

文部科学省科学研究費補助金
新学術領域研究

質感脳情報学



News Letter No. 2
2012.09.14

目次

領域代表挨拶	5
研究紹介	
A01 質感の計測と表示に関わる工学的解析と技術	6
A01-1 質感認知に関わるコンピュータビジョンと情報論的解析	
佐藤 いまり (国立情報学研究所・准教授)	
佐藤 洋一 (東京大学生産技術研究所・教授)	
岡部 孝弘 (東京大学生産技術研究所・助教)	7
A01-2 質感認知に関わる記録・合成と表示	
日浦 慎作 (広島市立大学大学院情報科学研究科・教授)	
岩井 大輔 (大阪大学大学院基礎工学研究科・講師)	9
A01 公募 画像のボケと両眼視差を同時に再現する注視反応ディスプレイ	
岡谷 貴之 (東北大学大学院情報科学研究科・准教授)	11
A01 公募 色彩情報処理による質感の計測・解析・再現	
堀内 隆彦 (千葉大学大学院 融合科学研究科・准教授)	12
A01 公募 分光情報に基づく高質感映像の収集と表示に関する研究	
山口 雅浩 (東京工業大学学術国際情報センター・教授)	13
A01 公募 質感情報の実体化プロセスを考慮した物体表面の質感編集手法	
宮田 一乗 (北陸先端科学技術大学院大学ライフスタイルデザイン研究センター・教授)	14
A01 公募 動的な見かけ制御を応用した実世界の質感制御技術に関する研究	
天野 敏之 (山形大学大学院理工学研究科・准教授)	15
A01 公募 人の認知を考慮した三次元記録や評価法の確立	
長原 一 (九州大学大学院システム情報科学研究院・准教授)	16
A01 公募 分光画像を利用した物体表面の色材要素解析と高質感画像の生成	
土居 元紀 (大阪電気通信大学情報通信工学部通信工学科・准教授)	17
A01 公募 輝度と立体感の順応を利用した質感再現の顕在化研究	
山本 昇志 (東京都立産業技術高等専門学校・准教授)	18
B01 質感認知に関わる感覚情報の特徴と処理様式	19
B01-1 質感認知に関わる視聴触覚情報の心理物理的分析	
西田 真也 (NTT コミュニケーション科学基礎研究所・主幹研究員)	
内川 恵二 (東京工業大学総合理工学研究科・教授)	
本吉 勇 (NTT コミュニケーション科学基礎研究所・主任研究員)	
藤崎 和香 (産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門・研究員)	20

B01-2	質感認知の環境依存性および学習依存性	
	中内 茂樹（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・教授）	
	北崎 充晃（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・准教授）	
	永井 岳大（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・助教）	22
B01 公募	質感からの3次元形状知覚	
	酒井 宏（筑波大学大学院システム情報工学研究科・教授）	24
B01 公募	漆黒の質感 ―黒うるしの表面特性とその感性評価―	
	阿山 みよし（宇都宮大学大学院工学研究科・教授）	25
B01 公募	実環境での安定した色認識における質感の役割	
	溝上 陽子（千葉大学大学院融合科学研究科・助教）	26
B01 公募	オノマトペの音象徴性を利用した触質感認知メカニズムの解明とその工学的応用	
	坂本 真樹（電気通信大学大学院情報理工学研究科・准教授）	27
B01 公募	視覚情報から物体の経時変化を推定する高次質感認知メカニズムの解明	
	岡嶋 克典（横浜国立大学大学院環境情報研究院・准教授）	28
B01 公募	皮膚変形レベルでの質感解明: 質感を際立たせる触覚テクスチャ合成法の確立	
	岡本 正吾（名古屋大学大学院工学研究科・助教）	29
B01 公募	物理刺激を伴わない質感認知: 共感覚における色認知の神経基盤の解明	
	齋木 潤（京都大学大学院人間・環境学研究科・教授）	30
B01 公募	チンパンジーにおける食物の質感知覚	
	伊村 知子（新潟国際情報大学情報文化学部・講師）	31
B01 公募	漆質感認知に寄与する時空間視覚情報特性解析 ―「漆の質感を見る技」の解明―	
	大谷 芳夫（京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科・教授）	32
B01 公募	「細かさ」質感の視知覚特性	
	新谷 幹夫（東邦大学理学部・教授）	33
C01	質感情報の脳内表現と利用のメカニズム	34
C01-1	質感認知の初期脳メカニズム	
	大澤 五住（大阪大学大学院生命機能研究科・教授）	
	佐々木 耕太（大阪大学大学院生命機能研究科・助教）	35
C01-2	質感認知の高次脳メカニズム	
	小松 英彦（自然科学研究機構 生理学研究所・教授）	
	一戸 紀孝（国立精神・神経医療研究センター神経研究所・部長）	
	郷田 直一（自然科学研究機構 生理学研究所・助教）	37
C01-3	質感認知に関わる感性・情動脳活動	
	本田 学（国立精神・神経医療研究センター神経研究所・部長）	39

C01 公募	ヒトの質感認知の脳神経メカニズムに関する臨床的研究 鈴木 匡子（山形大学大学院医学系研究科・教授）	41
C01 公募	聴皮質における音の質感と情動情報の神経基盤 高橋 宏知（東京大学先端科学技術研究センター・講師）	42
C01 公募	視覚情報がアクティヴタッチによる硬さ知覚に与える影響 勝山 成美（東京医科歯科大学大学院医歯学総合研究科・助教）	43
C01 公募	皮質脳波記録法を用いた視覚学習に伴う脳機能マップの可塑性の検証 川崎 圭祐（新潟大学大学院医歯学系研究科・助教）	44
C01 公募	実物体を用いた質感脳過程の研究～多角的脳イメージングによる機能・構造・生化学解析～ 山本 洋紀（京都大学大学院人間・環境学研究科・助教）	45
C01 公募	質感の変化による選好性の変化と前頭葉眼窩部の役割 船橋 新太郎（京都大学こころの未来研究センター・教授）	46
C01 公募	触覚による質感認知の基盤となる能動的触知覚の研究 古田 貴寛（京都大学大学院医学研究科・准教授）	47
C01 公募	初期視覚野における質感認知のための異種視覚情報統合メカニズムの解明 田村 弘（大阪大学大学院生命機能研究科・准教授）	48
C01 公募	大きさの知覚：恒常性、錯視、質感情報との相互作用 藤田一郎（大阪大学大学院生命機能研究科・教授）	49
C01 公募	脳が読み解く素材感：非注意・注意下での脳磁場反応解析 萩原 綱一（九州大学大学院医学研究院脳研臨床神経生理学・助教）	50
C01 公募	質感言語表現における多感覚相互作用：MEGによる脳内表象の解析実現に向けて 檀 一平太（自治医科大学医学部先端医療技術開発センター・准教授）	51
C01 公募	自然画像中の動きの解析の神経基盤 宇賀 貴紀（順天堂大学医学部・先任准教授）	52
C01 公募	モデル動物としてのサルにおける質感認知の研究 伊藤 南（東京医科歯科大学・保健衛生学研究科・教授）	53
C01 公募	質感認知とその障害の分子・神経メカニズム 南本 敬史（放射線医学総合研究所 分子イメージング研究センター・チームリーダー）	54
C01 公募	体性感覚を用いた質感認知の脳内機構 関 和彦（国立精神・神経医療研究センター神経研究所・部長）	55
C01 公募	脳情報復号化とデータ・マイニング技術による脳内質感情報表現の抽出 宮脇 陽一（電気通信大学先端領域教育研究センター・准教授）	56
	領域の活動 ～公開シンポジウムなど～	57
	領域開始後の主な研究成果発表一覧	59

領域代表挨拶

本領域「質感脳情報学」が発足してはやくも2年あまりが経過し、中間評価を受ける時期にさしかかっています。昨年の春に公募班員の方々が参加し、質量ともに本領域の活動は大きく発展しました。公募班員が加わってから3回の班会議と4回の研究集会を通して密な議論や交流が積み重ねられています。また3回の公開シンポジウムを通して、私たちの領域の活動を領域外の研究者の方や一般の方に知っていただく試みも行っています。これらの研究集会や公開シンポジウムでは、質感に関わる活動を進められている企業の研究者の方や芸術や工芸分野の専門家の方をお招きして、異なる視点から質感へのアプローチについて知ることにより多くの刺激を受けると共に、私たちの研究成果を今後社会にどのようにフィードバックしていくかを考えるきっかけとしても有意義でした。今回お届けするニュースレターの第2号では、領域2年目の昨年度に行った研究の内容を、研究計画全体や今後の展望との関係も含めてまとめたものです。計画班については代表者にグループ全体の内容をコンパクトにまとめていただきましたので、限られた紙面で書けなかった内容も多くあり、またグループ間の交流の成果が多くあがりつつありますが、それらについては次回のニュースレターを楽しみにしていただきたいと思います。

本領域は工学、心理物理学、脳科学の緊密な連携によって、質感認知に関わる人間の情報処理の特性を客観的に明らかにしながら、その基盤となる脳神経メカニズムの解明を進めることを目的にしています。質感認知は人間や動物のあらゆる活動と密接に関わっています。感覚入力をもとに物の素材や状態を判断する基本的な機能と共に、果物が新鮮でおいしそうとか古くなってますそうといった嗜好の形成や価値判断とも密接に関わっています。また地面が乾いているか濡れているかを瞬時に判断して歩き方を変えろといったように運動制御にも深くつながっています。質感というとすぐれた芸術作品や工芸の持つ高度な質感を連想しがちですが、そのような優れた質感の基礎には万物が持っている質感があり、万物が持つ質感が生み出される仕組みを理解しないことには、芸術や工芸の美しさの起源にも迫ることはできないのです。

ニュースレターを読んでいただくと分かるように、本領域では非常に多様な側面から質感にアプローチしています。これは私たちがめざす新しい学問分野である質感の科学の幅広いスコープを示しています。一方、質感認知へのアプローチは多様であっても、いずれの研究も世界の事物の持つ物理的な性質と、それらが生じる感覚情報と、脳活動の関係を客観的な方法論で明らかにしていくという共通した方向性を持つこともご理解いただけたと思います。このニュースレターによって、一人でも多くの方に質感の研究の大切さと面白さを知っていただけることを期待しています。

「質感認知の脳神経メカニズムと高度質感情報処理技術の融合的研究」領域代表

自然科学研究機構・生理学研究所・感覚認知情報研究部門

教授 小松 英彦

研究紹介 A01 質感の計測と表示に関わる工学的解析と技術

質感認知に関わるコンピュータビジョンと情報論的解析

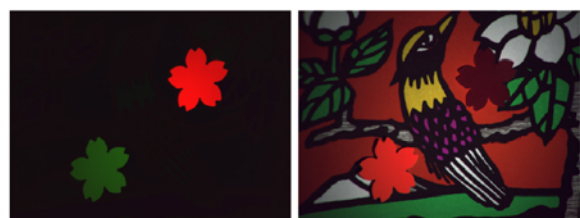
研究代表者 佐藤 いまり（国立情報学研究所・准教授）

研究分担者 佐藤 洋一（東京大学生産技術研究所・教授）

岡部 孝弘（東京大学生産技術研究所・助教）



(a) 参照画像（白色光のもとで観察）と入力画像



(b) 推定された蛍光成分（左）と反射成分（右）

図 1：実物体の反射成分及び蛍光成分のモデル化：
(a) 白色光のもとで撮影された参照画像と異なる照明色のもとで撮影された入力画像、(b) 分離結果（左：蛍光成分、右：反射成分）、

○研究の背景

分光に基づく精度の高い測色及び表色の技術は、塗料、印刷など、物体の見えの正確な再現が求められる産業への要素技術として注目されています。本研究では、実在物体の持つ分光特性（分光反射率および蛍光特性）や実シーンの分光分布（空間上に複雑に広がる分光分布）を効率的にモデル化し、シーン内の光の伝搬を RGB 値ではなく分光レベルを通して忠実に再現する画像合成手法の開発に取り組んでいます。

精度の高い測色及び表色を目的として、これまで、マルチスペクトルカメラを用いた測色・表色技術や液晶チューナブルフィルタなどの狭帯域フィルタを用いてシーンの高分解能のマルチスペクトル画像を獲得する技術が提案されています。しかしながら、これらのアプローチはカラーフィルタなどの帯域フィルタを変化させて画像を撮像する必要があるため、光源環境の変化などのシーン変動に対応することが難しいという問題を抱えています。

一方、撮像デバイスのスペクトル特性を変化させるのではなく、シーンの光源のスペクトル分布を変化させることで物体の分光分布を獲得する手法が提案され、様々なスペクトル分布を持つ光源の構築方法なども提案されています。様々なスペクトル分布

を持った光源を高速に点灯させることにより、ビデオレートで物体の分光反射率を獲得できることが示されています。しかしながら、これらの手法では自作の光源装置が用いられており、カメラとの同期も必要のため、動的なシーンを扱う簡便な光学測定技術とは言えません。我々は、後者のアプローチに基づき、光源のスペクトルを高速に変化させて物体の分光反射率を推定する技術の開発に取り組んでいます。

さらに、RGB に基づく画像解析では解析が難しい実物体の持つ蛍光成分のモデル化と見えの合成についても積極的に取り組んでいます。私達の身の回りに目を向けてみると、白紙、塗料、染料、植物など、反射成分のみならず蛍光成分を含む物体が多数存在します（無作為に選んだ物体のうち 20% に蛍光成分が含まれていたという報告もあります）。しかしながら、蛍光は光の吸収と発光といった波長をまたがる複雑なメカニズムに基づいており、RGB 値に基づく解析が困難なため、これまで提案されてきたコンピュータビジョンおよび画像処理技術の多くは、対象物体に蛍光成分が含まれず反射成分のみを含むと想定しており、蛍光成分を含む物体に対応することは難しい状況です。

○この研究の目指すもの

このような背景のもと、本研究では、動的なシーンのマルチスペクトル画像を獲得し、任意光源環境下で精度の高い色や質感を再現する技術の開発に取り組んでいます。特に、時間とともに刻々と変化する広範囲の分光情報を高い時間分解能で正確に計測できる技術の開発を目指しています。

また、実在物体の持つ蛍光特徴に着目し、対象物体の持つ反射成分及び蛍光特性のモデル化を実現し、実物体の持つ豊かな質感の再現を目指しています。また、実物体の持つ蛍光特性に基づくインバースレンダリング技術（実在シーンの観測に基づき物体情報（材質・形状）や照明環境モデルを獲得する技術）の開発にも取り組んでいます。

○これまでに得られた成果

従来研究は、どのような分光パターンを持つ光源が分光反射率の推定に効果的であるかということを示してきませんでした。これに対し我々の研

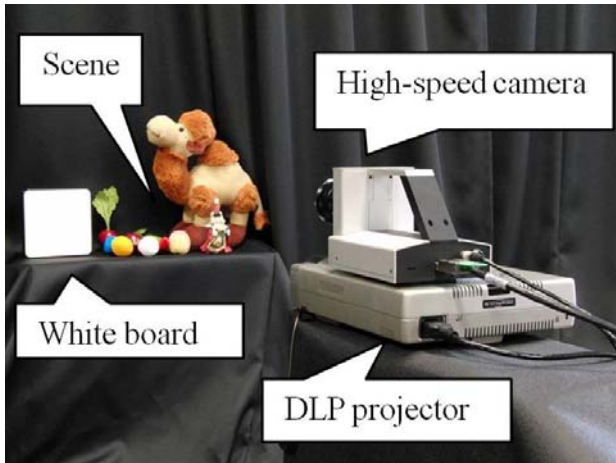


図 2: 動的なシーンに適用可能な分光計測を実現するシステムの概要。

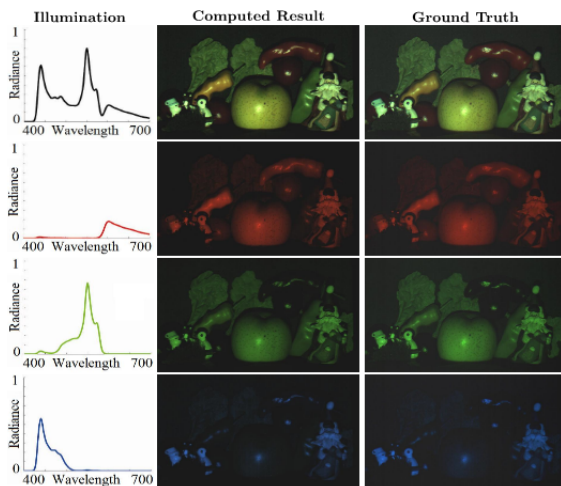
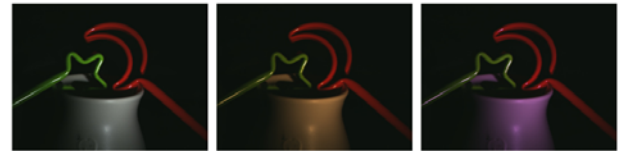


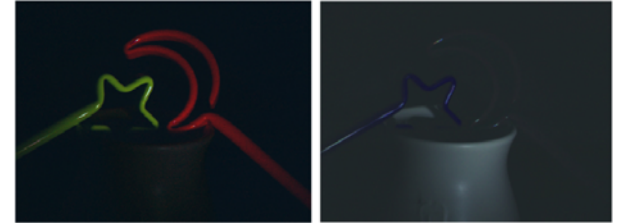
図 3 : 推定された分光反射率に基づく再現されたシーンの見え。(左) 光源分布、(中央) 提案手法により計測された分光反射率に基づき再現された見え、(右) それぞれの光源下で撮像された実画像。

究では、一般的な物体の分光反射率の統計量に基づき物体の分光反射率を推定するために適した光源の分光パターンを明らかにしています。提案する 4～8 の分光パターンを持つ光源下において、モノクロカメラを用いてシーンの明るさを観察することにより、安定に精度良くシーンの分光反射特性を推定できることを確認しました。

さらに、動的なシーンに対応するため、プロジェクタによる照射と高速カメラの利用に基づき、動的に変化するシーンの分光反射率を推定する技術を提案しました。システムの概要を図 2 に示します。汎用 DLP プロジェクタ、高速カメラを用いたシステムとなっています。DLP プロジェクタの特性（高速にカラーホイールが回転することで照射光の色が変化する）を効果的に利用することにより、刻々と変化するようなシーンの分光反射率を高速に獲得できる



(a) 参照画像 (白色光のもとで観察) と入力画像



(b) 推定された蛍光成分 (左) と反射成分 (右)

図 4 : 蛍光塗料を含む物体と陶器の分離結果。

ようになりました (図 3)。

また、実物体の持つ蛍光特性のモデル化では、蛍光成分は照明色変化の影響を受けないという特徴に注目し、照明色変化にともない観察された色変化に基づき対象物体の持つ反射成分及び蛍光特性を分離して観測する技術を開発しました。具体的には、照明色変化に伴い観察される色変化に基づく独立成分解析により、対象物体の反射成分、蛍光成分、照明色も未知という条件下での分離を実現しています。

実験結果の例を図 1 に示します、この実験では、様々な色で構成される版画に黄色とオレンジ色の蛍光紙で装飾を施した物体を対象として実験を行っています。参照画像中、中央の鳥の左右にある鮮やかな黄色とオレンジ色の花が蛍光紙に対応します。図 1(b) に提案手法による推定結果を示します。図において蛍光成分を示す画像を見ると、オレンジ色の蛍光紙からは参照画像と同じようなオレンジ色の蛍光成分が、黄色の蛍光紙から緑色の蛍光成分が推定されている様子が分かります。また、図 4 に蛍光塗料が塗られたペンと白色の陶器により構成される対象シーンに対しての分離結果を示します。反射成分を示す結果画像では陶器のみ、蛍光成分を含む画像ではペンのみを含んでおり、対象物体の蛍光成分の特徴により分離がうまく働いている様子が良くわかります。

○関連する研究発表

1. H. Shuai, I. Sato, T. Okabe, and Y. Sato, "Fast spectral reflectance recovery using DLP projector," *Proceedings of Asian Conference on Computer Vision (ACCV2010)*, November 2010, Best Student paper Award.
2. C. Zhang and I. Sato, "Separating reflective and fluorescent components of an image," *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2011)* June 2011 (Best Student Paper Honorable Mention Award.)

研究代表者 日浦 慎作（広島市立大学大学院情報科学研究科・教授）

研究分担者 岩井 大輔（大阪大学大学院基礎工学研究科・講師）

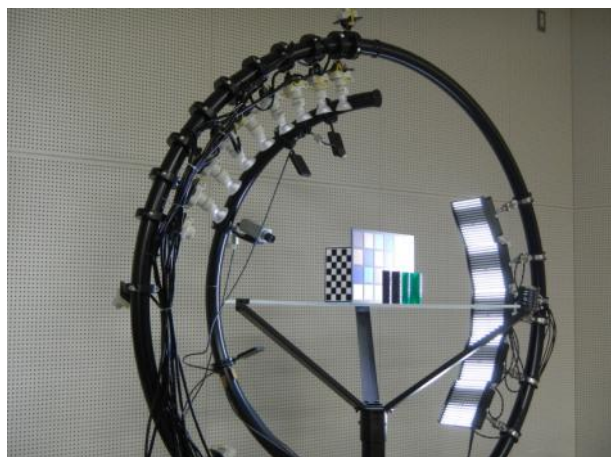


図1 多自由度照明装置「質感サンプラー」。対象物体を様々な照明パターンにより照らすことで、高精度かつ高速に反射特性を計測するために開発しました。

○研究の背景

私たちは身の回りにある様々な物体の質感を感じながら日々生活しています。中でも見かけの質感（視覚による質感）はその対象の材質や手触り、重さを実際に触れる前に予想したり、食べ物の新鮮さを判断したりといった点で私たちが生きるための重要な情報となっています。一方で、衣服や工業製品の高級感や本物らしさも質感に大きく左右されます。そのため、日本が得意とするものづくりにおいても質感の品質管理や検査がますます重要となってきていますが、その質感を余すことなく記録したり、またそれをディスプレイ等に再現することは容易ではありません。最近では衣服や食料品を通信販売で購入することが出来ますが、現在一般に使われているディスプレイではその対象の質感を画面で納得出来るまで確認することは出来ず、多かれ少なかれ「賭け」の要素があることは否めません。

それでは、実際に手元にはない物体の質感を、まるで実物を見ているかのように確認するためにはどのような技術が必要なのでしょう。この問いに対する答えを探し、またそのための技術的手段を開発するのがこの研究の狙いです。

質感の記録・再現の技術はこのような質感の通信や、グローバルなものづくりにおける品質管理の他に、文化財や考古遺物等を精細に記録することによって後世に伝えるデジタルアーカイブ分野でも求められている技術です。

○この研究の目指すもの

この研究では、物体の質感を余すことなく記録すること、つまり物体の表面でどのように光が反射しているのかをなるべく完全に取り込むことを目標としています。また同時に、質感を再現する上で現在のディスプレイ技術に欠けている要素に着目し、より本物らしく見せるための新しい表示技術の開発も行います。

近年のデジタルカメラ技術の発達により、対象の見た目は非常に高精細に取り込むことが出来るようになりました。しかし、物体の見え方は光の当たり方により様々に変化します。そこで我々は、質感の取り込みにはむしろ入力装置であるカメラそのものよりも、対象物体を照らす照明の性能に大きく影響されると考えています。図1は対象物体を様々な方向から照明することが出来る装置で、照明の形も鋭い1点から面的に広がりのある光源、または縞模様状といったふうに変化させることができます。これにより、物体表面の微妙なつやの違いなどを取り込むことが出来ると考えています。

表示についても、最近の液晶ディスプレイは非常に高精細化してきており、静止画の観察にはほとんど不足のないものになってきました。しかし実物を見たときと大きく異なる点もあります。1つはダイナミックレンジと呼ばれる明暗比で、特に滑らかに磨かれた金属表面を裸電球で照らしたときのような鋭く明るい反射の再現はいまだ困難です。もう1つは立体感で、特に我々は立体ディスプレイ等による立体表示と、実物の持つ立体感の違いに着目し、敢えてディスプレイを用いずに、立体物上に精細な像を表示する方法を追求しています。

○これまでに得られた成果

これまでに照明の形状（点光源・面光源など）を変化させることが出来るディスプレイや、光の照射部位を細かく制御できるプロジェクタを照明として用いることで、物体表面の反射を詳細に調べたり、物体表面に高精細な映像を表示する方法について研究を行いました。特に対象物体が平面でなく立体物であることを意識した研究となっている点が特徴となっています。

第1の例は画像表示に用いるディスプレイを照明装置として用い、それによって照らされた対象物体表面のつやを詳細に調べる方法に関する研究です。つやは、物体表面の滑らかさによってその鋭さが変

化します。例えば鏡のように平滑であれば、写り込んだ先の物体がはっきり見えますが、これが最も鋭い反射であると言えます。それに対し、少しざらついた仕上げの物体ではつやの鋭さが低下し、写り込んだ物体が次第にはっきり見えなくなります。また特に金属表面では、一方向に筋目が入ったように磨かれた仕上げ（ヘアライン仕上げなどと言います）がよく使われ、この場合は磨きの方向によって反射が鋭い方向とぼやける方向が決まり、これを異方性と呼びます。これを物体全体でなく、物体表面の各点において独立に取り込む方法を開発しました。ディスプレイ上に様々な方向と間隔の縞模様パターンを表示し、その縞の見え方を観測し、信号処理することによってつやの鋭さや方向性を求めることが出来ます。実験では異方性を持つような表面が複雑に入り交じった物体でも各点ごとの反射特性が得られることを示しました（図2）。

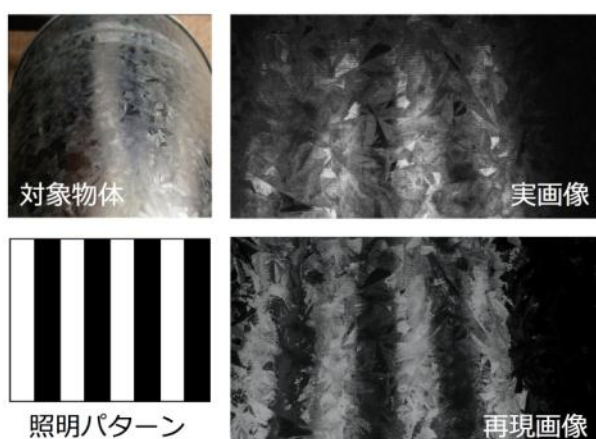


図2 複雑な艶を持つ物体の反射特性の計測と、その結果を用いた反射特性の再現の例。

他方、立体物の表面に質感を再現する方法として、複数台の 프로젝터를用い、3次元カラープリンタにより出力したモデルに映像を重ねあわせることで高精細かつコントラストの高い表示を実現する重畳型3次元HDRディスプレイを提案しています。この技術では、モデル表面の大部分で様々な位置・角度から投影される複数の投影像が重なりあうことになります。このとき、その表面上に画像を投影すべき 프로젝터를一つ選択する必要がありますが、我々は、個々の面に表示されるコンテンツを考慮して、その精細さを最も低下させない 프로젝터를選択する手法を開発しました。具体的には、モデル表面における各 프로젝터からの像のぼけ方を計算し、それによってオリジナル画像がどの程度劣化するかを計算機内で求めます。これらを 프로젝터ごとに比較することで、最も解像度低下の少ない画像を表示できる 프로젝터를求めることができます。各面に対しあらかじめ担当する 프로젝터が決まっているわけではなく、投影コンテンツによって最適な 프로젝터に切り替えられる点が特

徴です。 프로젝터2台と立方体の投影対象を用いて基礎実験を行った結果を図3に示します。コンテンツを考慮しない、従来の 프로젝터選択法との比較の結果、提案法の方が高解像度な表示が可能であることが確認できました。

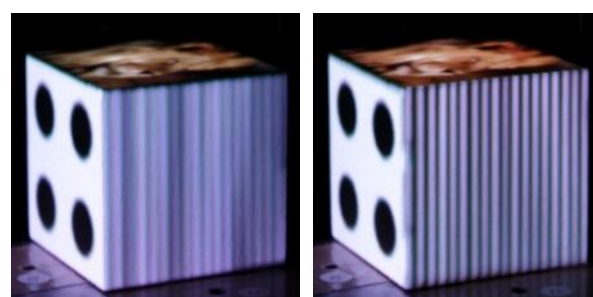
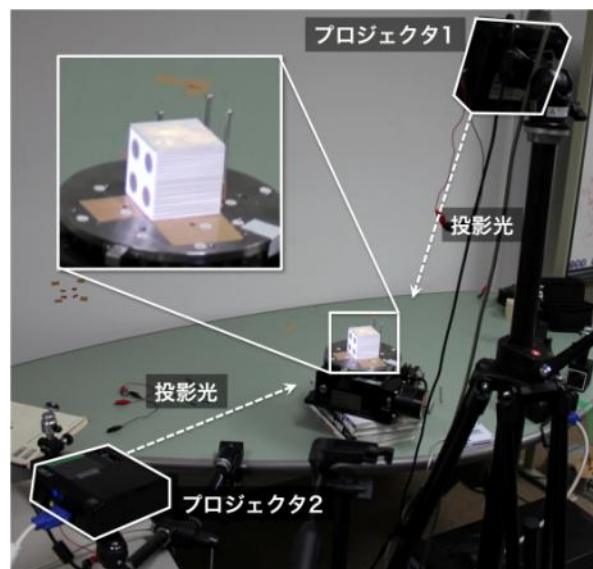


図3 実験システムの構成図（上）と、それによる像の表示結果（下左が従来法、下右が提案手法）。

○今後の計画

これまで、質感を記録するための計算手法やプログラムと、質感サンプラー（図1）の開発を並行して行なってきましたが、これからは開発したプログラムを質感サンプラーに適用し、様々な物体を実際に計測しデータベース化することを計画しています。また表示については、他の研究班に技術の提供が行えるようプログラムの整備を進めており、実際に技術提供をより積極的に進めていく予定です。

○関連する研究発表

1. 武田涼平, 日浦慎作, 浅田尚紀, 画像の線形化に基づく任意光源方位 HDR 画像列の可逆圧縮, 情報処理学会研究報告, Vol.2012-CVIM-182, No.2, pp. 1-7, 2012.
2. 田中章文, 岩井大輔, 佐藤宏介, コンテンツの空間周波数成分を考慮した投影画質劣化を最小化する 프로젝터選択手法, 第56回システム制御情報学会研究発表講演会論文集, pp.437-438, 2012.

