

## 表示デバイスや視環境に依存しない物体の光沢感再現法

## Development of Device Independent Gloss Reproduction Model

津村徳道<sup>†, ††</sup>, 池田哲男<sup>†</sup>, 三宅洋一<sup>†</sup>Norimichi Tsumura<sup>†, ††</sup>, Tetsuo Ikeda<sup>†</sup> and Yoichi Miyake<sup>†</sup>

**Abstract** We proposed an empirical model to reproduce object gloss. This model was obtained by analyzing on observer rating experiment and surface reflectance characteristics of the object based on Phong's light reflection model. We showed that our model significantly reproduced gloss using display devices with different dynamic ranges. In modeling gloss, we introduced a method to estimate the relative radiance of the display by rating the gray chart experiment without any measurement devices. We also proposed a prototype that could be used as an online shopping system.

キーワード：質感解析，電子商取引，e-commerce，ヒューマンパーセプション，反射モデル，コンピュータグラフィックス

## 1. はじめに

近年，インターネットの発達とブロードバンド化に伴い，電子商取引が急速に普及している。しかしディスプレイ上に表示される商品画像は，その見えがディスプレイの特性や視環境に大きく依存する。そのため装飾品などの，色や光沢感などの見えが重要視される商品では，顧客満足度の低下や返品率の増加により取引が困難な状態となっており，現在活発に行われている取引の対象は書籍やCDなどの見えが重要視されない商品に限定されている。そこで，表示デバイスや視環境に依存しない商品画像配信技術の開発が求められている。

これまで表示デバイスに依存しない画像再現としては，sRGB<sup>8)</sup>のように標準色空間を使用したり，ICC Profile<sup>9)</sup>のようにデバイスのプロファイルを記述する手法が一般的であった。しかしこれらの手法では，照明などの視環境が限定されており，各デバイスの特性を予め計測する必要があるため実用的な手法ではない。また，表示デバイスに依存しない色再現については考慮されているが，色に次いで重要な光沢感再現に関しては考慮されていない。

そこで本研究では，光沢感に着目し，表示デバイスや視環境に依存しない光沢感再現方法を提案する。Ferwerda<sup>10)</sup>らは物体の持つ物理的特性のうち，色・偏角反射特性と人

間が知覚する光沢感の関係をモデル化した。本研究では，Ferwerdaらの手法を拡張し，デバイスの最大輝度・物体の偏角反射特性と人間が知覚する光沢感の関係をモデル化することにより，異なる最大輝度を持つデバイス間における最大輝度に依存しない光沢感再現方法を実現した。また，ユーザによる表示デバイス上での簡単な操作により，その最大輝度を推定する手法を提案する。これにより，放射輝度計などの特別な測定装置を用いず，表示デバイスの最大輝度を得ることができる。さらに輝度推定手法では，照明などの視環境の影響による，相対的な表示デバイスにおける輝度の低下を考慮することができる。実験により，表示デバイス・視環境に依存しない光沢感再現が実現されることを確認した。

次節では，偏角反射特性を表現するための物体の反射モデルについて概説する。3節では，2節で述べた反射モデルのパラメータ・表示デバイスの最大輝度・人間が感じる光沢感の関係を主観評価実験によりモデル化する。4節では，ユーザによる表示デバイス上での簡単な操作により，デバイスの最大輝度を推定する手法を提案し，その有効性を評価する。5節では，3節の光沢感モデルと4節の輝度推定手法の組合せにより，表示デバイスの見かけ上の最大輝度を用いて，光沢感を有效地に再現できることを示す。6節では，実際にデバイス・視環境に依存しない商品画像配信システムを構築する。7節で，まとめと議論を行う。

## 2. 物体の反射モデル

2003年12月17日受付，2004年5月20日最終受付，2004年6月11日採録  
†千葉大学大学院自然科学研究科

(〒263-8522千葉市稲毛区弥生町1-33, TEL 043-290-3262)

††独立行政法人科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業

(〒332-0012川口市本町4-1-8川口センタービル, TEL 048-226-5641)

†Graduate School of Science and Technology, Chiba University

(1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8522, Japan)

††PRESTO, Japan Science and Technology Corporation (JST)

