

# フォトリアルな画像生成のための明度補正の一手法

西村 健二 西尾 一孝 中 俊弥 平井 誠 中瀬 義盛

松下電器産業株式会社 情報通信研究センター

本稿ではフォトリアルな画像生成のために仮想的な反射率と人間の眼の順応機能のモデルを導入した明度補正の一手法を提案する。従来、物体表面の照度や画像出力装置に応じてテクスチャの明度を色相を変えずに操作することは困難であった。本手法では仮想的な反射率の概念を導入して照度とテクスチャの明度の関係を定式化し、画像出力装置のコントラストを用いて人間の眼の順応機能をモデル化することによりテクスチャの明度を操作する。実際にスキャナ入力したテクスチャデータとラジオシティ法により算出した照度データを用いて画像生成した結果、従来例と比較して照度変化と表示輝度の変化が広い範囲で一致し色相のずれが生じないことを確認した。

## A LIGHTNESS CORRECTION METHOD FOR PHOTOREALISTIC RENDERING

Kenji NISHIMURA Kazutaka NISHIO Toshiya NAKA Makoto HIRAI Yoshimori NAKASE  
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd. Information and Communications Research Center  
1006, Kadoma, Kadoma-shi, Osaka 571, Japan

For photorealistic rendering, we propose a lightness correction method using virtual reflection ratio and the lightness adaptation model of our sight. There were some problems in adjusting lightness of texture in accordance with illuminance and dynamic range of display devices without changing hue of texture. We adjust texture lightness through the following steps. At first, we define the virtual reflection ratio to make clear the relation between illuminance and texture lightness. And next, we construct a model based on the lightness adaptation of our sight using the contrast of display devices. By some rendering tests, we got the result that display intensities were proportional to illuminance data in wide range without discrepancy of hue.

## 1. まえがき

コンピュータグラフィックス(CG)は、言葉や数値では表現が困難な現象を可視化し、計算機と人間のコミュニケーションを図るための道具として種々の分野の設計に利用されている。しかし、従来のCGでは生成画像の品質が低いため、インテリア設計や意匠設計などの分野で要求される物体の形状・材質感・テクスチャや照度分布などのフォトリアル(写実的)な表現を扱うことが困難であった。

従来のフォトリアルな画像生成手法として、相互反射を考慮した光学シミュレーションにより自然な照度分布を算出するラジオンシティ法<sup>[1-3]</sup>や物体表面のリアルな材質感を表現するためのテクスチャマッピング法<sup>[4]</sup>などがある。しかし、これらの手法を組み合わせることでレンダリングする場合に以下のような問題点があった。

スキャナなどで入力したテクスチャデータ自体が明度情報を含んでいるために、物体表面の照度や画像出力装置の表示可能な輝度範囲に応じてテクスチャの色相を変えずに明度を操作することが非常に困難である。

本稿では、上述の問題点を解決するための明度補正の一手法を提案する。そのために以下の2つのアプローチを用い、その有効性を検証するために本手法を用いて生成した画像を画像出力装置に表示して評価検討を行なった。

- ①仮想的な反射率の概念を導入して照度とテクスチャデータの明度の関係を定式化する。
- ②画像出力装置のコントラストを用いて人間の目の順応機能をモデル化する。

## 2. モデルと用語

本手法の説明のために必要な画像生成モデルおよびに主な用語について述べる。

### 2.1 画像生成モデル

本手法を用いて画像生成する場合に対象としているシーンのモデルを表1に示す。

表1 画像生成モデル

物体形状モデル	複数のパッチを含むメッシュ構造のサーフェイスモデル
光学属性モデル	表面はすべて完全拡散面 反射率は各パッチ上で均一
光源モデル	光源の色はすべて白色 相互反射光は白色
テクスチャマッピング	物体表面の位置に応じてスキャナ入力したデータを写像

### 2.2 照度・輝度・明度

照度・輝度・明度の各用語を本手法では以下の意味で使用している。

表2 照度・輝度・明度

照度	物体表面に入射する光のエネルギー強度を示す絶対的な値
輝度	物体表面の明るさを示す絶対的な値
明度	反射率の知覚に基づく物体表面の明るさを示す感覚的な値

### 2.3 コントラストと順応

画像出力装置の表示できる画素の輝度範囲の大きさを表す用語としてコントラストがある。コントラストは最大輝度と最小輝度との比で定義される(一般に、カラープリンタの場合は輝度かわりに濃度を用いるが、本稿では濃度を輝度に変換してモニタなどと同様に扱っている)。