画像のボケと両眼視差を同時に再現する注視反応ディスプレイ

研究代表者 岡谷 貴之（東北大学大学院情報科学研究科・准教授）

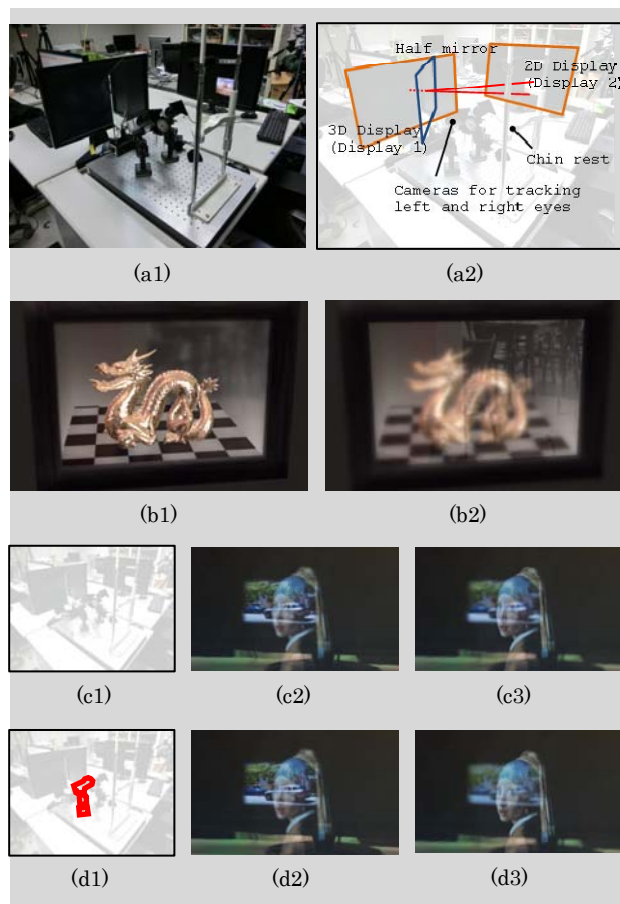


図 開発したディスプレイシステムの概要と表示映像の例。(a1-2) 外観と各部の説明。(b1-2) 表示映像のイメージ：手前の置物を見つめたときと、ガラスに写り込む室内を見つめたとき。(c1-3) ハーフミラー経由で2枚のディスプレイ表示映像を見た場合の映像。(d1-3) 開発したシステムでこれを再現した場合の映像。

○研究の背景

究極の映像ディスプレイとは、われわれが自分の眼で現実シーンを見るとき、その視覚的感覚をそのまま、再現してくれるようなものだと考えられます。長年にわたる映像ディスプレイの研究開発は、この目標へ向けて進められてきました。この目標を実現するには、映像表示の基本性能—コントラスト、色再現性や解像度など—の一層の向上と、奥行き手掛かりのさらに忠実な再現が必要とされています。

人が3次元シーンを見るとき、その視覚は、画像に存在する奥行き手がかりを使って、網膜上の2次元の像から3次元情報を引き出しています。中で

も、最も重要だと考えられている手がかりは、両眼・運動にかかわる視差および輻輳です。いわゆる3次元ディスプレイはこれらの再現のためにあります。

もうひとつの重要な手掛かりが、網膜上で生じる像のボケです。眼の被写界深度に制約があることで、眼から物体までの奥行きに応じて、像の場所ごとに程度異なるボケが生じます。ここではこのボケのことをDOFボケと呼びます。既に広く市販されている眼鏡方式のものを含め、現在までに実現されている3次元ディスプレイのほとんどは、視差（および輻輳）の再現に重点が置かれており、DOFボケを、注視変動に伴う時間変化を含めて忠実に再現できるようなものは存在しませんでした。

○この研究の目指すもの

以上を踏まえて本研究では、両眼視差とDOFボケを同時に提示可能ないわゆる注視反応ディスプレイを構築し、その効果を調べることを目標としています。これは、視差を再現する眼鏡方式の3次元ディスプレイを使い、それを見るビューアのディスプレイ面上の注視位置を連続的に計測し、その結果に基づいて表示映像をリアルタイムに変化させることで、視差を提示しつつ眼に生じるDOFボケを疑似的に再現するシステムです。その狙いは、視差とDOFボケを同時に提示することで、奥行き感覚を強化することにあります。焦点調節を再現することはできないものの、これら重要な2つの奥行き手掛かりを、解像度やコントラストなどの映像品質を犠牲にすることなく再現し得る点に意義があります。

○これまでに得られた成果

これまでに図に示すようなシステムを完成しました。システムは、眼の瞳孔位置・形状などを画像計測し、しかもこれを両眼それぞれ独立に行うことで、ユーザが表示シーンのどの奥行きを見ようとしているのかを推定し、これに応じた映像をリアルタイムに表示します。図(c1)のように、ハーフミラーを使って、遠近2台のディスプレイの表示映像を重ねて提示する実験システムを作り、この場合の映像の見え方を、提案するシステム（同図(c2)）がどこまで忠実に再現できるかを調べる実験を行ったところ、概ね良好な結果を得ることができました。

○関連する研究発表

1. 折笠達郎, 岡谷貴之, 出口光一郎, 両眼視差と被写界深度ボケを同時に提示する注視反応ディスプレイ, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2011), 2011年（この他にも論文誌投稿中）



本研究では、色彩情報工学の観点から、物体表面に関する質感（材質感、つや感、マット感など）の認知に関わる人間の情報処理の特性を客観的に明らかにして、それらの理解に基づいて、質感情報の獲得や生成に関する工学技術の発展を推進するための基礎研究と応用研究を行うことを目的としています。本稿では、下図に示すように、カメラで獲得したシーンから物体を抽出し、それらの材質が金属なのか不均質誘電体なのかを自動識別するシステムを開発したので紹介します。



図 実験例（上：入力シーン、下：材質識別結果）

○研究の背景

コンピュータビジョンをはじめ多くのビジョン問題において、獲得した画像データから、シーン内に存在する物体表面の材質を識別することは本質的な課題です。実世界に存在する物体の多くは、金属または誘電体に大別できます。シーンの獲得画像内の物体を金属または誘電体に分類する材質識別法は以前から研究されており、それらの従来研究は、色情報を用いたアプローチと物体の偏光現象に基づいたアプローチに分類できます。前者は、RGB カメラを用いて容易に識別処理を行うことが可能ですが、

その性能は物体と照明のジオメトリや、物体色に強く依存する問題がありました。後者は、物体や照明光の色情報の影響を受けませんが、識別結果が光源の入射角に強く依存する問題がありました。著者らは、先行研究において、ハイライトにおける偏光度の空間分布を利用した識別手法を提案しました。この方法は、入射角に識別結果が依存し難い頑強な方法でしたが、ハイライト周辺の材質識別を目的としていたため、シーン内に存在する物体全体の材質識別を行うことができませんでした。

○この研究の目指すもの

本研究では、一つのイメージング系を用いてシーン内に存在する物体の材質を、金属または誘電体に自動識別し、それらの物体領域を自動抽出するシステムの構築を目指しています。一般のシーンを対象とするために、ハイライトや陰影などの照明の影響に依存しない方法を開発します。

○これまでに得られた成果

はじめに、液晶チューナブルフィルタを用いて、分光画像と偏光画像の両方を同一システムで獲得できるイメージング系を構築しました。次に、教師データが不要であり、照明の影響に依存しないアルゴリズムを考案しました。具体的には、(1)輝度情報の動的閾値処理によるハイライト領域検出、(2)ハイライト領域の偏光度の分布形状に基づく材質識別、(3)照明不変な表面分光反射率を利用した領域分割を提案しました。構築したシステムの有効性は、実シーンを用いた実験によって検証しました。

現在のシステムは、ハイライトや光沢が検出されない物体に対して適用できません。また、同一物体が多色で塗装されている場合には、ハイライトを有する領域の材質のみ識別が可能です。メタリック塗装のように光輝材を含む対象物体に対しては、識別が不安定となる結果が得られています。これらの問題点を改善することが、課題となっています。

○関連する研究発表

1. 門井英貴、平井経太、堀内隆彦、富永昌治、偏光と分光を利用した金属－誘電体の識別、第 18 回画像センシングシンポジウム, pp. IS4-22-{1-4}, 2012.
2. 門井英貴、平井経太、堀内隆彦、富永昌治、偏光と分光を利用した金属－誘電体物体の識別と抽出、第 14 回画像の認識・理解シンポジウム, IS2-23, 2012

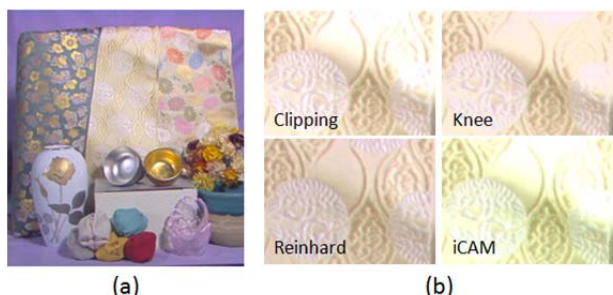


図: (a) 高ダイナミックレンジ6バンド画像入力に基づく金属光沢の再現実験で用いた被写体。金銀の装飾器（手前）と金欄（奥）。(b) 4種類の階調圧縮手法を適用した結果の比較（金欄の一部の拡大図）。実物を参照しながら金欄の再現性を視覚的に評価した結果、Reinhardの提案による階調圧縮手法が高輝度部の階調再現性が高く、質感とリアリティにおいて最も優れていることが示されました。

○研究の背景

映像システムにおいて、実物の質感をリアリティ高くディスプレイ上に再現することは、究極の課題の一つです。そのためには実物の色を忠実に再現することが重要ですが、従来のRGB（赤、緑、青）の三原色に基づくカラー画像では色再現性の向上に限界があります。これに対し、RGB三原色に代えて、光のスペクトルに基づく画像、すなわち分光画像を用いることで忠実な色再現を行う手法が提案されています。

しかし、分光画像は、可視光の波長ごとの成分をそれぞれ画像として扱う必要があるため、その取得には大がかりな撮影機材が必要です。また、光沢のように輝度の高い箇所は、カメラやディスプレイで取り扱うことのできる階調範囲（ダイナミックレンジ）を超えるため、そのままでは忠実に再現することができません。これまでに、広い階調範囲（高ダイナミックレンジ）の画像を通常のディスプレイでも表示できるようにするために、階調を圧縮する手法が提案されていますが、光沢や高輝度なテクスチャーを持つ画像に適した方法はわかっていません。

これらの課題を解決するには、簡易な分光画像収集方法の開発や、質感の再現性を考慮した光沢等の表現方法の確立が必要となります。

○この研究の目指すもの

本研究では、分光画像に基づいて質感の高い映像を再現するための、映像の収集と表示方法を開発することを目指しています。

映像の収集に関しては、分光画像の各波長成分は類似しているという特性を利用して、少ない計測データから信号処理により元の分光画像を再構成する手法を開発しています。これにより、効率的な分光画像収集を可能とし、小型で簡易な分光カメラシステムを実現します。

光沢の再現に関しては、光沢部を含む色情報を正確に取得するために、多バンドの高ダイナミックレンジ画像入力を利用します。そして得られた情報から、光沢や高輝度なテクスチャーをリアリティ高く再現する方法について実験的に検討を行っています。これによって、映像再現における質感の向上に必要とされる条件を明らかにし、将来の映像システム開発に対する指針を与えることを目標としています。

○これまでに得られた成果

分光画像の収集技術として、多色のカラーフィルタをイメージセンサの画素ごとに並べたセンサを用いて、コンパクトな分光イメージングシステムを実現する方法を提案しました。このセンサで直接取得できる分光画像の解像度は低いのですが、このセンサと共に、高解像度のRGB画像センサを組み合わせることで、高精細な分光画像を再構成します。これによって既存の高精細カラーカメラの技術を応用した効率的、実用的なシステムが可能になります。

また、6バンドの高ダイナミックレンジ画像入力システムにより、金属光沢を含む被写体（図(a)）の画像を取得し、様々な階調圧縮手法を適用して質感再現性を視覚的に評価しました（図(b)）。その結果、色、光沢、質感、リアリティの評価は互いに相関があり、色の再現性は質感表現にも重要であることが示されました。また、階調圧縮手法としては、光沢等の高輝度部に適度な階調を割り振るReinhardの手法が、質感とリアリティの項目において他手法より有意に優れていました。このような知見は、今後の映像入力・処理システムの設計に役立つものです。

○関連する研究発表

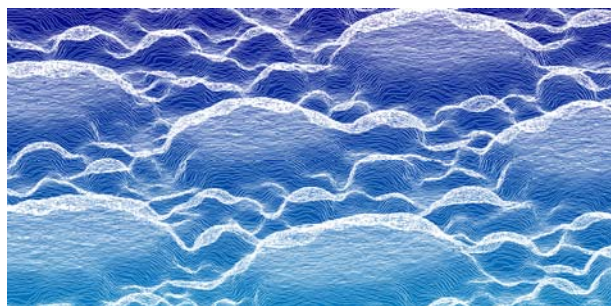
論文

1. Murakami Y, Nomura J, Ohshima N, Yamaguchi M: Fidelity evaluation of metallic luster in six-band high-dynamic-range imaging. Opt Rev 19(3):142-149, 2012.
2. Murakami Y, Yamaguchi M, Ohshima N: Hybrid-resolution multispectral imaging using color filter array. Opt Express 20(7):7173-7183, 2012.

質感情報の実体化プロセスを考慮した物体表面の質感編集手法

研究代表者 宮田 一乗

(北陸先端科学技術大学院大学ライフスタイルデザイン研究センター・教授)



革シボの凹凸情報をコンピュータで生成し、金型を削るデータを作成します。



金型でシリコンを成形してサンプルを実体化します。



ご飯粒を握り固めた複雑な立体物（おにぎり）を自動生成します。

○研究の背景

我々が利用する工業製品には、物体表面に微細な加工（シボやヘアライン加工など）が施されたものが多数あります。そして、その微細な加工が工業製品の質感を大きく左右しています。

物体表面に付与する微細構造をコンピュータ上でシミュレーションし画像として検証することは可能

ですが、データの微細構造と製造されたものでは見た目に差異が生じることがあるため、実体化して検証するほうが良い場合があります。また、ある構成要素が3次元的に凝集して形を成しているもの（おにぎりやお皿に盛られたシリアルなど）が身の回りにたくさんあります。その質感をCGで表現するためには、構成要素の方向と位置を調整しながら配置する必要があります、非常に面倒です。

○この研究の目指すもの

この研究では、研究の背景で述べた課題を解決することで、工業製品の質感向上を検証できる枠組みの構築を目指しています。すなわち、物体表面に付与する微細な凹凸データの生成・編集手法および、そのデータを実体化する仕組み、そして、3次元テクスチャとして物体表面の凹凸データを、手間をかけずに自動生成する手法を研究しています。

具体的には、小さな凹凸サンプルデータから大きな凹凸データを生成する手法や、構成要素を凝集させて、自然な見た目になるように大量の形状データを寄せ集める手法などを研究しています。

○これまでに得られた成果

コンピュータで生成した革シボの凹凸データを金型加工用のデータに変換し、切削加工した金型にシリコンを流し込んで実体化するプロセスを実現しました。

また、所望の質感を有する凹凸データを作成するために、任意の凹凸形状を有する要素で構成されるテクスチャ生成手法を提案しました。この手法では、要素同士が重ならないようにランダムに配置することで、不自然な要素の並びを避けることができます。また、重ならない領域を編集することで、要素の配置を操作できることを確認しました。

○関連する研究発表

1. 櫻井快勢, 宮田一乗: 任意形状の堆積形成手法, 情報処理学会 GCAD 研究会, Vol.2011-CG-145, 14.1-7, 2011 (優秀研究発表賞受賞)

2. Kaisei Sakurai, Kazunori Miyata: Generating Layout of Nonperiodic Aggregates, NICOGRAPH International 2012, 68-75, Bali, Indonesia, 2012 (Best Paper Award 受賞)

動的な見かけ制御を応用した実世界の質感制御技術に関する研究

研究代表者 天野 敏之（山形大学大学院理工学研究科・准教授）

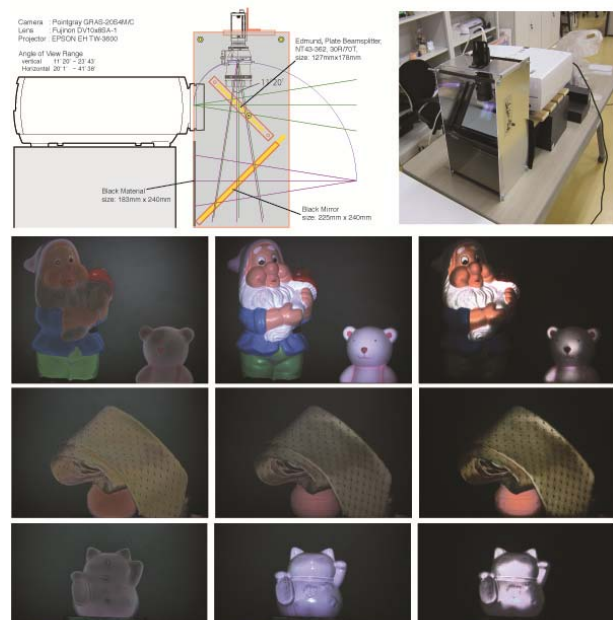


図 試作したプロジェクタカメラ系と質感制御結果：本研究では瞳位置が一致したプロジェクタカメラ系(上段)を試作し、光投影を行うことで現実物体(White illumination)の透明感(Translucency)や光沢感(Glossiness)を変化させる技術確立しました。

○研究の背景

我々の身の回りにある物の見かけは、物体固有の光学特性と投影されている光によって変化します。従って、物体に照射される光を工夫することで物の見かけを操作することができ、それによって人が感じる物の印象を大きく変えることができます。

食料品売場では、赤色灯などのように色のついた照明器具を用いて食品を鮮やかに見せるディスプレイ方法をよく行っていますが、これによって食品の鮮度を強調し、食欲を促すことができます。

我々の研究グループでは、このように投影する光によって物の見え方を変えることができるという光学的な特性に着目し、プロジェクタとカメラで構成されるフィードバック制御系を構築することで、自在に見かけを変化させる、見かけの制御を世界に先駆けて実現しました。

一方、視覚研究の分野では、人間が透明感や光沢感などの質感を知覚するメカニズムが解明されつつあり、この成果の一つに透明感や光沢感に関して興味深い性質が示されました。例えば、透明感の知覚は物体に生じる陰影のうち低周波成分の位相に依存していて、画像処理によりシーンを高周波成分と低

周波成分に分け、低周波成分の明暗を反転させて画像を再構築すると、不透明な物体が透明に見えるという視覚特性などが明らかになりました。

○この研究の目指すもの

本研究では、視覚研究で得られた知見を見かけの制御技術へ応用することで、光沢感や透明感などの物体の見かけの質感を自在に変化させる技術の確立を目指しています。

現実世界で物体の質感を操作する技術はデザイン支援へ応用することができます。例えば、宝飾品から工業製品に至る様々な製品のデザイン過程では試作を行います。試作品の質感を変化させることが出来れば、素材の選定や装飾方法の検討の際に試作を繰り返す必要がなくなります。

また、物体の質感を自在に変化させることが出来れば、テーマパークなどで幻想的な視覚効果を実現することができますし、博物館へ応用すれば風化して光沢を失った中世の食器や甲冑に手を加えることなく完成当時の輝きを再現することができます。さらに、人間の視覚のメカニズムを解明する視覚研究において心理実験を行う際の刺激提示手法として還元することもできます。

○これまでに得られた成果

質感の制御を実現するにあたり、本研究ではまず図に示したプロジェクタカメラ系を設計製作しました。この光学系ではプレート型ビームスプリッタで分光することでプロジェクタとカメラが光学的に同一の位置に配置されており、これによって立体的な物体に対する見かけの制御を実現しました。その後、B01 班の研究分担者である本吉らにより解明された透明感および光沢感に関する知見より質感制御のための画像処理アルゴリズムを考案し、見かけの制御技術と組み合わせることで、図に示した透明感および光沢感の制御を実現しました。

○関連する研究発表

論文

1. 天野敏之, 加藤博一, モデル予測制御を用いたプロジェクタカメラ系による見かけの制御, 電子情報通信学会論文誌 D, J94-D, (8), pp.1368-1375, 2011. 学会発表など

1. T. Amano, Shading Illusion : A Novel Way for 3-D Representation on the Paper Media, PROCAMS 2012 Workshop on CVPR2012, 2012, Providence, USA (Honorable Mention 受賞).

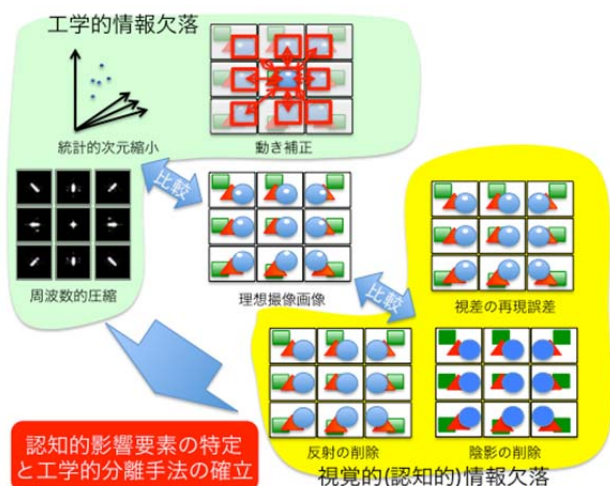


図 三次元映像提示のための多視点画像(ライトフィールド画像)は、多くの冗長性を含みます。この冗長性を特定することで、効率的な映像センシングや撮影対象の質感情報の定量化を実現できます。

研究の背景と目的

現在、映画やテレビの3次元表示が注目を集めており、各社より3D表示可能なテレビが発売されています。また、デジタルカメラにおいても、高解像度化やオートフォーカスをはじめとする自動撮影調整など、誰もが綺麗に画像を撮影するための機能はすでに飽和状態で、3D撮像など新しい撮像機能を模索しています。このような3Dテレビに必要な、または3D撮像で得られる多視点画像(ライトフィールド画像)は、小さな視点変化を持つ画像の集まりであり、それら画像の見かけはほとんど同じであるためそのデータは大きな冗長性を持っています。本研究では、この多視点画像に含まれるデータの冗長性や特異性を特定することを目的とします。情報の冗長性を単に工学的なデータ量削減や手法上の都合ではなく、人の質感や奥行き知覚の影響を考慮したデータ表現を提案することで、視覚的に効率的な圧縮手法を実現できます。また、逆に視点間に含まれる特異性と撮影対象物体の質感情報(艶感やマット感、透明感)などの関係を求める事で、定量的な質感情報表現や尺度の構築を目指します。

これまでに得られた成果

本研究では、多視点画像を効率的に撮影するための視点と解像度内挿手法を提案しました。多視点画像計測では、通常求める視点数分のカメラが必

要です。またはライトフィールドカメラに代表されるように、単体での撮影手法では、視点数を増やすと各視点の解像度が低下するというトレードオフがありました。すなわち、密で高解像度の多視点画像を得るためには、高コストの機材を使わなければならない上、得られたデータも巨大であるためその取り扱いが問題でありました。提案する多視点画像の内挿を行えば、少ないカメラ台数(低コスト)での多視点画像獲得が可能になります。

本研究では、内挿手法として Light filed rendering と Dimensional Gap prior を組み合わせた手法を提案しました。様々なカメラを想定して入力視点数や入力解像度を変化させ、内挿して生成された画像の画質を比較しました。その結果、解像度に関しては、入力解像度が低くとも提案する内挿法によって比較的画像劣化の影響が低いこと、一方で入力視点数の減少に関しては、著しい画像劣化が見られることから、視点内挿による補間が難しいことがわかりました。これにより、同様のデータ量削減であれば、視点数よりは、空間解像度を削減した方が、視覚的劣化の少ない画像が得られることがわかりました。すなわち、ライトフィールドカメラを設計する際には、視点数を解像度に対して優先する方が効率的であることが導かれました。

また、一方で通常の物体では観測視点に対して物体の見かけは大きく変わらないが、透明物体は、物体そのものではなく背景を大きく歪ませるため、その見かけが大きく変化するという特徴をもちます。この物体特有の背景の歪みを多視点画像の視点間より求める事により、透明物体の形状をモデル化し認識する手法を提案しました。物体そのものではなく、歪みをモデル化することで、背景に依存しない透明物体認識を初めて実現しました。

○関連する研究発表

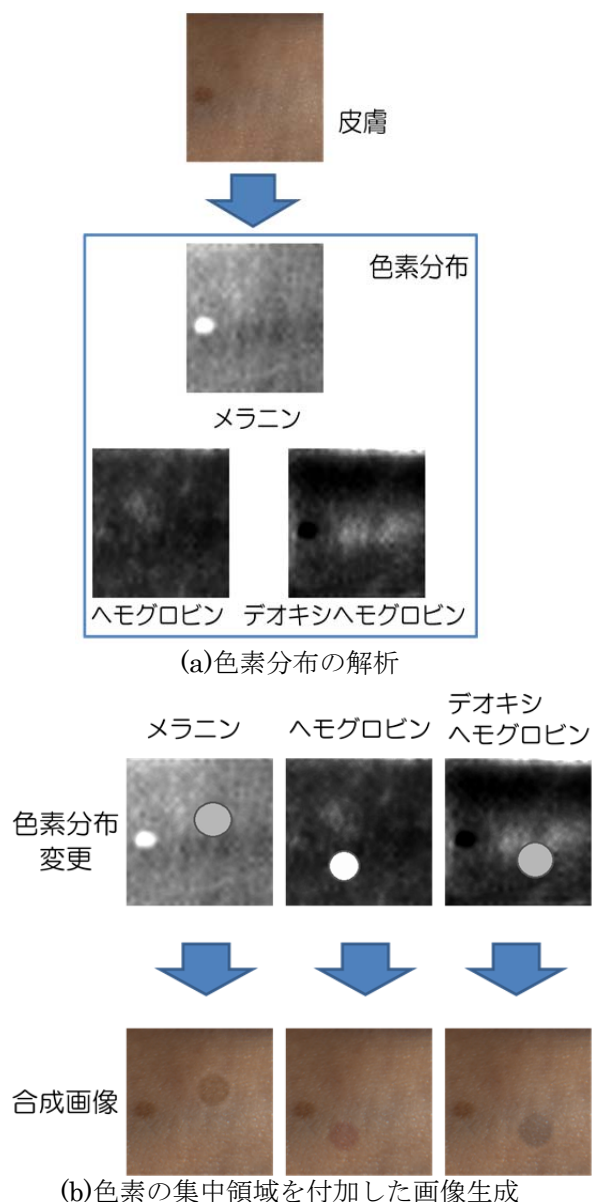
学会発表など

1. 長原一, 高島聖, 谷口倫一郎. “効率的自由視点撮影のための画像内挿と画質評価”, 画像の認識理解シンポジウム, No.IS2-64, 2012.

2. 前野一樹, 長原一, 島田敬士, 谷口倫一郎, “Light Field Distortion 特徴を用いた透明物体認識”, 画像の認識理解シンポジウム, No. OS1-01, 2012.

分光画像を利用した物体表面の色材要素解析と高質感画像の生成

研究代表者 土居 元紀（大阪電気通信大学情報通信工学部通信工学科・准教授）



図説：皮膚の分光画像からメラニン、ヘモグロビンおよびデオキシヘモグロビンの色素の分布を解析し、それらの色素分布を変更することにより、しみや炎症、あざなどができた画像を合成することができます。

○研究の背景

質感の表現では、反射特性と同時に表面上の色彩分布が重要です。色彩分布を変更して画像を生成する場合、単純に RGB 値の分布を操作しただけでは、

物理的に正確な色彩分布を生成することは困難です。本研究課題ではこの問題を解決します。

○この研究の目指すもの

本研究課題は、帯域の狭い波長ごとに撮影した分光画像から物体表面の色材要素分布を解析し、分布を変化させて画像を合成することにより、高質感画像を生成することを目的とします。

研究方法としては、皮膚など層構造をなす物体表面について、各場所での分光反射率を分光画像計測システムで獲得します。そして、各画素について分光反射率および層を成す色材の分光特徴から色素の分量を推定することにより色素の分布を得ます。この色素分布を解析し、変更することによって、異なった質感の画像を生成します。ここで、光源の分光分布や表面の反射特性を考慮して現実シーンに適合したカラー画像として合成します。

○これまでに得られた成果

主に皮膚を対象に解析と合成を行いました。皮膚の分光画像を撮影し、ウェーブレット解析を用いて色素分布解析の妨げになる陰影や細かいしわの除去を行いました。そして、クベルカ-ムンク理論を応用して、メラニン、ヘモグロビンおよびデオキシヘモグロビンの分布を解析しました。解析の結果として、図に示すように、ほくろの部分にはメラニンが集中し、静脈血管の部分にはデオキシヘモグロビンが集中しているのわかりました。これらの色素の分布に円形の色素濃度が高い領域を付加しました。そして、色素の分布から色彩分布画像を生成し、解析で除去した陰影や細かいしわを再び合成して、しみや炎症、あざなどがある質感の異なる皮膚画像をカラー画像として生成しました。

○関連する研究発表

学会発表

1. Doi M, Konishi M, Kimachi A, Nishi S, Tominaga S: Robust estimation of pigment distributions from multiband skin images and its applicati onto realistic skin image synthesis,(to appear in) 4th Color and Photometry in Computer Vision Workshop, Florence, Italy, October 2012.
2. 小西昌宏, 土居元紀：皮膚の分光画像におけるウェーブレット解析, 日本色彩学会第 43 回全国大会, 京都, 2012 年 5 月.

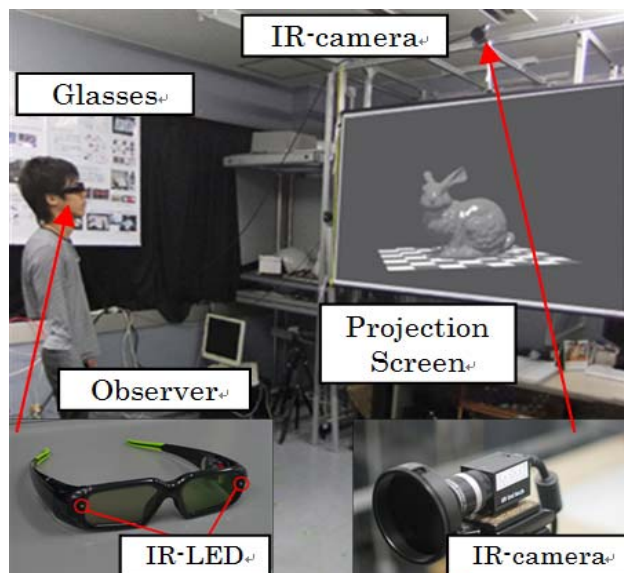


図1 視線追従型立体視による質感再現システム
光沢質感は奥行きを持った光源反射が織りなす現象です。我々はこの特性を正確に再現するために、観察者視線に追従可能な再現システムを開発しました。

○研究の背景

近年、製造業界では三次元 CAD や FEM 解析を用いた設計のデジタル化が急速に進行していて、更に機能性やデザインの確認まで行うデジタルモックアップの開発に着手しています。このデジタルモックアップを有益にするためには本物と遜色のない機能や外観の再現が求められます。特に、外観の確認では塗装や使用部品の材質感、すなわち質感をディスプレイ上でリアルに再現することが必要となります。

○この研究の目指すもの

本物と同様の質感を再現するためには、物体で生じる光学的な物理現象を正確に再現できる反射モデルの設計と、視覚特性に基づいた再現手法の開発が必要です。その中で、我々は光沢質感を持つ立体的な特性と、輝度に関する順応などの特性に着目して研究を進めています。特に、我々は光沢や映り込んだ反射の輝度や奥行き情報から材質判断を行う認知特性を明確化して、この特性を再現手法に組み込むことで材質感を顕在化させることを狙っています。

○これまでに得られた成果

図1は立体再現での質感知覚を定量化するための実験システムです。我々はアクティブシャッター型の二眼立体投影装置を用いていますが、自由な位置で

の観察が可能のように、視線をカメラで追従して、視線方向や射影角度を実物体と一致させることが可能です。このシステムを用いて予備実験を行ったところ、図2に示すように様々な観察位置で正確な光沢再現が可能であることがわかりました。

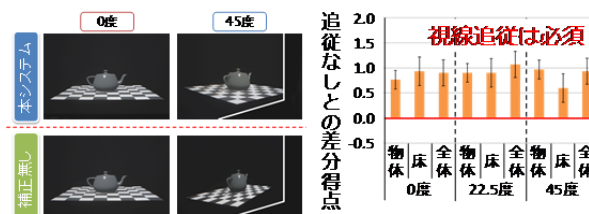


図2 立体表示における視線追従の効果

また、輝度による顕在化を目的とした実験では、図3に示すような対向配置したプロジェクタで広い輝度再現範囲を持つシステムを開発中です。投影装置を対向にすることで、スクリーンを透過する光は輝きと指向性を持った表示が可能となります。一方、反射する光は鮮明な画像再現が可能で、細部に至る細かなテクスチャ再現に適しています。これら各々の特性を生かして、質感が強調可能な表示再生手法を検討しています。

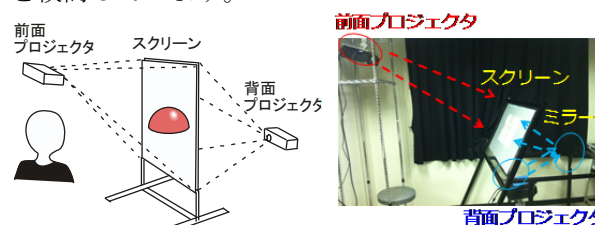


図3 対向配置による輝度再現を評価するシステム

○関連する研究発表

論文

1. Shoji Yamamoto, Mitomo Maeda, Norimichi Tsumura, Toshiya Nakaguchi, Ryutaro Okamoto, Yoichi Miyake, and Ichiro Shimoyama: Subjective evaluation of visual fatigue due to misalignment of motion and still images in a stereoscopic display. Journal of the Society of Information Display, Vol. 20(2), pp.94-102, 2012.

