

画像における質感認知の心理物理学的分析

西田 眞也

Psychophysical Analysis of Visual *Shitsukan* Recognition

Shin'ya NISHIDA

This short paper reviews recent advancement in psychophysical study on visual *Shitsukan* recognition. I first explain the effectiveness and current limitations of image statistical approach to gloss perception, then overview investigations of other properties including translucency and liquid viscosity, and discuss future direction of this research field.

Key words: human vision, material perception, gloss

視覚がとらえる物体の質感には、表面の光の反射などの光学的な性質に由来するものと、材質の機械的な性質に由来するものがある¹⁾。心理物理学的な質感知覚研究において最も研究が進んでいるのが光沢感で、これは光学的質感特徴の代表である。本解説ではまず、光沢感研究の流れを概観し、画像特徴に基づく質感知覚という考え方を説明する。そして、この考え方の有効性と現時点での限界を議論する。後半では、半透明感などの光学的質感、液体粘性感などの機械的質感、そして素材知覚についての研究を紹介する。本解説以外に、視覚的な質感に関してはすでによくつか解説が出ており²⁻⁵⁾、興味のある読者はそちらもご参考願いたい。

1. 光 沢 感

1.1 鏡面反射と拡散反射

物体表面で光がどのように反射するのかは、ものの質感を決定する重要な要因である。実際の物体表面の反射は非常に複雑であるが、近似的には拡散反射と鏡面反射に分解できる。拡散反射は物体表面に入った光が表面との相互作用を経てさまざまな方向に出ていく成分であり、鏡面反射は物体表面で鏡のように正反射する成分である。拡散反射に鏡面反射が加わるとハイライトが現れ、それを見た人は光沢感を感じる。

人間がどのように光沢感を感じるかを理解するために

は、人間がどれほど正しく表面反射特性を認識しているかを理解する必要がある。鏡面反射を拡散反射から分離し、その特性を推定することは、簡単な作業ではない。工学的な鏡面反射の推定では、表面方位や照明などを変化させたり偏光を使ったりできるが、人間が静止対象を眺めている状況で使える手段ではない。鏡面反射の完全分離が理論的にはほぼ不可能な状況で人間は光沢を知覚しているので、物理的に正しい鏡面反射推定をしているとは考えにくい。人間が間違えるとすればどのように間違えるのか、その間違いのパターンから人間の光沢感知覚の秘密に迫ることができる。

1.2 光沢感の恒常性の限界

人間が正しく表面反射特性を理解しているかどうかを心理物理的に調べるひとつの方法は、2つの物体を見比べて、同じ反射特性かどうかを判断させることである。このとき、2つの物体の間で形状や照明条件を変えることで、画素単位で見ると全く異なる画像を比較させる。そのような画像変化を乗り越えて、光沢知覚の恒常性が成り立つかどうかを調べるのである。

これまでに行われた研究の結果をみると、形状の変化によって光沢感が相当影響を受けることがわかる⁶⁾。照明の変化に関しても、自然照明環境を用いる場合には照明を変えてもある程度安定した光沢感が得られるが、間違いも生じる⁷⁾。照明環境が不自然なものになると、光沢感はさら

に弱まる。

このような光沢知覚の特性から、人間の光沢知覚に関わる情報処理は、対象の形状や照明環境を正しく考慮に入れた逆光学に基づく表面反射特性の復元ではなく、物体像に含まれる画像特徴を利用したヒューリスティックによる推定であることが示唆された^{6,7)}。つまり、あらゆる形状や照明環境で成立するわけではないが、日常の多くの場面で鏡面反射の特徴に相関をもつ画像の特徴があって、人間はそれを利用して光沢感を得ているのではないかというのである。

1.3 光沢感の画像統計量

光沢感に関わる画像特徴の候補のひとつは、輝度やサブバンドのヒストグラムの形状に関わるパラメータである。というのは、物体形状の異なる物体の間の光沢感の類似性が、輝度ヒストグラムの類似性である程度説明できることが示されたからである⁶⁾。また、自然物体画像の反射特性の機械認識特性や光沢感に対する照明環境の影響の分析から、輝度ヒストグラムや空間周波数のサブバンドヒストグラムに含まれる画像統計量が、光沢感の有効な手がかりとなる可能性が示された⁸⁻¹⁰⁾。とくに、ヒストグラムの二次と三次のモーメントが重要で、分散が大きく（輝度コントラストが強い）、歪度が正である（強い側に長くテールが伸びる）ことが光沢感の判断と強く相関していることがわかった。さらに、これらのパラメータは視覚系初期にある同心円受容野のような構造で検出可能で、そのようなメカニズムを順応させると、予想通りの仕方で光沢知覚が変化することが示された（光沢残効⁹⁾。

