

[研究助成 (A)]

視知覚特性に基づく物体の光沢感の正確な画像再現手法の開発

2251019

研究代表者
(助成金受領者)

千葉大学 大学院情報学研究院

准教授

田 中

緑

[研究の目的]

■研究の背景と社会的要請

インターネット通販、デジタル美術館、自動車などの工業デザインにおいて、製品の見た目をディスプレイ画面上で正確に再現する技術は、意思決定の迅速化やコスト削減のために不可欠な技術基盤である。これまで画像の再現評価は、主に色を実物と一致させること（測色的再現）がゴールとされてきた。しかし、色をどれだけ物理的に一致させても、画面越しに見ると「どこか質感が違う」「実物のような鋭いハイライトや深みのある光沢がない」と人間が知覚することが長年の課題であった。この見た目のギャップが、高品質なデジタル質感再現を阻む最大の障壁となっている。

■質感知覚における学術的課題

人間が光沢を感じるメカニズムは非常に複雑である。単に光がどう反射するかだけでなく、周囲の景色の映り込み、物体の立体感、見る角度による輝度の変化などを、脳が高度に処理して判断している。近年の質感工学の研究から、人間は画像内の輝度分布からなる統計的特徴を手がかりに光沢を判断している可能性が示唆されてきた。しかし、実物体と全く同じ光沢感をディスプレイ画面上で実現するために、画像のどの成分をどう調整すればよいのか、その定量的かつ汎用的な指針は確立されていなかった。

■本研究の目的

本研究は、人間の知覚メカニズムに焦点を当て、観察評価実験解析に基づいて実物体と画像の間の知覚的ギャップを埋めるための画像補正モデルを構築することを目的とした。具体的には、以下の2つのアプローチを軸とした。

- ①光沢感の低下に関わる物理要因の特定
- ②実物体と同じ光沢感をディスプレイ画面で実現する「画像補正モデル」の構築

[研究の内容、成果]

1. 実験環境の構築と実物体刺激の選定

本研究では、11種類の材質（金属、プラスチック、布、木材、ガラス、皮革、石材、陶器等）から、表面の凹凸や反射特性に多様性を持つ67種類の実物体刺激（50 mm × 50 mm）を選定した。これらの実物体刺激は、表面の凹凸や反射特性に多様性を持たせるために、日常的な素材からランダムに選出された。実物体刺激と画像刺激は、以下の手順で実験環境を構築した。

●実物体刺激の提示条件

各実物体刺激は、実験時に観察者の視線に対して垂直になるよう観察ボックス内に配置された。照明には、昼光同等の色温度を有するD65相当の拡散照明と高指向性照明を組み合わせたものを用いた。また、実物体刺激から観察者の目に入る輝度が、ディスプレイの最高輝度（962 cd/m^2 ）を超えないよう照明光の強さを調整した。

さらに、三次元形状測定機（キーエンス製 VR-5100）を用いて、各刺激の表面粗さを $0.5\ \mu\text{m}$ という高い空間分解能で計測し、形状データを獲得した。

●高精度な測色的再現画像の生成

画像刺激は、実物体を上記の観察ボックス内で撮影し、測色的に再現して作成した。撮影には、二次元分光放射計（テクノオプティクス製 SR-5100）を用いた。取得した CIE XYZ 画像データは、事前に実施したディスプレイ較正で作成した CIE XYZ から RGB への変換行列を用いて RGB 画像に変換し、較正済みディスプレイ（EIZO 製 CG3146）に表示した。画像刺激の色再現精度を確認するために、X-Rite カラーチェッカーを使用して実物体と測色的再現画像の各カラーパッチの三刺激値を分光放射計（コニカミノルタ製 CS-2000）で測定したところ、CIE1976 ΔE_{ab}^* の平均色差は 1.2 であった。これは人間が色の違いを識別できる限界の約半分に相当することから、測色的再現画像は実物体と見分けがつかないほどの十分な精度で色再現されていることが確認された。

2. 実験

本研究では、2 種の心理物理実験を実施した。実験 A では、実物体と測色的再現画像から知覚される光沢感を直接比較し、両者の差異と物理的特徴の関係を解析した。実験 B では、測色的再現画像の光沢成分を編集した刺激群を用いて、実物体と知覚的に等しい光沢感をもつ画像を選択する心理物理実験を行い、画像特徴を解析した。以下にその詳細を述べる。