学会発表など

1. Shoji Yamamoto, Masashi Sawabe, Mayu Yokoya, Norimichi Tsumura: Enhancement of Gloss Perception by using Binocular Disparity, CGIV2012, pp.226-230, Amsterdam, Netherlands, 2012.

研究紹介 B01 質感認知に関わる感覚情報の特長と処理様式

質感認知に関わる視聴触覚情報の心理物理的分析

研究代表者 西田 真也 (NTT コミュニケーション科学基礎研究所・主幹研究員)

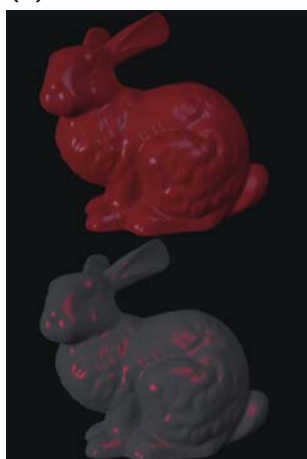
研究分担者 内川 恵二 (東京工業大学大学院総合理工学研究科・教授)

本吉 勇 (NTT コミュニケーション科学基礎研究所・主任研究員)

藤崎 和香 (産業技術総合研究所ヒューマンライフテクノロジー研究部門・研究員)



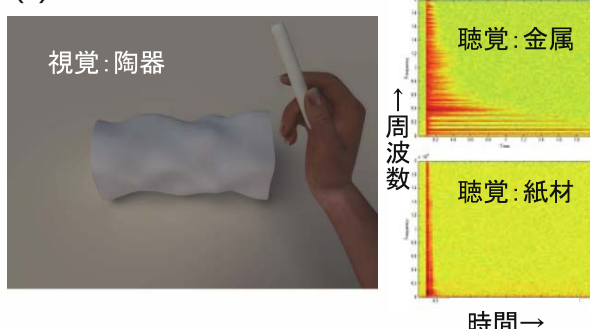
(a)



(b)



(c)



(d)

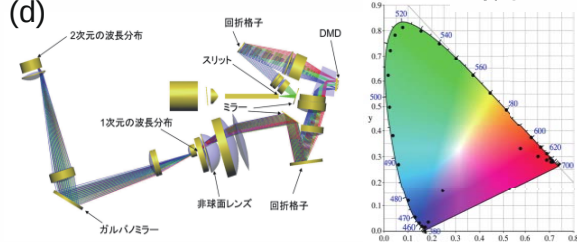


図 (a) ハイライトの色と物体の色が一致する場合 (上) と矛盾する場合 (下)。後者で光沢感が消失する。(b) 照明場の輝度コントラストが低い場合にも光沢感が消失する。(c) 素材認識における視聴覚統合。映像とそれを叩いたときの音の組み合わせにより知覚される素材が変化する。(d) 画素の分光発光特性を単色光レベルで制御できる2次元タイプの新カラーディスプレイの光学系と出力可能な色座標の範囲。

○研究の背景

人間はものを見るだけでその光沢・ざらつき・透明などの物理的質感特徴を認識することができます。金属かガラスかといった素材を判断し、ものの美醜・価値・情動的意味も認識することができます。人間と同じようにものを認識する機械の眼を作るためにも、また、脳の複雑な神経情報処理の原理を理解するためにも、この質感知覚の仕組みを理解することは重要な研究課題です。

人間の知覚の理解には、心理物理学が有効な手法となります。これまで心理物理学は、刺激が物理的に簡単に定義できるような色・形・運動などの基本的な感覚属性の知覚を中心に研究が進んできました。質感のような複雑な知覚はあまり得意な研究対象ではありませんでした。しかし、コンピュータビジョンやコンピュータグラフィックスの進歩も手伝って、近年、質感に関する心理物理研究が着実に進みつつあります。そこでは、どのような画像特徴が質感の手がかりとなっているのか、そして、どのような仕組みでその画像手がかりから質感を計算しているのか、について検討されています。

とくに物理的質感特徴の代表である光沢については、多くの研究が行われています。たとえば、われわれの研究から、光沢感の知覚に画像の輝度ヒストグラムの歪度といった画像統計量が関係していること、そしてその画像特徴が初期視覚系で計算可能であることが示唆されています。

○この研究の目指すもの

われわれのこれまでの研究を進展させ、物理的質感特徴の知覚に結びつく画像特徴を特定し、神経計算の理論を提案することを目指した研究を行っています。代表的な質感特徴である光沢については、色や空間要因の影響を分析し、人間と同じような仕方で画像から光沢を知覚するシステムの構築を目指しています。また、光沢感以外にも、半透明感や金属感、液体粘性といった幅広い質感特徴の知覚の仕組みを明らかにします。視覚だけでなく、触覚や聴覚による質感特徴知覚の分析も行います。素材知覚に関しては、それが複数の感覚モダリティの情報が統合された結果であると考え、視聴覚情報の相互作用について研究しています。さらに、従来の画像提示

装置の限界を乗り越えるため、新しい色彩刺激提示装置の開発も行なっています。

広範囲の質感を対象とするため、上記の研究代表者および分担者に加え、丸谷和史さん、河邊隆寛さん、王勤さん、渡邊淳司さん、何昕霓さん、黒木忍さん（以上NTT）、福田一帆さん（東工大）、三橋俊文さん、吉田圭祐さん（以上トプコン）など沢山の方々の協力を得て、研究を進めています。

○これまでに得られた成果

【視覚：光沢感】光沢の知覚に対する色の効果を分析しました。そして、ハイライト（鏡面反射）と物体本体（拡散反射）の色の関係が非常に重要であることを明らかにしました。たとえば、白色本体に赤いハイライトのように物理世界で生じないような色の組み合わせでは光沢感はほぼ消失することが分かりました（図a）。

また、光沢感に対する照明の影響を検討しました。光沢はものの特性で照明は関係なさそうに思いますが、実際には光沢感は照明環境の影響を大きく受け、たとえば霞がかかったような環境のもとでは大きく低下することがわかりました（図b）。さらに、光沢感は生まれつき備わる知覚能力かどうかを調べるために視覚発達研究を行い、光沢感知覚が7-8ヶ月の幼児では成立していることを示しました。

【素材情報の視聴覚統合】物体の材質についての情報は、視覚だけでなく聴覚など多くの感覚から得られます。例えば視覚的には物体の見た目から、それが硝子なのか金属なのかそれとも木なのかといったことを判断できます。同様に聴覚的にも、例えばその物体が叩かれた際の衝撃音を聴くことで、叩かれた物体の材質をある程度判断できます。しかしながら人間の脳がどのように、それぞれの感覚モダリティから得られた情報を統合して感覚間で一体感のある材質知覚を実現させているのかについてはよく分かっていません。そこで、まず聴覚刺激を単独で提示した場合でもガラスや金属、石、木など素材の分類がある程度可能であること、またその素材の分類が視覚の心理物理実験で得られた分類に類似していることを予備実験により確認しました。そのうえでさまざまな素材（樹皮、陶器、ガラス、金属、石、木材など）を棒で叩くコンピュータグラフィックス動画を作成し、またさまざまな素材（陶器、ガラス、金属、木材、石、プラスチック、野菜、紙など）を実際に叩いて音刺激を作成して（図c）、映像と音の組み合わせをさまざまに入れ替えてマルチモーダルな質感知覚がどのように変化するかを心理物理実験により検討しました。その結果、物理的に全く同じ視覚刺激に対して異なる聴覚刺激が組み合わさった場合に、知覚されるマルチモーダルな質感が大きく異なる刺激の組み合わせが存在すること、すなわち映像情報と音情報の双方に基づいた相補的なマルチモーダル材質知覚が生じていることを見いだし

た。

【視覚ディスプレイ開発】各画素の分光発光特性を単色光レベルで制御できる2次元タイプの新カラーディスプレイを開発しています。偏心光学系を制作し、2次元画像が提示できることを確認しました（図d）。

【視覚：色知覚と金属感】金銀銅色知覚、光沢知覚、および金属表面知覚との相互関係について調べ、輝度に対するそれぞれの知覚の変化特性を明らかにしました。表面色モード知覚を与える限界輝度値と表面の色度輝度統計量との関係を調べて、さらに照明光が変化した際の白色知覚面の色度と周辺刺激のモード知覚との関係を明らかにしました。

【視覚：半透明感】光の表面下散乱によって生じると言われる半透明感に関して、鏡面反射と拡散反射の不一致（拡散反射成分のコントラスト減少や極性反転）が重要な知覚的な手がかりであることが明らかになりました。

【視覚：液体粘性】液体の粘性の知覚において、人間が静的形状・動的形状・運動速度に含まれる様々な手がかりを柔軟に利用していることが明らかになりました。とくに運動情報に関しては、運動速度が粘性の重要な手がかりになっていることが分かってきました。

【触覚：振動周波数】手触りの違いは振動の周波数の違いによって生み出されます。異なる機械受容器によって構成されるチャンネルにより振動周波数情報がどのように符号化されているのかを分析し、チャンネル内情報とチャンネル間情報の両方が利用されていることが分かりました。

○今後の計画

光沢知覚について、工学的な画像合成や画像解析と心理物理実験を融合した手法で、光沢知覚における空間情報の役割の検討を進めています。ハイライトの位置や方向、形状といった空間的な要因の影響を調べ、その背後にあるメカニズムを探ります。新しく発見した残効現象を使って、質感と形状の脳内表現を分析します。素材知覚に関する視聴覚統合に関しては、情報統合の計算理論を定式化するとともに、脳イメージングを使って、マルチモーダルな素材表象の神経基盤を探る予定です。

○関連する研究発表

1. Motoyoshi, I. & Matoba, H. Variability in constancy of the perceived surface reflectance across different illumination statistics. *Vision Res* 53: 30-39, 2011.
2. Yang, J., Otsuka, Y., Kanazawa, S., Yamaguchi, M.K., Motoyoshi, I., Perception of surface glossiness by infants aged 5 to 8 months. *Perception*, 40: 1491-1502, 2011.

質感認知の環境依存性および学習依存性

研究代表者 中内 茂樹（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・教授）
 研究分担者 北崎 充晃（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・准教授）
 永井 岳大（豊橋技術科学大学大学院工学研究科・助教）

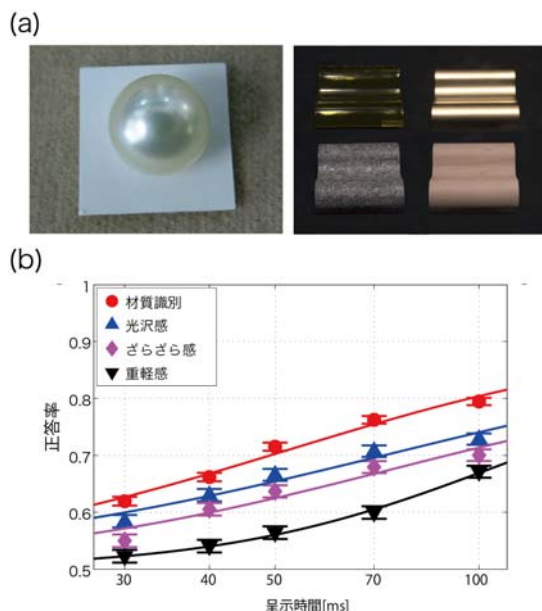
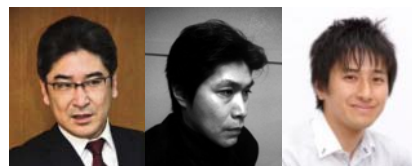


図1 (a)実験に用いた真珠と質感サンプル。(b)質感サンプルの呈示時間と質感認知の安定性の関係。

○研究の背景

多くの工業製品や工芸品、特に質感に関わる評価は機械による自動化が進んでおらず、いまだに目視検査が主流です。このことは、質感に関する科学が未だ発展途上であることを象徴する事実でしょう。例えば、真珠は、工芸品のなかでも光沢、多層膜構造による干渉などによって複雑な見えを呈しますが、その善し悪しはやはり鑑定士の目視検査によって決定されます。鑑定士は真珠のX線像等による断面像ではなく、網膜に映った真珠像から質感を認知しているため、鑑定士の質感認知特性は、視覚情報に基づく質感認知の脳内機序に関する手がかりを与えてくれる可能性が高いと言えます。

真珠鑑定の特徴の一つは、観察環境が直射日光の入らない北窓光で行われていることです。このような「自然な照明環境」が真珠らしい質感に大事なかもしれません。もう一つの特徴は、その鑑定の早さです。素人には同じように見える真珠を、鑑定士は10秒に3～5個と極めて早い速度で鑑定します。この能力はもちろん鑑定の学習によって得られたものですから、鑑定士と素人の真珠鑑定法の違いは質感認知に重要なプロセスを反映しているはずです。

私たちは、真珠鑑定に見られるような、物体の観察環境の影響、学習・熟練の影響という観点から、

質感認知のメカニズムについて検討を進めています。

○この研究の目指すもの

真珠鑑定と質感認知の関係性を手がかりとして、環境依存性、学習依存性、実物体をキーワードに研究を進めています。真珠鑑定の例から分かるように、様々な質感認知には照明を含めた物体の観察環境が大きく影響するため、その影響を精査することで、質感認知に対する視覚的な手がかりが浮き彫りになるはずです。そこで、重要な環境要因の一つとして環境光・環境照明に着目し、任意の環境照明を呈示できる装置を開発しました。その装置で様々な照明条件、例えば一様照明と自然環境照明を構築し、真珠を含めた様々な実物体に対する照明条件による質感認知の変化を明らかにします。

同時に、熟練鑑定士と非熟練者（素人）の真珠質感の弁別・評定に対する環境照明や視覚行為（視点移動等）の影響を比較します。熟練鑑定士のみが特に大きな影響を受ける観察要因があるならば、学習によって獲得する固有の質感認知の手がかりと言えるでしょう。こうした考えに基づき、質感認知の学習依存性、学習の影響を受ける質感認知手がかりを明らかにします。

違う視点からのアプローチとして、真珠鑑定の環境依存性・学習依存性から見えてくる質感認知メカニズムの一般性を明らかにするため、様々な素材（金属、木、布など）で作られた質感サンプルセットを開発しました。これは実物体サンプルですから、照明・観察環境の影響を直接的に検討することができます。質感サンプルの質感評価を幅広い観察環境や観察者群に行うことにより、質感認知メカニズムの大きな枠組みを明らかにしていきます。

○これまでに得られた成果

真珠鑑定における学習・熟練の影響に着目し、素人は真珠を何度も同じように評価できるのか、素人には真珠等級がわからないものなのかについて、2つの心理実験を行って検討しました。まず、8名の専門家に10個の真珠の評価を5回繰り返してもらったところ、評価の個人内の再現性と、個人間の類似度が偶然よりも高いレベルであることがわかりました。もう1つの実験では、素人の協力者23名に、美しさと光沢の強さ、色味の鮮やかさの3つについて真珠を評価してもらいました。光沢と色味は専門家の評価に関わる要素として知られているものです。

その結果、素人の美しさの評価よりも、光沢の強さの評価の方が、専門家による評価と近いことがわかりました。以上の結果から、専門家の真珠に対する評価の安定性が高いことと、専門家と素人の評価は少し異なる可能性が示されました。

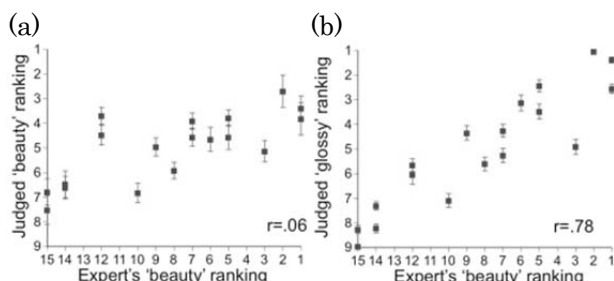


図2 (a) 専門家の評定と素人による美しさ評定の平均の関係。(b) 専門家の評定と素人による光沢評定の平均の関係。

また、環境要因が質感認知にあたえる影響を明らかにするために、環境照明を自在に操作し、真珠などの実物の質感認知を調べることができる装置を開発しました。照明にはある程度の光量が必要なため、標準最高輝度 1000 cd/m² の産業用 32 インチモニタ（ディサイン株式会社 W32OFL20-LJ1HB）を用いて、筐体を特注し 4 面からなる照明装置を作成しました。まず、4 画面の輝度を揃え、ガンマ補正を行い、最低輝度 0.22-0.27 cd/m²、最高輝度 928-952 cd/m² としました。4 つの画面はコンピュータ（Dell PWS T3500、AMD Fire Pro V7900）から 1 枚の連続した領域と認識されており、OpenGL を用いた描画・制御することができます。また、自然環境での環境照明をパノラマ画像として記録する装置も作成し、本装置に表示することを可能としました。今後は、真珠や質感サンプルなどに様々な環境照明を投影して、質感認知に及ぼす環境照明の効果を直接的に調べていきます。



図3 開発した照明装置

質感サンプルを使用した心理実験では、視覚情報にとって重要な質感特徴（光沢感、ざらざら感、重

軽感など）の感覚量や、材質識別の難易度等を計測しました。その結果、材質識別をする際に手がかりとなる質感特徴は、被験者の材質識別判断の早さによって異なることが分かってきました。例えば、かなり早く判断できる時には光沢感が手がかりとなり、ゆっくりしか判断できない時にはざらざら感が手がかりとなる、という具合です。この時間特性の違いは、私たちが何気なく「質感」と呼んでいる感覚のなかにも、視覚情報から直接的に取り出せる感覚と記憶等の高次認知情報にアクセスしないと取り出せない感覚がある可能性を示しています。このように、視覚情報に基づく質感認知プロセスの枠組みを浮き彫りにすべく、質感認知における応答時間や刺激呈示時間などの時間的側面を引き続き検討していきます。

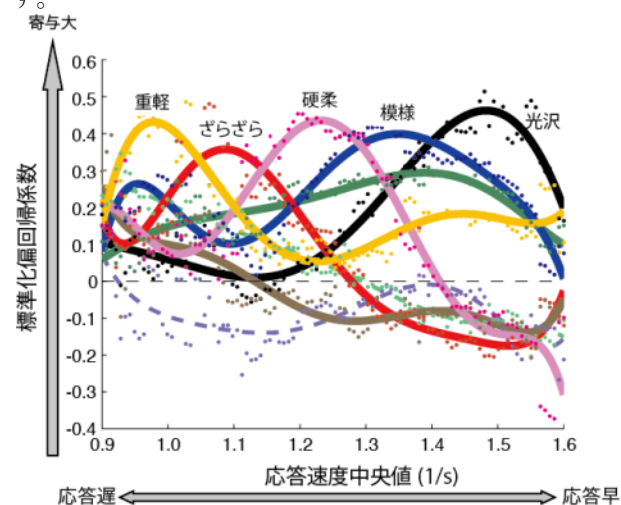


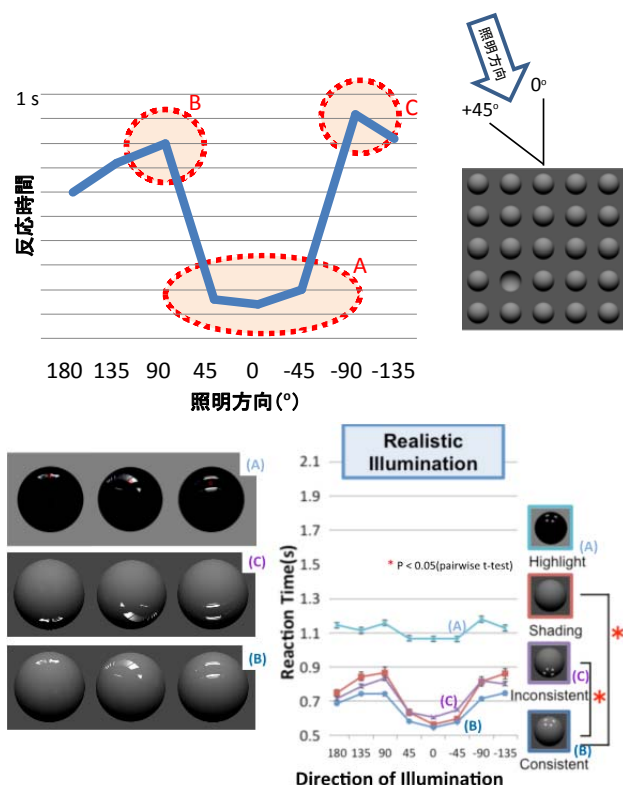
図4 材質識別と質感特徴の関係

○今後の計画

開発した照明装置を使い、素人の真珠評価能力に対する照明環境の影響を測定します。また、熟練者の被験者を増やし、熟練者と素人の違いをさらに明らかにすることにより、真珠質感認知の学習依存性を検討します。質感サンプル評定の時間特性については、対象とする質感特徴を増やし、同時に画像統計量等の画像特徴との対応付けも検討します。真珠認知と質感特徴の対応関係を調べることで、質感認知の処理機序の枠組みを明らかにする予定です。

○関連する研究発表

1. Kato M, Nagai T, Koida K, Nakauchi S, Kitazaki M: Perceiving quality of pearls: Novice observers discriminate pearls by interfering colour. 34th European Conference on Visual Perception, Toulouse, France, 8.28-9.1, 2011.
2. Tani Y, Matsushima T, Nagai T, Koida K, Kitazaki M, Nakauchi S: Perceptual information about surface qualities used in material discrimination. Vision Sciences Society 2012 Annual Meeting, Florida, U.S.A., 5.11-16, 2012.



上図： 右の様に内部に陰影をつけた円(球)を配置する。上側が明るい円達の中に、下側が明るい円がひとつ混じっている。下側が明るい円は、一瞬(1秒以下)で見つけられる。照明は上からあたっているように見える。実験で測定すると、見つけるのに掛かる時間(反応時間)は、照明の方向によって約2倍変わる。照明が上(0°)または左上(+45°)の時に最も速く、真横(±90°)の時に最も遅くなる(左のグラフ)。このように「ひ」の字型になることは、我々の脳内では光源が左上方にあることを前提にして、陰影から3次元形状を計算していることの証左となる。

下図： 陰影にハイライトを追加した画像を、コンピュータグラフィックスを使って作り、図1と同じ実験を行った。こうすると、ハイライトがどのように作用するかが判る。測定した反応時間は、(A)ハイライトだけの場合(左上の画像)、陰影だけの時よりも2倍程長くなり、「ひ」の字型も見られなかった。このことから、ハイライト自体では3次元知覚に役立たないことが判った。(B)ハイライトと陰影を同時に付けると、陰影だけの場合よりも速くなり、「ひ」の字型も見られた。このことから、ハイライトは、陰影からの3次元形状を助け、3次元知覚を速くしていることが判った。

○研究の背景

白黒写真やデッサンでも、陰影から3次元的な形を見て取ることができます。陰影は、単なる白黒の濃淡です。それでも、Ansel Adamsが撮った険しい山々の白黒写真でも、Da Vinciが描いた人体のデッサンでも、私達は迷うことなく、精緻な形状を正しく見ることができます。単なる濃淡という限られた情報から、私達の脳は3次元形状を計算する能力をもっているのです。

濃淡だけから形状が判るというのは、驚くべきことです。物の表面の明るさ(濃淡)は、照明、表面の反射の仕方、物の形、の3つ(変数)から決まります。しかし、白黒写真やデッサンでは、普通はこの3つ全てが判りません。つまり、数学的には解けない問題なのです。たとえば、同じ物でも、照明のあて方を逆にすれば濃淡は逆転し、表面がテカテカならハイライトができて明るくなります。また、出っ張ってれば明るく、引っ込んでれば暗くなります。ある場所が明るい(暗い)理由が、決められないのです。でも、私達の脳はこの問題を解いています。

○この研究の目指すもの

私達の研究グループでは、陰影からの3次元形状知覚を中心に据えて、質感を特徴づけるハイライトがどのように作用するかを探索しています。現実世界の物には、様々な質感があり、陰影やハイライトの付き方を複雑にしています。実は、陰影だけでは問題が単純すぎて(ヒントが足りなくて)かえって難しくなっています。そこで、質感をヒントにして、様々な質感を持つ物の陰影から、どのように3次元形状が計算されているかに、心理物理実験と計算理論を使ってアプローチしています。形を決める方策が判れば、先ほどの3変数の残り2つ(照明と表面)についても判ってくる筈です。

○これまでに得られた成果

これまでの実験から、ハイライトは陰影からの3次元形状を助けるように働いて、知覚を速くすることが判りました。一方、不自然なハイライトを人工的に付けても、知覚は阻害されませんでした。このように、ハイライトは陰影に対して強い非線形をもって促進的に作用することが判りました(左図を参照のこと)。

○関連する研究発表

K. Sakai, R. Meiji, T. Abe: Perceptual integration of specular highlight and shading. Vision Sciences Society, Annual Meeting 2012

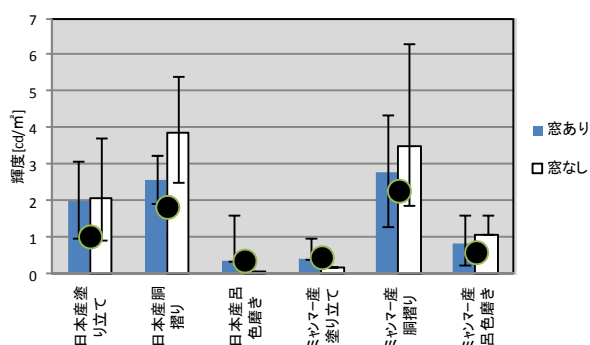


図1 漆板作成工程の三段階における手板の黒みマッチング輝度と実測輝度の比較です。日本産とミャンマー産の漆を用いました。棒は手板と等しい黒みと判断された黒みマッチングボックスの中心部輝度、9人の被験者の平均値で誤差棒はその標準偏差、黒丸は測定器での実測輝度です。人間の評価は、輝度が低いものは実測値より低く、高いものは実測値より高く評価しています。

○研究の背景

我々はこれまでに漆作品の画像やマスターピースといわれる絵画作品の画像を用いて、知覚的黒みの研究を行ってきました。その中で、同じ画像を見ても美術系の学生の方が工学系の大学生より、より黒いと評価する結果を得て、観察者の芸術への関心の高さや理解度の相違が黒の認識に影響することがわかりました。また、艶ありから艶消しまで漆作品の黒みの多様性に強い関心を持ちました。

○この研究の目指すもの

そこで本研究の第1の目的は、漆の「見た目の黒さ」すなわち「知覚的黒み」と漆の物理特性との関係を明らかにすることとしました。また第2の目的は、観察者の感性の違いが漆黒の評価にどのように影響するのかを明らかにすることとしました。

○これまでに得られた成果

黒みマッチング実験：

実験刺激として、漆表面を仕上げてゆく多数の工程の途中の2段階で止めたものと最後まで仕上げた3種類を選択し、それらの黒みを黒みマッチングボックスとの比較によって評価する実験を行いました。

ここで手板刺激を説明します。1枚目は下地塗りの上に漆に少量の灯油を混ぜて均一に塗った「塗り立て」で止めたもの、2枚目はそれを砥石で研ぎ、砥

粉(金剛砂)にサラダ油を混ぜた胴摺粉で磨いた「胴摺り」で止めたもの、3枚目はここまでに来た傷に生漆を擦り金で乾かす擦り漆の工程の後、胴摺粉より細かい呂色磨粉やチタン粉に適当に油を加えての磨きと乾燥を数回繰り返した「呂色磨き」です。手板のサイズは800mm×1000mmです。日本産漆とミャンマー産漆の手板を製作しました。

これら以外にスプレー等で塗料を塗布した板3枚(フェイク刺激と呼ぶ)を含む合計9枚の手板を実験刺激として用いました。これらのテスト刺激は観察ボックスの中に設置され、手板をそのまま見せる「窓なし」と小さい円形の穴をあけた灰色の紙で覆って見せる「窓あり」の2つの条件で提示されました。

テスト刺激の知覚的黒みは、白色周辺に囲まれた黒い中心から成る視野を提示できる黒みマッチングボックスで定量的に評価しました。白色周辺部の輝度 L_s と暗い中心部の輝度 L_c は独立に制御できます。

被験者は、テスト観察ボックス内に置かれたテスト刺激又はフェイク刺激と黒みマッチングボックス内の同心円状刺激の中心部を見比べてどちらが黒いかを判断しました。刺激までの観察距離は各々30cmです。色覚正常な美術を専攻する20代の10名(男5名、女5名)を被験者としました。

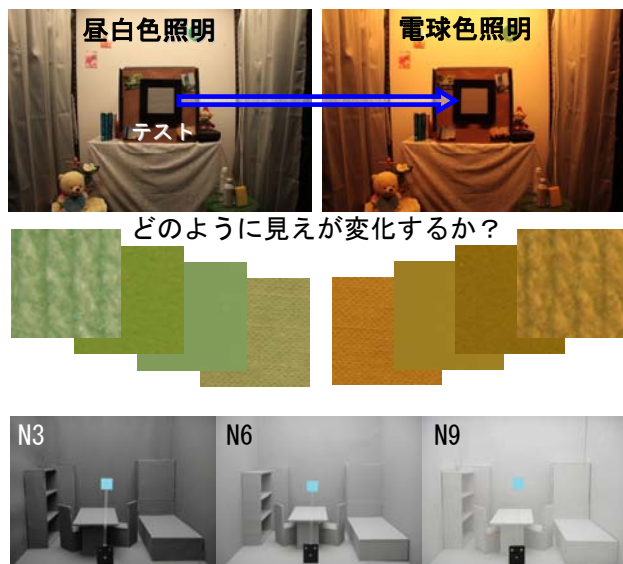
黒みマッチング実験の結果を図1に示します。人間の評価は、輝度が低いものは実測値より低く、高いものは実測値より高く評価しています。

○関連する研究発表

1. Komatsu T, Ohkura M, Ishikawa T, Ayama M: Assessment of material perception of black lacquer, 4th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, San Francisco, USA, 7. 21-25, 2012.
2. Kohno T, Sakaue Y, Ishikawa T, Matsushima S, Ohkura M, Kasuga M, Ohtani Y, Ayama M: Blackness of Japanese lacquer and its relation to surface property, AIC (International Color Association) Midterm meeting 2012, Taipei, Taiwan, 9. 22-25, 2012(accepted).

