

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 10 月 5 日現在

機関番号：94305

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2010～2014

課題番号：22135004

研究課題名（和文）質感認知に関わる視聴触覚情報の心理物理的分析

研究課題名（英文）Psychophysical analysis of visual, auditory and tactile information for material recognition

研究代表者

西田 眞也（NISHIDA, SHIN'YA）

日本電信電話株式会社NTTコミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・主幹研究員

研究者番号：20396162

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 71,300,000円

研究成果の概要（和文）：人間の質感知覚を心理物理学的に分析した。光沢知覚に対する照明の画像特性・ハイライトとボディの色関係・ハイライトとシェーディングの関係・乳児発達の影響を明らかにした。半透明感の画像手がかりや、順応により物体の質感やカテゴリーが大きく変わって見える新しい残効、運動ベクトル場や画像の動的な歪みだけから液体質感が知覚されることを明らかにした。画像の分光情報を再現できるハイパースペクトルディスプレイや静止物が動いて見えるプロジェクションマッピング技術を開発した。多感覚の質感認知に関して、色の温度知覚の影響に関して常識とは反対の効果を発見し、視聴覚の素材情報の統合の仕組みを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We psychophysically analyzed human material perception. We found how gloss perception is affected by image properties of illumination, color relationships between highlight and body, spatial relationships between highlight and surface shading, and the time course of infant development. We found image cues to translucency, and a new aftereffect wherein adaptation alters the material, shape and category of objects. We found critical information about liquid material perception lies in image motion vector fields, as well as in dynamic image deformation fields. We have developed a hyperspectral two-dimensional display, and a projection mapping technique that makes a static objects appear dynamic. We found counterintuitive effects of object and hand colors on object temperature judgments, and a computational principle of integration of audio-visual material information.

研究分野：人間情報学

キーワード：質感 視覚 触覚 マルチモーダル 光沢感 色覚 プロジェクションマッピング 画像

## 1. 研究開始当初の背景

質感認識とは、物体そのものがもつ性質、すなわち物性を、視覚や聴覚、触覚から得られる感覚情報を通して読み取る能力のことである。物体のもつ光学的な特性が光沢感や透明感などの質感を生み出し、幾何的な特性が粘性や柔らかさなどの質感を生み出す。さらに、その物体がどのような材質からできているかという素材判断も、質感認識である。

一般的な知覚認識の発想からすると、ある質感の認識は、その素になる物理現象(たとえば表面の光の反射特性)のパラメータを、感覚情報を介して推定することと考えることができる。しかし、この物理パラメータは(双方向反射率関数のように)複雑で、その推定に必要な計算も複雑である。正攻法で正確に推定することは理論的にほとんど不可能であるにもかかわらず、われわれ人間が質感を認識できるのはどうしてだろうか。

おそらく人間は、100%妥当性が保証される訳ではないけれど、多くの場面で妥当性を持つような質感の手がかりを利用して、比較的簡単な方法で質感を推定している可能性が高い。このような考えに基づいて、われわれのグループは、輝度ヒストグラムの歪度などの画像特徴が光沢感といった視覚的な表面質感の知覚の手がかりとなることを解明し、さらに、そのような画像特徴が比較的初期の視覚系の神経機構で実際に計算されている可能性を示した[引用文献①]。

## 2. 研究の目的

本研究計画ではこの研究を発展させ、光沢感の知覚に対する理解を深めると共に、透明感、液体粘性などに対応する画像特徴の解明を目指す。また、物体の材質感の知覚は、視覚のみならず聴覚や触覚といったモダリティでも成立する。「つるつる」「ざらざら」といった触覚的な情報を視覚や聴覚から感じ取ることができるように、異種モダリティを横断するも質感知覚の特徴である。このような側面を研究するために、聴覚や触覚、多感覚情報統合における質感知覚を研究し、そこで利用されている感覚情報を特定する。生理学研究から新たな質感手がかりの可能性が示唆された場合には、その実効性を心理物理学的に検討する。さらに、質感の心理物理研究の成果を質感の制御技術に応用する可能性を探る。

