.

学会発表など

1. 天野敏之: 「日本橋三越本店天女像 音と光のインスタレーション」, 羽倉賞 映像奨励賞 受賞記念講演, 最先端表現技術利用推進協会, 2018.7.
2. **Toshiyuki Amano**, Kouki Murakami, Yusuke Miyabayashi: Appearance Manipulation Using Light-Field Projection, *Int'l Display Workshops (IDW2018)*, 招待講演, Nagoya, 2018.12.
3. Kouki Murakami, **Toshiyuki Amano**: Materiality Manipulation by Light-Field Projection from Reflectance Analysis, *ICAT-EGVE2018*, Cyprus, 2018.11.
4. **Toshiyuki Amano**: Manipulation of Material Perception with Light-Field Projection, *Asia Pacific Workshop on Mixed and Augmented Reality, Keynote*, Nara, 2019.3.
5. **Toshiyuki Amano**: Manipulation of Material Perception with Light-field Projection, *SPIE DEFENCE+COMMERCIAL SENSING, 3D Imaging Visualization and Display*, 招待講演, Baltimore, 2019.4.
6. Shinji Nagata, **Toshiyuki Amano**: Gloss Enhancement beyond Projector Performance using the Glare Illusion, *IDW2019*, Sapporo, 2019.11.
7. Ryo Akiyama, Goshiro Yamamoto, **Toshiyuki Amano**, Takafumi Taketomi, Alexander Plopski, Christian Sandor, Hirokazu Kato: Perceptual Appearance Control by Projection-Induced Illusion, *IDW2019*, 招待講演, Sapporo, 2019.11.



研究代表者 石塚 裕己（大阪大学大学院基礎工学研究科・助教）

○研究の背景と目的

アクチュエータによる皮膚変形や経皮電流刺激によって皮膚内部の触覚受容器と呼ばれる神経細胞の直接刺激によって触覚への情報提示を行う装置である触覚ディスプレイが多くのグループによって研究されています。この触覚ディスプレイを通じて、よりリアルに実際の物体の触感を再現するためには、複数の触覚への刺激を同時に提示することが必要です。また、触覚ディスプレイを通じて触感を再現するには、その駆動条件を検討する必要があります。

本研究ではリアルな触感提示のために電気刺激と静電刺激を複合した触覚ディスプレイを提案し、有限要素法解析によりその駆動条件を最適化することを目指します。従来の触覚ディスプレイはアクチュエータが単一であり、一種類の刺激の提示しか行えないものが大半でした。これは使用するアクチュエータが大型であり、集積して組み合わせての使用に向かないからです。本研究では装置の構成が近い電気刺激触覚ディスプレイと静電刺激用の触覚ディスプレイとの組み合わせに着目しました。これらは刺激のために薄い電極と絶縁層のみを必要とするため、1つの基板上に容易に集積することが可能です。これらをMEMS加工によって1つの基板上に集積化することで、電気刺激による圧覚や振動と静電刺激による摩擦とを組み合わせ使用者に提示するための触覚ディスプレイを実現します。

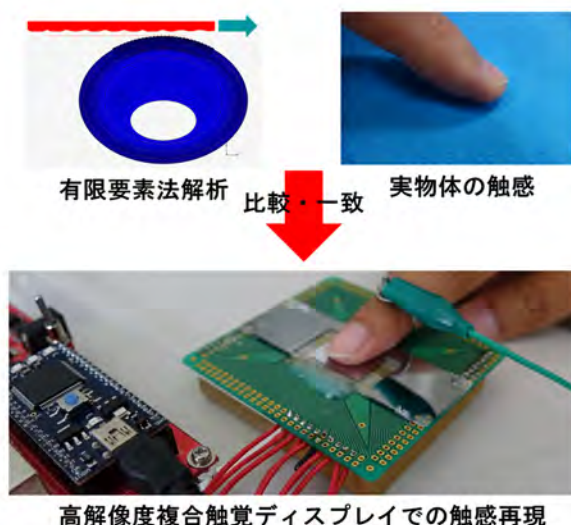


図1 提案する触覚提示方法

また、この触覚ディスプレイをなぞった場合の状態をコンピュータシミュレーションの一種である有限要素解析によって再現することによって、本触覚ディスプレイの駆動条件をシミュレーションから決定することも目指します(図1)。