人間の眼が動作できる輝度変化の範囲は $10^8$ 程度であるが、実際に明るさの変化を感じるのは眼に映る像の平均の輝度レベルを中心とした $10^2$ 程度の範囲だけである。つまり、視覚系には常に外界の明るさの分布を認知できるように輝度の平均に応じて動作点を移動させる機能があり、これを順応と呼んでいる<sup>[5]</sup>。

## 2.4 均等色空間

本手法では、照度に応じてテクスチャデータの明度を操作することが必要である。しかし、RGB-表色系やXYZ-表色系では、それぞれの色空間を構成する3成分のすべてに色味（色相、彩度）の情報を含んでいるために、明度を色味と分離して操作することが非常に困難である。そこで、明度情報と色味情報を完全に分離している色空間としてCIELAB均等色空間( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ )を採用する。 $L^*$ は明度、 $a^*$ と $b^*$ は色味を表す成分であり、この色空間は2点間の距離が感覚的な色・明るさの差にほぼ比例するような3次元空間であるとされている。

RGB-表色系からLAB-表色系への変換はXYZ-表色系を介して次式で行う。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.6067 & 0.1736 & 0.2001 \\ 0.2988 & 0.5868 & 0.1144 \\ 0 & 0.0661 & 1.1150 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad [\text{式1}]$$

$$L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \quad [\text{式2}]$$

$$a^* = 500[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}] \quad [\text{式3}]$$

$$b^* = 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}] \quad [\text{式4}]$$

ただし、( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ )は基準白色の完全拡散面に対する( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )であり、任意の完全拡散面の反射率は( $Y/Y_0$ )で表されるから、式2は明度と反射率の関係式であることに注目できる。

## 3. アプローチ

問題解決のためのアプローチとして用いる仮想的な反射率の概念と順応のモデル化について述べる。

### 3.1 仮想的な反射率

照度とテクスチャデータの明度の関係を定式化するために、閉じた空間内に完全拡散面の表面を持つ物体と光源が複数存在しているシーンを考える。各物体表面を微小面積のパッチに分割し、任意のパッチ  $i$  の表面における反射率を  $\rho_i$ 、複数の光源からの直射光や他の物体表面からの相互反射光による照度を  $I_i$  とすると、このパッチの輝度  $J_i$

は次の関係式が成り立つ。

$$J_i \propto \rho_i I_i \quad [\text{式5}]$$

シーンにおける最大の照度を  $I_{\max}$  とし、 $I_i$  と  $I_{\max}$  の比を  $\alpha_i$  とおくと式5は次のようになる。

$$J_i \propto \alpha_i \rho_i I_{\max} \quad [\text{式6}]$$

$$\alpha_i = I_i / I_{\max} \quad (0 \leq \alpha_i \leq 1) \quad [\text{式7}]$$

式6を以下のように解釈することができる。

任意のパッチ  $i$  の照度はすべて  $I_{\max}$  に等しく、その反射率は  $\alpha_i \rho_i$  である。

以後、 $\alpha_i \rho_i$  をこのシーンにおけるパッチ  $i$  の仮想的な反射率と呼ぶことにする。

### 3.2 順応のモデル化

一般に、画像出力装置の表示可能な輝度の範囲は一定で、外界の輝度変化の範囲と比較して非常に小さいため、画像生成して得られた外界の輝度を表示輝度に写像する必要がある。以下では視覚の順応をモデル化した写像を用いてこの問題を解決することを考える。

視覚の順応機能は、眼に映る外界の平均輝度を中心としたある範囲の輝度変化を明度の変化として感じる。これをモデル化する場合に次の2つを仮定を行なった。

- ①外界の任意の輝度を  $J$  としたときの眼が感じる平均輝度は  $J$  の相乗平均値  $\bar{J}$  と等しい。
- ②順応機能により  $\bar{J}$  は画像出力装置の最小輝度と最大輝度の中間値に写像される。

