

質感の脳内表現と感性情報処理

本 吉 勇

Visual Representation of Materials and the Processing of 'Kansei' Information

Isamu MOTOYOSHI

We can effortlessly estimate the quality of surfaces such as glossiness and translucency despite the complexity of optics involved in surfaces. Recent evidence demonstrate that the visual system estimate the surface qualities based on simple features or image statistics, which can be extracted by low-level neural mechanisms. Such a heuristic strategy of visual computation may be applied for the judgments of various visual impressions including the reality, mood, and beauty.

Key words: visual perception, image statistics, material, texture

1. 質感を見る

地面から家具、食べ物に至るまで、わたしたちはさまざまな物体の表面に囲まれて生活している。それぞれの表面には独特の質感・特性がある。

表面の画像は非常に複雑な光学的作用の産物である(図1)。ある表面に照明光が当たると、それは入射角に対して正反射(鏡面反射)したり、さまざまな方向に拡散反射する。表面の内部に透過し、屈折・散乱してから出てくることもある。その表面にいくらかでも凹凸があれば、表面上の各点から眼に届く光のパターンは実に複雑なものとなる。映画やゲームなどで使われる三次元コンピューター・グラフィックス(いわゆるCG)は、これらの光学現象を膨大な計算でシミュレートすることによって、現実に近い映像を作り出している^{1,2)}。

人間は(おそらく一部の動物も)、これほど複雑な画像から瞬時に表面の質感を知覚し、評価している。この驚くべき能力は、どのような脳の情報処理によって支えられているのだろうか？

2. 反射特性を逆算する

これまで、この謎に対する科学的アプローチはほとんどなされてこなかった。唯一参考になるのは、表面の色や明

度(明るさ)の知覚に関する研究である。この分野における一連の研究は、人間が、フラットで光沢のない表面の明るさや色を、照明の強さや表面の三次元的な方向にかかわらず正しく推定できることを明らかにしてきた³⁻⁵⁾。例えば、日向に置かれた白い紙と日陰に置かれた白い紙は、網膜上では著しく異なる輝度(強度)をもつにもかかわらず、わたしたちはそれらを同じ白い紙として知覚する。このような根拠に基づき、脳は、表面の三次元構造や照明の方向・強さを推定しつつ、それらと辻褃があうように色や明度を推定する、という理論が提案されている⁶⁾。

だが、これらの理論を凹凸に満ちた自然な表面にそのまま適用するのは難しいだろう。凹凸の一つ一つについて上記のような推定をするのはいかにも膨大な計算を要するし、そもそも計算が収束しない可能性もある。光沢や透明度がある場合には事態はもっと複雑になるだろう。脳がいかに優れた情報処理装置といえども、この戦略はあまりに負荷が重く、また冗長であると思われる。

3. 画像の特徴を使う

そこで、二次元画像のなかの簡単な特徴を分析して質感を推定する、という別の戦略を考えてみる。いわばショートカットである⁷⁾。たとえば、ある表面に光沢が

NTT コミュニケーション科学基礎研究所 (〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1) E-mail: motoyosi@apollo3.brl.ntt.co.jp

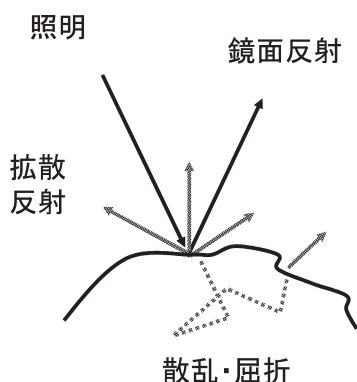


図1 表面における光の反射・屈折・散乱。

つくと、その表面の画像の強度ヒストグラムは明るい方向（正の方向）にテールを伸ばすように歪む傾向がある（図2）。ヒストグラムの歪み具合を歪度（skewness, 平均まわり三次のモーメント）として表すと、図2の右側のヒストグラムは強い正の歪度を持ち、左側のヒストグラムは弱い負の歪度をもつ。

さまざまな表面で光沢と歪度の間には強い相関がある。人間が判断する見かけの光沢も歪度と強く相関する。さらに、CGや画像処理を使ってヒストグラムを人工的に歪ませると、見かけの光沢もそれに応じて変化する。興味深いことに、物理的に光沢のある表面でも、ヒストグラムの歪度が低いと光沢がないように見えることが多い。つまり、人間は物理的に正しい反射特性を推定しているというよりは、単に画像のヒストグラムの歪みを利用して光沢感を判断しているにすぎない可能性がある。