(Kawaguchi Center Building, 4-1-8, Honcho, Kawaguchi-shi, Saitama 332-0012, Japan)

ユーザの要求に応じたインタラクティブな閲覧が求められている。そのため近年では、コンピュータグラフィックスによる商品画像表示が普及しつつある。

近年の商品開発では、商品デザインの段階で CAD などの形式で商品のデジタルデータを持っており、コンピュータグラフィックスによる商品画像を生成することは比較的容易である。また、デジタルデータがない場合も、偏角分光イメージング法<sup>12)</sup>などの手法を用いることで、実際の商品の形状情報と色を取得し、コンピュータグラフィックスによる商品画像を生成することが可能である。そこで本研究では、商品をコンピュータグラフィックスにより、インタラクティブに閲覧することを想定する。

コンピュータグラフィックスにおいては、物体の任意の質感・視点からの画像を合成するため、物体に光が入射した際の反射の様子をモデル化した反射モデルが用いられている。反射モデルには、Shafer の 2 色性反射モデル<sup>3)</sup>が一般的に用いられる。2 色性反射モデルでは、物体からの反射光は表面反射成分と内部反射成分と呼ばれる二つの成分から構成される。

図 1 に示すように、表面反射成分は物体と空気の屈折率の違いにより、物体表面で反射する光であり、光源と同じ色を持つ。一方、物体内部に入った光は、色素粒子間で屈折・吸収・散乱を繰り返す。入射光は波長に依存して色素粒子に吸収されるため、内部反射成分は物体固有の色を持つ。

2 色性反射モデルに基づく反射モデルとしては、Phong モデル<sup>2)</sup>、Oren-Nayer モデル<sup>4)</sup>、Torrance-Sparrow モデル<sup>5)</sup>、Cook-Torrance モデル<sup>6)</sup>、Ward モデル<sup>7)</sup>などの様々なモデルが提案されている。この中で、Phong モデルは等方的な反射面では正確な表現が可能である。また、比較的計算コストが低いため、リアルタイムレンダリングに適しており、OpenGL<sup>10)</sup>を始めコンピュータグラフィックスの様々な分野で幅広く使われている。そのため本研究では、Phong モデルを用いた。

Phong モデルにおける反射光の強度分布を図 2 に示す。Phong モデルにおける反射光は、表面反射成分では法線に対して正反射し、内部反射成分は等方的に反射する。この 2 成分の性質から、光源角度  $\theta$  からの入射光を観測角度  $\theta'$  から観測した際の画素値  $k(\theta)$  は式 (1) のように定義される。

$$\begin{aligned} k(\theta) &= k_s(\theta) + k_d(\theta) \\ k_s(\theta) &= A_s \cos^n(\theta - \theta') \\ k_d(\theta) &= A_d \cos(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

$k_s(\theta)$  は表面反射成分を表しており、表面反射成分の強度  $A_s$  とその広がり  $n$  から構成される。 $k_d(\theta)$  は内部反射成分を表しており、内部反射成分の強度  $A_d$  から構成される。

### 3. 光沢感再現モデルの構築

#### 3.1 主観評価実験

知覚される光沢感がデバイスに依存する要因の一つとし

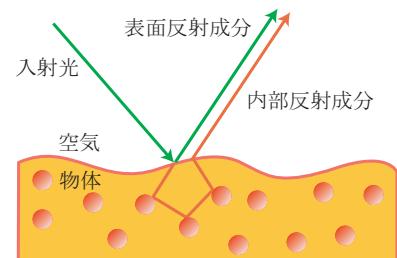


図 1 2 色性反射モデル  
Dichromatic reflection model.

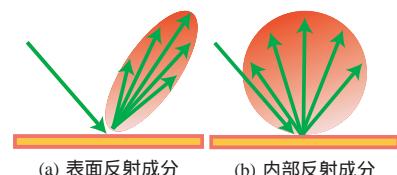


図 2 Phong モデルにおける反射光の強度分布  
Reflected radiance distribution in Phong model.