以上の仮定を用いると、表示輝度  $H$  は  $J$  を変数として次式で表すことができる(図1参照)。ここで、画像出力装置の最大輝度、最小輝度、中間値をそれぞれ  $J_{\max}$ ,  $J_{\min}$ ,  $J_{\text{cen}}$  とする。

$$H = \begin{cases} J_{\min} & (J < J_1) \\ J_{\text{cen}} (J/\bar{J})^t & (J_1 \leq J \leq J_2) \\ J_{\max} & (J > J_2) \end{cases} \quad [\text{式8}]$$

この関係式は、外界の  $J_1$  から  $J_2$  までの範囲の輝度を、画像出力装置の  $J_{\min}$  から  $J_{\max}$  までの範囲の

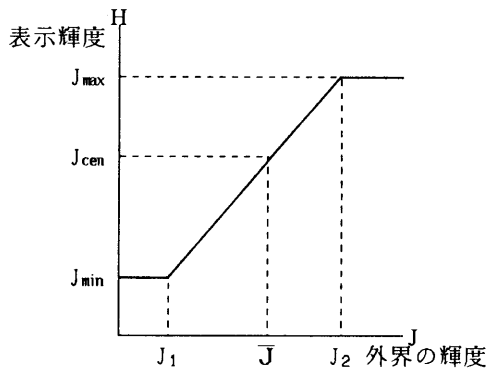


図1 外界の輝度と表示輝度の関係

表示輝度に写像しており、 $t$ を変化させることにより( $J_2/J_1$ )を変更することができる。

#### 4. 明度補正を用いたレンダリング

本稿におけるレンダリングの処理とは、隠面処理された物体表面の表示輝度をスキャナ入力したテクスチャデータとラジオシティ法を用いて算出した照度データとから決定することである。

以下にレンダリングの手順に沿って、明度補正の手法とその適用について述べる。

##### 4.1 テクスチャデータ

一般にスキャナ入力するテクスチャデータは画素単位のRGB値の集合として得られる。これをRGB-表色系からXYZ-表色系( $X, Y, Z$ )に変換すると、明度情報は $Y$ にのみ含まれテクスチャの各画素の反射率は( $Y/Y_0$ )で表される。さらに、明度情報と色味情報に分離するためにLAB-表色系に変換した場合の画素単位のデータを( $L^*, a^*, b^*$ )とする。

##### 4.2 照度データ

ラジオシティ法では、各物体がメッシュ構造からなるサーフェイモデルを採用し、メッシュのパッチ単位に照度を算出している。

任意のパッチ  $i$  の照度  $I_i$  と反射率  $\rho_i$  から、3.1節で述べた仮想的な反射率  $\alpha_i, \rho_i$  を求め、これを照度データとして蓄える。ここで、 $\rho_i$  はパッチ  $i$  上に写像されるテクスチャデータの平均の反射率と等

しいものと仮定する。

#### 4.3 明度補正係数

式8において物体表面が完全拡散面で、図1の( $J_2/J_1$ )が画像出力装置のコントラスト  $c$  と等しく  $J_{cen}$  が  $(J_{max}+J_{min})/2$  である場合を考えると、表示輝度  $H$  は仮想的な反射率  $r$  を用いて式9で表すことができる。ここで、 $\bar{r}$  は表示画素に対応する  $r$  の相乗平均である。また、表示輝度と反射率の関係は式10で表され、さらに式9と画像出力装置のコントラスト  $c$  を用いて変形すると式11になる。

$$H = (r/\bar{r})(J_{max} + J_{min})/2 \quad [\text{式9}]$$

$$Y_{new}/Y_0 = (H - J_{min})/(J_{max} - J_{min}) \quad [\text{式10}]$$

$$Y_{new}/Y_0 = \beta \rho \quad [\text{式11}]$$

$$\beta = \frac{(r/\bar{r})(c+1)/2 - 1}{\rho(c-1)} \quad [\text{式12}]$$

$$c = J_{max}/J_{min} \quad [\text{式13}]$$

式11は表示画素に対応するテクスチャの反射率  $\rho$  を  $\beta$  倍することにより、外界の輝度を表示輝度に変換できることを示している。以後、この  $\beta$  を明度補正係数と呼ぶことにする。

