

# A gloss on surface properties

## 光沢の知覚

Michael S. Landy

人間は視覚入力を解釈することで、物の表面の質感を知覚している。脳が光沢や明るさを見分けるときには、画像のもつ単純な統計的性質の識別が大きな役割を果たしているようである。

Nature Vol. 447 (158-159) / 10 May 2007

桃とネクタリンを見分けられるのはなぜだろう？ 磨きをかけていない木材と磨きかけた木材を見分けられるのはなぜだろう？ 物の表面の質感を識別するには、明るさ、色、きめなどの多くの視覚的属性が手がかりになる。ネクタリンの表面と磨きかけた木材の表面に共通する主な属性は、光沢や輝きとして知覚される鏡面反射成分である。本吉ら<sup>1</sup>は *Nature* 2007年5月10日号で、物の表面の質感に関する新発見について述べている。それは、画像の単純な統計的性質（画像中の輝度の分布、つまり「歪み」）が、光沢や明るさの判断と強く相関しているという発見である。このことは、ネクタリンの写真からハイライト部分を除去することで、桃のように見せる操作によって実証できる（図1）。

本吉らは、しっくいのような材料のアルベド（材料中の黒い顔料の量によって決まる）と光沢（透明なアクリルコーティングの量によって決まる）をさまざまに変えたものを写真に撮り、光沢を増すほど、あるいは、表面に光沢感を出すためにアルベドを小さくするほど、輝度の分布が正の方向（輝度の高い方向）に歪むことを明らかにした（Motoyoshi *et al.*<sup>1</sup> 図2a 参照）。いい換えれば、光沢のある材料の写真は全体に暗く、ところどころに明るい部分（ハイライト）があるのだ（図2）。本吉らは、人間が見て評価した光沢や明るさが、写真のヒストグラムの歪みと相関していることを発見した。このことは、しっくいだけでなく、ほかの自然の材料についてもいえた。より重要なのは、材料の写真のヒストグラムを歪ませるだけで、その表面に光沢があるように見せたり、暗いように見せたりすることができたことである。さらに、正の歪みのある画像に順応した観察者は、その後見せられた物の光沢を少なめに感じ、負の歪みのある画像に順応した場合は、その逆に感じることも明らかになった。これは、人間が画像から輝度の歪みのようなものを抽出していることを示唆している。

この知見は、人間が画像の統計的性質を敏感に感知してさまざまな判断を行っていることを示唆する他の研究と整合性がある。光沢のほかにも、表面のきめの粗さや透明感

も画像の統計的性質に依存している<sup>2,4</sup>。歪みは、輝度ヒストグラムから抽出される統計的性質の一例である。けれども人間は、ヒストグラムの統計的性質のうち少なくとも3つを敏感に感知することがわかっている<sup>5,6</sup>。人間が知覚する明るさとコントラストは、輝度の平均と分散にほぼ対応している<sup>7,8</sup>。初期の研究からは<sup>9,10</sup>、輝度の統計的性質だけでは質感のパターンの識別を十分に説明することはできないという結果が出ていた。けれども最近の研究からは、テクスチャの識別<sup>11</sup>についても、テクスチャの見え方<sup>12,13</sup>についても、人間はバンドパスフィルタ（例えば、第一次視覚野の単純細胞）の応答の統計的性質を敏感に感知することがわかっている。

視覚系は、ヒストグラムの歪みのような統計的性質をどのようにして計算するのだろうか？ 初期コーディングとして、網膜神経節細胞の中心-周辺受容野、脳の側方膝状体領域の細胞、第一次視覚野の単純細胞の方位選択性のある受容野など、視覚系のさまざまな部位で空間線形フィルタリングが行われている。ヒストグラムの統計的性質と、特にその歪みは、暗さと明るさの情報が「オフ」と「オン」のチャンネルにより別々に表現される中心-周辺受容野をもつ細胞から抽出することができる。本吉ら<sup>1</sup>は、このようなモデルのシミュレーションを行った。この統計的性質は、第一次視覚野の方位選択性のある単純細胞の反応から抽出することもできるかもしれない<sup>5</sup>。