## 3. 研究の方法

人間の質感知覚を心理物理学的に分析し、知覚に関与する画像要因を特定する。そして、知覚処理のモデルを構築し、その妥当性を実

験的に検討する。それを行うために、光沢感や透明感を持った表面画像のデータベースを用意し、画像の空間構造、色彩構造、周辺の分布などを操作する。

色情報に関しては、自然画像の統計的性質を分析する。そして、それを操作した画像に対する人間の知覚を分析することで、質感知覚において利用されている情報を特定する。また、刺激提示装置として既存のカラーディスプレイシステムでは広い色域をもつ自然画像を正確に表示することには限界があるために、色度を単色光にまで自由に变化できる新ディスプレイの開発に取り組む。

視覚以外のモダリティを含めた質感研究に関しては、触覚振動の符号化機構を分析するとともに、モダリティ間の質感情報の統合様式をモデル化する。

## 4. 研究成果

### ①光沢感

光沢などの物体の表面反射率の知覚は、全体的な照明の強さが変わっても一定であるが、コントラストなど照明の構造が変わると激変することを見出した(質感の非恒常性)。この結果は物体の画像のサブバンド・ヒストグラムの変化から正確に予測され、質感知覚における画像統計量の重要性を支持している。

光沢に関しては輝度情報だけではなく色も影響する。たとえば灰色の物体に赤いハイライトがついていると、自然な光沢感が得られない。これは、ハイライトが照明の色をそのまま反映するという物理的性質を持っているために、赤いハイライトは赤い照明を意味するはずだけれど、それは物体本体が無彩色であることとは矛盾するという点に関係していると考えられる。このような反射光の色の制約を脳が計算するには、輝度と色を分解して処理するのではなく、複数の色バンドに輝度情報を分解して処理するのが良いのでは無いかという仮説を提案した。同じ仮説は、ハイダイナミックレンジ画像をローダイナミックレンジの画像にトーンマッピングする際に色の彩度が高く見えすぎるといった輝度と色の相互作用を考える上でも有効である。また、最近、乾いた物体を濡れているように見せるウェットフィルタを開発したが、これは輝度のヒストグラムの操作とともに、色の彩度を操作することがポイントになっている。

しかし、単純な画像統計量だけでは光沢感の説明できないのも事実である。この点に関して、ハイライトとシェーディングの位置関係が空間的に整合していることが光沢知覚に重要だという点に注目が集まっている。われわれは、テクスチャ合成刺激を使った心理

物理実験でこの問題を分析した結果、まず、光沢に関する空間情報処理は高次の視覚野で行われる複雑なものであることが分かった。また、鏡面反射成分を操作することで画像の光沢感を変化させても輝度の順序関係はほとんど変化しないという点に、空間的整合性の本質があることが分かった。さらに、輝度順序に影響しない輝度勾配量の分布が光学的質感判断の情報のソースであり、一方、輝度勾配方向が決定する輝度順序マップが表面形状の情報ソースとなっているという考え方を導いた（図1）。

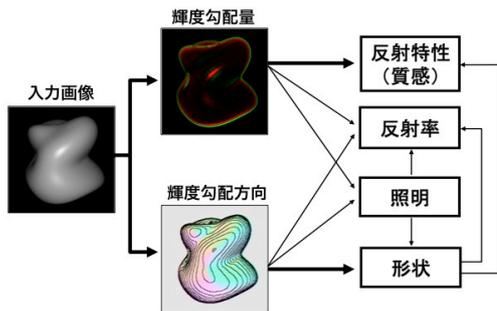


図1：表面画像から質感や形状などの成分を推定するスキーム。輝度勾配量の分布から光沢などの質感を推定し、輝度勾配方向の分布から形状を推定する。

光沢知覚に関しては、発達研究も進んでいる。公募班の山口真美研究室と共同で、乳児を対象とした実験により、光沢を見わける能力は生後6-8ヶ月齢ころに発達することを明らかにした。また、この能力が獲得される以前の3-4ヶ月齢の乳児はハイライトの違いなど大人が知覚しない瑣末な画像の差異を知覚することを見出した。