#### 4.4 明度補正

上述の明度補正係数  $\beta$  を用いてテクスチャデータの明度を補正することを考える。以下では、元のテクスチャデータを( $L^*, a^*, b^*$ )、明度補正後のテクスチャデータを( $L^*_{new}, a^*_{new}, b^*_{new}$ )とする。

まず、明度の補正は反射率を  $\beta$  倍することにより実現する。式2より、補正後の明度  $L^*_{new}$  は  $\beta$  と元の明度  $L^*$  を用いて次式で表すことができる。

$$L^*_{new} = \beta^{1/3}(L^* + 16) - 16 \quad [\text{式13}]$$

また、色味情報については  $a^*_{new}$  と  $b^*_{new}$  を以下の式で操作することにした。すなわち、色相角を一定に保ちながら、補正による明度の変化の割合に応じて彩度だけを小さくする(図2参照)。

$$a^*_{new} = k a^* \quad [\text{式14}]$$

$$b^*_{new} = k b^* \quad [\text{式15}]$$

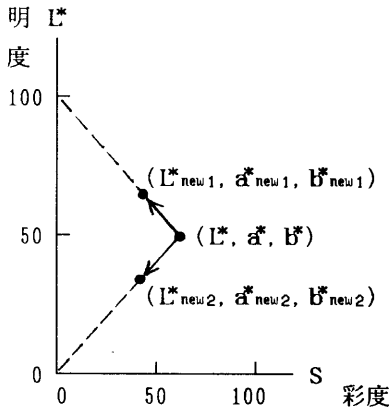


図2 明度補正に伴う彩度操作

$$k = \begin{cases} L^*_{new}/L^* & (L^*_{new} \leq L^*) \\ (100 - L^*_{new}) / (100 - L^*) & (L^*_{new} > L^*) \end{cases} \quad [式16]$$

ここで、色相角  $\theta$  と彩度  $S$  は次式で表される。

$$\theta = \tan^{-1}(b^*/a^*) \quad [式17]$$

$$S = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad [式18]$$

#### 4.5 表示画素データ

補正後のテクスチャデータ ( $L^*_{new}$ ,  $a^*_{new}$ ,  $b^*_{new}$ ) を XYZ-表色系を介して RGB-表色系に逆変換して表示画素データの RGB 値を求め、画像出力装置を用いて表示する。

### 5. 実験

本手法の有効性を検証するために、以下の実験を行なった。本実験では画像出力装置として銀塩写真方式のデジタルカラープリンタ (RGB 各 8 bit) を使用した。

#### 5.1 コントラスト測定

まず、カラープリンタのコントラストを求めるために、マクベス濃度計を用いて最大濃度 ( $R=G=B=0$ ) と最小濃度 ( $R=G=B=255$ ) を測定した。その結果コントラストは次のようになり、以下の実験ではすべてこの値を使用した。

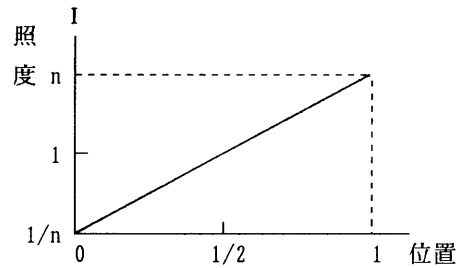
$$c = 23.4$$

#### 5.2 テクスチャの反射率測定

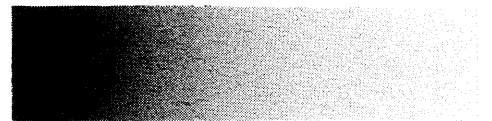
ラジオシティ法では各パッチの反射率は面単位で一定と近似し、実物から測定した反射率  $\rho$  を用いる。一方、スキャナから入力したテクスチャデータについて予め全画素について反射率 ( $Y/Y_0$ ) の平均  $\bar{\rho}_t$  を算出し、 $\bar{\rho}_t$  と  $\rho$  が異なる場合は明度補正係数  $\beta$  を  $(\rho/\bar{\rho}_t)$  倍することが必要である。