2.1. 実験 A：光沢感知覚の低下要因の実験的解析

●実験方法

実験 A では、実物体と測色的再現画像から知覚される光沢感を直接比較し、両者の差異と物理特徴の関係を解析した。実物の光沢感に対する画像の光沢感を数値化するため、マグニチュード推定法を用いた。基準となる実物体刺

激の光沢感評価値を正の定数 100 で基準値として設定し、評価対象の評価値を 0 と基準値の 2 つの指標で線形に評価した。実験では、評価値は非負とし、上限値は設定していない。

実験 A の実験環境を図 1 に示す。実物体刺激と測色的再現画像刺激は、それらに対する観察者の視野角がともに 8 度となるように配置された。提示された観察画像の解像度は約 65 cycle per degree (cpd) であり、これは視力 1.0 の人間が識別できる限界 30 cpd を大きく上回るため、実物体と同等の精細さを担保するほどの十分な画像解像度であった。観察者は、事前に顎台を調整して観察時の視線を固定した。評価環境に 5 分間順応したのち、実験を開始した。実物体刺激と画像刺激を両目で比較観察し、画像の光沢感を評価した。評価後には刺激が変更され、同様の評価を繰り返し、全 67 種類の刺激について各観察者は 2 回ずつ評価を行った。

●実験結果

20 代の観察者 10 名が実験 A に参加した。全員が石原式色覚検査と視力検査を事前に行い、正常な色覚と 1.0 以上の視力を有することが確認された。得られたデータから統計的な外れ値を除外した上で平均値を算出し、実物体と画像の間で光沢感の評価に有意差があるかを検証した。具体的には、Smirnov-Grubbs 検定を行い、それぞれの観察者が 2 回ずつ評価した 10 個の平均値の中で最も平均から外れた値が外れ値かどうかを判定した ($p < 0.05$)。外れ値が検出された場合は、外れ値がなくなるまで繰り返し除外した。その後、評価値の平均値を算出した。次に、対応のある t 検定を行い、測色的再現画

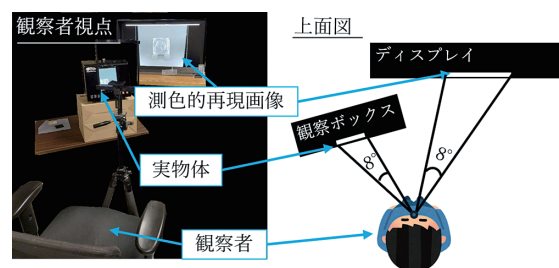


図1 実験 A の実験環境

像の評価値が実物体の光沢感と比較して、有意に変化しているかを検証した ($p < 0.05$)。さらに、Cohen の効果量 d を算出し、有意性を確認した。以降の議論では、 $p < 0.05$ かつ効果量 $d > 0.5$ を満たす刺激を有意差ありとして扱う。

検証の結果、67 種類の刺激のうち、約 93% に相当する 62 種類で測色的再現画像の光沢感評価値が実物体の基準値 100 よりも有意に低下した。特に、ガラス、陶器、樹脂、金属といった高光沢材質ほど、画像化した際の低下が顕著であった。

一方で、測色的再現画像の方が実物体より有意に高い光沢感として評価された刺激は、白色キャンバスの 1 種類のみであった。この刺激は非常に明るい白色 ($L^* = 97.3$) であり、布の折り目による微細な表面の凹凸を有する。実物体では、物体表面の光が拡散しているように見えるが、画像化によってその物理的な拡散性が弱まり、画像上の輝度分布の変化が強調された結果、実物体よりも画像で観察した際に、より光沢感が高いと知覚されたと考えられる。

以上の結果から、実物体の光沢感は測色的画像再現によって全体的に低下することが示された。これは、単に色を物理的に一致させるだけの測色的再現画像では、実物体が持つ本来の光沢感をディスプレイ画面上で再現することは困難であることを報告した先行研究と一致している [1]。これは、実物体は見る角度による輝度の変化や両眼視差やハイライトの重なりといった奥行き情報を持つが、平坦なディスプレイ画像ではそれらの情報が失われるため、光の入射や反射特性が異なることに起因すると考えられる。