## ② その他の光学的な質感

食べ物や人の肌などの表面がもつ半透明感をもたらす原因となる画像の特徴を分析し、ハイライトと陰影のあいだのコントラストやボケの不一致が重要な手がかりであることを明らかにした。同様に、さまざまな色の透明層をもつ多重表面の知覚の分析を進めた。

特定の質感や凹凸や形をもつ物体の画像に順応すると、その後に観察する物体の質感や形、カテゴリーが大きく変わって見える新錯視を発見した。この物体残効を分析することにより、三次元の形状や質感などの知覚が、高次の視覚過程における低次の画像特徴量の表現に部分的に支えられている可能性が示唆された。

物体表面の質感の知覚を越えて、「画像の質感」の知覚についてもいくつかの検討を進めた。例えば、画像のボケの知覚において、高空間周波数帯域のオフ信号がオン信号よ

りも大きな貢献をしていることを明らかにした。また、西洋・東洋の古典絵画の様式の違いを画像統計学の視点から分析し、両者が低次の画像統計量において大きく異なることを明らかにした。また、気象学データやCGシミュレーションを用いて、この違いが地中海性気候(西洋)とモンスーン気候(東洋)における照明環境の差異に起源をもつとする「絵画様式の生態光学説」を提唱した。

## ③ 動きが生み出す質感

ものの質感は光沢などの光学的な特性だけでなく、粘性などの機械的な特性にも由来する。ものの機械的な特性を知る重要な手がかりは動きの情報の中にある。

われわれは動きの情報に基づいて液体の質感を認識する仕組みを明らかにした。まず、不透明な液体が動いているシーンの動画から動きベクトル場の情報を取りだし、形の情報を取り除いて提示する方法を開発した。そして、動きの情報だけから液体であることや、その液体の粘性が判断できることが分かった。さらに、液体の知覚の画像手がかりはラプラシアンで記述可能な動きベクトルの空間的な滑らかさであること、一方、液体粘性の手がかりは運動速度にある（速いほど粘性が低く感じられる）ことを明らかにした。ここでも、比較的単純な画像特徴に基づいて、質感の認識が行われているという仮説が支持された。また、動きの情報が無くても形の情報だけから液体の粘性を判断することができることも分かった。

別の研究では、透明液体の屈折が生み出す背景パタンの動的な変形だけから、液体感のある透明層が知覚されることを明らかにした。歪んでいても、それが静止したものだと、あまり透明層に見えず、動いていることが重要であることが示された。また、動的な変形が透明液体に知覚されるためには、液体が物理的に作り出す変形と一致する必要はなく、特定の時空間周波数帯にランダムな変調があるだけで、人間は液体を見てしまうことが分かった。

この透明液体の研究成果を利用すると、簡単なアルゴリズムで人間に液体らしく見える映像を生成することができる。デジタル処理で画像を歪めることは簡単である。さらに、最近われわれが開発した「変幻灯」を利用すると、現実世界にある静止画像を動的に歪まして、液体質感を与えることも可能となった（図2）。変幻灯は、プロジェクションマッピングを利用した手法で、静止画像の動き映像の輝度の運動成分だけを原画像に投影（合成）することで、動きの感覚を生み出す。多少のずれがあっても動きの情報を色や形の情報と統合してしまう人間の視覚系の仕組