1.4 画像統計量の限界と高次特徴

ただし、輝度ヒストグラムの歪度のような画像統計量が光沢感と結びついているということは、この統計量の値をみただけで任意の画像の光沢感が予想できるということではない点に注意する必要がある。物体表面の同じ画像で歪度を操作すると光沢感が変化するが、歪度の値がいくら以上なら光沢感があるという絶対的な境界値はなく、画像に依存して変化する。また、歪度操作で光沢感がコントロールできるのは表面反射が拡散成分と鏡面成分の両方を含む場合で、はじめから拡散成分のみだとうまくいかない。凸凹の拡散反射面に照明光が浅く入射すると輝度ヒストグラムの歪度が高くなるケースがあるが、そのような場合に人間は光沢感を強く感じることはない¹¹⁾。照明環境の変化による光沢感の変化や¹²⁾、光沢残効の一部の現象が¹³⁾、輝度ヒストグラムの歪度では説明できないという報告がある。さらに、ハイライトの位置や方位をずらすと光沢感が減衰するが¹⁴⁾、この現象も輝度ヒストグラムの歪度変化

では説明できない¹⁵⁾。強い光沢知覚にはハイライト（周りより明るい部分）だけでなくローライト（周りより暗い部分）が重要だという指摘もされている¹⁶⁾。

輝度ヒストグラムで無視される空間要因を考慮に入れるひとつの方法は、空間周波数のサブバンドのヒストグラムを利用することである⁹⁾。初期視覚系の構造を考えても、輝度よりサブバンドのヒストグラムの利用を想定するほうが理にかなっている。実際、輝度ヒストグラムではなくサブバンドヒストグラムの特徴量を考慮に入れると、照明環境の効果¹⁷⁾や光沢残効¹⁸⁾がよりよく説明できるという報告がある。また、歪度だけでなく分散も重要な特徴量であることも忘れてはいけない⁹⁾。

しかし、サブバンド統計量で光沢を語り尽くすことができないのも事実である。HeegerとBergen¹⁹⁾のテクスチャシンセシスのアルゴリズムでは、輝度とサブバンドのヒストグラムを保存するかたちで新しい画像を生成する。このアルゴリズムを使って、光沢を含んだ画像をもとにして新しい画像を生成しても、光沢感があるテクスチャーはできない²⁰⁾。さらに複雑なPortillaとSimoncelli²¹⁾の生成アルゴリズムでは、隣接位置や隣接サブバンド感の相関なども保存するが、それでも光沢感の再現はできない。彼らのアルゴリズムは第二次視覚野までの脳内視覚処理を反映するという可能性が示唆されているが²²⁾、そのレベルまでの処理で光沢知覚は完成しないのである²³⁾。また、ハイライトずれの光沢感に対する効果も、サブバンド統計量だけでは説明が難しい。

現在、われわれは以下のように考えている。サブバンドヒストグラムの特徴抽出は光沢知覚の重要な段階であるが、それだけでは不十分である。その段階で光沢存在の証拠が示されても、高次の処理でのチェックで矛盾が生じれば否定され、反射率変化などの別の知覚解釈が与えられる。

では、その高次の処理はどのようなものであろうか。Andersonらのグループは、ハイライトはシェーディングの明るさのピークに近いところにある（明るさの適合）、ハイライトの方位はシェーディングの方位とほぼ一致する（方位の適合）という2つの条件が満たされることが光沢知覚に必要なと指摘した^{13,24)}。また、ハイライト領域の占める面積、コントラストおよびシャープネスの知覚が光沢感と強い相関を示すことを示した^{25,26)}。これらの発見は、定量的な記述や知覚間相関の分析にとどまっているという問題はあるものの、今後の研究方向を示す重要な指摘を含んでいる。