て、デバイス間における輝度の違いが挙げられる。人間が知覚する光沢感は、表示デバイスの輝度に依存するため、輝度の低いデバイスでは、輝度の高いデバイスに比べて物体の光沢感が小さく知覚される。本研究では、デバイスの輝度と光沢感の関係をモデル化し、輝度に応じた光沢感再現を行うことで、デバイスに依存しない光沢感再現を実現した。前節で述べたように、物体の光沢感は Phong モデルの表面反射成分のパラメータである  $A_s$  と  $n$  に関係している。これら二つのパラメータとデバイスの輝度は物理量であり、光沢感は人間が感じる心理量である。本研究では、主観評価実験によりこれらの物理量と心理量の関係を定量化し、モデル式を構築した。

実験では、画面に様々な光沢感を持った実験画像が提示される。被験者は提示された画像に対して、知覚した光沢感を 0 から 100 までの数値で評価する。 $A_s$  を 0.17, 0.33, 0.50, 0.66, 0.83, 0.99 の 6 通り、 $n$  を 0.001, 0.005, 0.009, 0.013, 0.017, 0.021 の 6 通り、輝度を 7 通り変化させた計 252 枚の実験画像を作成し、六人の被験者が各画像の光沢感を評価した。この際、表示デバイスの最大輝度が光沢感に与える影響のみを議論するため、実験に用いる物体の色・形状・材質などの特性は一定とし、光沢感のみを変化させた。また、実験は同一の表示デバイスを用いて行い、表示デバイスのガンマ特性を保持させたまま、最大輝度を変化させた。図 3 は実験に使用した画像の一部である。(a) ~ (d) は横方向に  $A_s$ 、縦方向に  $n$  が変化した異なる輝度の画像を表している。

#### 3.2 実験結果

主観評価実験の結果から得られたデータは、まず、個人による評価尺度範囲の差異を考慮するため、最大値と最小値を用いて正規化した。正規化された評価値に対して、重回帰分析を用いて処理することでモデル式を導出した。被験者が知覚した光沢感  $G$  を従属変数とし、デバイスの輝度

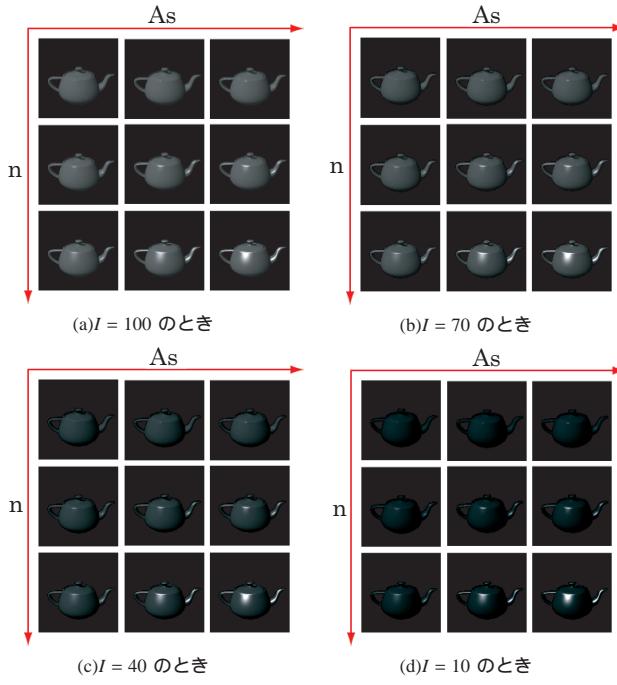


図 3 輝度  $I$  を変化させた実験画像の一部  
Synthesized images used in the experiment.

$I(cd/m^2)$  と表面反射成分のパラメータ  $A_s, n$  を独立変数として重回帰分析した結果、式(2)のモデル式が得られた。

$$G = 54.7 \sqrt{A_s} + 4.1 \times 10^2 \sqrt{n} + 5.4 \sqrt{I} - 76.3 \quad (2)$$

$$(R^2 = 0.803)$$

本モデル式では、 $G$  が  $A_s, n, I$  の関数となっているため、表示デバイスの輝度  $I$  の変化を、表面反射成分のパラメータ  $A_s$  と  $n$  を用いて補正することが可能である。輝度の低いデバイス上では  $I$  は減少するが、その変化を  $A_s$  と  $n$  で補正して画像を生成することで、光沢感  $G$  を一定にすることが可能となった。