○研究成果

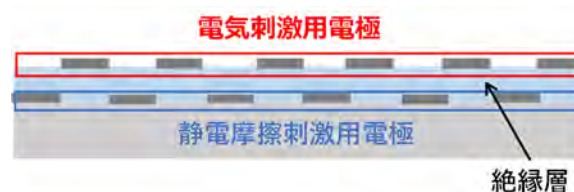


図2 本研究で提案する触覚ディスプレイ

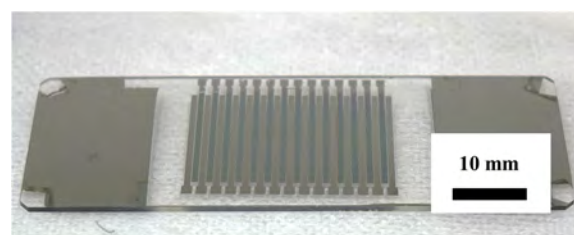


図3 MEMS加工で試作した触覚ディスプレイ

図2に本研究で提案する触覚ディスプレイの構造を示します。触覚ディスプレイの下部には静電刺激用の電極とそれを覆う絶縁層が形成されています。この電極に高電圧を印加した状態で指で触れると、絶縁層の誘電分極によって指と電極とが逆の電荷に帯電します。その結果、指に静電気が働き電極のほうへ引き付けられます。この状態で指を動かすことによって指に摩擦力が生じます。この電極への入力電圧を周期的に変化させることによって摩擦力も周期的に変化して、その結果、皮膚に振動刺激を提示することも可能です。静電刺激用の絶縁層の表面には電気刺激用の電極が形成されています。電気刺激を行う際には、2つの電極を高電圧とGNDに接続する必要があります。この2つの電極の間に指を乗せると、高電圧とGNDの間に皮膚による抵抗が介在した回路となり、皮膚の内部に電流が流れます。これによって、皮膚の内部にある触覚受容器が刺激されます。この際に、電流刺激は皮膚の浅部の圧覚や振動を知覚する触覚受容器を刺激できるため、圧覚や振動のような感覚を提示することができます。図3に実際にMEMS加工によって作製した触覚デ

ディスプレイを示します。

作製した触覚ディスプレイを通じてよりリアルな触感が提示できているかを確認するために、評価実験を行いました。実験では、触覚ディスプレイ上に提示されている刺激と、3Dプリンタによって作製したサンプルとを比較して、どの程度近い触感に感じるかを被験者に回答してもらいました。今回、摩擦と圧覚とを組み合わせることで提示ができそうな、幅1 mmの凸形状をサンプルとすることとしました(図4右)。触覚ディスプレイ上の1つの静電刺激用の電極と、その両隣にある電気刺激用の電極を用いました(図4左)。この際、電気刺激用の電極のみを用いて刺激を提示した場合と、電気刺激用と静電刺激とを組み合わせ提示した場合とで、どちらがよりリアルに提示できているかを5人の被験者に評価してもらいました。尚、電気刺激の際に感じるスコアを0として、そこから4段階で類似度を回答してもらいました。電気刺激と静電刺激の周波数は320 Hzで、それぞれパルス幅が200 usと625 usに設定した。刺激の強さはそれぞれの刺激の閾値の1.1倍、1.2倍、1.3倍の範囲で設定しました。刺激の強さの組み合わせで合計9通りのパターンを評価することとしました。

図5に評価実験の結果を示します。スコアが0を超えている条件が多いことから、電気刺激のみを提示した場合よりも、静電刺激を組み合わせ提示した場合のほうが、よりサンプルに近い触感を提示で