1.5 色, 両眼視差, 運動の手がかり

ここまで、1枚の静止モノクロ画像からの光沢知覚について考えてきたが、光沢の手がかりは色や両眼視差、運動にも存在する。

プラスチックのような誘電体では、拡散反射成分と鏡面反射成分が異なる分光反射特性をもつ。拡散反射は入射光の波長の一部を吸収し、反射の分光特性がその物体の色を決定する。一方、鏡面反射は照明光をそのまま反射する。この物理的な性質を考えると、拡散反射が赤や青で鏡面反射成分が白ということは自然に起こるが、拡散反射成分が白で鏡面反射成分が赤や青ということは通常起こらない。拡散反射成分が赤で鏡面反射成分が青ということもない。このような不自然な組み合わせを実際に見ると、自然な光沢感を感じられない²⁷⁾。一方、鏡面反射成分が赤や青でも、物理的に自然な組み合わせである拡散反射と同色なら光沢感を感じられる。このように、人間は光輝部の色が本体色と物理的に矛盾していないかチェックして、それがハイライトであるかどうかを判断しているのである。

鏡面成分の両眼視差は、反射している表面の奥行きではなく、映り込んでいる光源の見かけの奥行きに依存する。反射面が平面または凸なら反射面より奥に定位し、反射面が凹なら手前に定位する。このため、両眼視差は鏡面成分の分離の手がかりを与える。実際に両眼視差を与えることで人間の光沢知覚が促進される²⁸⁻³⁰⁾。また、凸反射面に対してはハイライトが奥に見えるときに光沢感が強まる。しかし、凹反射面に体しては本来のハイライトが手前に定位されたときだけでなく、奥に定位されたときにも光沢感が強まる^{28,29)}。つまり、両眼に基づく光沢処理は、必ずしも正しい幾何光学を考慮に入れているわけではない。

両眼視差と同様の原理で、対象や観測点が運動したときに、鏡面反射成分は表面上のパターンとは別の動きをする。鏡面成分の運動パターンを分析した研究から、運動フローに含まれるいくつかの特徴量によって、鏡面成分の運動と拡散成分の運動が区別できることが示唆された³¹⁾。さらに、自己受容感覚を含む運動視差による奥行き情報処理が、光沢感に関係することも報告されている³²⁾。

このように、光沢感は、さまざまな映像手がかりに関わる視覚処理が複合的に関与した産物である。

2. 半透明感など光沢以外の光学的質感

光は、完全に不透明な物体では表面のごく浅いところで反射するだけだが、大理石や人間の皮膚など半透明性(translucency)をもつ物体では、表面下に入り込んで別のところから出てくる光も、画像を形作る重要な成分とな

る。これを表面下散乱という³³⁾。表面下散乱が生み出す半透明感は、向こうが透けて見える必要がない³⁴⁾。半透明物体の鏡面反射成分は不透明物体と大差ないが、表面下での光の散乱によって拡散反射によるシェーディングのコントラストが弱まったり反転したりする。その結果、シェーディングとハイライトの間に食い違いが起こり、これが半透明感の重要な手がかりとなる³⁵⁾。実際に、シェーディングのコントラストを反転させて、鏡面反射像と合成すると、簡便に半透明画像を作り出すことができる³⁶⁾。

透明な物体の重要な質感特徴は屈折率である。透明物体の向こうに見える背景のひずみから、人間は屈折率の推定を行っていることが示唆されている³⁷⁾。ひずみは透明物体の厚みにも影響されるので、屈折率と厚みの効果を知覚的に分離することは難しい。

そのほか、髪の毛のような細かい要素で構成されるテクスチャーのサブピクセルの細かさの判断³⁸⁾や、食物などの新鮮さの判断³⁹⁾に用いられる画像特徴量の分析が進められている。

3. 液体粘性などの機械的質感

ここまでは光学的な性質からものの質感を認識するという話であったが、粘性、弾性、硬度など材質の機械的な性質も、質感知覚の重要なターゲットである。ここでは、液体の粘性についての最近の研究を紹介する。

われわれは、1枚の静止画だけから、水のような粘性の低いものと、ハチミツのような粘性の高いものを視覚的に区別することができる^{40,41)}。この場合の粘性判断の手がかりは形である。液体は特定の形をもたない。しかし、外部環境との境界面がある統計的な性質をもった形になる。その性質の違いは、曲率やまとまりのよさなどの複数の形状パラメーターで精度よく記述できるという報告がある⁴⁰⁾。