サル（おそらく人間も）の網膜や外側膝状体（LGN）、一次視覚野（V1）には、周囲よりも明るい点に反応するオン細胞と、周囲よりも暗い点に反応するオフ細胞というニューロンがある⁸⁾。ヒストグラムの歪度は、このオン・オフ細胞の反応のバランスを計算するだけで抽出できる。

光沢の知覚が、そうした歪度検出器の出力によって決定づけられていることを示す根拠もある。正の方向にヒストグラムの歪んだ画像を長時間観察すると、その後で観察する表面の光沢が弱く見える。この錯視は、順応によってオン・オフのいずれかの神経ユニットの感度が低下し、その後の表面の画像に対する反応のバランスが崩れると考えると簡単に説明できる。

もちろんヒストグラムの歪みだけですべてが説明できるわけではない。たとえば、白っぽい埃をかぶった黒い表面の画像は確かに正の方向に歪んだヒストグラムをもつが、決して光沢があるようには見えない。また灰色の表面に真っ赤なハイライト（鏡面反射成分）があるような表面もだ

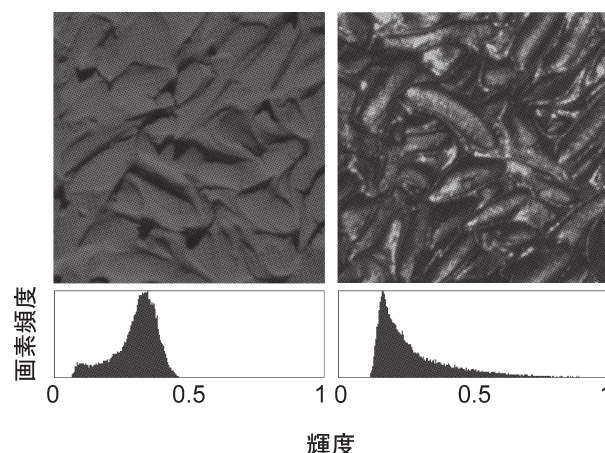


図2 光沢のない表面（左）と光沢のある表面（右），および各画像の輝度ヒストグラム。

めである⁹⁾。ほかにも、運動やステレオ情報が光沢の知覚に少なからぬ影響をもつことが知られている^{10,11)}。とはいえ、ヒストグラムの歪んでいない表面が運動やステレオだけで光沢をもつようには見えないことから、ヒストグラムの歪み（あるいはハイライトの有無）はやはり決定的な情報源であると推察される。

透明感（translucency）や金属感、やわらかさなどについても単純な手がかり特徴がある^{12,13)}。例えば、半透明な物体では照明光が内部で散乱・屈折するため、画像の陰影パターンコントラストが低くなったり、ぼやけたり、反転する。一方でハイライト（正反射）は、原理的に散乱などの影響を受けないため、不透明でも透明でも変わらない。その結果、物体が透明になるにつれ、陰影パターンとハイライトのあいだには強いミスマッチが起こる。人間は、このミスマッチを手がかりに透明度を推定している可能性がある。図3は、不透明な物体の陰影パターンを反転させたりぼかしたりするだけで、見かけの透明感が表れることを示している。

4. 低次視覚表現と感性

単純な画像特徴を利用して質感を判断する。これと同様のアイデアは、テクスチャーや現実感、雰囲気など、映像のもつさまざまな感性的情報の処理に当てはまるかもしれない。われわれの研究以外にも、その可能性を示す証拠が得られつつある。

人間やサルの低次視覚メカニズム（網膜からV1に至る神経経路）は、画像をさまざまな空間周波数と方位の成分に分解するウェーブレット解析マシンになぞらえられることがある。そうしたメカニズムの出力を比較する過程があることも知られているが、いずれにせよ、低次の視覚メカニ

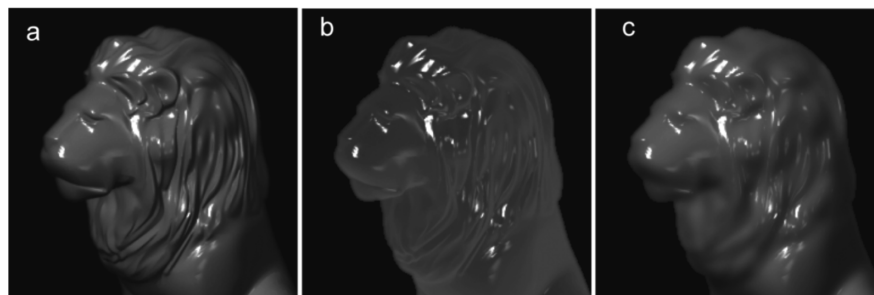


図3 (a) 不透明な表面をもつ物体。(b) 拡散反射成分の画像(陰影パターン)だけを逆転させると、ゼリーのような透明感が出る。(c) 陰影パターンをぼかすと、陶器のような厚みのある光沢が出る。