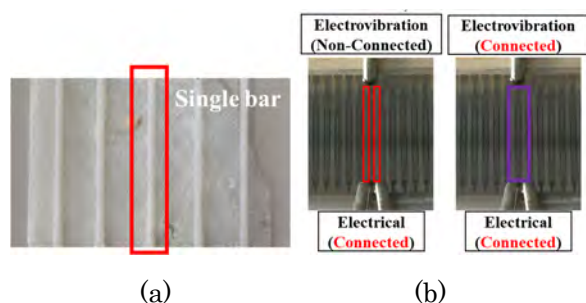


図4 実験条件。(a) サンプル。(b)電極接続。

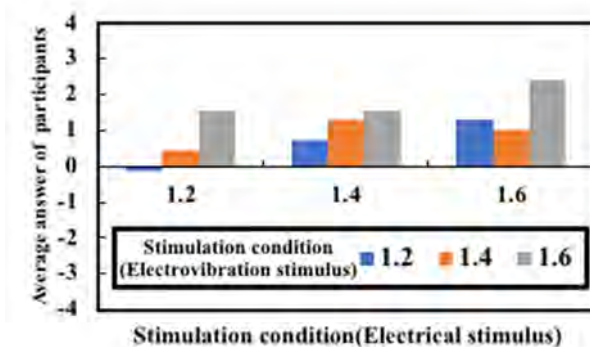


図5 実験結果

きていたと言えます。また、電気刺激と静電刺激がそれぞれ閾値の1.3倍の強さの場合に、最もスコアが高くなっていることから、刺激を更に強くすればよりリアルな触感を提示できることも考えられます。

○今後の展望

本研究では、複合触覚ディスプレイを作製して、電気刺激のみを提示した場合と比較して、よりリアルな触感を提示できているかを評価しました。今後は静電刺激のみの場合とも比較して、よりリアルな触感が再現できているかの確認も行います。また、刺激の条件によってよりリアルな触感を知覚することが、実験より明らかにできたため、今後は、刺激の提示の条件の最適化を、デバイスの開発と並行して進めてきた有限要素法解析を用いて明らかにする予定です。本研究に関連して、静電刺激の低電圧化に関する研究も進めており、低電圧化した際のリアルな触感再現についても検討を進める予定です。

○関連する研究発表

論文

1. Komurasaki S, Kajimoto H, Ishizuka H, Fundamental Perceptual Characterization of an Integrated Tactile Display with Electrovibration and Electrical Stimuli. micromachines 10(5):13 pages, 2019.

2. 加藤邦拓, 石塚裕己, 梶本裕之, 宮下芳明; 導電性インクの両面印刷を用いた電気刺激と静電吸着の複合触覚ディスプレイ. 情報処理学会論文誌 60(10): 1915-1928, 2019.

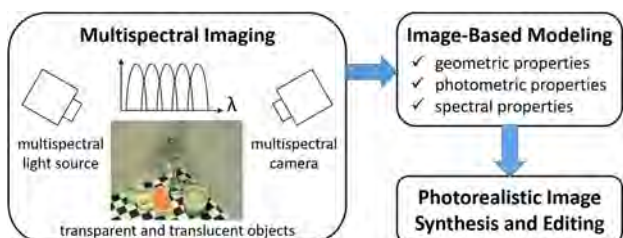
学会発表など

3. Kato K, Ishizuka H, Kajimoto H, Mliashita H: Double-sided Printed Tactile Display with Electrostimuli and Electrostatic Forces and its Assessment. In proceedings of CHI 2018, Paper No. 450, 2018.

4. Kitaguchi S, Yoshimura H, Shimokawa F, Ishizuka H: Why Surface Haptics Cannot Present Realistic Tactile Sensations? : Pilot Study. IEEE World Haptics Work in Progress, 2 pages, 2019.

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

研究代表者 岡部 孝弘（九州工業大学 大学院情報工学研究院・教授）



多波長光源・多波長センサを用いて獲得した実写画像に基づくモデリング・レンダリング技術により透明・半透明物体の質感を編集

○研究の背景と目的

木の葉の上の水滴やカットされたダイヤモンドなどの透明物体、および、人間の肌や大理石などの半透明物体は、豊かで独特な質感を生じます。これは物体と入射光との相互作用、すなわち、反射・屈折・散乱・吸収などに依るものです。

本研究の目的は、これらの相互作用が、反射率、屈折率、散乱係数、および、吸収係数を介して入射光の波長に依存することから、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の技術を開発することです。具体的には、多波長光源やマルチバンドカメラを用いた透明物体の幾何学的特性の推定や半透明物体の光学的・分光学的特性の推定、および、推定した物理的特性に基づく写実的な画像の生成・加工に取り組みます。

○研究成果

水の検出

ハイパースペクトルイメージングにより、分光反射率未知の物体表面上の水を検出する技術を開発しました（図1）。具体的には、水が可視光に対して透明である一方で近赤外光に対して半透明であることに基いて、近赤外域において、水が有るときの物体表面のみかけの分光反射率が、水が無いときの分光反射率よりも小さくなることを手掛りにして水を検出しています。そのために、分光反射率が少数の基底の線形結合で近似的に表現できることを活用して、水の有無に依らない可視光域の分光反射率から、水が無いときの近赤外域の分光反射率を推定しています。