液体の粘性は、動画になるとさらにわかりやすくなる。形状情報が利用できないようにしたランダムノイズ刺激で液体の運動場だけを再現しても、液体やその粘性が程度判断できる⁴²⁾。すなわち、運動場そのものに液体や粘性判断のための画像情報が含まれている。さらに分析を進めると、液体知覚は運動場がラプラシアン平均と強い相関を示すことがわかった。これは、運動場の空間的な滑らかさが液体知覚の最大の手がかりとなっていることを示唆している。一方、粘性判断に関しては、運動場が滑らかであるという条件の下、局所的な運動速度の平均が支配的なパラメーターであることがわかった。これは、粘性が低いものは早く流れ、粘性が高いものはゆっくり流れるというナイーブな物理法則を、視覚系の液体判断が採用しているこ

とを示唆している。

4. 材質の知覚

英語で質感知覚という *material perception* になり、金属や陶器といった素材の知覚というニュアンスが強くなる。材質の知覚は高次の推論と考える向きもあるかもしれないが、ごく短時間の刺激提示でも素材判断は可能である⁴³⁾。素材の知覚は、光沢や透明度、粘性などのさまざまな質感特徴を統合した結果として成立するのかもしれない⁴⁴⁾。素材に特異的な画像特徴に基づいて直接的に素材を認識している可能性も否定できない。また、素材の知覚が質感特徴の判断に影響する可能性もある。

素材に関する情報は視覚だけでなく、聴覚や触覚からも得られる。視覚的な見かけとその物体を叩いたときの聴覚的な音をさまざまに組み合わせた視聴覚刺激に対する素材判断から、各モダリティで独立に推定されたある素材らしさの積をとるような、視聴覚の素材らしさが決定していることが示された⁴⁵⁾。これはマガーク効果などの説明に用いられるファジー論理モデル⁴⁶⁾と類似しており、理論的に最適な情報統合のひとつの形である。

視覚心理物理学にとって質感研究は、サイエンスとしても応用研究としても昨今注目を集めている。しかし、世間の期待に応えるような成果が十分に上がっているとはいえない。質感研究は難しいと思われているし、実際に難しい。本解説の最後に、質感研究の難しさを乗り越えるという観点から、今後の研究展望を述べたい。

これまでの視覚心理物理学の典型的な方法論は、体系的に操作された刺激パラメーターと被験者のひとつまたは少数の反応との関数関係を明らかにして、刺激と反応を繋ぐ情報処理を推定するというものであった。一方、質感研究の場合、光学的な質感特性の物理原因とされる BRDF や BSSRDF は複雑で高次元である。また、実物を使うにしろ CG を使うにしろ刺激の作成は大変で、刺激選びにもあまりに多くの自由度が残されている。知覚される質感も複雑で、どのような空間で記述するのが妥当なのか明確でない。未知の高次元の刺激空間と未知の高次元の知覚反応空間を結び付けなければならないところに質感研究の本質的難しさがある。この問題を解決するには、古典的な心理物理学の枠組みを超えて、機械視覚、機械学習、コンピュータショナルフォトグラフィー、データマイニング、神経デコーディング、感性工学などで培われてきたノウハウを貪欲に取り込んでいく必要がある。また、有効な解析をするためには、大きな刺激セットに対する多次元の質感判断

のデータが不可欠である。データの公開や共有、クラウドソーシングを使った心理実験などが鍵となるだろう。

質感研究で個別問題を扱うと、普遍性がない趣味的研究のように思われる可能性がある。例えば表面の「ほこり感」などはかなり面白い質感問題だと思うが、その重要性はなかなかわかってもらえないだろう。サイエンスとしては、単に特定の画像特徴と質感との対応づけを行うだけでなく、そこから質感知覚の普遍論理のようなものを導き出したい。その普遍論理は、基本特徴抽出から基本表面反射要素への分解のようなエレガントな計算方式かもしれないし、生に近い画像要素とさまざまな質感との巨大なルックアップテーブルをもつということかもしれない。この問題を考えるにも、機械認識との相違を分析することは有効な方法だろう。また、画像特徴と質感の関係がどのように獲得されたのかを理解する必要がある。その意味では、質感の発達⁴⁷⁾や学習⁴⁸⁾の理解が重要となるだろう。