図 4 は式(2)において  $G = 50$  とした場合に、光沢感が等しく知覚される点を描画した等光沢感曲面である。底面は  $A_s$  と  $n$  から構成され、縦軸は表示デバイスの輝度を表している。等光沢感曲面上で表示デバイスの輝度に合わせて  $A_s$  と  $n$  を選択することで、光沢感が等しく知覚される画像を生成することが可能である。

図 5 は、図 4 において底面の  $A_s$  と  $n$  を  $n = 0.027A_s + 0.005$  として固定した場合の断面図である等光沢感曲線である。図中の曲線は  $G = 25, 50, 100$  とした場合に、光沢感が等しく知覚される画像を模式的に表している。この等光沢感曲線に沿って  $A_s$  と  $n$  を変化させた例を図 6 に示す。図 6(a) は原画像を表しており、図 6(b) は原画像を輝度の低いデバイスで表示した画像である。紙面上では正確に表現できないが、輝度の低いデバイスで表示したため、原画像に比べて光沢感が減少している傾向が確認できる。図 6(c) は輝度の低いデバイスで、本モデル式を用いて、光沢感を補正した画像である。 $A_s$  と  $n$  を増加させることで輝度の減少が補正され、原画像と同様な光沢感再現を実現している。

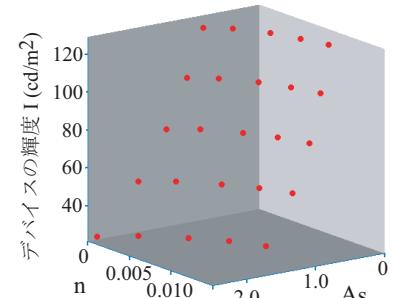


図 4 等光沢感曲面  
Iso-gloss surface.

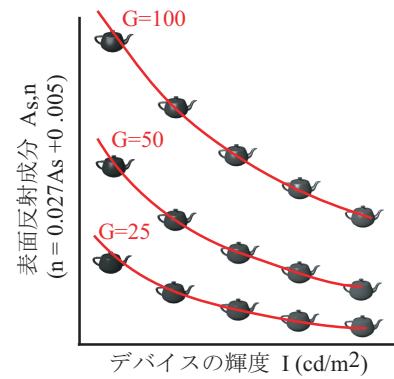


図 5 等光沢感曲線  
Iso-gloss curves.

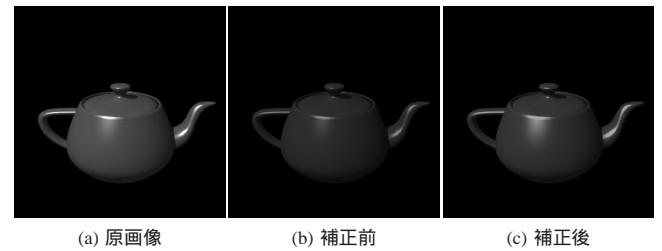


図 6 光沢感補正結果  
Results of gloss correction.

表 1 光沢感補正モデルの有効性評価実験で使用したデバイスの種類  
Devices used in the experiment.

デバイスの種類	輝度
A 社 LCD	128.8 cd/m <sup>2</sup>
B 社 CRT	76.78 cd/m <sup>2</sup>
C 社 携帯電話	24.76 cd/m <sup>2</sup>

### 3.3 モデル式評価実験

本モデル式の有効性を評価するため、主観評価実験を行った。実験に用いた表示デバイスを表 1 に示す。PC 用のディスプレイだけではなく、携帯電話の液晶画面を含めた輝度の異なる 3 種類の表示デバイスを用いた。

実験では、本モデル式に基づいて求められた各表示デバイスの輝度に適した画像を被験者に提示する。式(2)における光沢感  $G$  を 50, 75, 100 の 3 通りとし、3 種類の表示デバイスに対して、それぞれ画像を作成した。実験では、七

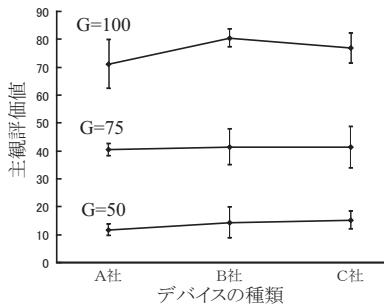


図 7 光沢感補正モデルの有効性評価実験結果  
Results of subjective evaluation for gloss correction model.