水中物体・動的水面の形状復元

多波長動画像から、水中物体と動的水面の両方の形状を復元する技術を開発しています。具体的には、可視光域／近赤外光域では、反射率の変動が大きい

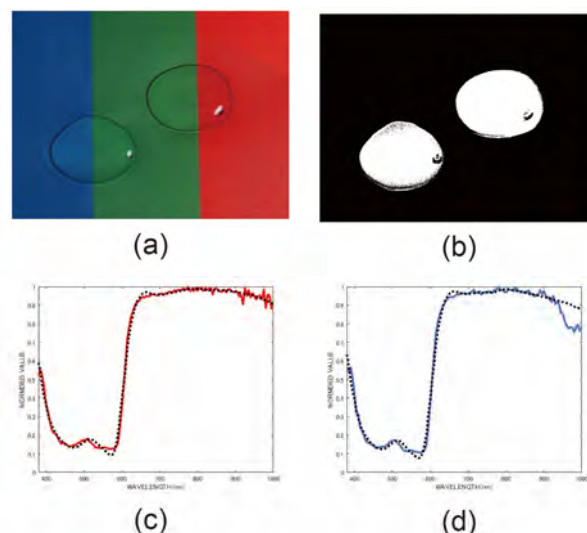


図1 分光反射率未知の物体表面上の水の検出：(a) 疑似カラー画像、(b) 検出結果、(c) 水が無いとき／(d) あるときの見かけの分光反射率と推定結果

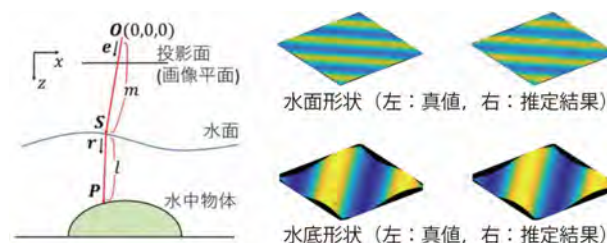


図2 多波長動画像を入力とする屈折と吸収に基づく水中物体・動的水面の形状復元（CG実験結果）

こと／小さいこと、ならびに、水が透明／半透明であることに着目して、可視光の屈折に基づく幾何学的な手掛りと近赤外光の吸収に基づく光学的な手掛りを統合することで、両方の形状を復元しています（図2）。

反射・散乱特性のモデリング

非一様な半透明物体を対象として、プロジェクタ・カメラシステムにより、反射光と表面下散乱光の各々の光学的特性を獲得するための技術を開発しています。具体的には、高周波パターンと正弦波パターンを組合わせた複合パターンを投影したときの画像を解析することで、反射率、および、反射成分を含まない散乱成分のみの点拡がり関数を頑健に推定しています。



図 3 動的シーンにおける光源色ごとの直接・大域成分の分離とその質感編集・照明シミュレーションへの応用

反射・散乱の分離

動的シーンを対象として、DLP プロジェクタと高速度カメラを用いて得られる、光源の明るさと色(波長)が高速に変動するシーンの画像列を入力として、光源色ごとに直接・大域成分を分離する技術を開発しました。参照物体を用いるとともに画素値の整合性を手掛かりにして、カメラとプロジェクタの同期もカメラ画素とプロジェクタ画素の対応も不要な簡便な成分分離を実現しています。この技術により、動的シーンにおける散乱などの波長に依存する光学現象の質感編集が可能になります(図 3)。

また、プロジェクタ・ハイパースペクトルカメラシステムを用いた分光反射率の計測やディスプレイ・偏光カメラシステムを用いた表面粗さの計測にも取り組んでいます。これらの技術は、半透明物体の外観検査に有効です。

その他

マルチスペクトルイメージングや色解析に関する研究として、狭帯域光源下画像の反射成分と蛍光成分の分離技術を開発しました。蛍光成分の色が光源波長に依存しないことに着目して、最少で 2 枚の画像からの分離が可能であることを示しています。また、事前知識を用いることで、単一画像からの分離を実現しています。

また、蛍光成分の分離とは逆の操作として、実写画像に蛍光成分を付加する質感編集技術も開発しました。複雑照明環境下における蛍光物体の見えに関する近似モデルを構築して、被写体の形状やシーンの照明環境を復元することなく、写実的な蛍光成分を付与できることを示しています。