みを応用した方法である。変幻灯は、質感脳情報学における研究交流でプロジェクションマッピングの最先端の知識に接することではじめて実現した革新的な技術開発といえる。

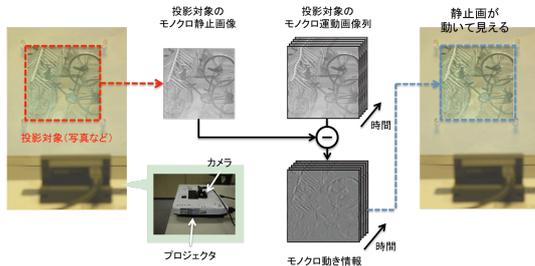


図2：変幻灯システム。静止画をカメラで撮影し、動き成分を計算して投影すると動いて見える。

#### ④ 色の恒常性

私たち人間は、物の色や質感を照明環境によらず安定して見ることができる。たとえば、黒い紙を薄暗い室内から晴天の屋外に持ち出すと、紙から眼に入る反射光の強さは  $10^8 \sim 10^{10}$  倍にもなるが、黒い紙は黒く見え、白色や発光する材質には見えない。また照明光の色がある程度変わっても、物の材質や色は同じように見ることができる。これは、人の視覚システムに、照明光の影響を差し引いて安定した色や質感の見えを実現するしくみ（色や明るさの恒常性）が備わっているためである。物体からの反射光が示す色度と輝度の分布範囲の物理的制限（オプティマルカラー）が照明光ごとに異なることに着目して、この適用により、精度の高い色恒常性における照明光推定モデル実現を目指した。

研究期間中に、(1) 色や明るさの見えを調べる心理物理実験、(2) 照明光推定モデルの作成 (3) モデルの評価を実施した[3]。実験では、色や明るさの見えがオプティマルカラーの分布に基づき知覚されていることを示す結果が得られた。また、モデルの作成では、シーンの色度輝度の情報とオプティマルカラーの差分を指標として照明光を推定する手法を提案した。さらにその評価として、実験結果とモデルによる予測値との相関を求めたところ、従来法と比較して照明色の推定は同程度、照明強度の推定は上回る優れた予測結果が得られた (図3)。

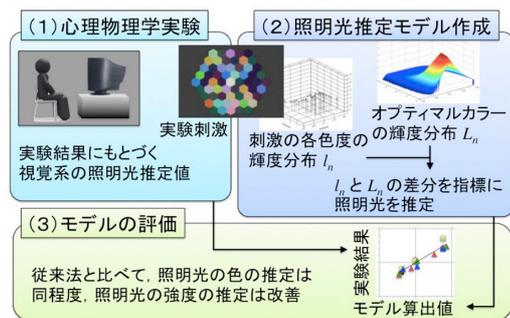


図3 物体色知覚の実験結果にもとづく照明光推定モデルの作成とその評価

今後は、より一般的なシーンをを用いた実験をおこない、自然風景を含む様々な条件下に適用できるようにモデルの更なる改良、そして人の視覚特性を考慮した自然な色や質感表現のための工学的応用を目指す。

#### ⑤ 金色知覚

金色知覚メカニズムの解明を目指し、金、銀、銅色知覚を生起する色度、明度、光沢度等の条件を詳細に調べた。また、金、銀、銅色知覚と光沢感や金属感との関係、および金色知覚と輝度ヒストグラムの画像統計量との関係を調べた。その結果、金色、銀色、銅色知覚は対比光沢度に対してそれぞれ、高彩度、無彩色、中～高彩度の領域で最も増加すること、また、明度は金色・銀色知覚に影響しないが、銅色が知覚されるためには低い明度（マンセル明度 4.6 以下）が必要であることが明らかとなった。さらに、金色知覚は光沢感よりも金属感とより相関することが明らかとなった。この結果は金色知覚の要因と金属知覚の要因が類似していることを示す。また対比光沢度が 10 以上の刺激において、金色知覚と金属感は輝度ヒストグラムの標準偏差と相関することが明らかとなった。この結果は、画像の輝度ヒストグラムの標準偏差が高い事が金色知覚の要因の 1 つである可能性を示す。

#### ⑥ ハイパースペクトルディスプレイ

多くの色覚の研究者が、分光情報を再現できるディスプレイを手に入れたい、と夢見ている。ハイパースペクトルディスプレイ (HSD) は「色」という心理物理的な難しい性質を考えずに元の色を再現できる、という意味で「簡単」で「完璧」なディスプレイである。具体的な効果としては、個人間で異なる色覚特性を考慮しなくても正確な色再現ができること、さらにどんな色でも再現できる、ということが挙げられる。