人の被験者に対して、予め十数枚の画像を提示して評価方法を習熟させた後、各表示デバイスに1枚ずつ提示される画像に対して光沢感を評価した。

図7に実験結果を示す。横軸は表示デバイスの種類を表しており、左から表1のA社製LCDディスプレイ、B社製CRTディスプレイ、C社製携帯電話の液晶画面を表している。図の縦軸は実験により得られた主観評価値であり、被験者が知覚した光沢感を表している。各折れ線は  $G = 50, 75, 100$  における評価値と標準偏差を表している。

本モデルが光沢感を適切に補正できている場合は、デバイス間の輝度の違いが、補正され光沢感の差異が減少するので、各折れ線におけるデバイス間の主観評価値の差異が小さくなると考えられる。図7において、縦軸の主観評価値とモデル式の  $G$  は異なるため、縦軸の値より小さくなっているが、 $G = 50, 75, 100$  でのそれぞれの主観評価値の差異はほとんどなく、本モデルを用いることで、光沢感を適切に補正できることができた。 $G = 100$  の場合は、 $G = 50, 75$  の場合に比べて、主観評価値の差異と標準偏差が大きい。これは、実験に用いた画像の光沢感が比較的大きく、階調推移の不足による光沢領域の擬似輪郭により、正しく光沢感が評価されなかったことが原因であると考えられる。

#### 4. 輝度推定モデルの構築

##### 4.1 光沢感補正モデルの問題点

前節では、表示デバイスに依存しない光沢感再現を目的として、光沢感補正モデルの構築を行い、またその有効性を確認した。しかし、前節のモデル式を用いた光沢感の補正には、表示デバイスの輝度  $I$  の情報が必要であった。

通常、表示デバイスの輝度を取得するには、放射輝度計などの測定装置を用いるが、実際の電子商取引では特別な測定装置を用いることは、実用的ではない。また、照明環境も知覚される光沢感を変化させる要因の一つであるが、測定には同様に特別な測定装置が必要である。

そこで本研究では、測定装置の代わりにユーザの視覚を利用した表示デバイスの輝度を推定する手法を提案する。ユーザの視覚を使用するため、特別な測定装置を必要とせ

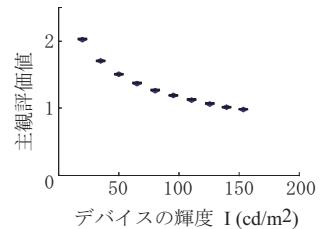


図 8 輝度推定モデル構築のための主観評価実験結果  
Results of subjective experiments for radiance estimation model.

ず、任意の環境で高速に行うことが可能であるため、電子商取引にも適している。また輝度だけではなく、照明環境やユーザの個人差なども含めた総合的な情報を推定することが可能である。

##### 4.2 主観評価実験

黒い背景に白いパッチを提示して、パッチの色を次第に白から灰色・黒と変化させていくと、パッチの色が完全な黒になる前に、背景の黒とパッチの色が区別できなくなる。これはデバイスの輝度と関連性があり、輝度の高いデバイスでは背景と区別できる濃い灰色でも、輝度の低いデバイスでは区別が做不到である。

本研究ではこのことに着目し、パッチの色と背景の黒を区別できる限界から、デバイスの見かけ上の最大輝度を推定する手法を提案する。区別できる限界のパッチの画素値と、デバイスの最大輝度の関係を定量化するため、主観評価実験を行った。実験では黒い背景に白いパッチを提示し、五人の被験者は、パッチの色を次第に黒くしていく。背景の黒とパッチの色が区別できなくなる限界の画素値を取得し、輝度との関連性を定量化した。実験は同一の表示デバイスを用いて行い、ガンマ特性を保持したまま表示デバイスの最大輝度を変化させることで様々な最大輝度を持つ表示デバイスの代わりとした。