ズムが取り出す情報というのはその程度に限られている。

ところが、その限られた情報の単純な組み合わせで、あたかも三原色を混ぜてあらゆる色を作るように、任意の自然なテクスチャー画像を合成できることが示されている^{14,15)}。凹凸や光沢をもつ表面もテクスチャー画像の一種と見なせば、脳が低次の情報表現に基づいて質感を推定していることも納得がいく。

また、テクスチャーに限らず、さまざまな自然の光景や物体の画像のもつアリティ（たとえば実写とCGの違い）ですら、人間は低次の画像統計量に基づいて判断している可能性が示唆されている¹⁶⁾。同じく、風景画像から得られる「やさしい」「都会的」といった印象や雰囲気も、低次のウェーブレット統計量を手がかりにして判別できることが知られている¹⁷⁾。

絵画や写真の真贋（偽造）の判別など、特定のエキスパートに委ねられてきた視覚判断ですら、低次特徴量の観点から説明できる可能性がある。たとえば、ある著名な画家が描いたとされる複数のデッサンからウェーブレット統計量を取り出し、その多次元ベクトル空間における分布の偏りから偽作を推定するという試みがなされている¹⁸⁾。

ここで紹介した研究から得られるひとつの教訓は、あたかも理性を超えた高尚で神秘的な能力であるかのように語られがちな「感性」が、実のところ物体や人物の認識と比べると単純な脳のメカニズムに由来するらしいということである。この教訓は、たとえばCGの迫真性やTVモニターの画質といった工学的な問題に対しても、fidelityに代わる新しい視点を提供すると期待される。つまり、実物よりもさらに現実的な、精細な、あるいは美しいと知覚される映像が原理的にはありうるのである。

文 献

- 1) A. Van Dam, S. K. Feiner, J. F. Hughes and J. D. Foley: *Computer Graphics: Principles and Practice* (Addison-Wesley Publication, 1995).
- 2) H. W. Jansen: *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping* (A. K. Peters Ltd., MA, 2001).
- 3) A. L. Gilchrist: "Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement," *Science*, **195** (1977) 185-187.
- 4) D. C. Knill and D. Kersten: "Apparent surface curvature affects lightness perception," *Nature*, **351** (1991) 228-230.
- 5) M. G. Bloj, D. Kersten and A. C. Hurlbert: "Perception of three-dimensional shape influences color perception through mutual illumination," *Nature*, **402** (1999) 877-879.
- 6) D. H. Brainard: "Color constancy in the nearly natural image. 2. Achromatic loci," *J. Opt. Soc. Am. A*, **15** (1998) 307-325.
- 7) I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan and E. H. Adelson: "Image statistics and the perception of surface qualities," *Nature*, **447** (2007) 206-209.
- 8) P. H. Schiller: "Central connections of the retinal ON and OFF pathways," *Nature*, **297** (1982) 580-583.
- 9) S. Nishida, I. Motoyoshi, L. Nakano, Y. Li, L. Sharan and E. H. Adelson: "Do colored highlights look like highlights?" *J. Vision*, **8** (2008) 399a.
- 10) B. Hartung and D. Kersten: "Distinguishing shiny from matte," *J. Vision*, **2** (2002) 551a.
- 11) R. W. Fleming: Human visual perception under real-world illumination. Ph.D Thesis, Massachusetts Institute of Technology (2003).
- 12) I. Motoyoshi, S. Nishida and E. H. Adelson: "Luminance re-mapping for the control of apparent material," *Proc. of APGV 2005* (2005) p. 165.
- 13) R. W. Fleming and H. H. Bulthoff: "Low-level image cues in the perception of translucent materials," *ACM Trans. Appl. Percept.*, **2** (2005) 346-382.
- 14) D. Heeger and J. Bergen: "Pyramid-based texture analysis/synthesis," *Proc. of ACM SIGGRAPH* (1995) pp. 229-238.
- 15) J. Portilla and E. P. Simoncelli: "A parametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients," *Int. J. Comput. Vis.*, **40** (2000) 49-71.
- 16) H. Farid and M. J. Bravo: "Photorealistic rendering: How realistic is it?" *J. Vision*, **7** (2007) 766a.
- 17) 多田昌裕・加藤俊一: "階層的分類を用いた視覚感性のモデル化と類似画像検索への応用," *情報処理学会論文誌*, **44** (2003) 37-45.
- 18) S. Lyu, D. Rockmore and H. Farid: "A digital technique for art authentication," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **101** (2004) 17006-17010.

(2009年6月2日受理)