文 献

- 1) E. H. Adelson: "On seeing stuff: The perception of materials by humans and machines," *Proc. SPIE*, **4299** (2001) 1-12.
- 2) 本吉 勇: "質感知覚の心理学", *心理学評論*, **51** (2008) 235-249.
- 3) B. L. Anderson: "Visual perception of materials and surfaces," *Curr. Biol.*, **21** (2011) R978-R983.
- 4) 西田真也: "視覚における質感知覚", *生体の科学*, **63** (2012) 255-262.
- 5) R. W. Fleming: "Visual perception of materials and their properties," *Vision Res*, **94** (2014) 62-75.
- 6) S. Nishida and M. Shinya: "Use of image-based information in judgments of surface-reflectance properties," *J. Opt. Soc. Am. A*, **15** (1998) 2951-2965.
- 7) R. W. Fleming, R. O. Dror and E. H. Adelson: "Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties," *J. Vision*, **3** (2003) 347-368.
- 8) R. Dror, E. Adelson and A. Willsky: "Recognition of surface reflectance properties from a single image under unknown real-world illumination," *Proc. IEEE Workshop on Identifying Objects across Variation in Lighting: Psychophysics and Computation* (2001).
- 9) I. Motoyoshi, S. Nishida, L. Sharan and E. H. Adelson: "Image statistics and the perception of surface qualities," *Nature*, **447** (2007) 206-209.
- 10) L. Sharan, Y. Li, I. Motoyoshi, S. a. y. Nishida and E. H. Adelson: "Image statistics for surface reflectance perception," *J. Opt. Soc. Am. A*, **25** (2008) 846-865.
- 11) M. W. A. Wijnjtes and S. C. Pont: "Illusory gloss on Lambertian surfaces," *J. Vision*, **10**, No. 9 (2010) article 9, 1-12.
- 12) M. Olkkonen and D. H. Brainard: "Perceived glossiness and lightness under real-world illumination," *J. Vision*, **10**, No. 9 (2010) article 5, 1-19.
- 13) P. J. Marlow, J. Kim and B. L. Anderson: "The role of brightness and orientation congruence in the perception of surface gloss," *J. Vision*, **11**, No. 9 (2010) article 16, 1-12.
- 14) J. Beck and S. Prazdny: "Highlights and the perception of glossiness," *Percept. Psychophys.*, **30** (1981) 407-410.
- 15) B. L. Anderson and J. Kim: "Image statistics do not explain the