さらに、交流電源により動作している光源の明るさの受動的な振動を手掛かりにして、複数の光源に照

らされたシーンの画像を固有画像に分解する技術も開発しています。具体的には、重ね合わせの原理に基づいて、高速度カメラなどを用いて撮影した動画像を光源分離、つまり、各々の光源のみに照らされた画像に分解したのち、輝度が光源色、反射率、照度の 3 つの積で表現されることに基づいて、固有画像分解、つまり、反射率画像、光源ごとの照度画像・光源色を推定しています。この技術は、シーンや光源の理解に有用であるだけでなく、画像の色補正にも有効です。

○今後の展望

本稿では、透明物体・半透明物体を対象として、マルチスペクトルイメージングによる検出、幾何学的・光学的特性の推定、および、質感編集などに関する研究成果を紹介しました。偏光などの波長以外の性質を用いた技術の開発は今後の課題です。

○関連する研究発表

1. 陰山, 松岡, 岡部: 屈折と吸収に基づく水中物体と動的水面の形状復元, 電子情報通信学会 ISS 学生ポスターセッション, 広島, 3. 2020
2. Hidaka D, Okabe T: Image-based material editing for making reflective objects fluorescent, In Proc. GRAPP2020, Valletta, Malta, 2. 2020
3. Oya R, Matsuoka R, Okabe T: NMF vs. ICA for light source separation under AC illumination, In Proc. VISAPP2020, Valletta, Malta, 2. 2020
4. 大屋, 松岡, 岡部: フリッカに基づく固有画像分解とその色補正への応用, FIT2019, H-030, 岡山, 9. 2019 (FIT ヤングリサーチアワード・FIT 奨励賞)
5. 柴田, 松岡, 岡部: 複合パターン投影による半透明物体の光学的特性の推定, MIRU2019, PS3-62, 大阪, 8. 2019
6. 奥山, 王, 岡部: 分光画像に基づく反射率未知の物体表面における水の検出, MIRU2019, OS1B-6, 大阪, 7. 2019
7. Koyamatsu K, Hidaka D, Okabe T, Lensch H: Reflective and fluorescent separation under narrow-band illumination, In Proc. CVPR2019, pp.7577-7585, Long Beach, USA, 6. 2019
8. 藤川, 岡部: ハイパースペクトルイメージングに基づく半透明物体表面の外観検査, 情報処理学会第 81 回全国大会, 1V-06, 福岡, 3. 2019
9. 有枝, 岡部: 外観検査のための半透明物体の表面粗さ推定, 情報処理学会 第 81 回全国大会, 1V-05, 福岡, 3. 2019 (学生奨励賞)
10. Torii M, Okabe T, Amano T: Multispectral direct-global separation of dynamic scenes, In Proc. WACV2019, pp.1923-1931, Waikoloa Village, USA, 1. 2019
11. 小屋松, 日高, 岡部, Lensch H: 狭帯域光源下画像の反射成分と蛍光成分の分離, MIRU2018, OS1-L2, 北海道, 8. 2018 (MIRU 優秀賞)

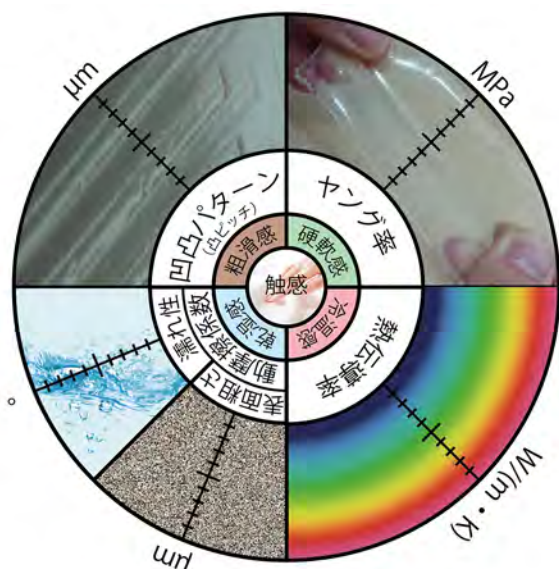


図1. 触感曼荼羅。微細加工技術により精緻に制御した粗さやヤング率等の物理特性と、触感の対応づけを試みました。

○研究の背景と目的

私たちは触覚を使って、物理的に外界とインタラクションをしています。一方で、通信や、バーチャルリアリティ、遠隔操作においては、視聴覚の利用に留まり、触覚は全く活用できていません。その理由は、触覚研究が、実サンプル、もしくは触覚を呈示する装置（触覚ディスプレイ）に触れた時の触感の評価を行ってはいないものの、「欲しい触感」を呈示するための触覚ディスプレイの駆動条件を求める研究が不十分だからだと考えました。ディスプレイ→触感評価を触覚研究の「順問題」とするならば、触感→ディスプレイの「逆問題」の研究が不可欠なのです。