実環境での安定した色認識における質感の役割

研究代表者 溝上 陽子（千葉大学大学院融合科学研究科・助教）



図（上）色恒常性の実験。色恒常性が成立していれば、照明の色が変化しても物体表面の色の見えは変化しない。（下）マット紙を用いた明るさ知覚実験。実際の照明は同じ明るさでも、室内の明るさ感とテストパッチの見えは壁や家具の明度の影響を受ける。

○研究の背景

私たちは、照明条件等の環境が変化しても、物体の色や明度を正確に判断できる能力を備えています。この色認識の安定性は「色の恒常性」と呼ばれており、私たちが生きていく上で大切な能力です。

これまでの研究で、色の恒常性は実空間と比べて画像やアニメーション風の図柄、シンプルな色パターンでは低下することが示されています。また、実空間であっても、不自然な照明や室内環境では恒常性は低下します。これは、空間の認識・照明の認識、物体の認識に必要な手がかりが減った分、見えが不安定になることが原因と考えられます。

この手がかりとして、質感が深く関わる可能性があります。画像において、あるいは特殊な物体表面や照明によりテクスチャーや陰影などの質感が分からなくなると、環境の自然さが損なわれ、正確な照明や物の認識ができなくなり、結果として色認識とその安定性に影響を与えと考えられます。

人間の基本的で重要な特性である色認識の安定性に対して、質感がどのような役割を果たすかについては明らかではありません。質感を含む、視覚系の高次レベルにおける色認識メカニズムを解明することが必要と考え、本研究に取り組み始めました。

○この研究の目指すもの

本研究では、質感が視環境の照明・空間認識に与える影響、視環境が質感に与える影響、物体の質感がその色認識に与える影響を調べます。色評価実験により色の見えを調べ、質感と空間認識、周囲環境の色分布特性等の統計的性質との関係を分析することで、視環境と質感、質感と見えの安定性の相互関係を総合的に明らかにすることを目指しています。

○これまでに得られた成果

まず、実環境を用いて、視対象とする物体の質感がその色認識に与える影響について調べました。実際の部屋を模した実験ブースに、異なる素材（画用紙、プラスチック、毛糸、等）のテスト刺激を置き、色評価実験を行いました。照明条件は昼白色光と電球色光の2種類、観察条件は通常両眼視とテスト刺激のみを観察する視野制限両眼視の2種類です。その結果、通常観察条件ではどの色でも色みの変化量は比較的小さく、また素材による明確な違いは見られませんでした。視野制限条件では、一般的に変化量は大きくなりましたが、平面よりも曲面刺激の方が変化量は小さい傾向にありました。これらから、通常環境では質感の違いが色恒常性の成立度に与える影響は小さいこと、刺激の陰影等の三次元的情報が色恒常性に寄与する可能性が示唆されました。

また、室内の構成要素が明るさ知覚に与える影響を調べるため、同一照度ですが明るさが異なるマット紙で構成された室内模型を用い、テスト刺激の色、室内物体の明度、室内照明の明るさ判定を行いました。その結果、テスト刺激の明度と彩度知覚は、室内構成物体の明度が高くなるほど低下しました。また、実際の照明は等しいにも関わらず照明の明るさ知覚は変化しました。室内模型をマット紙で構成していたため、明度知覚や明るさ感の安定性が低くなったと推定されます。今後、多様な質感で構成された場合に色恒常性が高くなるかを検討する予定です。

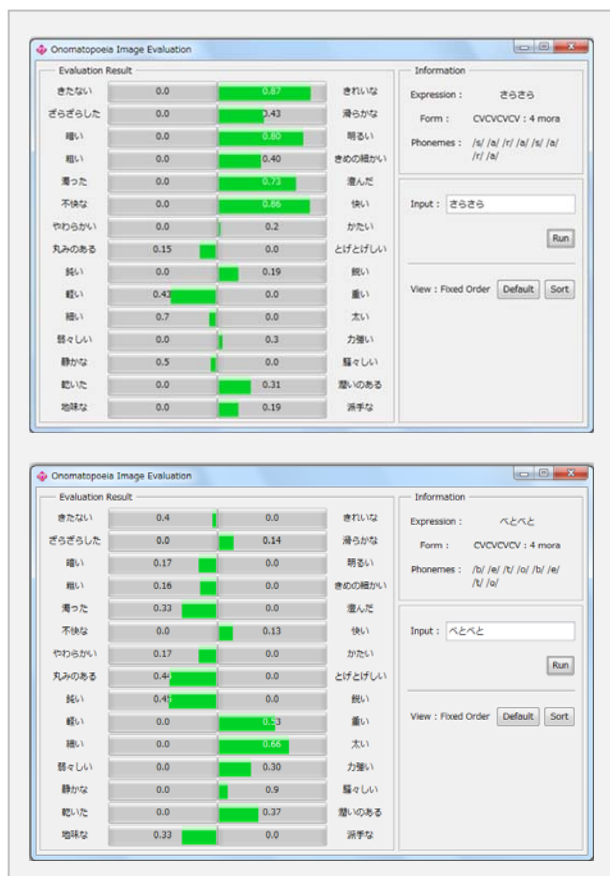
○関連する研究発表

学会発表など

1. Mizokami Y, Tajima A, Yaguchi H: Colour constancy in natural and unnatural images, Midterm Meeting of the International Colour Association (AIC), Proceedings pp.206-209, Zurich, Switzerland, 6.7-10, 2011.
2. Mizokami Y, Tsukano T, Yaguchi H: Effect of material perception on color constancy, Vision Sciences Society, Naples, USA, 5.11-16, 2012

オノマトペの音象徴性を利用した触質感認知メカニズムの 解明とその工学的応用

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・准教授）



上図は、「さらさら」というオノマトペがもつ情報を、
 下図は、「べとべと」というオノマトペがもつ情報を、
 システムで推定し、定量的に出力したものです。

○研究の背景

人間の感覚は言葉によってラベル付けされ、認知、記憶、共有されます。そのような言葉のなかで、オノマトペ（擬音語・擬態語の総称）は、単純な構成でありながらも、共通の感覚イメージを呼び起こす「感覚の物差し」として使用されています。オノマトペの重要な性質として、オノマトペを構成する音韻の響き自体が対象の性質を内包し、共通の感覚イメージと結びつく音象徴性があります。例えば、「ふわふわ」を構成する/h/は柔らかさが、「さらさら」を構成する/s/は滑らかさが表されるとされます。

オノマトペの音象徴性は個人差の少ない一般性を持つものです。一方、触覚をはじめとする内観が重要な感覚（他には味覚、痛みなど）では、その質感認知は個人差が大きく、共通のカテゴリを定量的に観察することは難しいとされてきました。

そこで、この研究では、主観表現でありつつ音象

徴という汎用性を持つオノマトペを、質感を表す柔軟な指標として利用し、その音韻論的分析と、材質感認知の特性や質感の価値判断の傾向を組み合わせることで、触質感認知の主要因を特定し、工学的に応用することを目指します。

○この研究の目指すもの

目標 1. 被験者実験によりオノマトペの音韻と触質感の関係性の体系化を行い、オノマトペの音韻を入力するだけでそのオノマトペが表象する触質感を出力する質感評価システムを実装します。

目標 2. 目標 1 で体系に基づき、触質感を表すオノマトペとその音韻の関係を表す二次元分布図を作成します。その分布図上で実際の触素材を操作し、触素材を直感的に推奨するシステムを構築します。

○これまでに得られた成果

日本語の全音韻の組み合わせから 2 モーラの繰り返しオノマトペ (ABAB 型) 11,075 語と特殊語尾 (標識) のついたオノマトペ 3,509 語を作成し、予備実験によって触覚を表すオノマトペ 300 語を抽出しました。これら 300 語について、質感評価に適した 43 対の形容詞評価尺度ごとに、被験者 41 名に 7 段階での印象評価を求める調査を行いました。得られたデータを用いて数量化理論 I 類による分析で得られた各音韻のカテゴリ数を算出し、オノマトペ表現全体の印象予測値を算出できるようにしました。左の図は本研究開始時点での 15 対の形容詞評価尺度でのシステム画面ですが、本研究により、質感評価に適した 43 対の評価尺度でオノマトペの音韻を入力するだけで質感を推定できるシステムを実装でき、目標 1 は達成済みです。

○関連する研究発表

論文

1. 渡辺淳司, 加納有梨紗, 清水祐一郎, 坂本真樹: 触感覚の快・不快とその手触りを表象するオノマトペの音韻の関係性. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 16(3) 367-370, 2011.

学会発表など

1. Junji Watanabe, Tomohiko Hayakawa, Shigeru Matsui, Arisa Kano, Yuichiro Shimizu, Maki Sakamoto: Visualization of Tactile Material Relationships Using Sound Symbolic Words. P. Isokoski and J. Springare (Eds.): EuroHaptics 2012, Part II, LNCS 7283, 175-180, Springer, Heidelberg, 2012.

視覚情報から物体の経時変化を推定する高次質感認知 メカニズムの解明

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・准教授）



図 恒温恒湿槽内で系統的に鮮度劣化させた小松菜の測色値画像を2次元色彩計で取得している様子

○研究の背景

質感は、物体の属性を得る際に非常に重要な手がかりを与える感覚情報の1つです。しかし、視覚の高次質感認知（例えば、鮮度感や瑞々しさ感等）に関する研究はあまり行われていません。一方、食品の分野でも生鮮食品の鮮度の測定法は確立されておらず、また化粧品業界でも人の肌年齢がどのような要因で決まっているかの解明が課題となっています。そのため、視覚情報から自然物の経時変化を推定するメカニズムの解明は、様々な産業分野においても重要な課題といえます。さらに我々は、人工物（建築物や紙、金属プレート、布等）を見たときにも、その物体の「時の流れ」すなわち「経時変化の度合」も感じることができます。これは、出来上がり当初の視覚情報を知らなくても、今の状態（視覚情報）だけからその物体の「経時変化」すなわち「古さ度合」を推定できることを示唆しています。

○この研究の目指すもの

「鮮度」という高次質感の認知メカニズムを完全に解明し、その成果を画像認識に組み込むことでカメラを用いた鮮度判定システムを開発します。また、画像処理によって任意の「鮮度」を有する画像に変換・生成する技術を開発します。さらに、人工物が経年変化した際に感じる「古さ度合」を定量化し、その高次質感認知メカニズムを解明し、画像処理によって任意の「経年変化」画像に変換・生成する技術を開発します。最後に、自然物と人工物の結果を比較検討することで、経時変化を推定する高次質感認知モデルの統一化が可能かどうかを検討します。

○これまでに得られた成果

生鮮食品（コマツナ・キャベツ・イチゴ・ニンジン）を恒温恒湿槽によって系統的に腐敗劣化させ、その途中経過を2次元色彩計で画像情報として記録し、それを視覚刺激に用いた鮮度評価実験を行いました。その結果、知覚鮮度と画像内の輝度分布統計量との間に高い相関があること、色情報が鮮度知覚に関して主要因ではないことを明らかにしました。次に、画像処理技術を用いて色情報を変化させずに各輝度分布統計量を独立に変化させたキャベツ画像を作成して同様な実験を行なった結果、鮮度知覚の変化は輝度分布統計量と輝度空間周波数で定式化できることを示しました。また、鮮度知覚が0.1秒以下の呈示時間で可能なこと、また刺激サイズに依存することを示しました。また、鮮度評価に輝度や照度レベルが影響することを明らかにしました。

○関連する研究発表

論文

1. Arce-Lopera C, Masuda T, Kimura A, Wada Y, Okajima K: Luminance Distribution Modifies the Perceived Freshness of Strawberries, *i-Perception*, 3(5):338–355, 2012.

国際学会発表

1. Arce-Lopera C, Okajima K: Luminance Information Suffices to Model Vegetable Freshness Perception, 12th Annual Meeting of the Vision Science Society(VSS), Abstracts, Florida, U.S.A., 220, 2012

皮膚変形レベルでの質感解明: 質感を際立たせる 触覚テクスチャ合成法の確立

研究代表者 岡本 正吾（名古屋大学大学院工学研究科・助教）

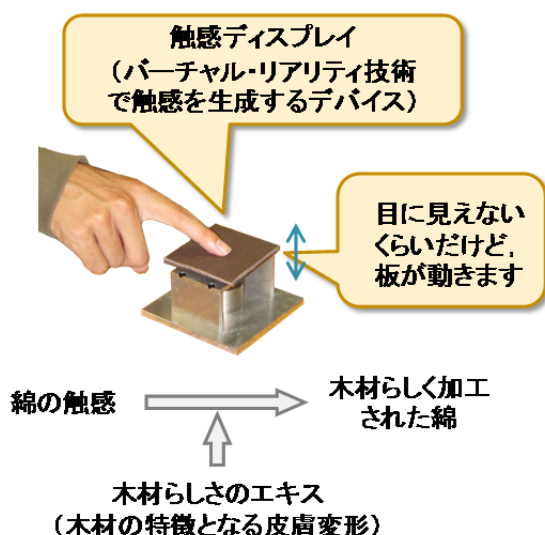


図 バーチャル・リアリティ技術を用いて、触感の「素材らしさ」の正体を突き止める。触感ディスプレイは、わずか数マイクロ・メートルですが、高速に移動することで、人の指に触感を生成します。この例では、木材らしさのエクスを用いて、綿の触感を加工しようとしています。綿が木材らしくなれば、成功です。木材らしさを決めるものが上手く抽出できた証拠です。

○研究の背景

人は物の表面に触れたときに、その物特有の質感を感じます。例えば、木材らしさ・絹らしさ・紙らしさなどがこれに該当します。では、これらの「素材らしさ」はどのように決まるのでしょうか？この研究では、このような触感（触の質感）を決めるものが何であるのかを理解し、それを上手に利用しようということを目的としています。

○この研究目指すもの

では、触感を決めるものの正体をどのようにつぎとめるのか。この研究の独自性はそこにあります。その方法は、バーチャル・リアリティ技術です。バーチャル・リアリティ技術を用いれば、様々な素材の触感を仮想的に生成することができます。もちろん本物にはかないません。その代わり、実際に存在しえないような素材を生成することも可能です。この実際には存在しない、もしくは時間と労力の観点から実際に用意することが困難な素材を生成できる

ということは、研究にとってはとても都合のよいことです。例えば、素材の要素の特定の一部だけを少しずつ変化させて、人の反応を調べたりすることが可能になります。同じことを本物の素材で行おうとすると、そのように特定の要素が少しずつ異なる素材が用意できない、存在しないなどの問題が生じます。

○これまでに得られた成果

人が指で物体の表面をなぞると、表面の起伏に併せて、指の皮膚が変形します。この皮膚の変形と触感の間に密接な関係があると多くの研究者がいらんでいます。そこで、この研究では皮膚を変形させることによって触感を擬似的に生成するバーチャル・リアリティのデバイスを用います。このデバイスを用いて、木材をなぞったときの皮膚の変形を模擬すれば、木材をなぞったような触感を生成できます。さて、木材をなぞったときの皮膚変形の中から一部を取り出して、それを例えば布らしい仮想素材と合わせたら何が起こるか？もし、布の触感が木材らしく変化したとすれば、それは、木材らしさを決めるものが何かを特定したことにならないか。それがこの研究のアプローチです。これまでに、実際に木材の触感を木綿らしく変化させることに成功しており、われわれのアプローチの可能性が示されています。

○この研究がどのように役立つか

研究の題目が示す通り、この研究の目指すところは、素材らしさを決めるものの理解だけではなく、それを用いて、より素材らしさが際立つような触感を合成することです。例えば、絹らしさを決めるものが理解できれば、さらに絹らしい絹を作ったりすることができるでしょう。

○関連する研究発表

1. Shogo Okamoto, Hikaru Nagano, and Yoji Yamada, Psychophysical Dimensions of Tactile Perception of Textures, IEEE Transactions on Haptics, 2012.
2. Yoichiro Matsuura, Shogo Okamoto, Shuhei Asano, Hikaru Nagano, and Yoji Yamada, A Method for Altering Vibrotactile Textures Based on Specified Materials, Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2012.

物理刺激を伴わない質感認知： 共感覚における色認知の神経基盤の解明

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）

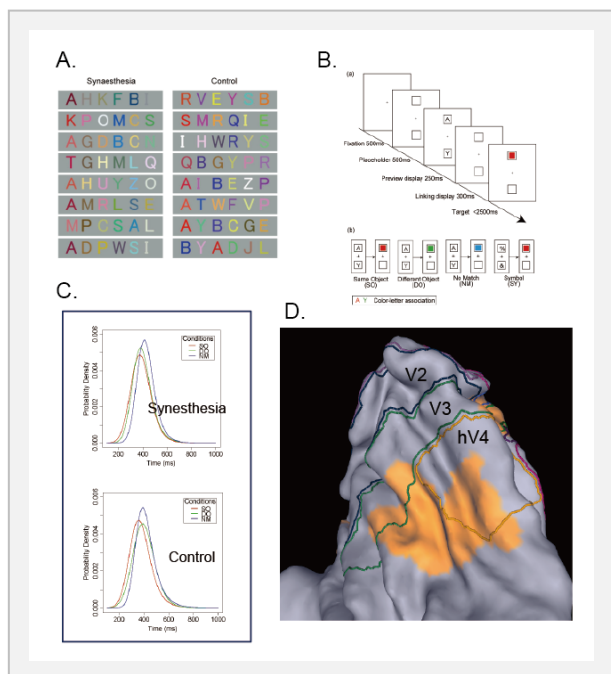


図 A. 色字共感覚(統制群は連想色を用いて実験)。
B. 文字-色結合の位置依存性を調べる実験方法。
C. 色刺激に対する反応時間分布の共感覚者と非共感覚者の差異。D. 脳活動からの色刺激の予測(オレンジが予測できた領域)。

○研究の背景

共感覚とは、「文字を見ると、色が見える／感じられる」ような、物理刺激に対応しない知覚が生じる現象で約 100 人に 1 人が持つと言われています。物理刺激に伴う知覚と共感覚を比較検討することで、高次視覚領野で生じていると考えられる色を含む質感の認知の特性や神経機構の解明が期待できます。

○この研究の目指すもの

文字を見ると色が見える色字共感覚に焦点を当て、
(1) 物理的な色認識と色字共感覚における文字と色の結びつき方の機能的差異、(2) fMRI を用いた脳機能測定による共感覚色の脳内表現様式、(3) 文字に対して色とテクスチャを感じる共感覚（以下、質感共感覚と呼ぶ）における色情報とテクスチャ情報の相互作用、の解明を目指しています。

○これまでに得られた成果

(1) 文字-色結合の機能的差異：我々が色付き文字の色を知覚する場合、色の知覚は文字の位置に依存します。共感覚色認知でも同様かどうかを調べる

ために、色なし文字を先行呈示して後続の色刺激に対する反応を 2 つの刺激の位置関係を変動させて観測すると、物理刺激の知覚とは異なり、共感覚色知覚はそれを誘発する文字刺激の位置とは無関係に生じていることがわかりました。この結果は、色字共感覚が、位置に依存しない抽象的な認知のレベルで生じている可能性を示唆します。

(2) 共感覚の脳内表現様式：共感覚者では色なし文字をただで色色に処理に関わる脳部位が活動することが知られています。しかし、具体的な共感覚色の内容が脳でどのように表現されているかは不明です。脳活動のパターンの類似性や違いを調べる解析手法を用いて共感覚色の内容の効果がみられる部位を探索しています。まず、色刺激を観察している非共感覚者の脳活動を fMRI により測定し、視覚野の脳活動パターンから見ている色を予測できることを確認しました。現在、予備的ですが、共感覚者色の効果が脳活動パターンに影響する部位が hV4 と呼ばれる高次の色情報処理を行う領野を含む高次視覚領野であるという結果を得ています。

(3) 質感共感覚：“共感覚質感”は色よりもはるかに多様性が大きく、同定が困難ですが、心理実験を行うためにこれをディスプレイ上で再現する必要があります。現在、共感覚質感の再現に取り組んでいます。質感共感覚者の協力を得て、主観的な共感覚質感を最もよく近似する自然画像を探索しています。共感覚者の主観に適合した刺激セットを構成したのちに、共感覚色と共感覚質感が脳の中で一体化して処理されているのか、或いは独立に処理されているのかを心理実験から明らかにする予定です。

○関連する研究発表

論文

1. Saiki, J., Yoshioka, A., & Yamamoto, H: Type-based associations in grapheme-color synaesthesia revealed by response time distribution analyses. *Consciousness and Cognition*, 20, 1548-1557, 2011.

学会発表など

1. Koga H, Yamamoto H, Saiki J: Synaesthetic letter-color binding is mediated by type-based association, 15th Annual Meeting of the Association for the Scientific Study of Consciousness, Kyoto, Japan, 6.9-12, 2011.

チンパンジーにおける食物の質感知覚

研究代表者 伊村 知子（新潟国際情報大学情報文化学部・講師）



質感知覚の進化的な基盤を探る

ものの素材や状態などから感じられる質感は、人間だけでなく、それ以外の動物にとっても生存に不可欠な情報だと考えられます。最近の心理物理学の研究から、人間が、物体の表面の光沢感や透明感などの質感を知覚する仕組みは、意外にも単純なメカニズムに支えられている可能性が示唆されてきました。一方で、質感知覚の基盤となる色彩や輝度の感度に関して、人間とその他の霊長類では多くの共通点が見られるのに対し、質感を区別する能力についてはほとんど報告されていません。そこで、ヒトの質感知覚の進化的な基盤を明らかにするために、チンパンジーがどのように質感を知覚するかについて、比較認知の視点から調べています。特に、チンパンジーの生活にとって関わりの深い、食物の質感に着目した実験をおこなってきました。

チンパンジーの食物選択と質感知覚

チンパンジーの主食といえば果実ですが、それ以外にも、葉や花、樹皮などの植物や、昆虫、哺乳動物の肉など、実に多種多様なものを食べています。このように幅広い食物をレパートリーとするために、味覚・嗅覚・視覚・触覚などのさまざまな感覚情報が手がかりとなります。人間の場合には、食べ物の表面の質感もまた、食物選択において重要な手がかりとなることが知られています。たとえば、果実や野菜などでは、表面の質感が時間的な変化から「鮮度」を知ることができます。食べるべき時期を見分けることにより、さらに効率よくエネルギーを摂取することができます。このような食べ物の状態の微妙な違いを、チンパンジーはどのように知覚するのでしょうか。

食物の「鮮度」の知覚

京都大学霊長類研究所の6個体のチンパンジー（年齢範囲：11歳～35歳）を対象に、日頃から食べているキャベツ、ホウレンソウなどの野菜の写真を用いて、「鮮度」の視覚的な差異を区別できるかどうかについて調べました。

図1のように、キャベツの表面が時間経過とともに劣化していく10枚の画像（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）を用意し、そのうちの2つをモニタ上に提示して、「鮮度の高い」方の画像を選択するように訓練しました。

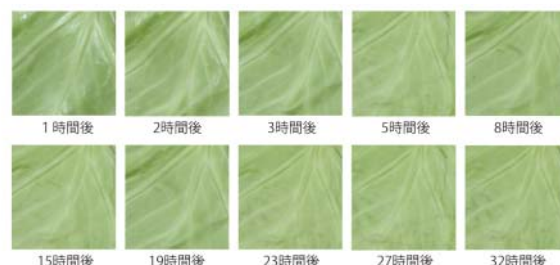


図1 実験で使ったキャベツの葉の画像例



図2 キャベツの葉の表面を見比べるチンパンジー

その結果、6個体中4個体のチンパンジーが、「鮮度」の異なるキャベツの画像の違いを見分けることができました。一方、キャベツの葉の形態がわからなくなるように、画像を細かく切り刻んでランダムな配置に並べた画像では、課題の成績が著しく低下したことから、ハイライトのような局所的な手がかりにしていたわけではないことがわかりました。さらに、訓練で使ったものとは別のキャベツの画像や、初めて見せたホウレンソウの葉の画像のペアでも、チンパンジーは、より「鮮度の高い」方を選択することができました。キャベツやホウレンソウなどの葉物の野菜の継時的変化に共通する特徴を学習したのかもしれません。

以上の結果から、知覚の上では「鮮度」の差異を区別することができることが示されました。今後はさらに、実際の食物選択行動との関係も視野に入れた実験的方法を検討していくつもりです。

学会発表

伊村知子, 増田知尋, 和田有史, 岡嶋克典. チンパンジーにおける食物のテクスチャ知覚. 日本動物心理学会第72回大会, 関西学院大学, 2012年5月12日～13日

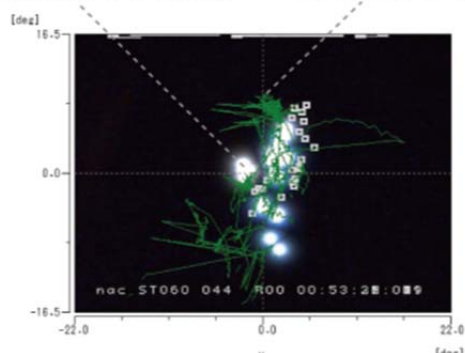
漆質感認知に寄与する時空間視覚情報特性解析

—「漆の質感を見る技」の解明—

研究代表者 大谷 芳夫（京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科・教授）

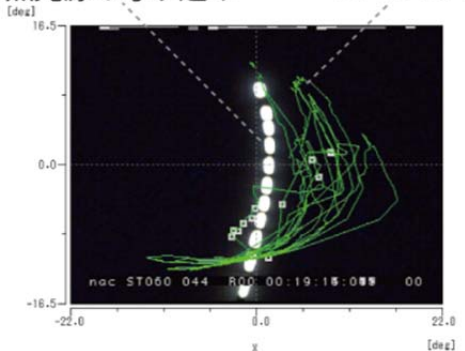


点光源の写り込み 眼球運動の軌跡



熟練者の眼球運動軌跡と視野画像

点光源の写り込み 眼球運動の軌跡



非熟練者の眼球運動軌跡と視野画像

○研究の背景

漆工芸品は‘japan’と呼ばれるように、その美しさは我が国を代表する伝統工芸の極致を示すものとして世界的に認知されています。漆の美しさは、作品表面のもつ「光沢」「艶」「深み」にあるとされており、それらをもたらす漆塗膜表面の微細構造や光反射特性などについての研究が多く行われてきました。しかし、そもそも、人間が漆塗膜を見て上記のような様々な「質感」を感じる心理学的な仕組みは十分に解明されていません。また、漆工芸の熟練者が漆の質感をどのように評価しているのか、また熟練者は素人とどこが違うのかといった点も科学的な理解が進んでいません。

○この研究の目指すもの

前項で述べたような状況を受けて、本研究では、視覚心理学分野の研究者と伝統工芸技能士でもある伝統産業工学分野の研究者が連携して、人間が漆の

質感を見て取る仕組みを明らかにすると共に、漆工芸熟練者と非熟練者の違いを解明することを目的としました。熟練者や非熟練者が「何を見て」質感を感じているのかを明らかにするのが最終の目的ですが、その答えに迫るために、まず、熟練者や非熟練者が「どこを見て」質感を感じているのかを調べることから研究を始めることにしました。

○これまでに得られた成果

現在、熟練者が漆塗膜の質感を評価する場合、漆板を動かし、板面に写る画像を観察することに着目して、漆板への写り込み画像の動きと、その画像を追う眼の動きの特徴を捉えるための研究を進めています。また、艶の程度が異なる漆板を見て、それらを識別する際の特徴も調べています。

これまでの分析から、熟練者と非熟練者では、質感を評価する際の漆板の動かし方と、写り込み画像を追う眼の動きが異なることが分かってきました。左の2つの図は、熟練者（上図）と非熟練者（下図）について、漆板の動きによる写り込み画像の移動（白点）と眼の動きを重ね書きしたのですが、漆板を動かす速度、眼の動きの速度と移動距離のすべての点で、熟練者の方が非熟練者よりも小さく、ゆっくりと観察している傾向が見られます。

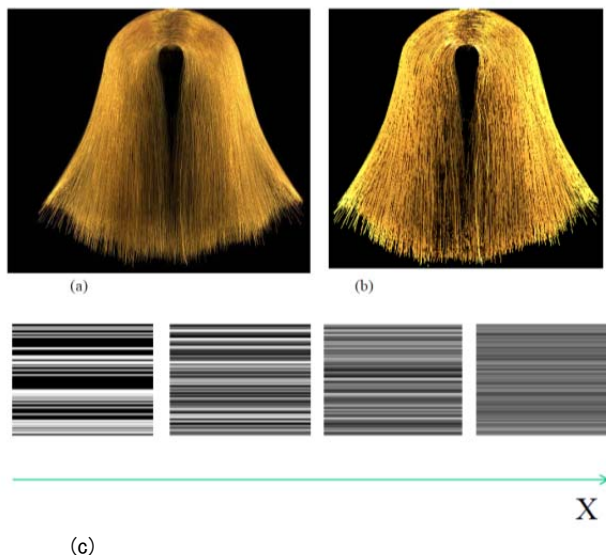
また、左図のような、暗室内で小光点のみが写り込む環境では、熟練者は漆板の艶を高めに評価する傾向がありますが、非熟練者は実際の艶の程度とほぼ一致した評価をしました。一方、熟練者が通常作業をしている様な蛍光灯下の環境では、熟練者の艶の評価は、漆板の実際の艶の程度とよく一致し、非熟練者の評価は暗室内とほぼ同じでした。

以上の結果から、漆板の艶の評価をする際には、熟練者と非熟練者では、「どこを見ているか」に関して違いがあり、照明環境の影響も異なることが分かりました。今後は、熟練者や非熟練者が見ている所の画像特徴を分析して、問題の本質である「何を見て」質感を感じているかという問題に取り組んでいく計画です。

○関連する研究発表

学会発表

1. 土井晶子, 高橋成子, 下出祐太郎, 大谷芳夫: 漆の質感認知過程に関する研究—艶の評価・再認実験及び眼球運動計測による検討—, 視覚学会 2012 夏季大会, 山形大学, 米沢, 2012 年 8 月.



図(a)は太さを 1/4 画素程度として生成した画像。
図(b)は髪の毛の太さを 1 画素として描画した CG 画像。
図(c)は実験に用いた多重解像度画像. 右側ほど細かい（低解像度）。

○研究の背景

人間は視覚情報から物体の「質感」を知覚し、材質の様々な特徴を認識します。「キメの細かさ」や「フワリとした感じ」などの感覚も重要な要素の 1 つです。

図において、図(a)は太さを 1/4 画素程度として生成した画像で、図(b)は髪の毛の太さを 1 画素として描画した CG 画像です。比較して明らかなように、太さが 1 画素以下であるにもかかわらず、「細かさ」の違いが明瞭に知覚されます。本研究では、これまで殆ど研究例のない「細かさ」の視知覚に焦点をあて、研究を行っています。

○この研究の目指すもの

本研究では、心理物理的手法により細かさ知覚の基本特性を解明することを目指します。また、知覚特性に基づいた画像生成など、工学的応用の検討も行います。

このため、状況を単純化し、輝度・幅・方向が一定であるストライプを用いて、多重解像度を用いた視

覚実験を行いました。図(c)は実験に用いた画像の一例です。

○これまでに得られた成果

実験により、以下のことが確認できました。

①多重解像度画像を 2 枚提示し、どちらが細かく見えるか判定させたところ、画素以下の細かさを正確に判断できることが判明した。

②一方の画像に対してのみフィルター処理などを行い、細かさ知覚に対する影響を調査した。その結果、提示パターンの低周波成分が大きな影響をもつことが判明した。

③これらの実験結果を分析したところ、簡単な線形モデルで説明可能であることを示した。

また、これらの知見を応用し、1 画素スケールで描かれた粗い髪の毛の画像に正規ノイズを適当に付加することで、細かく見える画像を生成できることを示しました。この原理を用いることで、髪や樹木などの細かい物体の画像生成を効率的に行うことができるようになるものと期待しています。

○関連する研究発表

総論

新谷幹夫. CG による質感表現. 映像情報メディア学会誌, vol.66, No.5, pp.364-370, 2012 年 5 月.

学会発表など

1. Mikio Shinya, Shin'ya Nishida, Michio Shiraishi, Visual perception of sub-pixel fines of hair-like textures, Workshop on Perception of Material Properties, June 1-5, Schloss Rauischholzhausen, Ferdinand von Stumm Straße, Germany (2011).