##### 4.3 実験結果

図8に実験結果を示す。横軸が表示デバイスの最大輝度を表し、縦軸は選択された画素値の最大輝度に対する割合を表している。各点は評価値と標準偏差を表しているが、標準偏差はほとんどなく、個人差が小さい結果が得られたことが確認できる。主観評価実験の結果から得られたデータを、重回帰分析しモデル式を導出した。デバイスの輝度  $I$  を従属変数とし、選択されたパッチの画素値  $V$  を独立変数として重回帰分析した結果、式(3)のモデル式が得られた。

$$I = 1.3 \times 10^2 \left( \frac{V}{255} \right)^2 - 5.3 \times 10^2 \left( \frac{V}{255} \right) + 5.4 \times 10^2 \quad (R^2 = 0.9934) \quad (3)$$

本モデル式を用いることにより、選択されたパッチから表示デバイスの見かけ上の最大輝度を推定することが可能となる。推定された輝度を式(2)に代入することで、光沢

表 2 有効性評価実験で使用した照明環境の種類  
Environmental illuminants used in the experiment.

照明環境	色温度	照度
暗室	—	0 lx
光源 1	3130 K	1140 lx
光源 2	6550 K	1800 lx

表 3 有効性評価実験で使用したデバイスの種類  
Devices used in the experiment.

デバイスの種類	輝度
D 社 LCD	87.56 cd/m <sup>2</sup>
E 社 CRT	36.21 cd/m <sup>2</sup>
F 社 CRT	18.06 cd/m <sup>2</sup>

感補正に用いる表面反射成分のパラメータ  $A_s, n$  を導出することができた。

本手法は、従来から提案されているパッチの見え方に基づいて、画面全体の明るさやコントラストなどのキャリブレーションを行う Macintosh の Color Sync や Adobe の Adobe Gamma とは異なり、物理モデルに基づいていることが特徴である。そのため従来法と比較して、より定量的な光沢感再現が可能である。

## 5. 光沢感再現評価実験

提案した光沢感モデルと輝度推定モデルは、暗室下での主観評価実験に基づいて構築されたため、蛍光灯などの光源下での正確な光沢感再現については保障されていない。4 節において提案した暗室下で作成された輝度推定モデルを用いて、照明下の表示デバイスの最大輝度を推定した場合、物理的には輝度が高く計測されるのに対して、推定された輝度は周囲の輝度への順応の関係で低く推定される。しかし、表示された物体の光沢感も、照明下では相対的に低く感じることから、暗室下で作成された光沢感モデルに、この順応の関係で低く推定された輝度を入力することにより、照明下における光沢感の低下を防ぐ画像合成ができると期待される。本論文では、この順応の関係で低く推定された輝度を見かけ上の輝度と定義する。そこで、本節では、暗室下で作成された両モデルを用いて、様々な輝度を持つ表示デバイスを様々な照明下で実験を行った。

実験では 2 台の表示デバイスに、それぞれ基準となる画像と、比較対象となる画像の二つを提示する。基準となる画像を提示するデバイスは、G 社製 CRT ディスプレイ (67.94 cd/m<sup>2</sup>) である。様々な環境での有効性を評価するため、光源の種類を表 2 に示す暗室下、色温度 3130K・照度 1140 lx の光源下、色温度 6550K・照度 1800 lx の光源下の 3 通り、比較対象となる画像を提示するデバイスの種類を表 3 に示す 3 通り変化させた計 9 通りの環境で行った。

比較対象となる画像には、適切に推定された見かけ上の輝度に合わせて補正した画像と、その輝度に対して -40%, -30%, -20%, -10%, +10%, +20%, +30%, +40% の誤差を加えた輝度に合わせて補正した計 9 通りの画像を用いた。基準となる画像は実験を通して一定である。

六人の被験者は基準画像と比較対象画像の二つの画像の光沢感の差異を評価する。本モデルが適切に見かけ上の輝度を推定できていれば、適切に推定された輝度に合わせて補正した画像の主観評価値が最も高くなると考えられる。

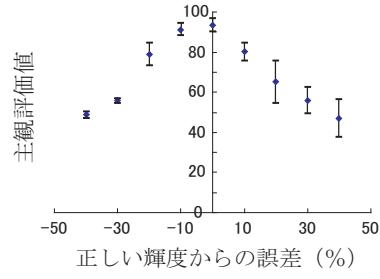


図 9 暗室下での有効性評価実験結果  
Experimental results in the dark room.