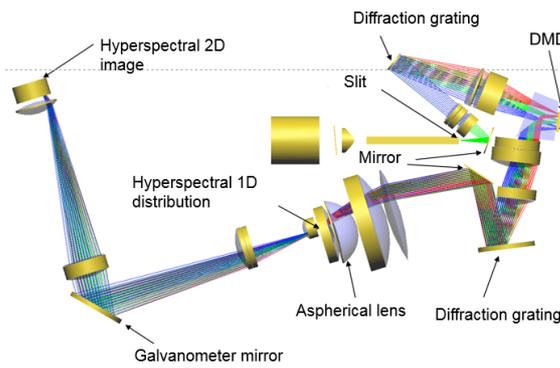


図4 ハイパースペクトルディスプレイのバージョン1の光学系。偏心を多用した光学系であった。バージョン2では偏心光学系を用いず、また2台あった分光素子を1台にした。

HSD のアイデアの元となったプログラマブル光源は、分光器に空間変調素子（つまりディスプレイパネル）を組み合わせた装置で、分光された光を波長ごとに強度を変化させた後、再合成して思い通りの分光分布を作る「光源」である。しかし、このままでは種類の分光分布しか作れず「ディスプレイ」にはならない。単にラスタースキャンをしたのでは、技術的に実現不可能な超高速空間変調素子が必要になってしまう。そこで、分光器と空間変調素子の光学的構造に着目して、プログラマブル光源では使っていなかったもう一つの空間次元を活用し、アレイ状のスペクトル分布を一気に作ってしまうことにした。走査は2次元ラスタースキャンでなく1次元になるので、この走査系に負担のかからない方法により、2次元画像を構築できることが分かり、装置の試作を行った（図4）。

実際の光学系を製作した(株)トプコンの努力もあって HSD(ver 2)では、32 原色で、画素数 120 x 160、リフレッシュレート 48 画像/秒での表示が可能になった。白色での最高輝度は 90 cd/m<sup>2</sup> となり、色覚の研究や工業的な評価などでは実用的と言えるディスプレイが完成した。

#### ⑦ 多感覚の質感

まず、触覚的な質感に関して、指先の振動を符合化する機械受容器の出力が、異種受容器間や別の身体部位間で、どのように比較され、どのように統合されるのかをあらかじめにした。その結果、異なる触覚信号に比較や統合において、積極的な情報統合が行われていることが明らかになった。

また、温度感覚に関しては、赤いものは温かく青いものは冷たいという常識を覆して、赤いものに触ったときの方が青い物に触ったときよりも温かいと判断しにくい、という

ことを発見した。また、青い手の方が赤い手より温かいと感じにくいことから、色から予測される物体と手の温度関係との差分を強調するようなメカニズムが働いていると考えられる。

ガラス、プラスチックといった素材カテゴリ判断と、ざらざらした、やわらかいといった素材特性判断とは、視聴覚統合の論理が異なるということを発見した。素材カテゴリ判断は視覚と聴覚の掛け算的に決まるのに対して、素材特性判断は、重みづけ平均になることが判った。いずれの統合もベイズ最尤推定でうまく説明できる。すなわち、素材カテゴリ判断では視覚と聴覚の尤度の掛け算によって視聴覚統合が行われ、素材特性判断では尤度では無く推定した属性値の評定なので重みづけ平均で視聴覚統合が行われるが、どちらも最適な統合であると考えられる。

木をターゲットオブジェクトとして、全く同じ被験者、全く同じ質問、全く同じ試験片を用いて、視覚、聴覚、触覚および視聴覚についての、大規模なデータセットを取得し、さまざまな観点からの分析を行った。まず、同じ対象物についての高次質感認知は、どの感覚で訊いても同じになるのかという問題については、高次質感認知の評価パターン自体は、視、聴、触のどのモダリティでもほぼ共通になるということが判った。さらに低次質感認知と高次質感認知の紐付けができるか、という問題については、重回帰分析等の多変量解析によって、対象を絞ればある程度できそうだということが判った。また、本物とよくできた偽物がどれくらい区別できるかという問題については、直接本物かどうかを聞くことと答えられない場合でも、潜在的には本物と偽物が区別できている可能性が示唆された。

#### 〔引用文献〕

- ① Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L., & Adelson, E.H. (2007). Image statistics and the perception of surface qualities. *Nature*, 447, 206-209.