●光沢感の低下に影響を与える物理的特徴の解析

実験 A において、実物体と画像の光沢感知が有意に変化したサンプルの物理特徴を明らかにするために、実物体刺激の色や輝度分布だけではなく、形状情報を含む表面粗さを解析した。形状データから ISO 25178 に基づいて、算術平均高さ (R_a)、最大高さ (R_y)、十点平均

粗さ (R_z)、二乗平均平方根高さ (R_q)、歪度 (R_{sk})、尖度 (R_{ku}) の 6 つの物理量を算出した [2]。

実験 A で得られた実物体と測色的再現画像の間で評価値に有意差がなかった 4 種のサンプル ($d < 0.5$) をグループ 1 とし、有意差があった 63 種のサンプルをグループ 2 と定義した。この 2 群間で、複数の指標を対象に Mann-Whitney の U 検定を行った ($p < 0.05$)。対象の指標は、テクスチャ解析手法を代表する gray-level co-occurrence matrix (GLCM) から算出した 6 種の特徴量 (contrast, dissimilarity, homogeneity, angular second moment (ASM), entropy) と色特徴 (L^* , 彩度), 計測した 6 種の表面粗さ指標 (R_a , R_y , R_z , R_q , R_{sk} , R_{ku}) である。

解析の結果、表面凹凸の偏りを示す歪度 R_{sk} の指標において、2 つのグループ間にグループ 1 > グループ 2 という有意差が確認された。具体的には、歪度 R_{sk} の値が小さく、物体表面の凹凸が凸側に偏っている刺激 (表面がなだらかで平滑面が多い材質) ほど、実物体と測色的再現画像の間で光沢感が有意に低下しうると考えられる。グループ 2 のサンプルは、負の R_{sk} を持ち、表面が平滑で滑らかな領域が多い場合に光沢感の損失が生じやすいことを示している。この結果より、物体表面全体に広がる精細なツヤ (Hunter の光沢の分類 [3] では sheen gloss や contrast gloss に該当) が光沢感の評価に影響を与える可能性がある。

2.2. 実験 B：知覚的再現のための画像特徴量解析と補正モデル

●実験方法

実験 B では、測色的再現画像の光沢成分を編集した刺激群を用いて、実物体と知覚的に等しい光沢感をもつ画像を選択する心理物理実験を行い、画像特徴を解析した。

実験 B は、実験 A と同様の環境と手順で実施された。異なる点は、ディスプレイ画面に表示する画像として、色をそのまま再現しただけの画像 (測色的再現画像) ではなく、画像の光

沢成分を段階的に変化させた画像（編集画像）を用いた点である。この画像刺激は、Manabeら[4]によって開発された光沢感編集手法を応用して作成した。図2に、光沢感を編集した画像の一例を示す。

観察者は、ディスプレイ画面に提示される編集画像刺激を手元のキーボード操作によって切り替え、観察ボックス内に配置した実物体刺激と、一番光沢感が同じに見える画像（光沢感再現画像）を1枚選択した。1つの刺激に対して、光沢の度合いが異なる31枚の画像が用意された。観察者が画像を選択すると、実験者は刺激を切り替え、同様の評価を繰り返した。全67種類の刺激に対して、各観察者は2回ずつ評価を行った。

●実験結果

実験Bの目的は、観察者が実物体と画像を比較する際に、どのような画像特徴を手掛かりとして光沢感を判断しているのかを明らかにすることである。そのために、画像内の明暗パターンを解析するテクスチャ解析手法であるGLCM特徴量を用いて、観察者が選んだ光沢感再現画像の特徴を分析した。利用したGLCM特徴量はcontrast, dissimilarity, homogeneity, ASM, entropyであり、二次元輝度画像から抽出される。これらの特徴量は、我々の先行研究により、物理的な光沢感のモデル化に有効であり、特にcontrastやentropyは光沢感や質感の重要な指標であることが示唆されている[5]。実物体の物理的特徴は撮影を行わないと得ることができないため、実験Aで用いた測色的再現画像のGLCM特徴量を代わりに用いた。実験Bでは、観察者が選択した光沢感再現画像



図2 光沢感を編集した画像の例
(左から、光沢抑制、測色的再現、光沢強調)

のGLCM特徴量の平均値を算出し、測色的再現画像と比較した。

測色的再現画像と光沢感再現画像のGLCM特徴量を比較した結果、複数のテクスチャ指標の中で特にcontrastに有意な変化が観察され、それ以外の指標では、測色的再現画像と光沢感再現画像の間で大きな差は見られなかった。図3に、測色的再現画像と光沢感再現画像のcontrastの比較結果を示す。