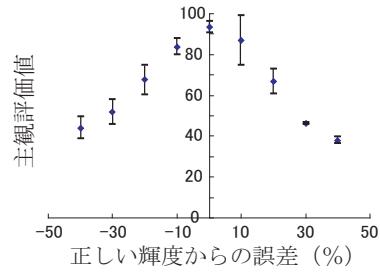


図 10 光源 1 での有効性評価実験結果  
Experimental results under the light source #1.

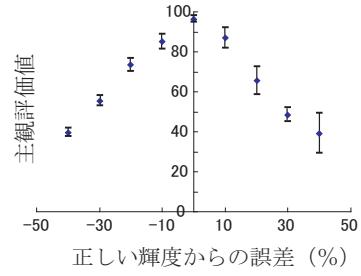


図 11 光源 2 での有効性評価実験結果  
Experimental results under the light source #2.

図 9,10,11 に実験結果を示す。各図において、横軸が画像合成時に用いた輝度の推定された見かけ上の輝度からの誤差の割合を表しており、縦軸が主観評価実験により得られた基準画像の光沢感との一致度を表している。実験結果は、誤差を加えていない 0% の時の画像の評価値が最も高く、本モデルの有効性を確認できた。モデル式は暗室下で作成したため、図 9 の標準偏差が最も小さくなっているが、図 10,11 から異なる光源下でも本モデルが有効であると確認できた。

## 6. 商品画像配信システムの構築

本研究で提案した二つのモデル式を用いて、簡単な商品画像配信システムのプロトタイプを構築した。システムは顧客が使用している PC などのユーザ側と、企業が運営し

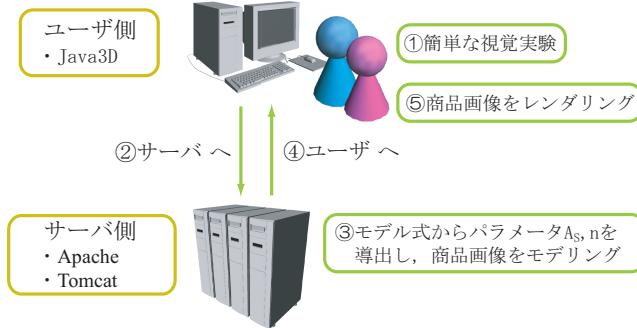


図 12 商品画像配信システム  
Prototype system for the online shopping system.

ているサーバ側から構成される。システムの概念図を図 12 に示す。

まずユーザ側で見かけ上の輝度を推定するための簡単な視覚実験を行う。この視覚実験は、本研究で提案した輝度推定モデルに基づくものである。視覚実験の情報はサーバ側に送られ、光沢感補正モデルを用いて表面反射成分のパラメータ  $A_s, n$  を導出する。サーバ側では、導出されたパラメータに基づきコンピュータグラフィックスによる商品画像のモデリングを行い、ユーザ側に配信する。ユーザ側ではモデリングデータを用いて商品画像のレンダリングを行うことにより、インタラクティブに任意の質感・視点・照明環境での商品画像を閲覧することが可能である。

従来の商品画像配信システムでは、すべてのユーザに対して、サーバ側に予め準備されている商品画像を配信するため、表示デバイス間の差異が問題となっていた。本システムでは各ユーザの視覚実験情報に基づき、各ユーザに対して商品画像をモデリングすることが特徴であり、ユーザの使用している表示デバイスに適した画像を提供することが可能である。

## 7. ま と め

本研究では、デバイスに依存しない光沢感再現を目的として、光沢感補正モデルと輝度推定モデルの二つのモデル式を提案した。人間の心理的特性である光沢感と、物理的特性である物体の表面反射成分のパラメータ・表示デバイスの輝度の関係を量化し、表示デバイスの輝度に応じて最適なパラメータを導出することで、表示デバイスの輝度に依存しない光沢感補正モデルを提案した。