研究紹介 C01 質感情報の脳内表現と利用のメカニズム

質感認知の初期脳メカニズム

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 佐々木 耕太（大阪大学大学院生命機能研究科・助教）

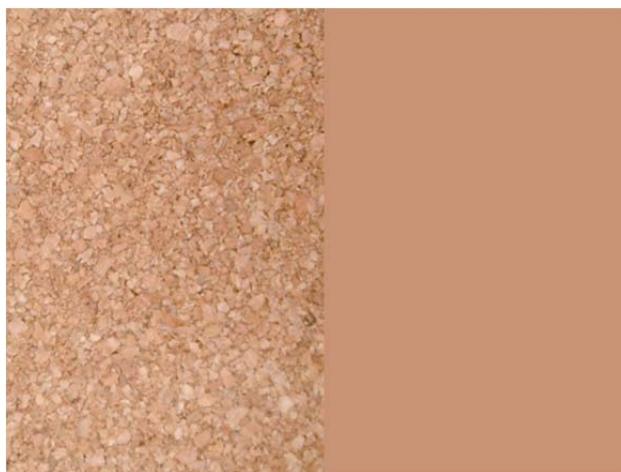


図1：ザラザラ・ツルツル等の視覚テクスチャーの境界に関する情報は、視覚野の細胞にどのように担われているだろうか？

○研究の背景

視覚的質感のなかでも、ヒトは物体が光沢を持ってツルツルしているのかテクスチャーが付いたザラザラした表面なのか、さらに光沢を持つ物体の中でも材質は金属なのかそうでないのか等は一目見ただけでわかります。したがって、視覚的質感について心理物理学的なテストを行うことは可能です。しかし、神経細胞の反応として研究する事には予想以上に難しいところがあります。難しさの一つの原因は、個々の細胞がごく一部の視覚情報しか担っていないことに由来します。さらに、視覚経路の各領野の神経細胞は、既に形や色、運動などの、様々な視覚特徴に選択的に反応することが知られています。例えば一次視覚野(V1)の個々の単純型と呼ばれるタイプの細胞は、図2のように明暗の縞模様の小さな切れ端(wavelet)の様な形の画像成分に選択的に反応します。私たちが見る全ての画像や情景は、このような様々な角度（方位）と細かさを担当する、非常に数多くの細胞の活動を総合することで表現されています。つまり、個々の細胞の反応からは、ある細胞はこのような細胞に固有の小さな成分としての波の破片に反応しているようにしか見えません。

そうすると、例えば、光沢を持つ物体を、このような特性を持つ細胞の反応を通して見た時、光沢によるハイライトと物体の表面に描かれた白っぽい部分とを区別できるでしょうか？光沢という質感の情報もこれらの細胞の活動の何処かに隠されているの

でしょうが、どのように隠されているのかは、簡単にはわかりません。

視覚情報処理が進んで、V1より高次の領野になると、光沢の変化に対応して反応を変化させる細胞の存在が小松グループの西尾ら(2012)の研究により示唆されています。

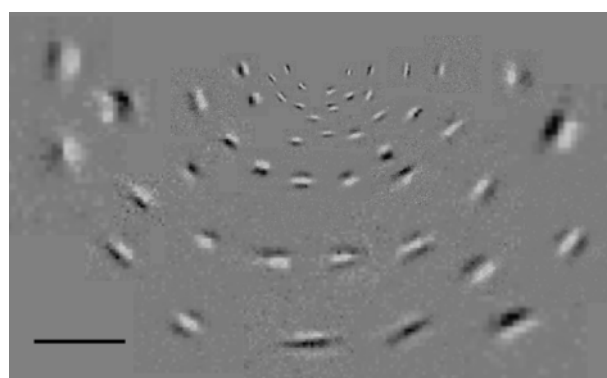


図2：逆相関法で求めた多くの一次視覚野(V1)単純型細胞の詳細な受容野。高次視覚野の細胞の刺激選択特性は、これらの単純な形の複雑な組み合わせで構築されています。スケールバー：視角10度

○この研究の目指すもの

上記のような高次視覚野の細胞は、従来からの物体形状の表現に関する同じ領野の研究が示すように、質感の変化に感受性を持つだけでなく、物体の形や照明の変化にも感受性を持つ可能性が高いと言えます。つまり、これらの細胞の反応には、物体形状に関する情報だけでなく、テクスチャーや光沢感等の質感に関連する情報も埋め込まれていることとなります。このような高次視覚野の細胞を、初期視覚野の細胞から作り上げるためには、ちょうど電子機器の回路図を描くように、初期視覚野細胞におけるテクスチャーや光沢情報の表現形態を具体的な神経回路が示せるほど詳細に探る必要があります。

これまでの研究で、図1のような視覚テクスチャーの境界に反応する細胞は、実は「受容野周辺抑制」を示す細胞であることを示す事ができました。さらに、境界がどのような方位（傾き）にあれば細胞が反応するのかを示す、「テクスチャー受容野」を実際に計測することができました。図3には4個のV1細胞のテクスチャー受容野を示します。これらのテクスチャー受容野の赤色で示す場所は縞模様がそこに有ると細胞が興奮する領域です。これに対し、青色の場所は縞模様がそこに有ると細胞が抑制を受け

る領域です。赤と青の領域を全部覆うような縞模様は興奮と抑制の効果が打ち消し合って、細胞は反応しません。従って、赤色の領域には縞模様が有り、青色の領域には無い、という両方の条件が同時に満たされる時、すなわちテクスチャーの境界がそのように視野に配置された時に良く反応する細胞ができあがるのがわかります。

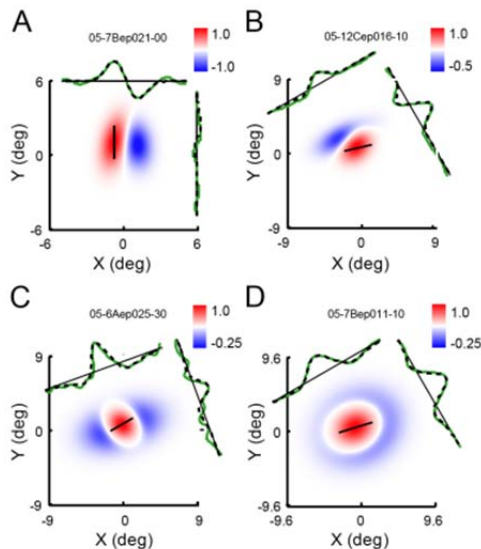


図3：V1細胞のテクスチャー受容野。赤が黒線の方位（傾き）を持つ縞模様に対して興奮性、青が抑制性の領域。Aの細胞は図1の画像に対して反応すると予測されます。

○これまでに得られた成果

上記の研究では、単眼のテクスチャー受容野のみを計測してきましたが、大多数の視覚野細胞は両眼性です。つまり、左右どちらの目からも入力を受けており、ステレオ視による立体視や奥行き知覚等に貢献している可能性があります。しかし、両眼のテクスチャー反応特性に関しては、細胞レベルでの研究はほとんどありません。

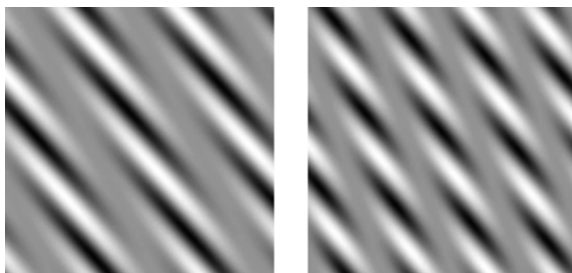


図4：両眼のテクスチャー受容野を調べるための視覚刺激：様々な組み合わせで左右の目に刺激を提示する。

そこで、図4の様な両眼刺激を用いて、テクスチャーがどのように立体視情報の表現にかかわってい

るかを調べています。左右眼のテクスチャー受容野がこの刺激を使った実験により得られており、中には左右で受容野構造が異なる細胞も見られました。

また、別の研究ではV1細胞の空間周波数選択性の外にある周波数からの刺激の影響（興奮および抑制）を調べました。（Ninomiya et al. JNP 2012）

過去の研究では、V1細胞は空間周波数に関しては単純なバンドパス特性を持つ線形フィルターの様な物であると考えられてきました。一方、周期的な物理表面が持つ光沢感などは、多くの空間周波数成分の間の何らかの非線形的相互作用に担われていることが予想されます。この研究では、V1細胞の通常のパスバンドの外にある空間周波数成分が細胞の反応にどのような影響を与えているかを、両眼を同時に刺激し細胞の活動レベルを上げることで抑制的な反応も検出し易くする新手法により調べました。多くの細胞で、興奮性のパスバンドの外から主として抑制性の影響が見られ、その周波数はパスバンドのそれよりも高い場合も低い場合もありました。従来は検出が難しかった空間周波数間の相互作用が存在することから、この結果はV1細胞は単純な線形フィルターでは無いことを意味しています。

○今後の計画

現在進行中の実験には、上記のテクスチャー両眼受容野の研究の他に、フェーディング錯視の反映と見られる順応現象をV1細胞の活動で調べています。このため、心理物理学的な実験と電気生理学的な実験を組み合わせた研究を準備中です。また、光沢情報が視覚野細胞の反応にどのように含まれているかを探るため、刺激パターン中に含まれる周波数成分の位相に着目した刺激提示とデータ解析を行っています。この実験ではV1だけでなく、より高次の視覚野についても解析を行う予定です。

○関連する研究発表

論文

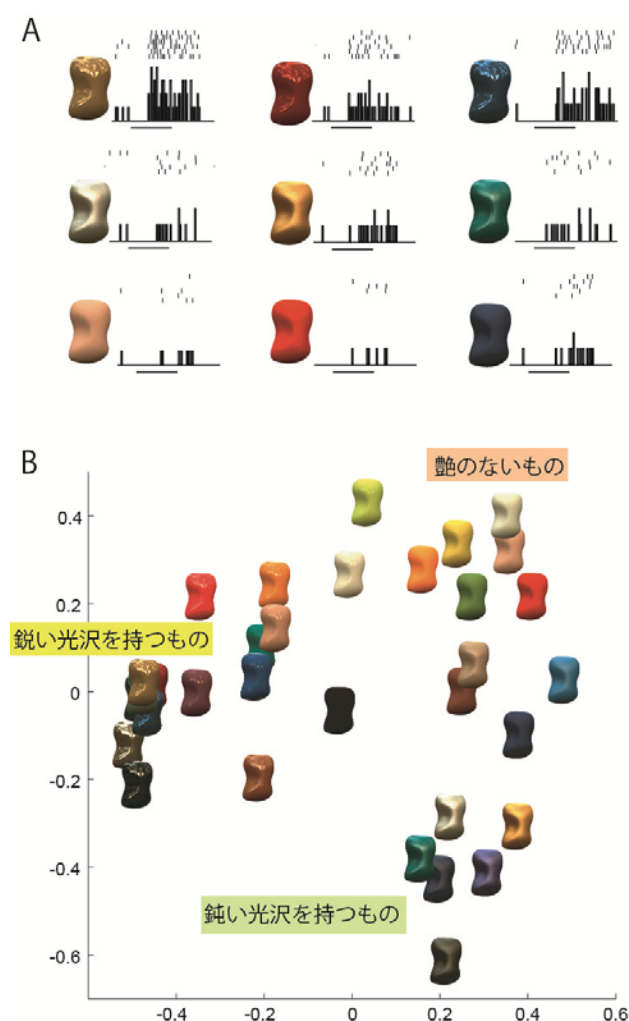
1. Ninomiya T, Sanada TM, Ohzawa I. Contributions of excitation and suppression in shaping spatial frequency selectivity of V1 neurons as revealed by binocular measurements. *J Neurophysiol.* 107(8):2220-2231, 2012.
2. Tao X, Zhang B, Smith EL 3rd, Nishimoto S, Ohzawa I, Chino YM. Local sensitivity to stimulus orientation and spatial frequency within the receptive fields of neurons in visual area 2 of macaque monkeys. *J Neurophysiol.* 107(4):1094-1110, 2012.

研究代表者 小松 英彦

(自然科学研究機構 生理学研究所・教授)

研究分担者 一戸 紀孝 (国立精神・神経医療研究センター・部長)

郷田 直一 (自然科学研究機構 生理学研究所・助教)



図の説明：光沢に選択性を示すサルの下側頭皮質ニューロンの活動。Aは一つの光沢選択性ニューロンの9個の刺激に対する応答を示している。鋭い光沢を持つ刺激（上段）に強く応答し、鈍い光沢の刺激（中段）や艶の無い刺激（下段）には反応していない。Bは57個の光沢選択性ニューロンが集団としてどのように異なる光沢を表現していたかを多変量解析で示したものの。異なる種類の光沢が系統的に表現されている様子がわかる。

○研究の背景

私たちはある物体を見た時に、その物体の表面がどのような状態であるか、例えばざらざらしているのかつるつるしているのか、或いは硬いか柔らかい

かを瞬時に認知することができます。このような物体の表面状態を認知する機能は、物体を作る素材の識別や物体の手触り或いは鮮度といった質感認知の基本となる機能です。物体表面の持つ光沢はこのように物体の表面状態を認知する上で重要な役割を果たす性質です。光沢については多くの光学的研究や心理物理学的研究が行われてきましたが、どのような脳内機構で光沢を見分けているかについてはほとんど知られていません。

我々のグループは主に視覚における質感認知の脳内機構を対象として研究を進めています。ヒトやマカクザルの脳で素材の識別の仕組みや、物体表面の状態の認知の仕組みについて研究を行うと共に、一戸グループでは脳溝の少ないマーモセットの利点を生かして、脳の表面から多点同時記録を行い素材識別に関係する情報のマッピングを進めています。それらの研究の中からここではマカクザルの下側頭皮質で光沢を見分ける仕組みについて行った研究を紹介したいと思います。

○この研究の目指すもの

視覚情報は階層的に構成された大脳視覚皮質で、徐々に単純な情報が統合されて生物的に意味のある複雑な情報が取り出されていくと考えられています。質感についても同様に階層的な処理が行われて、生物にとって重要な質感の情報が高次視覚領野で抽出されると考えられます。我々のグループではまず高次視覚領野に焦点をあてて物体表面の重要な特性である光沢や素材を見分ける神経活動を探ることから研究を始めています。そのような神経活動を手がかりとして、光沢や素材を見分けるための情報が視覚系でどのように取り出されてくるのか、またそれらの情報が物の価値判断や行動にどのように用いられるのか、といった質感認知の全体像に迫る研究に発展させることができると考えています。同時に視覚における質感認知の処理が視覚以外の触覚や聴覚における質感認知とどのように脳の中でつながっているのか、また質感認知に関わる神経ネットワークはどのように構成されているのか、といった問題の解明もこの研究の目指しているところです。

○これまでに得られた成果

光沢を見分ける仕組みについて研究を行うためには、まず様々な表面反射特性を持つ統制された刺激

を作る必要があります。光沢に関わる表面反射特性の主要なパラメータには鏡面反射の強さ (ρ_s)、拡散反射の強さ (ρ_d)、鏡面反射の広がり (α) の三つがあり、コンピュータグラフィクス (CG) のプログラムでリアルな CG 画像を作るために用いられています。鏡面反射は入射光が物体表面で鏡のように反射される成分で、強い方向性を持ちます。 ρ_s は鏡面反射の強さを表します。一方拡散反射は表面に入射した光が、物体内の色素などで吸収や散乱を受けたのち物体外に出ていく成分で、あらゆる方向に反射が起こります。 ρ_d は拡散反射の強さを表します。また鏡面反射は強い方向性を持ちますが、表面に微小な凸凹が存在すると反射光の方向がばらつきます。 α は鏡面反射の方向の広がりを表します。我々はこれら三つのパラメータ (ρ_s 、 ρ_d 、 α) の様々な組み合わせで作られたさまざまな光沢を持つ刺激セットを用いて、サルの下側頭皮質から記録したニューロンの応答を調べました。その結果、下側頭皮質の中央部の上側頭溝とよばれる溝の中の皮質に、特定の表面反射特性の刺激に選択的に応答するニューロンが存在することを見出しました¹。

図Aにはそのようなニューロンの一つについて、9個の刺激への応答の例を示しています。このニューロンは鏡面反射が強くはっきりしたハイライトを持つ物体画像によく反応しました。色に関わりなく鋭い光沢のある刺激に応答しており色は選択性には無関係であることが分かります。どのような光沢を持つ刺激に強く応答するかはニューロンによって異なっていました。また形の違う物体や異なる照明環境に物体を置いた時の画像を用いても光沢選択性は保たれており、この段階では物体の反射特性の情報が、物体の形や照明環境からある程度分離されて取り出されているものと考えられます。

この実験で記録された57個の光沢選択性ニューロンが集団としてどのように光沢を表現しているかを多変量解析の手法を用いて調べました。図Bには刺激の間の距離関係がニューロン集団の応答の強さの違いを反映するように、刺激を2次元に配置した結果を示しています。図に見られるように、鋭い光沢を持つ刺激、鈍い光沢を持つ刺激、艶の無い刺激といった異なる刺激が規則正しく配置される結果が得られました。このことは下側頭皮質の光沢選択性ニューロンが様々な光沢を系統的に表現できる性質を持っていることを示しています。

上で述べた研究では下側頭皮質のニューロン活動のみを調べていますが、表面反射特性の情報が視覚経路のどの段階で取り出されるかを調べるために、視覚野全体の活動を可視化できる機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を用いた実験も行っています²。この実験では光沢をもつ物体画像を呈示した時と、光沢の無いコントロール画像を呈示した時にサルの脳活動を fMRI により計測し比較を行いました。コントロール画像は画像を構成する基本的な要素である局所的

な空間周波数成分のパワーやコントラストは光沢刺激と同じにそろえ、位相をでたらめにすることによって光沢を無くしたものです。その結果予想されたように下側頭皮質の限局した部位で光沢刺激に対して強い応答が見られましたが、驚いたことに一次視覚野でも光沢をもつ画像で強い活動が観察されました。本領域班員の西田や本吉らのグループは光沢知覚に関わる画像特徴を調べた心理物理実験から、比較的単純な画像統計量である輝度ヒストグラムの歪度 (skewness) が光沢知覚に関係することを報告すると共に、歪度が初期視覚野の処理で検出できることを示すモデル化も行っています (Motoyoshi et al. Nature 2007)。我々の fMRI 実験の結果は、そのような処理が実際に一次視覚野でなされていることを示しているのかも知れません。

○今後の計画

物体の表面状態認知の重要な要因である光沢の情報 が脳内でどのように表現されているかの一端が明らかになりました。今後はこれらのニューロン活動が光沢知覚とどのように関係しているのかを明らかにしていくことが必要です。また初期視覚野でどのような画像特徴が検出され、それがどのような処理を経て高次視覚野で我々が見出したような異なる表面反射特性に対する選択性が形成されるのかを明らかにすることも重要です。

また昨年度のニュースレターで紹介した素材識別に関する研究も継続して進めています。これまでの研究で素材識別が腹側視覚経路に含まれる領野で行われており、初期領野と高次領野で素材の識別に使われる情報が違うことが明らかになっています。しかし画像に含まれるどのような視覚特徴が異なる素材を識別するのに用いられているかは明らかになっていません。そこで今後の研究ではさまざまな質感の識別に関わる画像特徴を解明していく研究を進めたいと考えています。また腹側高次視覚野では知覚的な印象と対応する表現が行われていると考えられますが、このような表現は非視覚的な情報とも関係が深く、例えば見ただけで触った感じが分かるといった質感認知の重要な性質を反映していると考えられます。そのような異種感覚を統合した知覚の形成に経験や学習がどのように関わっているのかといった問題も今後調べていく予定です。

○関連する研究発表

1. Nishio A, Goda N, Komatsu H: Neural selectivity and representation of gloss in the monkey inferior temporal cortex. J Neurosci 32(31):10780-93, 2012.
2. Okazawa G, Goda N, Komatsu H: Selective responses to surface gloss in the macaque visual cortex revealed by fMRI. Neuroimage, 63(3): 1321-1333, 2012.

研究代表者 本田 学

(独立行政法人国立精神・神経医療研究センター神経研究所・部長)

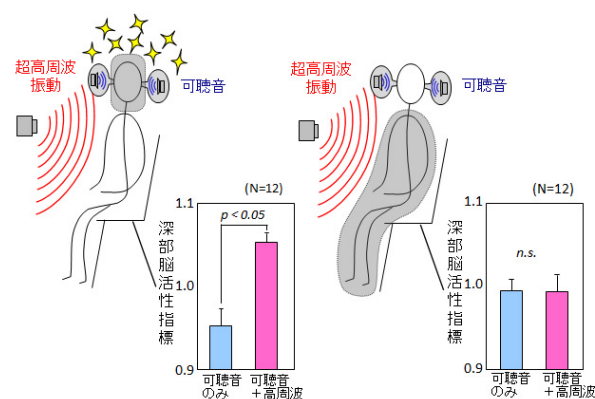


図 超音波振動の受容部位を検討しました。昨年度に開発した脳幹報酬系の活動状態を間接的に評価することが可能な脳波指標を用いて、首より下の体部に超音波を呈示したとき脳幹報酬系回路の活性化が起きますが（左）、頭部のみに呈示したときには同様の活性化がおこらない（右）ことを明らかにしました。

○研究の背景

脳に入力される感覚情報は、視覚・聴覚といった感覚モダリティごとに固有の分析が行われる一方で、全ての感覚モダリティの情報が感性・情動神経系で統合されて、快・不快や美醜などの価値判断が行われます。その中で質感認知の感性的な側面は極めて重要な働きをしています。

私たちの研究グループはこれまでに、人類の遺伝子が形成された有力な候補である熱帯雨林の自然環境音や、さまざまな文化圏の楽器演奏音などが、人間の可聴域上限の20 kHzをはるかにこえミリ秒単位で複雑に変化する超音波成分を豊富に含むことを見出しました。加えて、こうした超音波成分を含む音は、同じ音から超音波成分を除外した音と比較して、音響情報の質感認知に伴う感性反応（感性的質感認知）を統計的に有意に向上させることを発見しました。また、被験者に与えるストレスをできるだけ低いレベルに抑えるよう可能な範囲で最適化した脳血流計測手法を用いて、音を聴取しているときの脳活動を評価してみると、超音波成分を含む音を聴いている時には、同じ音から超音波成分のみを除外した音を聴いている時に比較して、脳幹、視床、視床下部から前帯状回および前頭前野に伸びる神経ネットワークが活性化されることを見出し、報酬系神経ネットワークが関与する可能性を示唆し

ました。以上の現象をハイパーソニック・エフェクトと名付けました。同時に、視覚情報についても、視覚弁別能を超えた高精細映像は、それよりも精細度の低い映像と比較して、感性的質感認知を有意に向上させることを示しました。

○この研究の目指すもの

質感認知と感性・情動反応との間には密接な関係が存在するにもかかわらず、現在急速に拓かれつつある質感認知研究の大部分は、それぞれの感覚モダリティに固有の情報処理を対象としていて、質感認知に対する感性・情動神経系からのアプローチは大きな空白地帯となっています。本研究では、ヒトの感性的質感認知に関わる神経基盤を明らかにするため、これまでに以下の研究を推進してきました。

①感性的質感認知研究に最適化した脳機能計測システムと手法の構築

私たちがこれまでに開発した超小型ポジトロン断層撮像装置 PET-Hat を用いて、大型装置に被験者を拘束するのではなく、人間にあわせて装置が動く低拘束型の脳機能計測手法を構築する。また、感性的な侵襲性の低い脳波をもちいて、報酬系神経系の活性を反映するパラメータを検討しました。

②感覚情報の信号構造のパラメータと感性的質感認知に関わる感性・情動神経系との関連

私たちが発見したハイパーソニック・エフェクトを対象として、音の感性的質感認知を向上させ、報酬系の神経活動を活性化するために必要な信号構造のパラメータを検討しました。

○これまでに得られた成果

①感性的質感認知研究に最適化した脳機能計測システムと手法の構築

自発脳波とファンクショナル MRI との同時計測を行い、快適性の指標として用いられることの多い脳波アルファ波パワーのうち、周期25秒以上の緩やかなアルファ波パワーの変動成分が、視床内側核、中脳腹側部、前帯状回などの報酬系神経回路の活動と相関することを見だし、報酬系神経活動の代用指標として使用できる〈簡易深部脳活性指標〉を開発しました。

一方、うつ病の症状が重い人は、周囲の世界が、コントラストのはっきりしない、鮮やかさに欠けた、生き生きとした楽しさがない世界として見えているという報告があることから、心理的な抑うつ状態が報酬系神経ネットワークを含む深部脳の活動低下を

引き起こし、質感認知に関わる感性・情動反応を低下させている可能性が示唆されます。

そこで、うつ病と診断された外来患者を対象として、開発した〈簡易深部脳活性指標〉の計測と、状態不安の程度を示す心理検査 STAI を行い、両者の関連を調べました。

報酬系神経ネットワークを強く活性化する実績をもつ、超高周波成分を豊富に含む音響情報をうつ病患者に呈示しながら、〈簡易深部脳活性指標〉を計測し、音響情報呈示の前後で心理検査 STAI を実施しました。その結果、まず、呈示時間が長くなるにつれて〈簡易深部脳活性指標〉が顕著に上昇し、確かに報酬系神経ネットワークの活性化が導かれていることが示されました。また、音響情報呈示前に比べて呈示後の方が、STAI により評価した被験者の状態不安が顕著に改善しました。さらに、〈簡易深部脳活性指標〉と STAI により計測した状態不安尺度との間には、強い負の相関が存在することが、高い統計的有意性をもって示されました。このことは、報酬系神経ネットワークを含む深部脳の活性が高いほど、状態不安の程度が低くなることを示すものと考えられます。

②感覚情報の信号構造のパラメータと感性的質感認知に関わる感性・情動神経系との関連

一般に 20 kHz を超える空気振動は、耳小骨の機械的特性によって鼓膜から内耳に伝達されないことが知られています。私たちはこれまでに、人間の可聴域上限をはるかにこえる超高周波成分を含む音が感性的質感認知に影響を及ぼすにあたり、超高周波成分の受容部位について検討をおこない、耳（気導聴覚系）ではなく耳以外の身体が関与している可能性を見いだしました。これに関連して、Martin L. Lenhardt らは、音響情報の感性的質感認知を導く超高周波振動は、眼球から頭蓋内に入り、髄液を介して脳を振動させるのではないか、という独自の仮説を提唱しています。そこで、Lenhardt らによる眼球伝導説も視野に入れて超高周波振動の身体受容部位を検討するため、可聴音をイヤホンから、超高周波振動をスーパーツィータからそれぞれ独立して呈示し、超高周波振動を人間の首から上の頭部に呈示した場合と、首から下の身体に呈示した場合とに分けて、超高周波振動の有無による効果の違いを、上記で開発した〈簡易深部脳活性指標〉を用いて調べました。

その結果、超高周波振動を首から上の頭部に呈示したときには〈深部脳活性指標〉の変化が見られず、首から下の身体に呈示したときには、超高周波振動の付加によって〈深部脳活性指標〉が統計的有意に増大することが明らかになりました。この結果は、感性的質感認知を引き起こす報酬系神経ネットワークの活性化は、首から下の身体に超高周波振動を呈示した場合により強力に導かれることを示しており、少なくとも Lenhardt の眼球伝導説を裏付けるもの

ではなく、身体の皮膚または体表面で超高周波振動を受容している可能性を示唆するものと考えられます。

○今後の計画

PET-Hat をもちいた計測システムを整備するとともに、今回見いだした報酬系神経ネットワークの活動を反映する脳波指標とをもちいて、周波数や複雑性といった信号構造のさまざまなパラメータと報酬系神経ネットワークとの関連を明らかにしていきます。また、印加する情報構造と情動神経系との直接の因果関係をより詳細に調べるため、動物を用いた脳内神経伝達物質の計測が有効であると考えられます。そこで、動物を用いた *in vivo microdialysis* 法により、様々な情報構造をもった音響情報を呈示し、呈示される音情報と脳内のドーパミン遊離量との関係などを検討する予定です。これらにより、音響情報による感性的質感認知の基盤となる情動神経系活性化の分子メカニズムがより詳細に解明されることが期待されます。

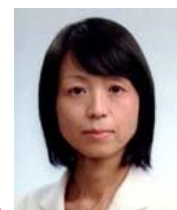
○関連する研究発表

1. Yamamoto S, Honda M, Oohashi T, Shimizu K, Senda M: Development of a brain PET system, PET-Hat: A wearable PET system for brain research. IEEE Transactions on Nuclear Science 58(3):668-673, 2011.

2. Oohashi T, Kawai N, Nishina E, Honda M, Maekawa T, Morimoto M, Yagi R, Ueno O: Vibration generating apparatus and method introducing hypersonic effect to active fundamental brain network and heighten aesthetic sensibility. United States Patent, US 8167826 B2, 2.17, 2012.

ヒトの質感認知の脳神経メカニズムに関する臨床的研究

研究代表者 鈴木 匡子（山形大学大学院医学系研究科・教授）



図：素材・図形弁別と素材呼称

- パソコンを用いて、図形／素材弁別課題（ふたつが同じかどうかを判断）と素材呼称課題（何の素材かを答える）を行った。
- 両側後頭葉に病巣のある患者は素材の弁別、素材の呼称ともに不良だが、図形の弁別は良好であることが分かる。

○研究の背景

私たちは日常生活で物を見分ける時に、形や色だけでなく、質感（素材の光沢やみずみずしさなど）を参考にします。たとえば、新鮮な野菜と古くなった野菜を見分けるには質感の違いが手がかりになります。この質感の認知にヒトの脳のどの部分が深く関わっているのかは、ほとんど分かっていません。

○この研究の目指すもの

脳血管障害、脳腫瘍などでは脳の一部の機能が低下してしまいます。そのような患者さんで質感認知の機能に異常があるかどうか調べることによって、脳のどの部位が質感認知に特に重要かを知ることがで

きます。質感認知障害の起きやすい部位が分かれば、障害を予測しながら検討を進めることによって、早期から日常生活での対応を考え、効率的なリハビリテーションをすることができます。

この研究は、質感認知に関わる脳部位を明らかにし、障害のある患者さんによりよい対応ができるようにすることを目的としています。

○これまでに得られた成果

8名の脳損傷患者さんにご協力いただき、質感認知について検討しました。ものの素材は質感をもとに区別されます。そこで、素材が同じかどうかを見分ける機能（素材弁別）、素材が何であるか名前を言う機能（素材呼称）を調べ、形が同じかどうか見分ける機能（図形弁別）と比較しました。

その結果、両側の後頭葉に脳損傷のある患者さんで質感認知に著しい障害がみられました。この患者さんの図形弁別は正常でした。他の部位に損傷のある患者さんでは、質感認知はほぼ保たれていました。

したがって、ヒトの質感認知には両側の後頭葉が特に重要な働きをしていることが分かりました。

また、質感認知障害のある患者さんでは、口に入れるまで食物が何か分からないなどの戸惑いがありましたが、症状を説明し、家族の言語によるヒントを多くすることによって対応することができました。

○関連する研究発表

学会発表など

1. Suzuki K, Uno Y: Neuronal Bases of Texture Discrimination and Identification, The 2012 International Neuropsychological Society Mid-Year Meeting, Oslo, Norway, 6.27-30, 2012.

聴皮質における音の質感と情動情報の神経基盤

研究代表者 高橋 宏知（東京大学先端科学技術研究センター・講師）

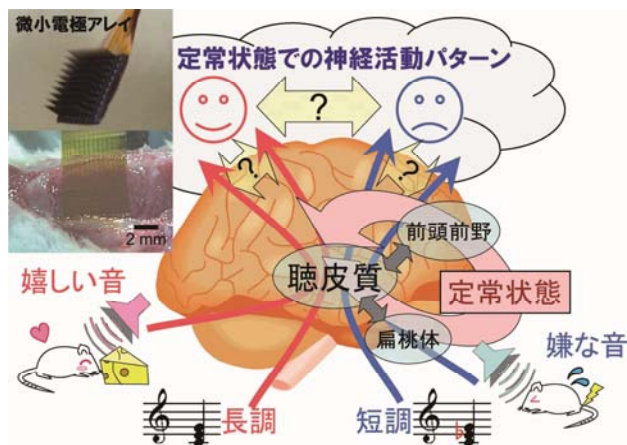


図 研究構想：聴皮質による情動的な音情報処理

○研究の背景

任意の純音を組み合わせると和音を作ると、豊かな質感が生まれます。例えば、異なる周波数の音のうなりで、協和音と不協和音の質感が生じます。また、周波数の倍音構造は様々な音色を生み出します。さらに、長調や短調といった調性のように、特定の周波数構造の音には情動的な質感も生じます。

音の質感の識別、さらには、質感による情動的な情報の伝達は、ヒト固有の特徴ではなく、進化の過程で獲得されてきた可能性があります。実際に、実験動物は、長調と短調を識別できるし、協和音と不協和音の質感も識別できます。また、威嚇と服従時の声の調子には、種に関わらず共通性が認められ、それぞれ、長調と短調の特徴が該当します。したがって、このような音の質感には、脳内表現が存在すると考えられます。

○この研究の目指すもの

本研究は、このような音の質感の脳内表現を解明するために、電気生理学的な手法を用いて、ラットの聴皮質を研究対象とします。聴皮質は、前頭前野、扁桃体、線条体など様々な領域と直接的な結合をもつことで、知覚や情動的な情報処理に決定的な影響を与えており、質感情報の表現にも深く関わっているはずです。実際に、話声の情動的な情報は、聴皮質の活動パターンから予測できます。

従来の動物実験では、聴皮質の情報表現を解明するために、音刺激提示後から数 100 ms 以内の一過性の反応が盛んに調べられてきました。この反応は、視床から皮質への入力を中心に反映しています。しかし、実際の知覚は、この一過性の反応の後に皮質内

の情報処理で生じます。この情報処理では、連続した音刺激に対して、聴皮質内の神経活動は定常的になるはずです。本研究では、そのような定常的な神経活動を解析対象とします。

本研究の目的は、ラットの聴皮質を対象にして、音の質感とそれに付随する情動が、どのような神経活動パターンとして表現されているかを明らかにすることです。

○これまでに得られた成果

任意の音に対して、情動的な価値（報酬または恐怖）をラットに学習させた後、その聴皮質の反応がどのように変化するかを調べました。その結果、音の顕在性と情動価は、それぞれ、短い時間スケールの一過性反応と長い時間スケールの定常反応に表現されていることがわかってきました。

ミスマッチ・ネガティビティ反応（MMN）は、音提示後、150 ms 程度と比較的短い潜時において、刺激音列内の識別可能な音の変化に対して、無意識的に出現する反応です。条件付けにより、任意の音に対して、報酬を連合しても、恐怖を連合しても、MMN は増加しました。一方、その音を単に暴露し、情動的な価値を付加しないと、MMN は小さくなります。このように、MMN は音の珍しさと情動的な顕在性の両方、すなわち、音の顕在性に依存します。

また、報酬または恐怖で条件付けすると、音提示中に聴皮質の神経反応において、振幅は小さくなり、位相同期は強くなることがわかりました。特に high-gamma 帯域（高周波数帯域）の神経反応の位相同期は、恐怖条件付群で報酬条件付群よりも強くなりました。これは、音の情動価は、聴皮質において、数秒オーダーの長い時間スケールで定常的な神経反応に反映されていることを示唆します。

○関連する研究発表

論文

磯口知世, 阿久津完, 野田貴大, 神崎亮平, 高橋宏知. 聴皮質の定常的な神経活動における音情報のデコーディング. 電気学会論文誌 C 電子情報システム部門誌, 132 (10): 印刷中, 2012.