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 19 件）

- ① Uchikawa K, Fukuda K, Kitazawa Y, MacLeod DIA: Estimating illuminant color based on luminance balance of surfaces, *Journal of the Optical Society of America A, Optics and image science*, 29(2), 133-143, 2012.
- ② Fujisaki W, Goda N, Motoyoshi I, Komatsu H, Nishida S: Audiovisual integration in the

human perception of materials, Journal of Vision 14(4):1-20, 2014.

- ③ Ho HN, Iwai D, Yoshikawa Y, Watanabe J, Nishida S: Combining colour and temperature: A blue object is more likely to be judged as warm than a red object. Scientific Reports. 4: 5527, 2014.
- ④ Kawabe T, Maruya K, Fleming RW, Nishida S: Seeing liquids from visual motion. Vision Research, 109, 125–138. 2015.

その他 15 件

[学会発表] (計 111 件)

- ① Mihashi T, Nakamura N, Yoshida K, Yamaguchi T, Yamauchi Y, Sakata K, Fukuda K, Uchikawa K: Optical design of hyperspectral two-dimensional display and its application, Optical Society of America Fall Vision Meeting, Seattle, USA, 2011.

その他 110 件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○ 出願状況 (計 8 件)

名称: 動的錯覚呈示方法、動的錯覚呈示装置、プログラム、およびデータ構造

発明者: 河邊隆寛・澤山正貴・西田眞也

権利者: 日本電信電話株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2014-230720

出願年月日: 平成 26 年 11 月 13 日

国内外の別: 国内

その他 7 件

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

変幻灯ホームページ:

<http://www.brl.ntt.co.jp/cs/human/hengentou/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

西田 眞也 (NISHIDA, Shin'ya)

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・

主幹研究員

研究者番号: 20396162

### (2)研究分担者

内川 恵二 (UCHIKAWA, Keiji)

東京工業大学・総合理工学研究科・教授

研究者番号: 00158776

本吉 勇 (MOTOYOSHI, Isamu)

東京大学・総合文化研究科・准教授

研究者番号: 60447034

藤崎 和香 (FUJISAKI, Waka)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・

主任研究員

研究者番号: 20509509

### (3)連携研究者

渡邊 淳司 (WATANABE, Junji)

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・

主任研究員

研究者番号: 40500898

河邊 隆寛 (KAWABE, Takahiro)

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・

主任研究員

研究者番号: 40423511

丸谷 和史 (MARUYA, Kazushi)

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・

主任研究員

研究者番号: 20626634

何 昕霓 (Ho Hsin-Ni)

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・

研究主任

研究者番号: 60466406

黒木 忍 (KUROKI, Scinob)

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・

研究員

研究者番号: 70648104

新谷 幹夫 (SHINYA Mikio)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号: 50339199

福田 一帆 (FUKUDA, Kazuho)

工学院大学・情報学部・准教授

研究者番号: 50572905

### (4) 研究協力者

横坂 拓巳 (YOKOSAKA, Takumi)

王 勤 (WANG Qing)

木村 昭悟 (KIMURA, Akisato)

土田 勝 (TSUCHIDA, Masaru)

三橋 俊文 (MIHASHI, Toshifumi)

吉田 圭祐 (YOSHIDA, Keisuke)

松本 知久 (MATSUMOTO, Tomohisa)

時田 みどり (TOKITA, Midori)

金谷 翔子 (KANAYA, Syoko)