

質感知覚の心理物理学

西田真也[†]

質感知覚をどのように心理物理学的に研究するかを解説する。質感知覚を生み出す主たる物理的実体は物体表面の光の反射特性である。人間は画像に含まれる統計的な手がかりを利用して、反射特性をおおまかに推定している可能性がある。

Psychophysics of Material Perception

Shin'ya Nishida[†]

Here I explain how we study material perception by psychophysics. The major physical correlate of surface material perception is light reflectance properties of the object surface. Human visual system may roughly estimate the reflectance properties from cues involved in image statistics.

1. はじめに

人間の脳は網膜に映った画像を色・形・運動といった基本的な属性に分解して分析する、というのが、これまでの視覚研究の常識であった。しかし、現実にはわれわれが見ている世界は基本属性の単純な寄せ集めではない。人間は視覚を通して世界の複雑な有り様を理解している。その中でも、複雑な表面の光の反射パターンから質感を読み取る人間の能力には驚くべきものがある。

質感は古くから芸術などの分野では強い関心を持たれてきたが、一部の例外を除き、科学的な視覚研究の対象とはならなかった。その状況に大きな変化を引き起こしたのが近年のコンピュータグラフィックスの発展である。複雑な光の反射のプロセスを精緻にシミュレーションすることによって形と色を組み合わせたような単純なシーンが現実的な質感を持った映像へとドラマティックに変貌する、この事実をコンピュータグラフィックスはわれわれに教えてくれた。技術の進歩によって、質感画像の生成原理の理解と実際の生成手段を、視覚科学は手に入れたのである。

しかし、画像生成の光学プロセスを理解したからといって、画像から質感を理解する人間の脳の仕組みが簡単に分かる訳ではない。なぜなら、この光学プロセスが非常に複雑で、画像から逆に辿って質感を生み出している表面反射特性を推定することが理論的に非常に難しいからである。また、「理論的に」というのは「コンピュータビジョンの問題として」という意味でもあるが、人間と機械とでは質感認識の方法も大きく異なる可能性がある。たとえばコンピュータビジョンにおいて表面反射特性を推定するインバースレンダリングでは、特定の条件において BRDF (双方向反射率関数) がどのように推定されるかを真面目に考える。一方、人間の質感知覚においては、BRDF、またはそれに類する高次元の反射特性が推定されていることは考えにくく、にもかかわらず人間は一瞬にしてものの質感を適切なレベルで推定できる。その謎を解き明かすことは、視覚科学にとっても工学にとっても、大きな挑戦である。

2. 質感の画像手がかりを求めて

2.1 表面形状と照明環境の影響

画像を見て質感が得られるのだから、当然質感の手がかりは画像に含まれているはずである。物体表面の画像は、表面の反射特性、形状、そして照明環境の複雑な相互作用によって決まっている。反射特性が質感を決定する主たる物理要因である。一枚の画像からこれらの要因をすべて復元するのは非常に難しい。そういう難しい問題を

[†] NTT コミュニケーション科学基礎研究所人間情報部

Human and Information Science Laboratory, NTT Communication Science Laboratories

まともには解かないで、画像の中に内在する反射特性に関する手がかりを何とか利用して、人間は質感を知覚しているというのがわれわれの基本的な見方である。

このような考えのきっかけとなったのは、十数年前にわれわれが行った次のような研究である [1]。この研究では、アルベドや光沢といった表面反射特性の知覚に対して表面形状が与える影響を検討した。物理的には反射特性と形状は独立した要因である。だから、形状が変化して、それに伴って画像が変わっても、表面反射特性は一定であるのが「正しい」知覚のはずである。しかし、実際には、凸凹の変化で全体の明るさやハイライトの様子が変わると、表面反射特性の知覚も変化した。さらに、知覚的に表面反射特性が似ている画像においては、輝度ヒストグラムといった「生の」画像特徴が似ていることが分かった。この結果から、人間の視覚系が表面の3次元形状を正しく考慮に入れて質感を判断していないこと、二次元画像に含まれる画像特徴を手がかりとして質感を判断している可能性があること、が示唆された。

表面反射特性に対する環境光の影響に関する研究も行われている [2]。照明環境が変化すると、物体の画像は画素レベルで劇的に変化する。しかし、人間の表面反射特性の知覚はかなり安定しており、同じ反射特性をもつ物体は照明によらず同じ質感をもつ。ただし、安定した知覚が得られるのは、照明環境が変化しても自然画像の持つ特徴が維持されているからである。自然環境が持つ画像の統計的な性質から逸脱するような照明環境下では、表面反射特性知覚もおかしくなってしまう。自然な照明環境で現れ不自然な照明環境では現れない画像特徴があり、それを利用して人間は質感知覚を行っていることが示唆される。

2.2 質感の画像統計量

このような研究結果から、質感の画像手がかりがあるとすると、それは統計的のものであると考えられる [2][3][4]。自然な照明環境は千差万別であるが、その画像統計的な性質にはある種の法則性がある。照明環境は我々を取り巻く環境世界そのものなので、この法則性は自然画像の統計的な性質そのものである。その照明パターンが物体表面で反射して、シェーディングや鏡面反射の映り込みのパターンが生まれる。その表面画像の画像統計量は、照明環境の画像統計量が表面反射というフィルタを通して変形されたものである。このように考えれば、表面画像に含まれる統計量の歪みを手がかりとして、フィルタとしての表面反射特性が推定できる可能性が出てくる。