学会発表など

高橋宏知. 聴覚野での情動情報の表現. 電子情報通信学会技術研究報告, 112 (112), pp. 19-22, 2012 (電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 室蘭, 2012 年 6 月 30 日).



図 ミラーハンド錯覚：鏡に写った手の像が、鏡の裏にある、対側の手のように感じられる。

○研究の背景

私たちは、手や指で身の回りにある様々な物体に触れて、その形態や材質、質感などを知覚しています。このように、手や指を能動的に動かして触知覚を得ることを、アクティヴタッチといいます。アクティヴタッチは、物体の識別や道具の使用、またハグやスキンシップといった非言語的なコミュニケーションにとって、たいへん重要です。

アクティヴタッチによる物体の質感知覚には、指からの触覚情報が重要であることは言うまでもありません。しかし最近の研究では、人間の知覚は単独の感覚ではなく、複数の感覚情報が相互作用をして成り立っていることが明らかになりつつあります。とりわけ、受動的な触覚刺激の知覚は、視覚の影響を強く受けることが知られています。しかし我々の日常生活では、能動的な触知覚、すなわちアクティヴタッチを行なう機会の方がはるかに多く、また重要です。そこで私は、アクティヴタッチによる質感知覚も視覚の影響を受けて変化するのかどうかについて調べました。そのためには、ある物体に触知している時、指からの触覚は同一でありながら、物体が押されてへこんだり、変形したりする場面だけが変化するという、現実世界では起こりえない条件を作り出す必要があります。そのためこの実験では、ミラーハンド錯覚という現象を利用しました。上の図のように、体の正面に設置した鏡の表側に左手を、裏側に右手を置きます。この状態で鏡を見つめると、鏡に写った左手の像が右手の位置に重なって、本当の右手のように感じられます。これを、ミラーハンド錯覚といいます。この錯覚を利用すれば、右手の触覚と視覚（本当は左手の鏡像）を、実験的に分離して操作することが可能になります。

○これまでに得られた成果

今回の実験では、左の図のようなスポンジのパッドを指で触知し、その硬さを評定する課題を行いました。スポンジパッドは同じ材質の布で包装されており、外見からは硬さの区別がつきません。左手では硬い・柔らかい・中間の硬さのスポンジを、鏡の裏側の右手では常に中間の硬さのスポンジを押してもらい、右手で知覚されるスポンジの硬さを答えてもらいました。すると、硬いスポンジが押されている鏡像を注視している時は右手で触れているスポンジも硬く感じられ、柔らかいスポンジが押されている鏡像を観察すると右手も柔らかいスポンジに触っているように感じられることがわかりました。目をつぶって同じ操作を行なうと、右手では中間の硬さのみ知覚されました。また、被験者は実験中、左手の鏡像を本当の右手と感じていました。これらのことから、右手で知覚される硬さは、異なる硬さのスポンジが押されている鏡像の影響を受けて変化することがわかります。すなわち、アクティヴタッチによる硬さ知覚には、触覚に加えて視覚情報も重要な役割を果たしていることが示唆されました。

○この研究の目指すもの

なぜこのような現象が生じるのでしょうか。ひとつの可能性は、我々の脳には、感覚入力の際に予想に反するような不一致が見出された場合、判断の停止や混乱が生じないように、何とか合理的な解釈をして身体の平衡を保とうとする機能があるのではないかと、ということです。その場合、今回の実験結果によれば、少なくとも触覚と視覚の間では、視覚の方が優先されるようです。触覚や視覚、聴覚などさまざまな感覚による質感知覚の背景には、こうした脳の適応的な働きがあるのかも知れません。私は次のステップとして、こうした機能が脳のどこで行なわれているのかを、機能的MRI実験などを通して明らかにしてゆきたいと考えています。

○関連する研究発表

1. 勝山成美, 吉澤英之, 齋藤綾, 臼井信男, 泰羅雅登 (2012) 視覚情報がアクティヴタッチによる硬さ知覚に与える影響. 第63回知覚研究会, 2012年1月16日, 東京都.
2. 勝山成美, 館枝里子, 臼井信男, 吉澤英之, 齋藤綾, 泰羅雅登. アクティヴタッチにおける視覚情報の影響. 第35回日本神経科学大会 (平成24年9月19日 名古屋市).

皮質脳波記録法を用いた視覚学習に伴う脳機能マップの可塑性の検証

研究代表者 川寄 圭祐（新潟大学大学院医歯学系研究科・助教）

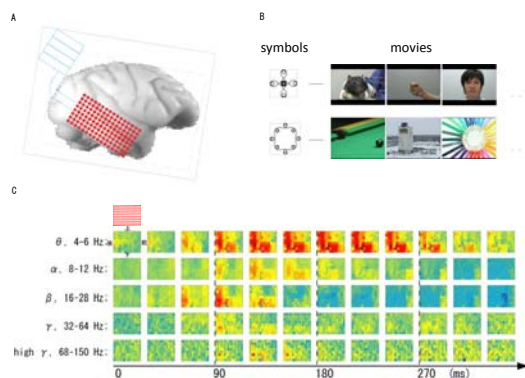


図 記号による動物・非動物動画のカテゴリ分け課題と皮質脳波法による神経活動伝搬の可視化：(A)サル下側頭葉皮質における皮質脳波法の模式図 (B)動物・非動物動画のカテゴリ分け課題に用いた記号と動画 (C) 周波数成分ごとの神経活動の伝搬様式

○研究の背景

霊長類の大脳皮質下側頭葉には特定の種類の物体の形（顔、体など）や色を専門的に処理する部位が存在します。これらの専門モジュールの機能単位と考えられているコラム構造、ドメイン構造などの機能マップが認知学習を習得する際にどのような変化を引き起こしているのでしょうか？高次認知学習による神経回路の変化をとらえるためには、高い時間・空間的分解能で長期間安定に脳活動を計測する必要があります。従来の単一細胞記録法は高い時空間分解能をもつ代わりに、長期の学習期間中、同一神経細胞あるいは同一の神経細胞集団から安定に記録することは非常に困難で、また空間的に広い範囲から同時に記録することも容易ではありません。そこで本研究では大脳皮質の広い領域から長期間にわたり高時空間分解能で記録が可能な皮質脳波（Electrocorticogram (ECoG)）法をサル下側頭葉皮質に適用して、質感の知覚、情報処理の経験依存的な側面を明らかにすることを試んでいます。

○この研究の目指すもの

- ①ECoG法によって上側頭溝を含む下側頭葉皮質の視覚モジュールマップを高い時空間分解能で同定すること、
- ②サルが訓練によって、色、形、動きを組み合わせで作りだされる新規物体カテゴリ学習を習得できるか行動学的に検証すること、

③学習に伴う機能マップの変化を同定すること、を具体的な下位目標としました。

○これまでに得られた成果

①について、下側頭葉皮質での長期 ECoG 法を確立して、広範囲における視覚応答の伝搬様式を高時空間分解能で可視化することに成功しました。視覚応答は、いくつかの速度、方向の異なる神経活動伝搬が複数回繰り返す様子として捉えられました。これまで、形態学的研究、あるいは単一細胞の応答潜時を調べた研究などから視覚モジュールは階層的な視覚情報処理によって形成されていくと示唆されてきましたが今回の結果は視覚モジュール形成過程において、階層的処理に加え、動的な繰り返し現象が重要であることを示唆しています。また応答の時間周波数解析によって 30-100Hz 程度の比較的高い周波数成分に形と動きのモジュールが見出されました。②について、ニホンザル 1 頭に記号を使った動物・非動物動画のカテゴリ分け課題を訓練し、合計 30 個の動画と 2 つの記号の組み合わせを習得させることができました。初学習の動画セットを学習後、新規動画セットを訓練するとより早くカテゴリ分けを習得することがわかりました。今後、記号の意味がどの程度汎化しているかを検証していきます。③について、繰り返し見慣れた動画と新規動画に対する時間周波数応答に差があることがわかりました。広範囲記録を行うと下側頭葉皮質の中でも記録部位によって差の様相が違ってくるわかりました。今後は学習、汎化の進み具合によって見出された脳活動の差がどのように変化していくか検討していきます。

○関連する研究発表

論文

1. Matsuo T, Kawasaki K, Osada T, Sawahata H, Suzuki T, Shibata M, Miyakawa N, Nakahara K, Iijima A, Sato N, Kawai K, Saito N, Hasegawa I: Intracortical electrocorticography in macaque monkeys with minimally invasive neurosurgical protocols. *Frontiers in Systems Neuroscience* 10.3389/fnsys.2011.00034, 2011.

学会発表など

1. 川寄圭祐, 松尾健, 長 貴宏, 澤畑博人, 鈴木隆文, 柴田昌宏, 宮川尚久, 中原潔, 佐藤昇, 川合謙介, 齊藤 延人, 長谷川 功: マカクザルにおける脳溝内皮質脳波記録. 日本神経科学大会, 横浜, 9.15-18, 2011.

実物体を用いた質感脳過程の研究

～多角的脳イメージングによる機能・構造・生化学解析～

研究代表者 山本 洋紀（京都大学大学院人間・環境学研究科・助教）

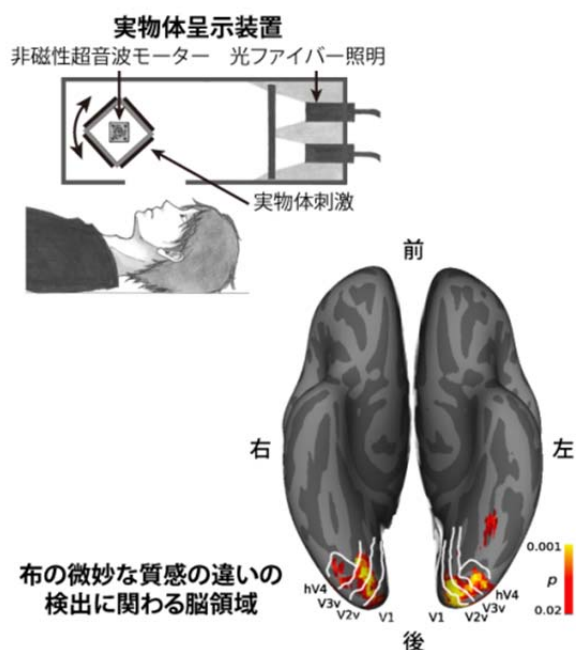
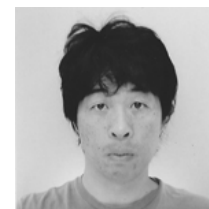


図 左上：横から見た実物体呈示装置の概念図。直方体の4面に実物体刺激を貼り、超音波によるモーターの駆動で刺激を切り替えることができる。
右下：脳の下側から見た、布の微妙な質感の違いの検出に関連すると考えられる領域。

○研究の背景

近年のコンピューターグラフィックス（CG）技術の発展により、実物の写真と見まがうほどにリアルな画像を容易に作り出すことが可能になっています。とはいえ、カシミアの起毛感や赤ちゃんの柔肌のような微妙な表面の質感を再現するには至っていないのが現状です。事実、建築やデザインの現場では、未だに現物合わせが主流です。これは実際の質感と画像上で再現した質感の間に埋め切れない差があることを物語っています。

これまでの脳研究では、視覚刺激をCGを使って液晶モニターやプロジェクターで呈示するのが一般的でした。これでは、上述の微妙な質感の本質に迫ることはできません。そこで、映像ではなく、実際の物体を呈示する実験装置を開発し、リアルな質感を知覚している時の脳過程を明らかにしようというのがこの研究の出発点です。

○この研究の目指すもの

微妙な質感の知覚に関わる脳過程を明らかにするために、この研究が用いるのはMRIと呼ばれる医療

機器です。大きな病院でよく見かける、一般に脳や身体の高解像度断層写真撮影に用いられているものです。MRIは放射線を用いないということで、被曝に対する安全性が確保されている一方で、非常に高い磁場環境（日本で計測される地磁気の数万倍）に晒されます。これ自体は人体に有害なものではなく、特に問題はないのですが、磁場の影響を受けるものを一切使うことができないという制約があります。このため、左図（左上）にあるような、実物体呈示装置の作成には工夫が必要です。多面体の各面に実物体を貼り付けて呈示面を切り替える時、通常の電氣的に駆動するモーターは使えません。そこで、この研究では、超音波で駆動する非磁性のモーターを用いて、この制約を克服しています。

また、実物体表面は日中戸外に相当する非常に明るい光ファイバー照明で照らしています。そのため、より自然環境に近い状況で実物体の微妙な質感を観察できます。この装置を用いて、従来の映像では実現できないような高質感刺激を用いて、私たちの脳のどこでどのような活動が生じるのかを明らかにしていきます。

○これまでに得られた成果

実物体呈示装置の開発と実証試験を終え、素材の異なる布地を刺激として、微妙な質感の知覚に関わる脳領域を調べる実験を行いました。用いた布刺激はいずれも、画像や写真ではただの同じ黒色の布としか認識できないような、互いに微妙に質感の異なる布地です。実験の結果、大脳下面の色覚関連野の前方にある領域が質感の違いの検出に関わっている可能性が示されました（左上の図の右下部分を参照）。今後は布地以外の実物体にも展開していきます。更に、質感知覚に関連する脳領域の生理学的基盤を明らかにするために、神経伝達物質の濃度や脳内の神経線維の構造等を多角的に調べていきます。

○関連する研究発表

論文

1. 山本洋紀：表面の色と質感の知覚：脳研究の展開。繊維機械学会誌 せんい 64(8):13-19, 2011.
<http://hdl.handle.net/2433/152404>

学会発表など

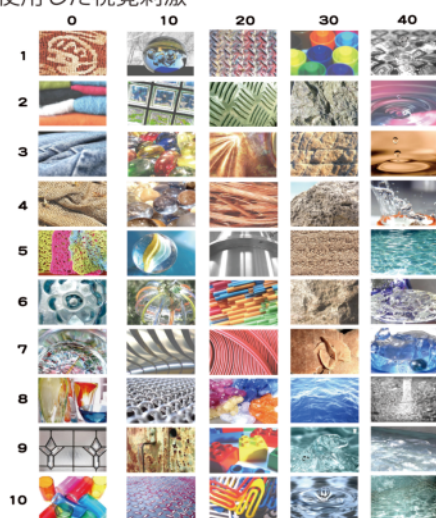
1. 山城博幸, 川島康裕, 村瀬智一, 山本洋紀, 市村好克, 梅田雅宏, 樋口敏宏. 非磁性超音波モーターを用いた実物体刺激呈示装置のfMRI適合性評価, 日本視覚学会 2011年夏季大会, 福岡, 8.3-4, 2011.



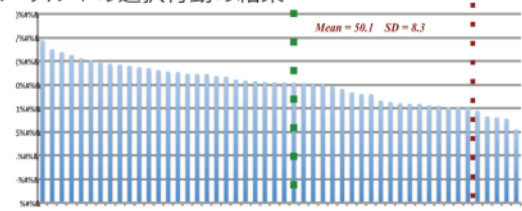
1. 使用した課題



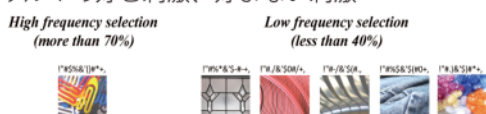
2. 使用した視覚刺激



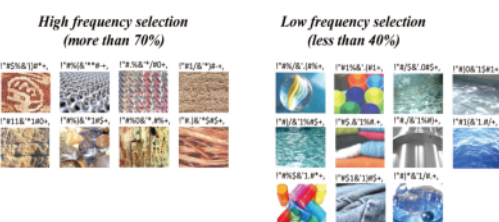
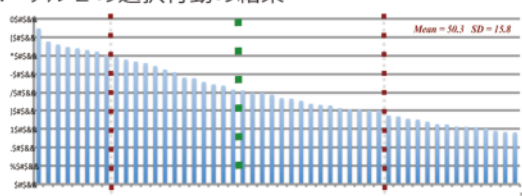
3. サル1の選択行動の結果



4. サル1の好む刺激、好まない刺激



5. サル2の選択行動の結果



○研究の背景

気に入った風景の場所に行けば、何時間でもそこに佇んでいられるし、気に入った音楽ならば何度聞いても飽きません。好きな絵画、好きな風景、好きな音楽は、私たちの情動系に働きかけ、心地よさ、快感、喜びなどの positive な感情を生み出します。しかし、同じ絵画や彫刻であっても、表面の明るさ、色味、光沢、粗さなどを変化させると、印象が変化し、好みも変化します。本研究では、物の質感の変化がその選好性にどのような影響を与えるのかと、このような選好性の変化を生じる神経メカニズムを、特に前頭葉眼窩部の働きに注目して、明らかにしようと試んでいます。

○この研究の目指すもの

視覚刺激のどのようなパラメータ（明るさ、色合い、光沢、鮮明さなど）が刺激の選好性に関わるのかを行動実験により決定するとともに、このようなパラメータを変化させた時に観察される前頭葉眼窩部ニューロンの応答変化との相関を検討することにより、刺激選好性を生じさせる神経メカニズムを探ります。

○これまでに得られた成果

FMD Database の中から 50 枚の図形を選択し、眼球運動を利用した図形選択課題を用いて、図形の選好性を行動学的に検討しました。特に、どの刺激要素が選好性に影響するかを決定するため、元図形を加工した図形を作成し、同一図形の色付き条件 vs モノクロ条件、細密条件 vs 粗大条件、輪郭の明確さの異なる条件などでの選好性の比較を 2 頭のサルで行いました。その結果、図形が色付きか否かは選好性に影響しないが、輪郭の明確さは影響し、輪郭の明確なものの選択率が高いことがわかりました。また、全ての図形を使った選好性の検討では、左図のように、選好性は図形に依存すると同時に、個体差の影響も大きいことが明らかになりました。これらの成果をもとに、刺激選好性の発現における前頭葉眼窩部の役割の解明を進めたいと考えています。

○関連する研究発表

論文

1. Funahashi S: Brain mechanisms of happiness. *Psychologia*, 54: 222-233, 2011.

学会発表など

1. Takebayashi M, Funahashi S: Orbitofrontal neurons encode preference for an intrinsic reward that is produced when artificial visual stimuli are seen. 41st Annual Meeting of Society for Neuroscience (Neuroscience 2011) (Washington, D.C.) (2011.11.13)



図1: ラットヒゲシステムを題材とした、触覚による質感の研究において基盤となる三つの課題



図2: 末梢受容器の研究結果の一例

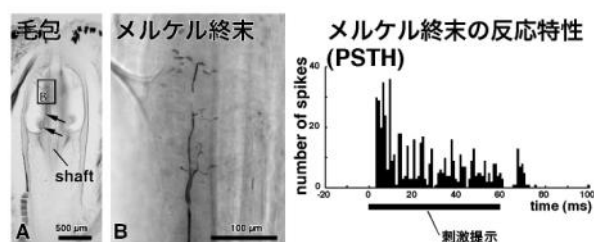


図1は本研究における重要な三つのテーマを示しています。これらの事柄を一つ一つ明らかにして、統合的に考察することにより、触覚による質感認知のしくみを明らかにします。図2は末梢受容器に関する研究結果の一例を示しています。単一のメルケル終末の形態学的特徴を見ると同時に、その終末が刺激提示中に持続的に発火することが分かりました。

○研究の背景

日常生活において我々を取り囲む質感は目や耳や肌を通して伝わってきますが、本研究では特に質感に関わる触覚について研究を行います。我々は物に触れることによって素材の固さや表面の荒さ等を質感として感じます。このような触覚による質感認知のメカニズムを研究するとき重要なのは、我々が物に触れて質感を得る時の多くの場合は我々が手を動かしながら触れているということです。もし手を動かさずに受動的に対象物に接触したとしたら対象物の質感に関して詳しく知ることが難しいのは容易に想像できます。触覚受容器を動かしながら触覚情報を得ることを能動的触知覚といいます。

本研究の題材としてラットのヒゲシステムを利用します。夜行性であるラットではヒゲ感覚が空間認知のための最も優れた感覚系です。ヒゲ感覚器はヒゲとその根元にある発達した神経組織によって構成されていますが、一つ一つの構成要素は人間の皮膚

にある触覚器とほぼ相同のものです。さらに、ラットはヒゲを動かして周囲を探索する行動様式を持つので、ラットヒゲシステムは能動的触知覚の研究題材として非常に適しています。

○この研究の目指すもの

能動的触知覚を伴う質感認知について研究するに際して、三つの基本的なテーマを設定しました。一つは末梢受容器において触覚情報（機械的入力）がどのように神経活動に変換されるかということです。二つ目は、感覚器（ヒゲ）の運動パターンとその制御に関わるニューロンの活動を調べることです。そして三つ目は、覚醒ラットにおいて運動制御と感覚情報が統合される回路の構造を明らかにすることです。我々の先行研究では、運動制御を行う領域が感覚情報処理を行う領域の活動に影響を与えることが示されています(Furuta et al., 2010)。これらのテーマについて電気生理学的手法と形態学的手法を直接的に組み合わせて実験を行います。

○これまでに得られた成果

一つ目のテーマでは、微小電極を用いて単一末梢神経の活動を調べた上で色素を注入しその形態も明らかにしました。これにより末梢受容器の形態学的特徴と反応特性の関係を直接的に調べることが出来ます。末梢受容器が構築する感覚器の構造と情報変換メカニズムの関係が明らかになりつつあります。

二つ目のテーマについて、高速カメラを用いてヒゲの運動をリアルタイム解析するシステムを構築しました。これによりヒゲ運動の長時間にわたる記録が可能になり、ヒゲ運動を制御するニューロンの活動との関連性を明らかにすることができるようになりました。

三つ目のテーマに関して、覚醒状態のラットで神経活動を解析し、また、そのニューロンに色素を注入して形態をも明らかにする実験システムを構築しました。大脳皮質感覚野第6層のニューロンに注目してこの実験を行ったところ、細胞体の位置や軸索の投射パターンによる分類とヒゲ刺激に対する反応特性との間に一定の関係があることが分かりました。

○関連する研究発表

論文

1. Furuta T, Urbain N, Kaneko T, Deschenes M.: Corticofugal control of vibrissa-sensitive neurons in the interpolaris nucleus of the trigeminal complex. J Neurosci 30:1861-1868, 2010.

初期視覚野における質感認知のための異種視覚情報 統合メカニズムの解明

研究代表者 田村 弘（大阪大学大学院生命機能研究科・准教授）

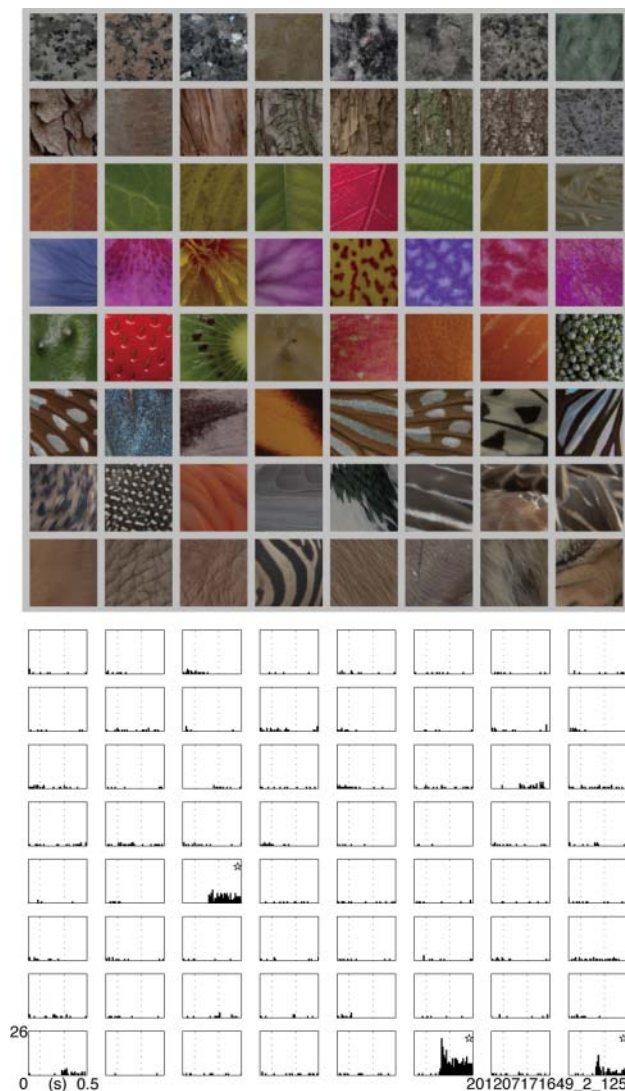


図 上：物体表面画像刺激セット；下：V4 細胞の反応。
横軸：時間（秒）、縦軸：活動電位発火頻度（spikes/秒）、星： $p < 0.01$ (K-W test)。刺激は 0.2 秒呈示。サルの手掌の画像に選択的に反応しています。

○研究の背景

物体の視覚的認識において、物体表面の色や肌理・模様などは重要な手がかりとなります。例えば、森の中でトラを見つける場合、トラの外形輪郭は葉などで隠されるため有効な手がかりとはなりません、体表の一部でも見えれば、我々はその模様からトラであると認識できます。このように物体表面の視覚特徴は物体認識に重要ですが、その脳内処理過程および脳内情報表現様式については不明です。

○この研究の目指すもの

本研究では、霊長類において物体認識に重要な役割を果たす第一次視覚野（V1）、V4、そして下側頭葉皮質（IT）を対象として、表面特徴情報の脳内処理過程と情報表現様式の解明を目指します。表面特徴を構成する様々な視覚要素（色、肌理・模様）の情報が統合される過程に注目して研究を実施します。

○これまでに得られた成果

- 1、物体表面画像刺激セットの作製：自然界に存在する、8 カテゴリー（石、樹皮、葉、花、果実、蝶翅、羽毛、皮）各 8 種類の画像からなる、物体表面画像刺激セットを構築しました（図上）。
- 2、画像特徴量による類似度評価：物体表面画像刺激セットの性質を評価するために、画像解析を行いました。基本的な画像特徴量（明るさ、色、方位、空間周波数成分など）を抽出し、画像間類似度（距離）を求めました。異なるカテゴリの画像間距離と比べて、同一カテゴリ内の距離は近い傾向にありました。今回用いる 64 枚の刺激に関しては、基本的な画像特徴量だけを用いても、ある程度のカテゴリカルな分類は可能となることが明らかになりました。
- 3、心理実験による類似度評価：物体表面画像刺激セットの心理的性質を評価するために、心理実験（SD 法）を行い、心理特徴量に基づいて画像間距離を計算しました。画像解析の結果に比べて、同一カテゴリ内の画像間距離は、より近い傾向にありました。ヒトは画像解析では捉えられない情報も利用して、今回用いる 64 枚の刺激画像をカテゴリカルに分類していることが明らかになりました。
- 4、物体表面画像に対する神経活動計測：実験には 3 頭のニホンザルを用いました。鎮痛・不動化処置を施した状態で、多プローブ・多ニューロン同時計測手法を用いて、用意した 64 枚の刺激画像に対する単一神経細胞の活動電位発火頻度を、V4 の 373 個の神経細胞と IT 野の 275 個の神経細胞より計測しました。物体表面画像に対する選択的な神経活動が V4 野及び IT 野において観察されました（図下）。この実験より、物体表面特徴に関する情報が腹側視覚経路の高次視覚連合野に存在することが明らかになりました。また、例に示す細胞のように個々の細胞は特定の表面特徴に非常に選択的に反応していたことから、少数の神経細胞の活動によって物体表面特徴が表現されている可能性が考えられます。

○関連する研究発表

なし

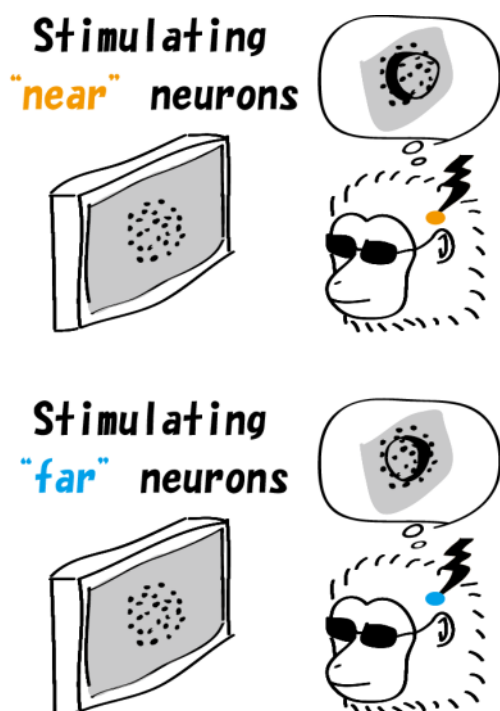


図 V4 刺激実験の概略図

視覚刺激の奥行き判断を遂行中のサルの V4 野に局所電気刺激を与えます。視覚対象が手前にあるときに反応する細胞（Near 細胞）集団を活動させるとサルは刺激が手前に見えると判断し、視覚対象が奥にあるときに反応する細胞（Far 細胞）集団を活動させると刺激が引っ込んでいっていると判断しました。

○研究の背景

大きさの知覚と奥行きの知覚は不可分に結びついています。本年度の研究では奥行き知覚の一側面の神経機構の解明に取り組みました。

顔の正面に目を持つ動物では、右目に映る像と左目に映る像が、ほんのわずかずれています。脳がこの位置ずれ（両眼視差）に基づいて視覚対象の奥行きを計算し、私たちは世界を立体的に知覚します。霊長類ではこの能力が特に鋭敏で、2メートル先に立てた2本の針が前後に4ミリずれた時、どちらの針が手前にあるのかを言い当てることができます。この能力は「微小奥行き視」と呼ばれます。この能力を脳のどこが担っているかは不明でした。

○この研究の目指すもの

本研究では、サルを対象とした実験により、大脳

皮質の V4 野と呼ばれる領域が微小奥行き視を担う責任領域であるかどうかを検討しました。

○これまでに得られた成果

本研究では、画像を立体的に見るためのメガネをかけたサルの V4 野の電気活動を解析しました。その結果、V4 細胞の活動強度が動物の奥行き判断と合致することを見出しました。また、V4 細胞の活動を人為的に変化させると、動物の奥行き判断が影響を受けることを示しました。物体が手前であることを伝える細胞の活動を上昇させると、平らな面を見ている手前に飛び出ていると動物は判断し、物体が注視点より奥にあることを伝える細胞の活動を上昇させると視覚刺激がひっこんで見えると動物は判断しました（図）。つまり、V4 野の活動変化が原因となって、奥行き判断が変わることを証明したのです。

本研究により微小な奥行きを知覚する際に働く脳の実体が判明しました。従来から、両眼立体視の中には、複数の異なった現象が含まれていると考えられてきました。その例の一つが、粗い奥行き視と微小奥行き視です。しかし、両眼立体視は一つであるという考えもあり、知覚心理学の分野で長く論争が続いていました。2000 年代に入り、MT 野が粗い奥行き視に関わるが微小奥行き視には関与しないという証拠が得られました。今回、微小奥行き視は V4 野により担われていることがわかったことから、粗い奥行き視と微小奥行き視は、脳の中の異なった部位が担う2つの現象であることが確定しました。

V4 細胞の性質をさらに解明することで、3D 映像技術の有用な設計指針を得ることができます。これらの指針を得ることで、将来的には、コンピュータグラフィックスを用いた立体映像の作成の際に、より自然な映像を作ることが可能になり、無理な両眼立体視を強いられることで起きていた眼精疲労の軽減を図ることが期待されます。

○関連する研究発表

論文

Shiozaki HM, Tanabe S, Doi T, Fujita I: Neural activity in cortical area V4 underlies fine disparity discrimination. J Neurosci 32(11): 3830-41, 2012.