また、人間の視覚による実験結果と表示デバイスの輝度の関係を量化し、放射輝度計などの特別な測定装置を必要とせず、高速に表示デバイスの輝度を取得することができるモデルを提案した。

さらに、光沢感補正モデルと輝度推定モデルを組合せ、簡単な視覚実験から顧客の使用しているデバイス、照明環境下における光沢感再現を実現した。このとき、輝度推定モデルより得られる輝度は、照明下の表示デバイスに対する

見かけ上の輝度であり、この見かけ上の輝度を介して光沢感補正モデルにより光沢感を制御した。また、表示デバイスに依存しない、光沢感再現が可能となるインタラクティブな商品画像配信システムを構築した。

本研究で行った主観評価実験は、物体の表面反射成分と人間の心理量である光沢感を量化する目的で行ったため、物体の内部反射成分や形状は一定としていた。しかし今後の課題としては、物体の色や形状などのより多くのパラメータを考慮した光沢感補正モデルの構築が挙げられる。また、本研究では、表示デバイスのガンマ特性は一定としている。しかし、ガンマ特性が保持されている場合は、輝度推定実験において知覚できる限界の背景と輝度差と、最大輝度には高い相関があるが、ガンマ特性が変化した場合にはこれは保障されない。今後、ガンマ特性を考慮した輝度推定手法の開発<sup>11)</sup>が必要である。

## 〔文 献〕

- 1) James A. Ferwerda et al. : "A psychophysically based model of surface gloss perception.", SPIE Human Vision and Electronic Imaging IV, pp.291-301 (2001).
- 2) B. Phong. : "Illumination for computer-generated pictures.", Communications of the ACM, **18**, 6, pp.311-317 (1975).
- 3) S. A. Shafer. : "Using color to separate reflection components.", COLOR Research and application, **10**, 4, pp.210-218 (1985).
- 4) Michael Oren and Shree K. Nayar. : "Generalization of the Lambertian Model and Implications for Machine Vision.", International Journal of Computer Vision, **14**, pp.227-251 (1995).
- 5) K. E. Torrance and E. M. Sparrow. : "Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces.", J. Opt. Soc. Am. **57**, 9 pp.1105-1114 (1967).
- 6) Cook R. L. and K. E. Torrance. : "A reflectance model for computer graphics.", Computer Graphics, **15**, 3 pp.307-316. (1982).
- 7) Ward G. J. : "Measuring and modeling anisotropic reflection.", Computer Graphics, **26**, pp.265-272 (1992).
- 8) IEC 61966-2-1, "Multimedia Systems and Equipment -Colour Measurement and Management- " Part 2-1 : Colour Management - Default RGB Colour Space - sRGB, IEC. (1999).
- 9) ICC. Spec ICC.1 1998-09, File Format for Color Profiles. ICC. (1998).
- 10) Mason Woo et al. : "OpenGL Programming Guide.", Addison-Wesley Developers Press (1997).
- 11) Raja Balasubramanian, Karen M. Braun, et al. : "Color Documents in the Internet Era.", The Industrial Physicist JUNE/JULY 2001 pp.16-20 (2001).
- 12) K. Tonsho, Y. Akao, N. Tsumura, Y. Miyake. : "Development of goniophotometric imaging system for recording reflectance spectra of 3D objects.", Proceeding of SPIE, **4663**, pp.370-378 (2001).

つむら のりみち  
**津村 徳道** 1995 年 大阪大学大学院博士後期課程修了。現在、千葉大学工学部情報画像工学科助教授、医用画像工学、計測画像工学、色再現工学、質感再現工学の研究に従事。博士（工学）

いけだ てつお  
**池田 哲男** 2002 年、千葉大学工学部情報画像工学科卒業。同年、同大学大学院自然科学研究科知能情報工学専攻博士前期課程進学。主として質感再現に関する研究に従事している。

みやけ よういち  
**三宅 洋一** 1968 年、千葉大学大学院修士課程修了。京都工織大助手、助教授。千葉大工助教授を経て、1989 年、同教授。1978-1979 年 スイス連邦工科大研究員。1997 年、ロチェスター大客員教授。2003 年よりフロンティアメディア工学研究開発センター長。IS&T Vice President, IS&T フェロー、名誉会員。工学博士。