ヒストグラムの正の歪みにより光沢感が増すだけでなく、表面が暗くなったようにも感じられるのはなぜだろう？ 多くの知覚能力は「割り引き」により説明できる。例えば、人間は光源のスペクトル分布とは独立に表面の色を評価することができ（ただし完全にはない）、この能力は色の恒常性として知られているが、これは網膜からの信号を解釈するにあたって光源を割り引いているからである<sup>14</sup>。ヒストグラムが正に歪んでいるときには、光沢感が増したように見える。ここで、輝度分布において正の方向に広がる画素はハイライト（光源の鏡面反射）として解釈され、表面の明るさを解釈する際に割り引かれる<sup>15</sup>。その

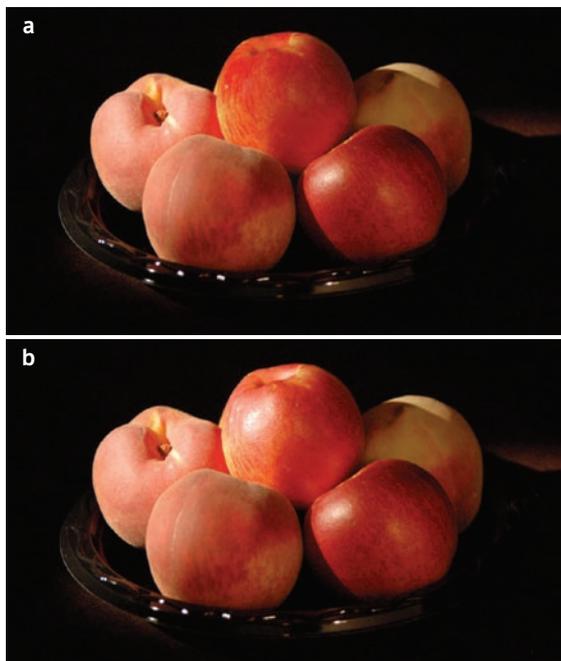


図1 果物皿の写真からハイライト部分を除去する。

a. 2つの画像を合成した写真。中央の果物以外は、左上から明るい光を当ててハイライト部分ができるようにして撮影した画像を使っている。中央の果物だけは、光源に偏光フィルターをかけ、カメラにも偏光レンズを装着することで、ハイライト部分を除去した画像を使っている。この果物はネクタリンであるが、表面の光沢を除去してあるため、桃のように見える。

b. 同じ果物皿の写真。加工はしておらず、すべてのハイライト部分を残してある（写真はYun-Xian Hoによる）。

結果、明るさは、残りの暗い画素の値の関数になる。光沢感が増すと明るさが減ったように感じられることが多い理由は、このようにして説明できる。

しかし、画像の歪みが光沢と明るさの両方の判断と相関していることを説明する方法はもう1つある。輝度ヒストグラムのパラメータ（平均、分散、歪みなど）は数学的には便利であるが、知覚的判断の際に用いられる計算には厳密には対応していないのかもしれない。実際、輝度の分散は、人間が画像のコントラストを評価するとき用いる非線形性にはなっていない<sup>7</sup>。さまざまなレベルの輝度が光沢の判断に及ぼす影響を直接測定してみると、（歪み以外の）異なる非線形性が計算されていることが明らかになるかもしれない。たとえば「ブラックショット機構」<sup>5,6</sup>ならば、平均輝度の計算に対して直交するように定義されているため、明るさの判断とは相関していないことになる。光沢の評価に関係する量をどのようにして決定するかは、まだ明らかになったとはいえないのだ。

ヒストグラムの統計的性質だけで明るさ、コントラスト、光沢の知覚のすべてを説明できるわけではない。表面の明るさやコントラストの知覚は、その周辺の表面から複雑な影響を受けている<sup>16</sup>。画像に光沢があるように見えるためには、