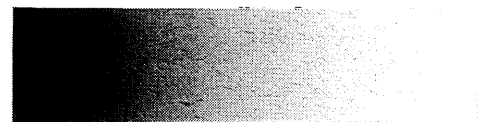
(a) テクスチャデータ



(b) 照度データ



(c) 従来例



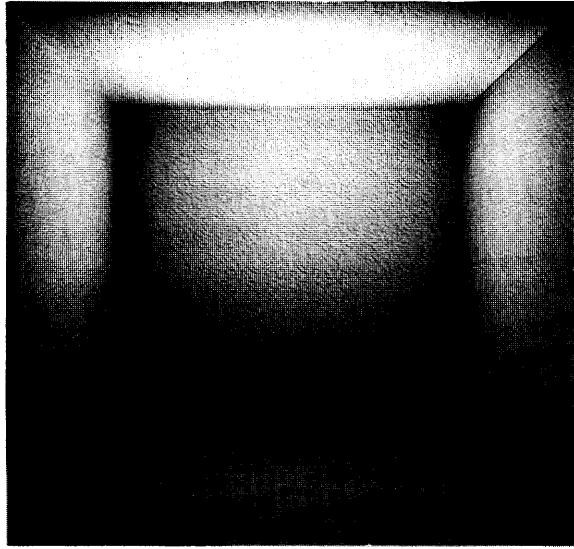
(d) 明度補正例

図3 実験結果1

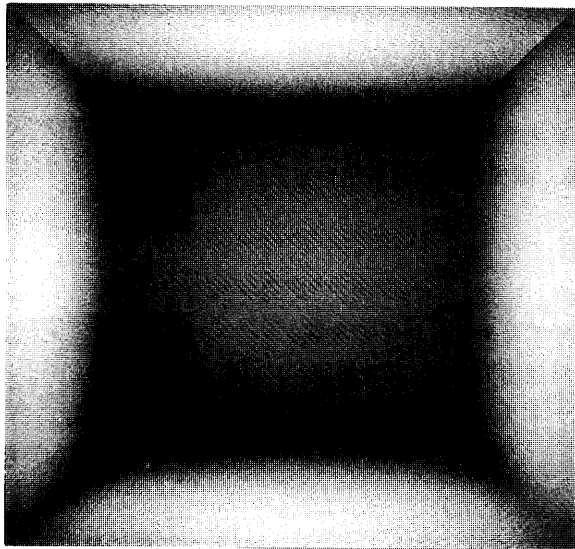
#### 5.3 表示輝度算出

本明度補正法と従来の表示輝度算出法を比較するために、同一のテクスチャデータと照度データを用いて表示輝度を求め、画像出力装置に表示したものを図3に示す。

図3において(a)はテクスチャデータ、(b)は照度データ、(c)は従来の表示輝度算出法、(d)は本明度補正法を用いて求めた表示輝度である。



(a) 横からの視線



(b) 上からの視線

図4 実験結果2

ここで、従来の表示輝度の算出法として次式を用いた。表示画素に対応するテクスチャデータを (R, G, B)、表面の照度を I、反射率を  $\rho$ 、表示輝度を (R<sub>new</sub>, G<sub>new</sub>, B<sub>new</sub>) とする。

$$(R_{new}, G_{new}, B_{new}) = \rho I (R, G, B) \quad [式19]$$

#### 5.4 画像生成実験

表3の条件で、ラジオシティ法により算出した照度データと3種類のテクスチャデータを用いて画像生成実験を行ない、視点位置と視線方向を変えて生成した画像をそれぞれ図4(a), (b)に示す。

表3 画像生成実験

実験条件	
形状	立方体の各面からなる部屋
照度	各面を2,500個のパッチに分割しラジオシティ法で照度算出
テクスチャ	床、壁、天井に各3Mバイトの異なるテクスチャデータを使用
照明	室内に点光源が1個のみ
視点	視点位置、視線方向は任意に指定

### 6. 評価

本明度補正法の効果をテクスチャおよび照度のデータを用いて実際に生成した画像について評価する。評価基準として次の2点を用いる。

- ①照度変化と表示輝度の変化が一致すること
- ②照度変化に対して色味のずれが生じないこと

図3の実験結果を見ると、従来の表示輝度算出法では照度の連続かつ滑らかな変化に対してテクスチャの表示輝度の変化が折れ線的になり、さらに色味のずれが顕著に生じることが確認できる。一方、本手法ではテクスチャの表示輝度の変化は滑らかであり色味のずれが生じないように見える。