図の横軸は測色的再現画像の、縦軸は光沢感再現画像のcontrastをそれぞれ示しており、誤差バーは標準誤差を示している。各点(“●”)は、測色的再現画像と光沢感再現画像の間で、有意に変化したサンプル($d > 0.5$)を示し、白抜き点(“○”)は有意差がなかったサンプルを示している。図3に示したcontrastの比較結果より、測色的再現画像と光沢感再現画像の関係を表す切片0の線形近似式は $y = 1.13x$ 、この近似式の相関係数は $R^2 = 0.98$ であった。

図3から求めた線形近似式より、測色的再現画像のcontrastを約1.13倍に増加させることで、実物体と知覚的に等しい光沢感が再現可能であると考えられる。しかし、contrastを操作することは、画像の明度や色に影響を与える可能性がある。そこで、測色的再現画像と光沢感再現画像の L^* や a^*b^* 色度図を比較したところ、

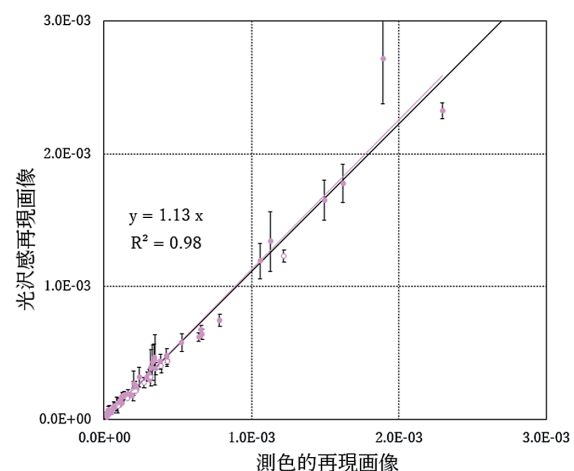


図3 測色的再現画像と光沢感再現画像のcontrastの比較結果

人間が色の違いを見分けられる限界（弁別閾）を超える変化（ $\Delta E_{ab}^* > 2.3$ ）が生じていた。弁別閾を超えて差があったにもかかわらず、光沢感が同じと判断されていたことから、光沢感知覚においては色情報保持の優先度が低いと考えられる。したがって、画像化によって光沢感が大きく低下するサンプルに対しては、GLCM特徴量の contrast を増加させる処理により、実物体と知覚的に等しい光沢感を再現できることが示唆された。

3. まとめ

本研究では、実物体の光沢感が画像再現によってどのように変化するか、また実物体の光沢感を画像再現するためにはどのような画像補正が必要かを明らかにするため、2つの心理物理実験を行った。

実験 A では、実物体と物理的に色を合わせた測色的再現画像を比較し、光沢感知覚の変化を検証した。その結果、大半の刺激において、実物体の光沢感は画像化によって低下した。特に表面粗さの物理量である歪度 R_{sk} が低い、すなわち表面の微細な凹凸がなだらかで滑らか

な素材ほど、画像化による光沢感の損失が顕著であることを特定した。

実験 B では、実物体と光沢感編集を行った画像群を比較し、観察者は実物体と等しい光沢感を持つ画像を選択した。選択された光沢感再現画像の画像特徴を解析した結果、画像の contrast を約 1.13 倍に増幅させることで、失われた光沢感を補正し、実物体と等しい光沢感を画面上で再現できる明確な指針を得た。

本成果は、デジタルアーカイブや EC サイト、工業デザインにおける質感再現技術の高度化に大きく寄与するものである。

[成果の発表、論文など]

- [1] 安喰英幸, 田中緑, 堀内隆彦: 光沢感の画像再現に影響を与える物理特徴と画像特徴の実験的解析, 日本色彩学会研究会大会 (研究発表会奨励賞受賞), (2025 年 11 月).
- [2] 明田川航世, 田中緑, 堀内隆彦: ディスプレイの画素開口率が光沢感知覚に与える影響の実験的検討, 日本色彩学会研究会大会 (研究発表会奨励賞受賞), (2025 年 11 月).
- [3] 安喰英幸, 田中緑, 堀内隆彦: 実物と画像の直接比較による光沢感再現のための画像特徴の実験的解析, 映像情報メディア学会冬季大会, (2025 年 12 月).