- perception of gloss and lightness,” *J. Vision*, **9**, No. 11 (2009) article 10, 11–17.
- 16) J. Kim, P. J. Marlow and B. L. Anderson: “The dark side of gloss,” *Nat. Neurosci.*, **15** (2012) 1590–1595.
 - 17) I. Motoyoshi and H. Matoba: “Variability in constancy of the perceived surface reflectance across different illumination statistics,” *Vision Res.*, **53** (2012) 30–39.
 - 18) 中内茂樹, 西島 遼, 鯉田孝和, 永井岳大, 谿 雄祐, 北崎充晃: “光沢感と輝度歪度に見られる空間周波数依存的な関係”, *Vision (日本視覚学会冬季大会予稿集)*, **26** (2014) 30–31.
 - 19) D. Heeger and J. Bergen: “Pyramid-based texture analysis/synthesis,” *Proc. 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (1995) pp. 229–238.
 - 20) L. Sharan: “Image statistics and the perception of surface reflectance,” Master thesis (Massachusetts Institute of Technology, 2006).
 - 21) J. Portilla and E. Simoncelli: “A parametric texture model based on joint statistics of complex wavelet coefficients,” *Int. J. Comput. Vision*, **40** (2000) 49–70.
 - 22) J. Freeman, E. P. Simoncelli: “Metamers of the ventral stream,” *Nat. Neurosci.*, **14** (2011) 1195–1201.
 - 23) Q. Wang, I. Motoyoshi and S. Nishida: “Characterization of high-level images features for surface gloss perception,” *J. Vision (VSS abstract)*, **13** (2013) article 202.
 - 24) J. Kim, P. J. Marlow and B. L. Anderson: “The perception of gloss depends on highlight congruence with surface shading,” *J. Vision*, **11**, No. 9 (2010) article 4, 1–19.
 - 25) P. J. Marlow and B. L. Anderson: “The Perception and Misperception of Specular Surface Reflectance,” *Curr. Biol.*, **22** (2012) 1909–1913.
 - 26) P. J. Marlow and B. L. Anderson: “Generative constraints on image cues for perceived gloss,” *J. Vision*, **13**, No. 14 (2013) article 2, 1–23.
 - 27) S. Nishida, I. Motoyoshi, L. Nakano, Y. Li, L. Sharan and E. H. Adelson: “Do colored highlights look like highlights?” *J. Vision (VSS abstract)*, **8** (2008) article 339.
 - 28) A. Blake and H. Bühlhoff: “Does the brain know the physics of specular reflection?” *Nature*, **343** (1990) 165–168.
 - 29) I. S. Kerrigan and W. J. Adams: “Highlights, disparity, and perceived gloss with convex and concave surfaces,” *J. Vision*, **13**, No. 1 (2013) article 9, 1–10.
 - 30) Y. Sakano and H. Ando: “Effects of head motion and stereo viewing on perceived glossiness,” *J. Vision*, **10**, No. 9 (2010) article 15, 1–14.
 - 31) K. Doerschner, R. W. Fleming, O. Yilmaz, P. R. Schrater, B. Hartung and D. Kersten: “Visual motion and the perception of surface material,” *Curr. Biol.*, **21** (2011) 2010–2016.
 - 32) Y. Tani, K. Araki, T. Nagai, K. Koida, S. Nakauchi and M. Kitazaki: “Enhancement of glossiness perception by retinal-image motion: Additional effect of head-yoked motion parallax,” *PLoS ONE*, **8** (2013) e54549.
 - 33) H. Jensen, S. Marschner, M. Levoy and P. Hanrahan: “A practical model for subsurface light transport,” *Proc. 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (2001) pp. 511–518.
 - 34) R. Fleming and H. Bühlhoff: “Low-Level Image Cues in the Perception of Translucent Materials,” *ACM Trans. Appl. Percept.*, **2** (2005) 346–382.
 - 35) I. Motoyoshi: “Highlight-shading relationship as a cue for the perception of translucent and transparent materials,” *J. Vision*, **10**, No. 9 (2010) article 6, 1–11.
 - 36) I. Motoyoshi, S. Nishida and E. H. Adelson: “Luminance remapping for the control of apparent material,” *Proc. Second Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization* (2005) p. 165.
 - 37) R. W. Fleming, F. Jakel and L. T. Maloney: “Visual perception of thick transparent materials,” *Psychol. Sci.*, **22** (2011) 812–820.
 - 38) 新谷幹夫, 西田眞也: “人間の「細かさ」視知覚の基本特性”, *映像情報メディア学会予稿集* (2012) pp. 7–4.
 - 39) Y. Wada, C. Arce-Lopera, T. Masuda, A. Kimura, I. Dan, S. Goto, D. Tsuzuki and K. Okajima: “Influence of luminance distribution on the appetizingly fresh appearance of cabbage,” *Appetite*, **54** (2010) 363–368.
 - 40) R. Fleming and V. Paulun: “Goop! On the visual perception of fluid viscosity,” *J. Vision (VSS abstract)*, **12** (2012) article 949.
 - 41) T. Kawabe, K. Maruya and S. Nishida: “The role of dynamic visual information in the estimation of liquid viscosity,” *J. Vision (VSS abstract)*, **12** (2012) article 870.
 - 42) T. Kawabe, K. Maruya, R. Fleming and S. Nishida: “Seeing liquids from visual motion,” *Vision Res.* (in press).
 - 43) L. Sharan: “The perception of material qualities in real-world images,” Ph. D thesis (Massachusetts Institute of Technology, 2009) pp. 1–146.
 - 44) R. W. Fleming, C. Wiebel and K. Gegenfurtner: “Perceptual qualities and material classes,” *J. Vision*, **13**, No. 8 (2013) article 9, 1–20.
 - 45) W. Fujisaki, N. Goda, I. Motoyoshi, H. Komatsu and S. Nishida: “Audio-visual integration in the human perception of materials,” *J. Vision*, **14**, No. 4 (2014) article 12, 1–20.
 - 46) D. W. Massaro and D. G. Stork: “Speech recognition and sensory integration: A 240-year-old theorem helps explain how people and machines can integrate auditory and visual information to understand speech,” *Am. Sci.*, **86** (1998) 236–244.
 - 47) J. Yang, Y. Otsuka, S. Kanazawa, M. K. Yamaguchi and I. Motoyoshi: “Perception of surface glossiness by infants aged 5 to 8 months,” *Perception*, **40** (2012) 1491–1502.
 - 48) Y. Tani, T. Nagai, K. Koida, M. Kitazaki and S. Nakauchi: “Experts and novices use the same factors — but differently — to evaluate pearl quality,” *PLoS ONE*, **9** (2014) e86400.

(2014年2月13日受理)