実際に、輝度やその周波数サブバンドのヒストグラムに含まれる統計的な特徴、特に歪度が、アルベドや光沢といった表面反射特性の知覚に関係あることをわれわれは示した [4][5]。すなわち、歪度が正になればなるほど、アルベドが低く光沢感が強い表面に知覚される傾向が高まり、歪度が負になればなるほど、アルベドが高く光沢感が低い表面に知覚される傾向が高まる。また、そのような画像特徴を検出する初期の

神経機構が実際の質感知覚に関与していることも、心理実験から示した。

2.3 色彩情報の利用

ここまで見てきたように、光沢感は質感研究の中心的な課題である。光沢感は、拡散反射成分に対する鏡面反射成分の強さが重要な要因となる。コンピュータビジョンでは鏡面反射成分と拡散反射成分を分離する方法が古くから議論されていて、色が分離の手がかりとして利用できることが知られている。われわれの最近の研究では、人間も色の情報を利用して鏡面反射成分の特定を行っているかどうかを調べた [6][7]。

コンピュータグラフィックスで作った物体画像を拡散反射と鏡面反射に分解し、それぞれの成分の色を独立に操作して再合成した。その画像を観察して、光沢感の広がり判断させた。その結果、鏡面反射のスペクトルが拡散反射のスペクトルを含むような場合（たとえば、赤い拡散反射に白い鏡面反射、図1上）では正しい光沢感広がり得られるのに、反対の場合（白い拡散反射に赤い鏡面反射、図1下）では光沢感の広がり得られないことが分かった。自然界においてはたいていの場合、鏡面反射は照明の色スペクトルをそのまま反映しているので、この結果から人間が物理的なスペクトル関係を正しく考慮に入れて光沢感知覚を行っていることが示唆される。

ただし、さらに詳細な分析の結果、人間の視覚系が色情報と輝度情報の分解を正しく行っていないために、物理的には不整合な状況でも光沢感が得られるケースがあることも分かってきた。また、神経による計算機構としては、カラー画像を複数の狭帯域バンドに分解して、それぞれのバンドで画像の強度に基づいた光沢処理が行われているという仮説を提案している。

3. おわりに

質感知覚が視覚科学の重要なテーマとなりつつある。各方面からの期待も大きい。しかし、本質的に難しい問題であり、伝統的な心理物理学的手法や考え方の延長では歯が立たない。ブレークスルーを見出すには、工学や神経科学とのさらなる連携が不可欠である。

光沢感に関しては、画像特徴手がかりの分析という観点を維持しながら、空間的な要因や運動情報の影響をどのように取り込んでいくのかが今後に残された課題となる。また、質感の次元は多様で、光沢はその一部に過ぎない。視覚以外のモダリティとの連携も重要なテーマとなり、現在、研究を進めている。

参考文献

- 1 Nishida, S. and Shinya, M.: Use of image-based information in judgments of surface-reflectance properties. *J Opt Soc Am A*, Vol. 15, pp. 2951-2965 (1998).
- 2 Fleming, R.W., Dror, R.O. and Adelson, E.H.: Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties. *J Vis* 3, 347-368 (2003).
- 3 Adelson, E.H.: On seeing stuff: The perception of materials by humans and machines. *Proceedings of the SPIE 4299*, 1—12 (2001).
- 4 Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L. and Adelson, E.H.: Image statistics and the perception of surface qualities. *Nature* 447, 206-209 (2007).
- 5 Sharan, L., Li, Y., Motoyoshi, I., Nishida, S. and Adelson, E.H.: Image statistics for surface reflectance perception. *J Opt Soc Am A* 25, 846-865 (2008).
- 6 Nishida, S., Motoyoshi, I., Nakano, L., Li, Y., Sharan, L. & Adelson, E.H.: Do colored highlights look like highlights? Vision Sciences Society meeting (2008).
- 7 Nishida, S., Motoyoshi, I., Maruya, K.: Luminance-color interactions in surface gloss perception. Vision Sciences Society meeting (2011).

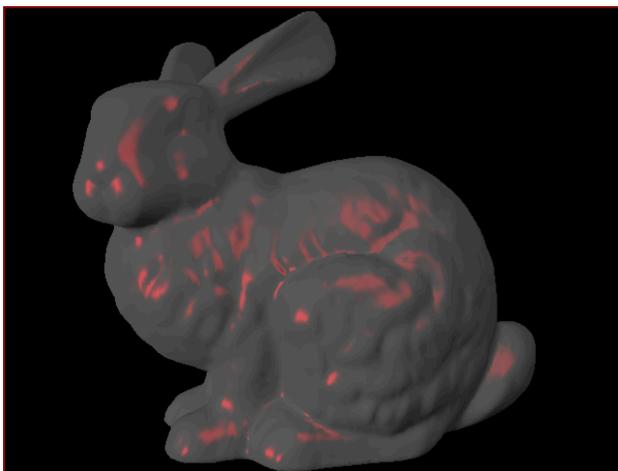


図 1 光沢知覚に対する色の効果。

Figure 1 The effects of color on gloss perception