学会発表

Shiozaki HM, Tanabe S, Doi T, Fujita I: Effects of microstimulation in cortical area V4 on fine disparity discrimination. 第34回日本神経科学大会、横浜、9.16.2011.

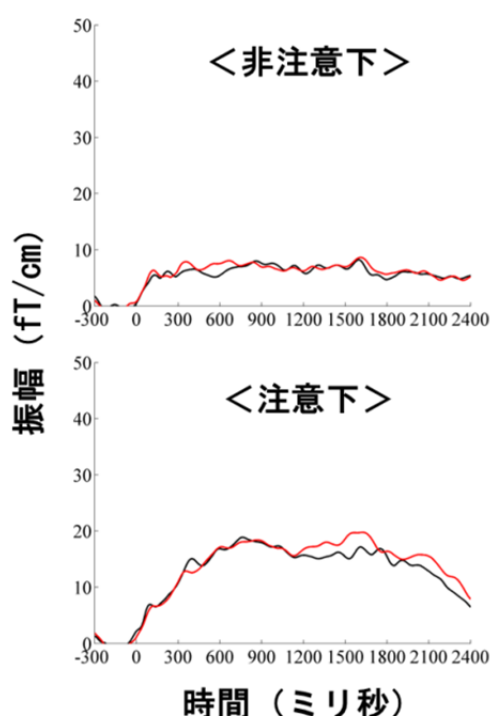
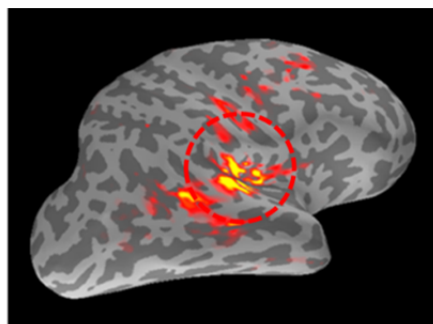


図 二次体性感覚野 (SII) 応答：能動的な触振動周波数の弁別を行った場合（注意下）では、非注意下に比較して活動亢進（振幅の増大）を認めました。横軸は刺激開始時刻 (0) を基準とした経過時間です。

○研究の背景

物体の表面のテクスチャ（手触り）の違いは、表面を触れた時に周波数の異なる触振動感覚入力を生じ、それが物の質感の違いとして認知され则认为られます。このような触覚的な質感は繊細な手先の感覚を必要とする“ものづくり”において特に重要であると考えられます。我々は最新の全頭型脳磁計を用いてこのような触振動弁別に関連して誘発された脳内の神経活動とその活動源について検討しました。

○この研究の目指すもの

振動周波数の異なる触覚刺激を用いることにより物

体表面のテクスチャ（手触り）の違いを擬似的に表現した刺激を行い、触覚的な質感に関わる脳内情報処理の詳細を明らかにすることを目指しました。特にヒトの感覚情報処理において高次の情報処理を担っていると考えられている二次体性感覚野（Secondary somatosensory area; SII）の機能的意義（役割）にこのような質感情報処理が含まれていると予想され、脳磁計を用いて検討しました。

○これまでに得られた成果

右利き健康成人 10 名を対象として実験を行いました。振動周波数 (Hz (=1 秒間の振動回数)) の異なる触覚刺激の提示にはピエゾ型触覚刺激装置 (KGS 社製) を用い、右示指を刺激しました。具体的な刺激方法は、①規則的な周波数の触振動刺激 (20 Hz) と②不規則な周波数の触振動刺激 (12.5-50 Hz で変動) の 2 種類とし、約 15 分間の測定の間にそれぞれの刺激を 100 回以上行いました。前者 (①) は規則的なパターンのテクスチャをもつ物体の質感を擬似的に表現した刺激で、後者 (②) は不整な表面テクスチャをもつ物体の質感を表現した刺激として用いました。各刺激は被験者が予測できないようにランダムな順番で行いました。脳活動の測定には、ミリ秒単位での神経活動の計測が可能で、かつ、ミリ単位の精度で活動源の同定が可能な脳磁計を用いました。各刺激について約 100 回分の反応を平均して解析しました。測定は注意下（毎回の刺激のインターバル（約 1.5 秒の間）で、刺激が①の場合はマウスの左クリックを、②の場合は右クリックを押すように指示）および非注意下（サイレント動画を提示して刺激から被験者の注意を逸らした状態）の 2 条件で行いました。その結果、注意下において振幅の増大を生じる誘発反応を両側半球において認めました。活動源については二次体性感覚野 (SII) に推定されました。この誘発反応は触振動情報の能動的な弁別を反映した成分であると考えられ、推定された活動源である SII は触覚の質感に関わる認知情報処理においての重要な役割を担っていることが今回の研究により示唆されました。

○関連する研究発表

1. Hagiwara K, Ogata K, Hironaga N, Shigeto H, Tobimatsu S: How does the brain represent vibrotactile temporal structure? An SEF study, 18th international conference on biomagnetism, Paris, France. 8,26-30,2012.

質感言語表現における多感覚相互作用： MEGによる脳内表象の解析実現に向けて

研究代表者 檀 一平太（自治医科大学医学部先端医療技術開発センター・准教授）

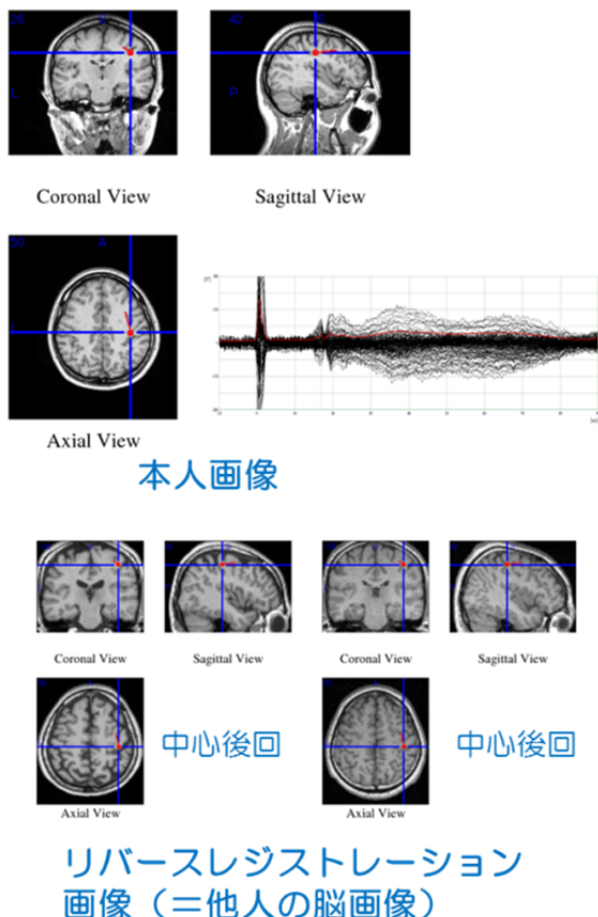


図 本研究の副産物として、リバースレジストレーション法が誕生しました。この方法では、本人の脳画像がなくとも、他人の脳画像を変形して、脳の構造を予測できます。MEGで指の神経を刺激した場合、本人画像では、中心後回という場所に脳活動が検出されますが、リバースレジストレーション法で他人の脳を用いても、下の2例が示すように、やはり、中心後回に活動が検出できました。

○研究の背景

日本語は、多様な質感表現を有する言語です。しなやかな髪、ふわふわのセーター、艶やかな舞、きらめく水面、カリカリの煎餅…。これらの質感表現は、豊潤かつ繊細な言語表現を可能ならしめ、言語としての日本語の質を支えています。

日本語の質感表現に最も特徴的なのは、オノマトペ（擬音・擬態語）の豊富さです。その数は、欧米語の3－5倍程度と推定されています。オノマトペには、人や動物の声を模した擬声語（例：ギャー、

けらけら、わんわん）、物音を模した擬音語（例：がたがた、バキッ、かんかん）、物事の様態を表す擬態語（どろどろ、けろっと、すいすい）、心理状態を表す擬情語（わくわく、どっきり、はらはら）があります。

はたして、様々なオノマトペの背景に存在する質感はどのように生まれるのでしょうか？個々の質感表現独自の脳内の働きが存在するはずです。しかし、質感語が脳内でどのように処理、表現されているかについてはいまだ明らかにされていません。

○この研究の目指すもの

本研究では、質感を言語表現の背景に潜む脳の働きを探索します。このため、オノマトペの脳内表象の基本原理を、MEG（脳磁計）による脳機能イメージング法を用い、解明を試みます。解析の対象としては、「さくさく」、「ぱりぱり」といったABAB型のオノマトペに的を絞ります。ABAB型のオノマトペは日本語に頻発します。この要因は、3、4文字目の反復によって、ABで表現される語感の印象が高まるためと考えられます。そこで、MEGによって、繰り返しに敏感な脳反応を探索します。

○これまでに得られた成果

ところが、本研究の推進に際して、技術的な問題が生じました。MEGによる脳機能データの時空間解析では、実験参加者のMRIが必要です。ところが、震災の影響により、病院のMRI稼働率が下がり、MRIによる画像データ取得が困難となっていました。参加者のMRI画像なしでのMEG信号源推定は困難です。この問題を解消するために、他人の頭を参加者の頭の形に変形して代用するという「リバースレジストレーション法」を考案しました。この結果、参加者のMRIが入手困難な場合でも、MEGデータの信号源推定が可能となりました。本質的にはMRIの取得が望ましくのですが、次善の策として、極めて有用な手法が誕生しました。思いがけない研究の副産物といえるでしょう。

○関連する研究発表

特許

発明者：檀一平太、續木大介、渡辺英寿

発明の名称：経頭蓋脳機能解析方法

出願日：2012年4月19日

出願番号：特願2012-95838

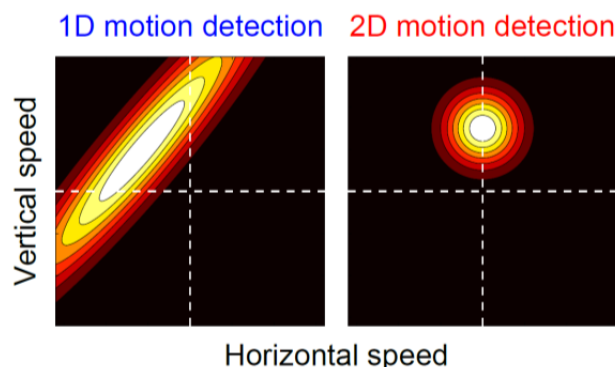


図 ランダムドットのように多くの時空間周波数成分や方位成分を含んだ刺激を様々な速度で動かした場合、1次元運動、2次元運動のどちらを検出するかで反応パターンが異なります。MT野ニューロンは正しく2次元運動を検出できます。

○研究の背景

実験室で行われる研究の多くは人工的な刺激を使用しています。しかし、現実世界での脳機能を理解するにはリアルな刺激を用いる必要があります。本研究では人工刺激と自然画像を用いた運動視研究のギャップを埋めることで、質感脳情報処理の理解を目指します。

これまでの運動視の研究では、時空間周波数や方位の統合によって正しい運動方向や速度が検出できるとされていました (Simoncelli & Heeger, 1998)。実際、大脳皮質 MT 野では約 1/3 のニューロンで物体の正しい運動方向や速度が検出できていることが報告されています (Rust et al., 2006 など)。しかし、この説を支持するほとんどの研究は時空間周波数成分や方位成分が限られた視覚刺激 (grating や plaid) に依存した結論であるうえ、この議論は剛体の並進運動にしか適用できません。我々は最近ランダムドットを用いて、より多くの時空間周波数成分や方位成分を含んだ刺激では、MT 野ニューロンはより正しく真の運動方向・速度を検出できる可能性を示しました。この結果は、限局した時空間周波数成分や方位成分を持つ刺激を用いた実験だけでは自然界での真の運動視の理解は得られない可能性を示している、自然界での動きを分析するための、より複雑なメカニズムが存在することを示唆します。

○この研究の目指すもの

本研究では、自然界での運動視メカニズムに迫る

ため、自然画像を用いた運動視研究を展開します。まずは、多くの時空間周波数や方位の成分を含んだ刺激の並進運動の検出方法を理解します。さらに、剛体の並進運動以外の運動検出の理解にも挑戦します。

○これまでに得られた成果

本研究では、従来、運動視の計算過程を調べるために用いられた視覚刺激と、自然画像やそれに近い視覚刺激への反応の違いを明らかにし、1次元運動から2次元運動への変換過程の解明を目指します。具体的には、大脳皮質 MT 野と V1 からニューロン活動を記録し、従来の運動視研究で用いられてきた grating や plaid 刺激、ランダムドット刺激に対する反応を測定しました。それぞれの刺激を様々な方向に様々な速さで動かしたときの反応を解析し、視覚刺激の2次元運動を抽出できるのか、あるいは1次元運動しか抽出できないのかを検証しました。その結果、ほぼ全ての MT 野ニューロンはランダムドット刺激では2次元運動を抽出できるのに対し、plaid 刺激では約 1/3 のニューロンしか2次元運動の抽出ができないことを解明しました。これは、同一ニューロンで測定した場合でもそうであり、多くの時空間周波数成分や方位成分を含んだ刺激では、MT 野ニューロンはより正しく真の運動方向・速度を検出できることを示しています。V1 ニューロンでも少数の細胞で同測定を行った結果、ランダムドット刺激では2次元運動を抽出できない可能性が示されました。このことは、V1 から MT 野への変換過程で、従来の方位の統合による2次元運動の検出に加えて、2次元運動の検出のための非線形処理が存在する可能性を示唆します。

○関連する研究発表

論文

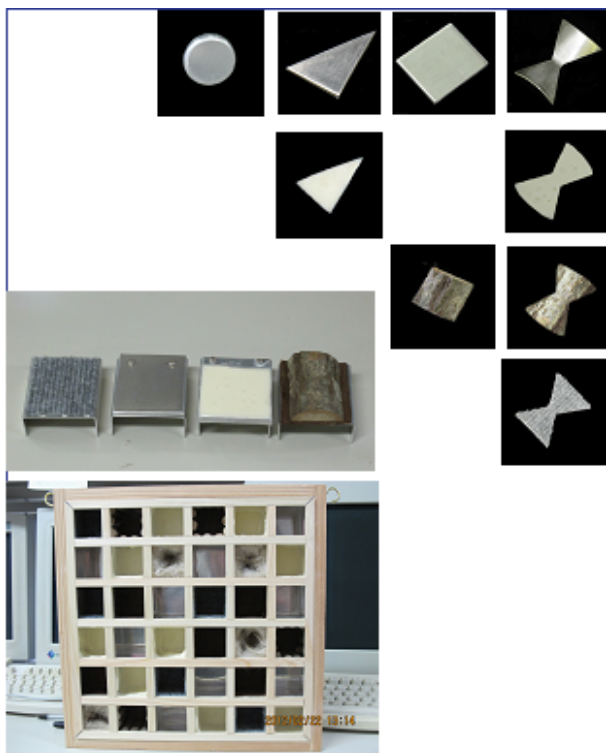
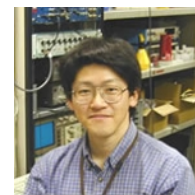
1. Kumano H, Uka T: Reduction in receptive field size of macaque MT neurons in the presence of visual noise. J Neurophysiol 108:215-226, 2012.

学会発表など

1. Kumano H, Uka T: Quantification of direction-speed tuning and its relationship with pattern motion selectivity in macaque area MT, The 33rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Kobe, Japan, Nov 3, 2010.

モデル動物としてのサルにおける質感認知の研究

研究代表者 伊藤 南（東京医科歯科大学・保健衛生学研究科・教授）



○図の説明（上から）テレビに表示される刺激は形（列）と素材（行）の手がかりを含みます。動物は素材を貼り付けたレバーを押すことで回答します。えさ箱を小さく仕切って内部に素材を貼り付けます。

○研究の背景 私たちが物体を識別する時には、輪郭線が表す物体の形と物体表面の素材感や質感が重要な手がかりとなります。しかし、そうした素材感や質感が脳でどのように表現されているのかは未だによく分かっていません。私たちはサルに代表されるモデル動物を用いて、一つ一つの神経細胞がこうした素材感や質感にどのように反応するのかを明らかにし、その情報処理の一端を明らかにしようと考えています。素材感の表現を考える上で注意すべき点は（１）素材の識別の手掛かりには曖昧な要素が大きく個人差が大きいこと（２）素材感の中には金属、布、プラスチック、紙といった人工的な素材が対象となっていることです。従ってモデル動物から記録を行う前に、まずその動物が実際に質感の情報を知覚し利用しているかどうか、利用しているとしたらそれはどのような情報なのかを明らかにすることが、メカニズム解明の重要なステップとなります。

○この研究の目指すもの 素材識別がヒトに固有のものか、あるいは学習を通して生まれた後で獲得する能力なのかという疑問に答えるために、素材の質

感を識別するようにサルを訓練します。識別成績を心理物理学的手法により解析して、動物がどのような情報を質感の知覚に利用しているのかを明らかにします。その結果をもとに、動物が質感の情報を利用している最中に、視覚前野（V2、V4）の神経細胞の活動を記録して、質感情報の中間処理のメカニズムを明らかにします。私たちはこれまで輪郭線情報の中間処理がゆるやかな加算処理によることを示してきました。これらの研究成果を合わせることで視覚情報の中間処理の様子を明らかにすることを目指しています。

○これまでに得られた成果 現在、4種類の素材（金属、布、樹皮、ゲル状プラスチック）に絞って、これらを識別するようにニホンザルを訓練しています。

（１）毎日数時間、テレビに表示した刺激を4個のレバーを押し分けて識別するように訓練しています。レバーの表面に4種類の素材を貼り付けて、動物が視覚と触感の両面から4種類の素材の違いを学ぶようにします。（２）えさ箱を3x3cmの小部屋に仕切り、その内部に4種類の素材を貼り付けました。動物は仕切内に置かれたえさやレーズンを探しながら食べることで日常的にこれらの素材に触れることとなります。まず形により刺激を区別するように訓練した後で、形の要素を除いて素材により刺激を区別するように訓練しています。現在、樹皮と布の刺激については素材による区別の正答率が90%を越えています。一方、金属とゲル状プラスチックについては素材で区別させると混同する傾向があります。これはテレビの画質が十分でなく、刺激が同じように見えることが一因ではないかと考えています。4択の識別が可能であることが分かりましたので、記録実験に向けて、素材を手がかりとした視覚刺激の識別がより確かなものとなるようにさらに訓練を継続しているところです。

○関連する研究発表 論文

1. Ito M and Goda N Mechanisms underlying the representation of angles embedded within contour stimuli in area V2 of macaque monkeys. *European Journal of Neuroscience* 33:130-142, 2011.

学会発表など

1. Ito M., Asakawa K. Selectivity for the spatial arrangement of two half-line components of angles within contour stimuli in area V2 of the macaque visual cortex. 北米神経科学学会大会 (Neuroscience 2011), Washington D.C., 2011.

研究代表者 南本 敬史

(放射線医学総合研究所 分子イメージング研究センター・チームリーダー)

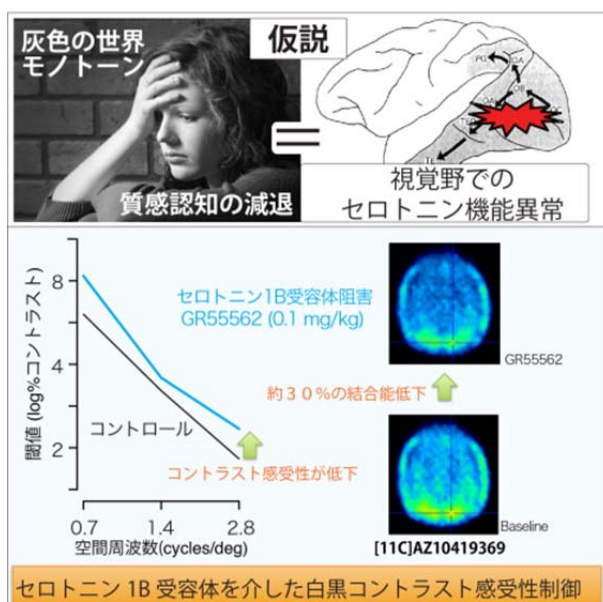


図 上: うつ病における質感認知の減退が視覚野のセロトニン機能異常によるという仮説。下: 行動データと PET による視覚野のセロトニン 5-HT_{1B} 受容体結合能評価。1B 受容体阻害により、コントラスト感受性が低下しました。

○研究の背景

うつ病を患うと、「見るもの全てが灰色に見える」かのごとく、主観的にネガティブな質感認知をされると言われています。近年、うつ病の患者において、コントラストに対する感受性低下が生じていることが客観的に示されました。このことは、うつ病により単に患者さんの主観が変わるだけでなく、視覚野における情報処理に何らかの障害が生じた結果、質感認知のひずみを引き起している可能性を示すものです。神経伝達物質の一つセロトニンが脳内で不足していることがうつを引き起すと考えられていますが、質感認知障害との関わりは不明です。

○この研究の目指すもの

この研究は、うつ病に伴う質感認知の障害が視覚野におけるセロトニン機能異常によって生じているという仮説を検証して、質感認知の分子・神経メカニズムの解明に貢献することを目指します。そのために、研究代表者が開発したサル認知課題とサルうつ病モデルを中心に、PET イメージング法、行動薬理実験などを融合した研究を展開します。

○これまでに得られた成果

3頭のマカクサルにコンピュータ画面の信号が赤るか緑になれば、握っているバーを放すよう、成功報酬として液体報酬を与え訓練しました。報酬量を2段階用意し、Gabor パッチの縞の方向が縦だと報酬大、横だと報酬小のように縞の方向を報酬の手がかり刺激としました。サルは必ずしもこの手がかり刺激を気にする必要はありませんが、成功報酬が小さいと分かると、やる気が低下して、反応時間が延長したり、バー放しをしない試行の割合が増加します。縦縞と横縞の Gabor パッチ(白黒コントラスト比が8段階、空間周波数が3段階)をそれぞれ大報酬、小報酬の手がかり刺激として、やる気に差が出る白黒コントラスト閾値を同定しました。テスト直前に、セロトニン 5-HT_{1B} 受容体の阻害剤 GR55562、またはセロトニン 5-HT_{2A} 受容体の阻害剤 MDL100,907 のいずれかを筋肉内投与し、生理食塩水を投与後の行動と比べることで、これら受容体の機能を検証しました。

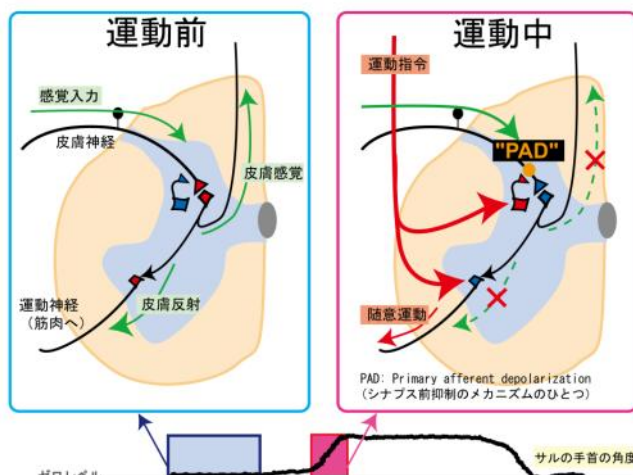
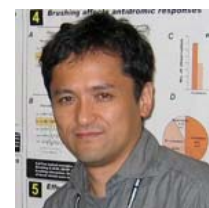
5-HT_{1B} 受容体の阻害した場合、コントラストの検出閾値が上昇し(図1左下)、感受性の低下が確認されました。一方、5-HT_{2A} 受容体を阻害した場合、行動に差が見られず、検出閾値には一貫した影響は観察されませんでした。

さらに 5-HT_{1B} 受容体アンタゴニストリガンド [¹¹C]AZ10419369 を用いた PET スキャンを行い、baseline と比較して、結合能を測定したところ、GR55562 の同投与量下で約 30%の結合能の低下が観察されました(図1右下)。また 5-HT_{2A} 受容体のアンタゴニストリガンド [¹⁸F]Altanserin を用いた場合、MDL100,907 の同投与量下で 80%以上の結合能の低下が確認されました。

以上の結果から、白黒コントラスト感受性制御がセロトニン 5-HT_{1B} 受容体を介して行われているという視覚認知機能の分子メカニズムが明らかとなりました。また、約3割の 5-HT_{1B} 受容体阻害により、感受性の低下が生じることが分かりました。うつ病において、脳内セロトニンレベルの低下によりセロトニン 5-HT_{1B} 受容体の活性が低がり、コントラスト感受性の低下を引き起し、「見るものが灰色に見える」というようなネガティブな質感認知を引き起していると考えられます。

○関連する研究発表

なし



動が必須となります。また、様々な物体の形状を判断するためにも、多様な手の運動が必要となります。多様な接触運動はそれぞれ異なった様式で手の受容器を刺激するので、多様な体性感覚を生んでいるはずです。しかし、不思議な事に我々は物体へのどのようなやりかたで接触しても同一の質感を感じる事ができるのです。これは実際に行った運動の内容によって受容器から受けた感覚入力が校正されているためだと考えられていますが、その脳内機構はわかっていません。

○この研究の目指すもの

そこで本研究では体性感覚による質感認知に必要な「運動と感覚の相互作用」を生み出す神経メカニズムを明らかにします。具体的にはニホンサルに手を用いた運動を行わせて、その際に末梢感覚神経からの脳や脊髄への入力がどのように変化するかについて調べます。これまでの研究から、皮膚感覚については、運動中に広範な脳部位で抑制されていることがわかってきました。そこで現在は、物体の大きさ・柔らかさなどの知覚に重要だと考えられる深部感覚が運動中にどのような制御を受けるかについて、実験を行なっています。

○これまでに得られた成果

この実験から、皮膚感覚と筋感覚は手の運動中に異なった様式で制御されていることが明らかになってきました。つまり、運動中に皮膚感覚入力は抑制される一方、一部の深部感覚は抑制が小さくなるという逆のパターンが認められました。このことは、積極的に外界に働きかけて、手指の感覚によって物体の質感を認知する場合、認知したい質感情報に最適な受容器からの感覚入力を積極的に取り込むようなメカニズムが脳内に存在していることを意味しています。

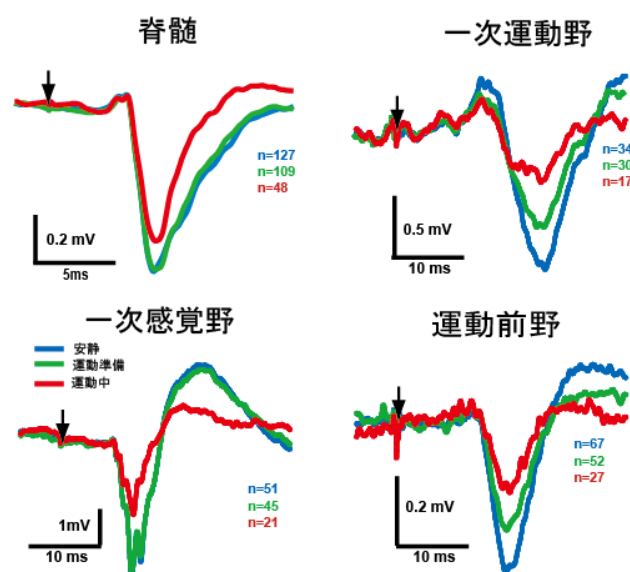
○関連する研究発表

Seki, K. and Fetz, EE.: Gating of Sensory Input at Spinal and Cortical Levels during Preparation and Execution of Voluntary Movement. *Journal of Neuroscience*, 32(3): 890-902, 2012.

図 上：運動は新たな末梢感覚信号を生み、それは常に脳神経の活動に影響を与えます。しかしそのような感覚入力は受動的なものでなく、運動中に能動的な制御（シナプス前抑制）を受けています。下：そのような能動的制御は脊髄や大脳皮質における触覚刺激に対する感受性に影響を与えていることが分かりました。

○研究の背景

体性感覚によって物体の質感を認知するためには、まずその物体へ手を伸ばして接触する必要があります。つまり、体性感覚による質感認知のためには運



脳情報復号化とデータ・マイニング技術による 脳内質感情報表現の抽出

研究代表者 宮脇 陽一（電気通信大学先端領域教育研究センター・准教授）

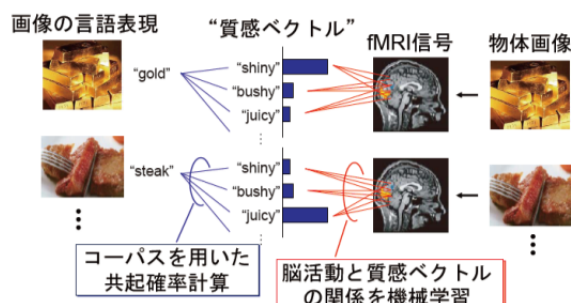


図 テキスト・マイニングを用いた画像―質感関係の解析手法。間接的ではあるが、網羅的かつ定量的に、質感と脳活動の関係を解析することを目指します。

○研究の背景

ヒトは、物体を見るだけで、その物体の質感を知覚できます。質感の知覚は、その物体の素材や状態を判断し、その価値を認識することにつながります。したがって、質感の知覚は、ヒトが生物として生存していく上でも大変重要な機能のひとつとして考えられます。

このように画像から得られた質感の情報は、主に、脳の視覚を司る部位（視覚野）で表現されていると考えられていますが、その詳しい仕組みはこれまで分かっていません。

質感の情報がどのように脳内で表現されているかを調べるのが難しい原因のひとつは、様々な質感をもった画像を実験的に作り出すことが難しいことによります。いくつかの質感は、画像の単純な操作によって作り出すことができることが最近分かってきましたが、そのような例は非常に少数であり、限定的です。世の中にあふれる多様な質感がどのように脳内で表現されているかを知るためには、多様な質感を網羅的に扱う新しい実験および解析手法が必要です。

そこで本研究では、質感を陽にコントロールした画像を使った実験を行うのではなく、ありふれた自然な画像を観察した時の脳活動を計測すると同時に、画像からそれに関連する質感要素を抜き出すデータ・マイニングを行い、計測された脳活動と抜き出された質感要素の対応関係をコンピュータに学習させる新しい研究手法を提案し、実践しています。

○この研究の目指すもの

本研究では、自然な画像を用いて、そこから質感要素を抜き出すことを行うため、多様な質感を網羅

的に扱うことが可能になります。第一の目標は、この利点を生かし、多様な質感に対応する脳内表現を網羅的に調べることです。第二の目標は、多様な質感それぞれが、脳内でどのような関係性をもって表現されているのかを調べることです。

本研究の大きな特徴のひとつは、多様な質感を言語を介して表現することにあります。画像から受け取る質感の印象は、修飾語を用いてシンプルに表現することが可能です（「ピカピカした車」など）。また、ある特定の画像にはある特定の修飾語が付きやすいが、別の修飾語はつきにくいといった性質があります（車には「ピカピカした」は付きやすいが、「ヌメヌメした」はつきにくい修飾語です）。コーパスと呼ばれる辞書データを用いることで、どのような物体にはどのような修飾語が付きやすいかの確率（共起確率といいます）を求めることができます。この確率を計算することにより、一般的な物体を、それとくっつきやすい修飾語の確率の集合として定量化することができます。これにより、一般的な物体画像を質感の側面から数値化できるので、画像を見たときの脳活動と質感との対応関係を計算機で求めることができるようになります。

○これまでに得られた成果

これまでの実験により、画像データベースから選んだ 420 カテゴリの物体画像を用いて、それらと共起する 1000 程度の形容詞を同定することができました。また、これらの画像を観察しているヒトの脳活動（fMRI 装置で計測）から、その画像に対して、それぞれの形容詞が共起するかどうかを計算機プログラムに学習させ、ある程度予測できることが分かって来ました。

今後は、それぞれの形容詞の共起を脳活動から予測する計算機プログラムの学習結果を分析し、多様な質感形容詞の脳内表現を詳細に調べ、それぞれの質感同士の関係性の解析をさらにすすめます。

○関連する研究発表

学会発表など

1. 宮脇陽一. 脳情報復号化技術を用いた高次視覚機能へのアプローチ、第 14 回ヒト脳機能マッピング学会、2012 年 7 月 6 日（北海道）.
2. 宮脇陽一. 脳情報復号化技術と視覚情報の疎表現、第 40 回日本磁気共鳴医学会大会、2012 年 9 月 6・8 日（京都府）.