そこで本研究では、微細加工技術を駆使して、例えば硬さ（剛性）は同じ材料だけれども、表面の微細パターンが 0.1 mm の精度で異なる触覚サンプルや、逆に微細パターンは同じだけれども、剛性が違う触覚サンプルなどを網羅的に製作し、これらの触感を評価します。この結果を用いることで触感が果たしてどの物理特性で、どのように決定されているか、が明らかになります。この結果に基づいて、触覚ディスプレイの駆動条件を網羅的なデータベースから、もしくは機械学習によって求めることで、触感呈示の逆問題を明らかにします。

○研究成果

図1に示すように、触感の粗滑感、硬軟感、冷温感、乾湿感に注目しました。粗滑感は表面の凹凸パターンで、硬軟感はヤング率、冷温感は熱伝導率、乾湿感は表面粗さと濡れ性の影響を評価しました。

まず粗滑感ですが、表面の凹凸パターンを、光によって硬化する樹脂（SU-8）をフォトリソグラフィにより製作しました。初期実験によると、0.05 mm 以下のパターンの違いを認識できなかったのが、0.1 mm から 1 mm までのパターンでの実験を行いました。大変面白いことに、この領域では凸幅よりも、凹幅の方が粗滑感へ与える影響が大きいことがわかりました。人の感覚はパターンの絶対値ではなく、パターンの変化率や比（ウェーブ比）に対応することが知られています。凹幅を 0.5 mm に固定し、凸幅を変化させた場合に違いを検出可能なウェーブ比が 0.5 であったのに対し、凸幅を 0.5 mm に固定し凹幅を変化させた場合は、ウェーブ比 0.1 でも検出することが可能でした。

次にヤング率の異なる材料で同じパターンを持つサンプルを製作し、実験しました。この材料は、主剤と硬化剤の二つの薬品を混ぜて成型する PDMS（ポリジメチルシロキサン）です。主剤と硬化剤の混合比を変えることで、ヤング率の異なるサンプルが実現できます。しかも転写性能が良好なため、持たせたいパターンを有する鋳型を用いて成型することで、同じパターンかつ異なるヤング率のサンプルが用意できます。こちらの実験では、まずヤング率が 0.7 MPa までのサンプルではウェーブ比 0.05 で

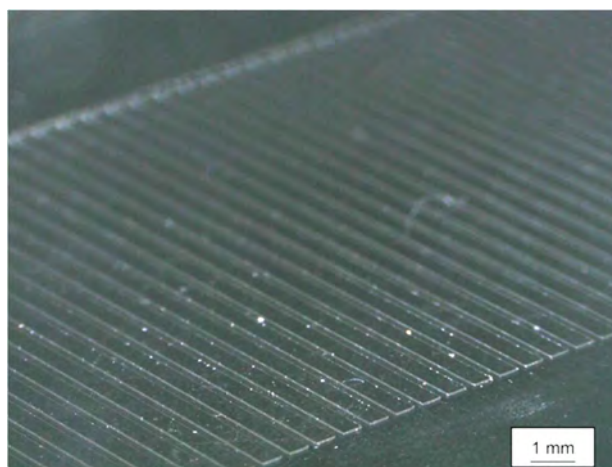


図2. 粗滑感のための触覚サンプル。凸部幅 0.5 mm、凹部幅 0.2 mm、高さ 0.05 mm。

硬さの違いを認識できました。一方で、ヤング率が 0.7 MPa 以上では、硬軟感の違いを検出できませんでした。これはヒト指腹部のヤング率に関係していると考えています。

乾湿感についても研究を行いました。図 3 のように、PDMS を酸素ドライエッチングにより処理することで、表面を粗くすることができます。ドライエッチング時間により表面の粗さを制御することもできます。このサンプルを用いることで、図 4 に示すように、表面粗さが増加すると、乾いた表面と感ずることがわかりました。