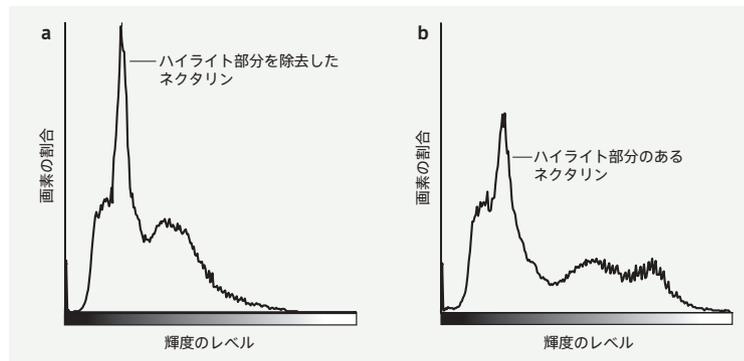


図2 輝度の分布。本吉ら<sup>1</sup>は、視覚系が画像中の輝度の分布における正の歪みの量から光沢の有無を評価する方法を示した。図1の例でいえば、果物皿の中央のネクタリンのハイライト部分を除去した場合の輝度ヒストグラムの正の歪み(a)は、ハイライト部分がある場合(b)に比べて小さい。

まずは物の表面のように見えなければならない。本吉ら<sup>1</sup>が指摘するように、正に歪んだヒストグラムがあるだけでは不十分なのである。画素をランダムに入れ替えたり、正弦波成分にランダムな位相値を与えたりして加工した画像は、正に歪んだ統計的性質をもっているかもしれないが、物の表面のように見えないだろう。また、明るい画素がまばらに分布していても、ハイライトのように見えないだろう。

表面に光沢があるように見えるには、鏡面反射があるだけでなく、その周辺の照らされ方も統計的に自然なパターンになっていなければならない<sup>17,18</sup>。表面の質感に影響を及ぼす光沢には、多くの物理的次元がある。本吉らが調べたのは、鏡方向に反射される周辺光の割合である。もう1つは、鏡面反射が点状であるかにじんでいるか（例えば、磨きかけた金属とブラシでこすった金属の違い）である。これが知覚に及ぼす影響は系統的には調べられていない。ヒストグラムの歪みから表面の質感や光沢のすべてが明らかになるわけではないが、質感の理論に向けて大きな一歩が踏み出されたことは確かである。 ■

Michael S. Land, ニューヨーク大学 (米)

- Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L. & Adelson, E. H. *Nature* **447**, 206-209 (2007).
- Ho, Y.-X., Landy, M. S. & Maloney, L. T. *J. Vis.* **6**, 634-638 (2006).
- [Ho, Y.-X., Maloney, L. T. & Landy, M. S. *J. Vis.* **7**, 1-16 (2007).
- Fleming, R. W. & Bühlhoff, H. H. *ACM Trans. Appl. Percept.* **2**, 346-382 (2005).
- Chubb, C., Econopoulou, J. & Landy, M. S. *J. Opt. Soc. Am. A* **11**, 2350-2374 (1994).
- Chubb, C., Landy, M. S. & Econopoulou, J. *Vision Res.* **44**, 3223-3232 (2004).
- Chubb, C. & Nam, J. H. *Vision Res.* **40**, 1677-1694 (2000).
- Nam, J. H. & Chubb, C. *Vision Res.* **40**, 1695-1709 (2000).
- Caelli, T. & Julesz, B. *Biol. Cybern.* **28**, 167-175 (1978).
- Julesz, B., Gilbert, E. N. & Victor, J. D. *Biol. Cybern.* **31**, 137-140 (1978).
- Bergen, J. R. & Adelson, E. H. *Nature* **333**, 363-364 (1988).
- Heeger, D. J. & Bergen, J. R. *Proc. ACM SIGGRAPH 1995*, 228-238 (Assoc. Comput. Machinery, New York, 1995).
- Portilla, J. & Simoncelli, E. P. *Int. Comput. Vision* **40**, 49-71 (2000).
- von Helmholtz, H. *Treatise on Physiological Optics, Vol. II* (transl. Southall, J. P. C.) 287 (Dover, New York, 1962).
- Todd, J. T., Nordman, J. F. & Mingolla, E. *Psychol. Sci.* **15**, 33-39 (2004).
- Gilchrist, A. L. *Seeing Black and White* (Oxford Univ. Press, New York, 2006).
- Fleming, R. W., Dror, R. O. & Adelson, E. H. *J. Vis.* **3**, 347-368 (2003).
- Dror, R. O., Willsky, A. S. & Adelson, E. H. *J. Vis.* **4**, 821-837 (2004).