領域の活動 ～公開シンポジウムなど～

○「質感脳情報学 キックオフシンポジウム」(2010 年 9 月 25 日 東京大学山上会館)

計画研究代表者の質感認知に関係するこれまでの研究と研究計画の紹介を行い、本領域が質感の科学的研究の場として活動を開始したことを社会にアピールした。

〈プログラム〉

新学術領域「質感脳情報学」のねらい 小松英彦(生理学研究所、領域代表)

セッション A 質感の計測と表示に関わる工学的解析と技術

- ・「カメラを通して実世界を読み解く」佐藤いまり(国立情報学研究所)
- ・「光の制御で質感に迫る」日浦慎作(広島市立大学)

セッション B 質感認知に関わる感覚情報の特徴と処理様式

- ・「質感知覚：心理物理実験によるアプローチ」西田真也(NTT コミュニケーション科学基礎研究所)
- ・「質感を見分ける熟練者：真珠鑑定を例に」中内茂樹(豊橋技術科学大学)

セッション C 質感情報の脳内表現と利用のメカニズム

- ・「高次元空間から実世界を見る視覚野細胞たち」大澤五住(大阪大学)
- ・「素材や質感を見分ける脳の働きを探る」小松英彦(生理学研究所)
- ・「聴こえない音が生み出す音の質感：ハイパーソニック」本田学(国立精神・神経医療研究センター)

○新学術領域合同シンポジウム「リアリティを生み出し現実世界と関わる脳の働き」(2011 年 8 月 24 日 神戸国際会議場)

包括脳夏のワークショップのイベントとして、本領域が企画し他の2つの新学術領域「学際的研究による顔認知メカニズムの解明」「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」と合同で開催し、本領域から4名の班員が発表した。

〈プログラム〉

- ・「脳は質感をどう捉えるか：感性の計算論的理解に向けて」本吉勇(NTT コミュニケーション科学基礎研究所)
- ・「脳のリズムとコミュニケーション」山口陽子(理化学研究所 脳科学総合研究センター)
- ・「顔認知のメカニズムと発達」山口真美(中央大学)
- ・「脳情報復号化を用いた高次知覚へのアプローチ」宮脇陽一(ATR 脳情報通信総合研究所)
- ・「自閉症児は世界をどのように見ているか」中村克樹(京都大学霊長類研究所)
- ・「コンピュータビジョン技術による質感のモデル化」佐藤いまり(国立情報学研究所)
- ・特別講演「視覚選好判断の行動・神経対応」下條信輔(カリフォルニア工科大学)
- ・「顔の記憶における情動・社会的認知の効果とその脳内機構」月浦崇(京都大学)
- ・「質感情報の脳内表現を探る」小松英彦(生理学研究所)

○企業との合同研究集会「質感研究の応用に関する意見交換会」(2011 年 10 月 3 日 学術総合センター)

質感に関わる研究開発を行っている企業内研究者に対して班員4名が発表を行い、質感認知の基礎的研究の重要性を示した。

〈プログラム〉

- ・「質感脳情報学紹介」小松英彦(生理学研究所)
- ・「熟練者の質感評価：真珠の光学特性と質感評定」中内茂樹(豊橋技術科学大学)
- ・「皮革テクスチャ生成への試み」宮田一乗(北陸先端科学技術大学院大学)
- ・「形状と反射の関係を再考する」日浦慎作(広島市立大学)
- ・「美しさ快さへの脳機能計測からのアプローチ」本田学(国立精神・神経医療研究センター)
- ・企業研究者の講演4件

○領域公開シンポジウム「質感理解へと向かう5つの挑戦」（2011年12月7日 大阪大学中ノ島センター）

計画班・公募班の研究の中から5つのテーマを選んで紹介し、質感における主観と客観についてパネルディスカッションを行った。

〈プログラム〉

- ・「コンピュータビジョン技術による物体モデルの獲得」佐藤いまり（国立情報学研究所）
- ・「「さらさら」「ざらざら」という言葉からわかることーオノマトペと触質感認知ー」坂本真樹（電気通信大学）
- ・「真珠質感はどこから現れるのか？」中内茂樹（豊橋技術科学大学）
- ・「質感にまつわる見え方・見せ方・測り方」日浦慎作（広島市立大学）
- ・「白いものは雪？砂？ー脳損傷と質感認知ー」鈴木匡子（山形大学）
- ・パネル討論「質感における主観と客観」

○領域公開シンポジウム「美術工芸×質感脳情報学」（2012年5月29日 京都市勧業館みやこめっせ）

伝統工芸士や画家など美術工芸の専門家3名をスピーカーとして招き、班員3名の研究紹介と合わせ、美術工芸と質感脳情報学とのコラボレーションについてさまざまな視点から考える斬新なシンポジウムを開催した。

〈プログラム〉

- ・「優れた質感の映像再現：分光画像収集・表示技術と絵画の解析への応用」山口雅浩（東京工業大学）
- ・「ITと工芸素材による伝統工芸デザイン支援システム」梶井紀孝（石川県工業試験場）
- ・「質感と好み：動物を用いた研究から」船橋新太郎（京都大学）
- ・「自然と画家」鶴田憲次（京都市立芸術大学）
- ・「脳と質感：感性と芸術への情報処理アプローチ」本吉勇（NTTコミュニケーション科学基礎研究所）
- ・「うるしの魅力の質感について」下出祐太郎（伝統工芸士、京都美術工芸大学）

領域開始後の主な研究成果発表一覧

① 原著論文

A01

1. *西山正史, 岡部孝弘, 佐藤洋一, 佐藤いまり (2010) 複数の注目領域を用いた写真の主観品質の識別、電子情報通信学会論文誌 D-II, J93-D: 8: 1364-1374.
2. 古瀬達彦, *日浦慎作, 佐藤宏介 (2010) スリット光の変調による相互反射と表面下散乱に頑健な三次元形状計測、計測自動制御学会論文集 46: 10: 589-597.
3. Tachikawa T, *Hiura S, Sato K (2011) Robust estimation of light directions and albedo map of an object of known shape, IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications, 3: 172-185.
4. Nagase M, *Iwai D, Sato K (2011) Dynamic defocus and occlusion compensation of projected imagery by model-based optimal projector selection in multi-projection environment, Virtual Reality, 15: 2: 119-132.
5. *Murakami Y, Yamaguchi M, Ohyama N (2011) Class-based spectral reconstruction based on unmixing of low-resolution spectral information, Journal of Optical Society of America-A, 28: 7: 1470-1481.
6. *岸本純子, 金澤勝, 村上百合, 山口雅浩, 羽石秀昭, 大山永昭 (2011) 忠実な色再現映像システムにおける心理要因の分析、画像電子学会誌、40: 6: 1017-1026.
7. *Murakami Y, Yamaguchi M, Ohyama N (2011) Dictionary-based estimation of spectra for wide-gamut color imaging, Color Research & Application, published online: 23 OCT 2011.
8. *天野敏之 (2011) プロジェクタカメラフィールドバックのためのアンチベイヤ投影法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 16: 4: 653-662.
9. *天野敏之, 加藤博一 (2011) モデル予測制御を用いたプロジェクタカメラ系による見かけの制御, 電子情報通信学会論文誌 D, J94-D: 8: 1368-1375.
10. *Bimber O, Kloeck D, Amano T, Grundhoefer A, Kurz D (2011) Closed-loop feedback illumination for optical inverse tone-mapping in light microscopy, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 17: 6: 857-870.
11. 上山都士也, *平井経太, 堀内隆彦, 富永昌治 (2012) 可視光源とマルチバンドカメラを用いた蛍光物体の分光成分推定, 電子情報通信学会論文誌 (D), J95-D: 3: 638-644.
12. *Murakami Y, Nomura J, Ohyama M, Yamaguchi M (2012) Fidelity evaluation of metallic luster in six-band high-dynamic-range imaging, Optical Review, 19: 3: 142-149.
13. *Murakami Y, Yamaguchi M, Ohyama N (2012) Hybrid-resolution multispectral imaging using color filter array, Optics Express, 20: 7: 7173-7183.

14. *Yamamoto S, Maeda M, Tsumura N, Nakaguchi T, Okamoto R, Miyake Y, Shimoyama I (2012) Subjective evaluation of visual fatigue due to misalignment of motion and still images in a stereoscopic display, Journal of the Society for Information Display, 20: 2: 94-102.

B01

15. *Motoyoshi I (2010) Highlight-shading relationship as a cue for the perception of translucent and transparent materials. Journal of Vision, 10(9): 6, 1-11.
16. *Yang J, Otsuka Y, Kanazawa S, Yamaguchi MK, Motoyoshi I (2011) Perception of surface glossiness by infants aged 5 to 8 months. Perception, 40: 1491-1502.
17. *Sakai K, Ogiya M, Hirai Y (2011) Decoding of depth and motion in ambiguous binocular perception. Journal of Optical Society of America, A, 28: 7: 1445-1452.
18. *Qiu W, Sakai K (2011) Medial axis for 3D shape representation. Lecture Notes in Computer Science, 7062: 79-87.
19. *渡辺淳司, 加納有梨紗, 清水祐一郎, 坂本真樹 (2011) 触感覚の快・不快とその手触りを表象するオノマトペの音韻の関係性、日本バーチャルリアリティ学会論文誌、16: 3: 367-370.
20. *Okamoto S, Ishikawa S, Nagano H, Yamada Y (2011) Spectrum-based vibrotactile footstep-display for crinkle of fragile structures, Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2459-2464.
21. *Okamoto S, Yamada Y (2011) An objective index that substitutes for subjective quality of vibrotactile material-like textures, Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 3060-3067, San Francisco.
22. *Saiki J, Yoshioka A, Yamamoto H (2011) Type-based associations in grapheme-color synaesthesia revealed by response time distribution analyses. Consciousness and Cognition, 20: 1548-1557.
23. *Motoyoshi I, Matoba H (2012) Variability in constancy of the perceived surface reflectance across different illumination statistics. Vision Research, 53: 30-39.
24. *Uchikawa K, Fukuda K, Kitazawa Y, MacLeod DIA (2012), Estimating illuminant color based on luminance balance of surfaces, Journal of the Optical Society of America A, 29: 2: 133-143.
25. *Mizokami Y, Kamesaki C, Ito N, Sakaibara S, Yaguchi H (2012) Effect of spatial structure on colorfulness-adaptation for natural images. Journal of the Optical Society of America A 29-2: A118-A127.

26. *Mizokami Y, Webster MA (2012) Are Gaussian spectra a viable perceptual assumption in color appearance? *Journal of the Optical Society of America A* 29-2: A10-A18.
 27. Arce-Lopera C, Masuda T, Kimura A, Wada Y, *Okajima K (2012) Luminance distribution modifies the perceived freshness of strawberries, *i-Perception*, 3: 5: 338-355.
 28. *Okamoto S, Yamada Y (2012) Lossy data compression of vibrotactile material-like textures, *IEEE Transactions on Haptics*, doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TOH.
 29. Arce-Lopera C, Igarashi T, Nakao K, *Okajima K (2012) Effects of diffuse and specular reflections on the perceived age of facial skin, *Optical Review*, 19: 3:167-173.
 30. *Okamoto S, Yamauchi T, Konyo M, Tadokoro S (2012) Virtual active touch: perception of virtual gratings wavelength through pointing-stick interface, *IEEE Transactions on Haptics*, 5: issue 1: 85-93.
 31. Arce-Lopera C, Masuda T, Kimura A, Wada Y, *Okajima K (2012): Luminance distribution as a determinant for visual freshness perception: evidence from image analysis of a cabbage leaf, *Food Quality and Preference*, in press.
 32. Arce-Lopera C, Igarashi T, Nakao K, *Okajima K (2012) Image statics on the age perception of human skin, *Skin Research and Technology*, in press.
 33. *Sakai K, Nishimura H, Shimizu R, Kondo K (2012) Consistent and robust determination of border-ownership based on asymmetric surrounding modulation. *Neural Networks*, in press.
- C01**
34. Sasaki KS, Tabuchi Y, *Ohzawa I (2010) Complex cells in the cat striate cortex have multiple disparity detectors in the three-dimensional binocular receptive fields. *J Neurosci*. 30: 41: 13826-13837.
 35. *Ogawa T, Komatsu H (2010) Differential temporal storage capacity in the baseline activity of neurons in macaque frontal eye field and area V4. *J Neurophysiology* 103: 2433-2445.
 36. Yokoi I, *Komatsu H (2010) Putative pyramidal neurons and interneurons in the monkey parietal cortex make different contributions to the performance of a visual grouping task. *J Neurophysiology*, 104: 1603-1611.
 37. *Borra E, Ichinohe N, Sato T, Tanifuji M, Rockland KS (2010) Cortical connections to area TE in monkey: hybrid modular and distributed organization. *Cereb Cortex*, 20: 257-270.
 38. *Ichinohe N, Matsushita A, Ohta K, Rockland KS. (2011) Pathway-specific utilization of synaptic zinc in the macaque ventral visual cortical areas. *Cereb Cortex* 20: 2818-2831.
 39. Banno T, Ichinohe N, Rockland KS, *Komatsu H (2011) Reciprocal connectivity of identified color-processing modules in the monkey inferior temporal cortex. *Cerebral Cortex* 21: 1295-1310.
 40. Hiramatsu C, *Goda N, Komatsu H (2011) Transformation from image-based to perceptual representation of materials along the human ventral visual pathway. *Neuroimage* 57: 482-494.
 41. Okazawa G, Koida K, *Komatsu H (2011) Categorical properties of the color term "GOLD". *J Vision* 11: 8: 4: 1-19.
 42. *Yamamoto S, Honda M, Oohashi T, Shimizu K, Senda M (2011) Development of a brain PET system, PET-Hat: A wearable PET system for brain research. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 56: 5: 668-673.
 43. Shitara H, Shinozaki T, Takagishi K, Honda M, *Hanakawa T (2011) Time course and spatial distribution of fMRI signal changes during single-pulse transcranial magnetic stimulation to the primary motor cortex. *Neuroimage* 56: 1469-1479.
 44. Matsuo T, Kawasaki K, Osada T, Sawahata H, Suzuki T, Shibata M, Miyakawa N, Nakahara K, Iijima A, Sato N, Kawai K, Saito N, *Hasegawa I (2011) Intracal electrocorticography in macaque monkeys with minimally invasive neurosurgical protocols. *Frontiers in Systems Neuroscience* 5, 34. Epub 2011 May 25.
 45. 前田青広, *山本洋紀, 江島義道 (2011) メタコントラストにおける色選択性の一対比較法による解析, *VISION*, 23: 3: 135-142.
 46. *Yamamoto H, Fukunaga M, Takahashi S, Mano H, Tanaka C, Umeda M, Ejima Y (2011) Inconsistency and uncertainty of the human visual area loci following surface-based registration: probability and entropy maps. *Human Brain Mapping*, 33: 1: 121-129.
 47. *山本哲也・山本洋紀・眞野博彰・梅田雅宏・田中忠蔵・齋木潤 (2011) ヒト視運動野の単眼性奥行き視への関与, *信学技報(NC)*, 111: 96: NC2011-8: 79-84.
 48. *Funahashi, S (2011) Brain mechanisms of happiness. *Psychologia*, 54: 222-233.
 49. Ohno S, Kuramoto E, Furuta T, Hioki H, Tanaka Y, Fujiyama F, Sonomura T, Uemura M, Sugiyama K, *Kaneko T (2011) Morphological analysis of thalamocortical axon fibers of rat posterior thalamic nuclei: A single neuron tracing study with viral vectors. *Cereb Cortex* Epub ahead of print.
 50. Tanaka YR, Tanaka YH, Konno M, Fujiyama F, Sonomura T, Okamoto-Furuta K, Kameda H, Hioki H, Furuta T, Nakamura KC, *Kaneko T (2011) Local connections of excitatory neurons to corticothalamic neurons in the rat barrel cortex.

- J Neurosci 31: 18223-18236.
51. Tanaka YH, Tanaka YR, Fujiyama F, Furuta T, Yanagawa Y, *Kaneko T (2011) Local connections of layer 5 GABAergic interneurons to corticospinal neurons. *Front Neural Circuits* 5: 12 Epub 2011 Sep 29.
 52. Sardella TC, Polgár E, Garzillo F, Furuta T, Kaneko T, Watanabe M, *Todd AJ (2011) Dynorphin is expressed primarily by GABAergic neurons that contain galanin in the rat dorsal horn. *Mol Pain* 7: 76
 53. *Furuta T, Deschênes M, Kaneko T (2011) Anisotropic distribution of thalamocortical boutons in barrels. *J Neurosci* 31: 6432-6439.
 54. Ma YF, Hioki H, Konno M, Pan SX, Nakamura H, Nakamura KC, Furuta T, Li J-L, *Kaneko T (2011) Expression of gap junction protein connexin36 in multiple subtypes of GABAergic neurons in adult rat somatosensory cortex. *Cereb Cortex* 21: 2639-2649.
 55. *Honda Y, Furuta T, Kaneko T, Shibata H, Sasaki H (2011) Patterns of axonal collateralization of single layer V cortical projection neurons in the rat presubiculum. *J Comp Neurol* 519: 1395-1412.
 56. Fujiyama F, Sohn J, Nakano T, Furuta T, Nakamura KC, Matsuda W, *Kaneko T (2011) Exclusive and common targets of neostriatofugal projections of rat striosome neurons: a single neuron-tracing study using a viral vector. *Eur J Neurosci* 33: 668-677.
 57. *Okamoto T, Ikezoe K, Tamura H, Watanabe M, Aihara K, Fujita I (2011) Predicted contextual modulation varies with distance from pinwheel centers in the orientation preference map. *Scientific Report*. 2011; 1, 114 Epub 2011 Oct 12.
 58. Inagaki M, *Fujita I (2011) Reference frames for spatial frequency in face representation differ in the temporal visual cortex and amygdala. *J. Neurosci* 31: 10371-10379.
 59. *Elston GN, Oga T, Okamoto T, Fujita I (2011) Spinogenesis and pruning in the anterior ventral inferotemporal cortex of the macaque monkey: an intracellular injection study of layer III pyramidal cells. *Frontiers in Neuroanatomy* 2011; 5: 42. Epub 2011 Jul 21.
 60. Sasaki R, *Uka T (2011) Psychophysical evidence for contraction of the range of spatial integration as a mechanism for filtering out spatial noise in a random dot motion display. *Vision Res* 51: 1979-1985.
 61. *Zimmermann JB, Seki K, Jackson A (2011) Reanimating the arm and hand with intraspinal microstimulation. *J Neural Eng* 8: 5: 054001, Aug 10.
 62. Ninomiya T, Sanada TM, *Ohzawa I (2012) Contributions of excitation and suppression in shaping spatial frequency selectivity of V1 neurons as revealed by binocular measurements. *J Neurophysiol* 107: 2220-2231.
 63. Tao X, Zhang B, Smith EL 3rd, Nishimoto S, Ohzawa I, *Chino YM (2012) Local sensitivity to stimulus orientation and spatial frequency within the receptive fields of neurons in visual area 2 of macaque monkeys. *J Neurophysiol* 107: 1094-1110.
 64. Aihara T, Takeda Y, Takeda K, Yasuda W, Sato T, Otaka Y, Tanaka S, Hanakawa T, Honda M, Liu M, Kawato M, Sato M, *Osu R (2012) Cortical current source estimation from electroencephalo-graphy in combination with near-infrared spectroscopy as a hierarchical prior. *Neuroimage* 59: 4006-4021.
 65. *Seki K, Fetz EE (2012) Gating of sensory input at spinal and cortical levels during preparation and execution of voluntary movement. *J Neurosci* 32: 3: 890-902
 66. Shiozaki HM, Tanabe S, Doi T, *Fujita I (2012) Neural activity in cortical area V4 underlies fine disparity discrimination. *J. Neurosci* 32: 3830-3841.
 67. Kumano H, *Uka T (2012) Reduction in receptive field size of macaque MT neurons in the presence of visual noise. *J Neurophysiol*, in press.
 68. 野田貴大、神崎亮平、*高橋宏知, (2012): 「聴覚野における音脈分凝に関わる機能的ネットワークの下部構造」、電気学会論文誌 C 電子情報システム部門誌 132: 7, 印刷中
 69. Nishio A, Goda N, *Komatsu H (2012) Neural selectivity and representation of gloss in the monkey inferior temporal cortex, *J Neurosci*, 63(3): 1321-1333.
- ②査読付き国際学会発表
70. *Shuai H, Sato I, Okabe T, Sato Y (2010) Fast spectral reflectance recovery using DLP projector, *Proceedings of Asian Conference on Computer Vision (ACCV2010)*.
 71. *Nishiyama M, Okabe T, Sato I, Sato Y (2011) Aesthetic quality classification of photographs based on color harmony, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2011)* 33-40.
 72. *Zhang C, Sato I (2011) Separating reflective and fluorescent components of an image, *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2011)* 185-192.
 73. *Okatani T, Yoshida T, Deguchi K (2011) Efficient algorithm for low-rank matrix factorization with missing components and performance comparison of latest algorithms, *Proceedings of International Conference on Computer Vision (ICCV)* 1-8.
 74. Furuse T, *Hiura S, Sato K (2011) Synchronous detection for robust 3-D shape measurement against interreflection and

- subsurface scattering, Proc. International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP2011), 276-285.
75. Kodama K, *Iwai D, Sato K (2011) Pan-tilt projector path planning for adaptive resolution display, Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), 140.
 76. Yabiki T, *Iwai D, Sato K (2011) Adaptive annotation layout in projection-based mixed reality by considering its readability, Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), p.144.
 77. Shimazu S, *Iwai D, Sato K (2011) High dynamic range 3D display system with projector and 3D color printer output, Proceedings of International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT), 165.
 78. Shimazu S, *Iwai D, Sato K (2011) 3D high dynamic range display system, Proceedings of IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 235-236.
 79. *Ito E, Okatani T, Deguchi K (2011) Accurate and robust planar tracking based on a model of image sampling and reconstruction process, Proceedings of The 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), 1-8.
 80. Koike M, *Saga S, Okatani T, Deguchi K (2011) Sensing method of total-internal-reflection-based tactile sensor. Proceedings of World Haptics 615-619.
 81. *Tanaka M, Tominaga S, Horiuchi T (2011) Color naming experiment using 2D and 3D rendered samplers, Proc. Midterm Meeting of the International Colour Association, 90-93.
 82. *Horiuchi T, Suzuki Y, Tominaga S (2011) Material classification for printed circuit boards by kernel Fisher discriminant analysis, Lecture Notes in Computer Science, Computational Color Imaging, 6626: 152-164.
 83. *Tominaga S, Horiuchi T, Kamiyama T (2011) Spectral estimation of fluorescent objects using visible lights and an imaging device, Proc. IS&T/SID's 19th Color Imaging Conference, 352-356.
 84. *Murakami Y, Yamaguchi M, Ohyama N (2011) Hybrid resolution spectral imaging by class-based regression method, The 19th Color and Imaging Conference (CIC19), San Jose, 310-315.
 85. *Sato I, Okabe T, Sato Y (2012) Bispectral photometric stereo, Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2012), 270-277.
 86. *Han S, Matsushita Y, Sato I, Okabe T, Sato Y (2012) Camera spectral sensitivity estimation from a single image under unknown illumination by using fluorescence, Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2012), 805-812.
 87. *Okatani T, Deguchi K (2012) Optimal integration of photometric and geometric surface measurements using inaccurate reflectance/illumination knowledge, Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 254-261.
 88. *Satio M, Okatani T, Deguchi K (2012) Application of the mean field methods to MRF optimization in computer vision, Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 1680-1687.
 89. Mori T, *Hiura S, Sato K (2012), Shadow and specular removal by photometric linearization based on PCA with outlier exclusion, International Conference on Computer Vision Theory and Applications (VISAPP2012), 221-229.
 90. Hino N, *Iwai D, Sato K (2012) Dynamic reflectance control of photochromic compounds for 3D high dynamic range display, Proceedings of CVPR 2012 Workshop for Computational Camera and Displays, (in press).
 91. Samuel D, *Iwai D, Sato K (2012) Focal length modulation of projection lens for defocus blur compensation, Proceedings of CVPR 2012 Workshop for Computational Camera and Displays, (in press).
 92. Koshikizawa Y, *Horiuchi T, Tominaga S (2012) Color appearance control for color vision deficiency by projector-camera system, Proc. IS&T's 6th European Conference on Colour in Graphics, Imaging, 11-16.
 93. *Horiuchi T, Tanimoto T, Tominaga S (2012) Color analysis and image rendering of woodblock prints with oil-based ink, Proc. 24th IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, 8292: 8292R-1-8.
 94. *Suzuki K, Yamaguchi M, Murakami Y (2012) Colorimetric characterization of a laser display, Laser Display Conference '12, LDCp7-17.
 95. *Murakami Y, Yamaguchi M, Ohyama N (2012) Hybrid resolution multispectral imaging based on color filter array: basic principles and computer simulation, The 6th European Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision (CGIV2012), Amsterdam, 259-265.
 96. *Kimachi A, Ando S, Doi M, Nishi S (2012) Human skin imaging using three-phase spectral matching imager, Color Imaging XVII: Displaying, Processing, Hardcopy, and Applications, Proc. of SPIE, Vol. 8292, pp. 829225E-1-8.
 97. *Sakurai K, Miyata K (2012) Generating layout of nonperiodic aggregates, NICOGRAPH

International 2012, Bali Indonesia, (in press).

98. *T. Amano (2012) Shading illusion : a novel way for 3-D representation on the paper media, PROCAMS 2012 Workshop on CVPR2012, Providence, USA (in press).

③総説・解説・著書

A01

99. *日浦慎作 (2011) 符号化撮像によるぶれ・ぼけの除去、日本光学会誌「光学」、40: 10: 522-527.
100. *岩井大輔, 佐藤宏介(2011) プロジェクション型AR(拡張現実感)、画像ラボ、22: 2: 8-15.
101. *山口雅浩 (2011) レーザーディスプレイと広色域映像システム、レーザー研究、39: 6: 395-401.
102. *山口雅浩 (2012) ナチュラルビジョンによる高質感映像技術、映像情報メディア学会誌:特集「質感を科学する」、66: 371-378.

B01

103. *Nishida S (2011) Advancement of motion psychophysics: Review 2001-2010. Journal of Vision, 11(5), 11: 1-53.
104. 花沢明俊、*酒井 宏、三浦健一郎 (2011) 研究最前線---ニューロコンピューティング、情報処理学会、情報・システムソサエティ誌、15: 4: 16-17
105. *阿山みよし (分担執筆) (2011) 光の百科事典、7.19 照明、編集代表 谷田貝豊彦、丸善出版、560-566.
106. *溝上 陽子 (2011) 視覚特性と電子ペーパーの見え、化学工業、62-6: 453-457.
107. 永野 光、*岡本 正吾、山田 陽滋 (2011) 触覚的テクスチャの材質感次元構成に関する研究動向、日本バーチャルリアリティ学会誌、12: 3: 343-353.
108. *本吉勇 (2012). 質感の視覚認知. 映像情報メディア学会誌: 特集「質感を科学する」、66: 338-342.
109. *Fujisaki W, Kitazawa S, Nishida S (2012) Multisensory timing, In Stain et al. Eds, "The New Handbook of Multisensory Processes", MIT Press. ISBN-10: 0262017121, ISBN-13: 978-0262017121.
110. *新谷 幹夫 (2012) CGによる質感表現、映像情報メディア学会誌: 特集「質感を科学する」、66: 5: 364-370.
111. *Okamoto S, Nagano H, Yamada Y (2012), Psychophysical dimensions of tactile perception of textures, IEEE Transactions on Haptics, in press.

C01

112. *鯉田孝和、*小松英彦 (2010) サル下側頭皮質(T E野)の色選択性ニューロンの応答特性と認知コントロールによる影響、日本神経回路学会誌 17: 3: 93-100.
113. *本田 学 (2010) 脳と情報環境ー脳科学から見た環境の安全・安心ー。脳の発達と育ち・環境。NPO 法人脳の世紀推進会議編、クバプロ、東京 9-45.
114. *Komatsu H (2011) Bridging gaps at V1:

Neural responses for filling-in and completion at the blind spot. Chinese J Psychol. 53: 413-420.

115. *山本洋紀 (2011) 表面の色と質感の知覚: 脳研究の展開、繊維機械学会誌 せんい、64: 8: 13-19.
116. *大澤五住 (2012) 頭の中のサイン、コサインー波による視覚情報の脳内表現、(近藤寿人 編)「芸術と脳の対話」 pp,153-163, 国際高等研究所.
117. *小松英彦 (2012) 色と質感を認識する脳と心の働き、(近藤寿人 編)「芸術と脳の対話」 pp,105-114, 国際高等研究所.
118. *小松英彦 (2012) 質感の科学への展望、映像メディア学会誌: 特集「質感を科学する」、65: 5: 332-337.
119. *本田 学 (2012) 感性的質感認知への脳科学的アプローチ、映像情報メディア学会誌: 特集「質感を科学する」、65: 5: 343-348.
120. *鈴木匡子 (2012) 視覚性認知障害、神経心理学、28:23-28.
121. *古田貴寛 (2012) 触覚システムにおける神経回路の構造と機能: ラットのヒゲ感覚システムを題材として. ブレインサイエンスレビュー2012,(出版社: クバプロ) 107-126.
122. 金子秀和、*田村弘 (2012) 大脳皮質視覚関連領域を中心としたマルチプローブ・マルチニューロン計測技術について、神経回路学会誌、19: 1:28-38.
123. *Roe AW, Chelazzi L, Connor CE, Conway BR, Fujita I, Gallant JL, Lu H, Vanduffel W (2012) Toward a unified theory of visual area V4. Neuron, 74: 12-29.
124. *藤田一郎、池添貢司、稲垣未来男 (2012) 腹側視覚経路の情報処理 Clinical Neuroscience 30: 8 (印刷中)
125. 竹林美佳、*船橋新太郎 (2012)「フラクタル図形に対するサルの好き嫌い」荻阪直行編「神経美学 - 美しさと喜びの脳内表現」新曜社、(印刷中)

④特許

126. 山本誠一、大橋 力、本田 学、前川督雄 (2010) PET 支持装置. 特許第 4610671 号.
127. 山本誠一、大橋 力、本田 学、前川督雄 (2010) PET 支持装置. 特許第 4642143 号.
128. 大橋 力、河合徳枝、仁科エミ、本田 学、前川督雄、森本雅子、八木玲子、上野 修 (2011) 振動発生装置及び方法. 特許第 4663034 号.
129. 大橋 力、河合徳枝、仁科エミ、本田 学、前川督雄、森本雅子、八木玲子、上野 修 (2012) 信号再生装置、電気自動車及び記録媒体. 特願 2011-000038 (特許査定済).
130. 檀一平太、續木大介、渡辺英寿 (2012) 経頭蓋脳機能解析方法. 特願 2012- 95838.