触覚サンプルを用いることで、特定の物理特性だけを独立して変化させることが可能になり、触覚の基本特性についての理解を進めることができました。まだ結果をまとめている最中でここでは詳細に述べられませんが、摩擦感についても検討を行いました。こちらでは、連続的に摩擦感を変えることができる触覚サンプルの開発も行いました。

次に、触覚を呈示する触覚ディスプレイの開発も行いました。ここでは冷温感ディスプレイを紹介します。これまで冷温感を呈示するディスプレイは、主にその表面温度を変化させるものが主流でした。けれども我々が木の表面を触った時と、金属の表面を触った時、それら両方が同じ温度、例えば室温だったとしても冷たさの感じ方は異なります。これらは物体の熱伝導によるものと考えられます。そこで、表面の「みかけの熱伝導率」を変えられる冷温感デバイスを製作しました。図 5 に示す装置は、表面にチタン板があり、そこを指が触れます。初期状態ではチタン板の下は空気のため、装置全体の、見かけの熱伝導率は小さくなります。実は、その下に熱伝導率の大きな液体金属が封入された袋があります。液体金属を外側からシリジンプンで注入すると、袋が表面のチタン板に接触し、熱が液体金属を經由して逃げていくので、みかけの熱伝導率が大きくなります。この装置により、チタン板に触れた時の冷温感を制御することに成功しました。

本研究の目標は、呈示したい触感→触覚ディスプレイの駆動パラメータ、という触感に関する逆問題を解くことでした。これまでの結果では、物理特性（触覚サンプル）→触感、触覚ディスプレイ→触感という順問題にとどまっています。触感は、粗滑感や冷温感など複数の触覚の複合したものになっています。そこで、粗さ感、硬軟感、摩擦感、乾湿感の 4 つの触感の官能評価結果を入力データとし、そこから当該触感を導出するサンプルの凹凸幅を、機械学習により導出を試みました。540 のデータセットを用い学習することで、評価損失 0.3 で導出することができました。この結果は触感の逆問題を解く第 1 歩だと言えると思います。

○今後の展望

今後は、触感についての逆問題と順問題を明らか



図 3. 乾湿感のための触覚サンプル。PDMS を酸素ドライエッチングにより表面を形成しました。

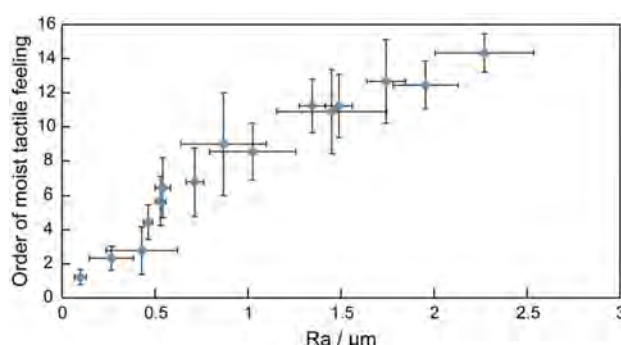


図 4. 表面粗さと乾湿感の関係。粗さが大きくなるにつれて、乾いた表面と感ずることがわかりました。

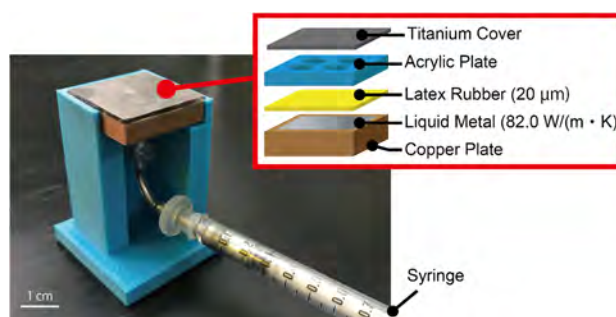


図 5. 冷温感ディスプレイ

にし、例えば「木の表面」と入力すれば、まさに「木」の表面を呈示できる触覚ディスプレイを開発したいと思っています。触感は主観的な感覚ではありますが、これを触覚サンプルを用いることで客観的、定量的に評価することで、触覚応用へのブレイクスルーを実現したいと考えています。

○関連する研究発表

論文

1. Hirai S, Miki N: A thermal tactile sensation display with controllable thermal conductivity. *Micromachines*. 10 (6): 359, 2019.

学会発表など

1. 柳橋 啓一朗, 三木 則尚: 触覚サンプルを用いた触感の定量化による触感曼荼羅の製作. 第 10 回 マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 浜松, 11.19-21, 2019