さらに基準①②について定量的に詳しく評価するために、表4に示す条件で評価実験を行なった。結果を図5(a)~(c)に示す。(a), (b), (c)はそれぞれ照度と表示輝度、色相角、彩度との関係について、本手法と従来手法を比較したものである。

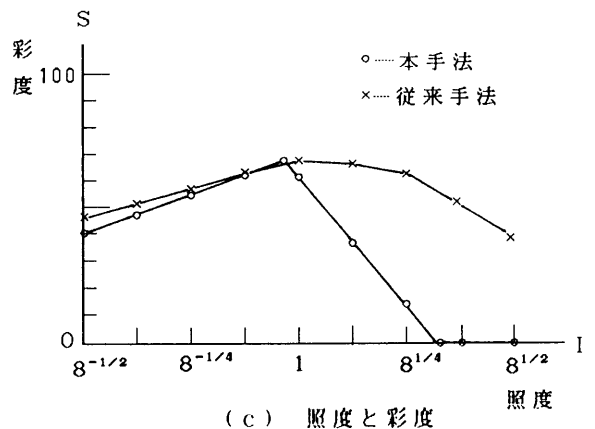
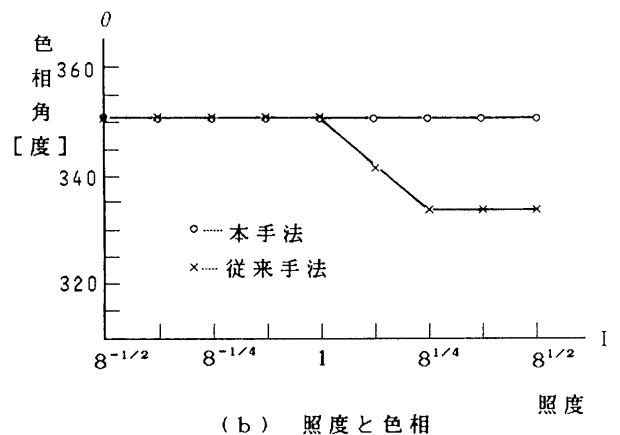
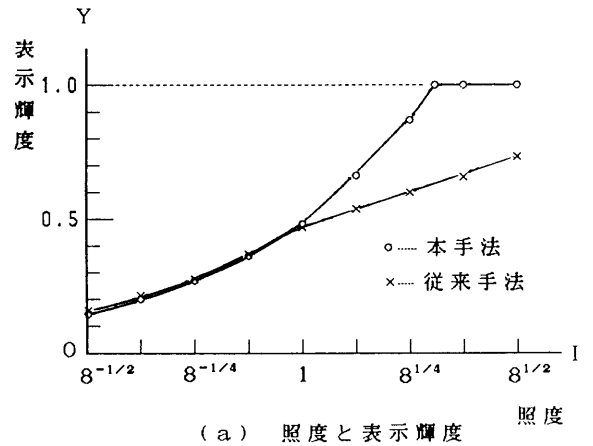


図5 実験結果3

表4 評価実験

	実験条件
テクスチャ	単色 (R=250, G=50, B=150)
照度	図3 (b)と同様の照度分布

図5 (a)より, 本手法では照度が $8^{-1/2}$ から $8^{2/3}$ までの広い範囲において照度変化と表示輝度の変化が一致しているが, 従来手法では照度が約1の所において表示輝度のR成分が飽和(R=255)した後は, 照度変化と表示輝度の変化が一致しない。

また, 図5 (b)において, 本手法は照度変化に対して常に色相を一定に保っているが, 従来手法ではRの飽和点およびBの飽和点で色相が急激に変化している。

図5 (c)は, 本手法の明度補正に伴う彩度操作(図2参照)による彩度の変化を表しており, 従来手法では, 色相と同様にRとBの飽和点において急激な彩度変化を伴う。

以上の実験結果より, 従来手法における折れ線的な輝度変化や色味のずれの原因が, RGBの各表示輝度の飽和によることがわかる。一方, 本手法では表示輝度が標準白色に等しくなるまで飽和しないので, 照度変化と表示輝度の変化は広い範囲で一致し色相のずれも生じない。すなわち評価基準①②をよく満たしていることが確認できる。

## 7. まとめ

本稿では, テクスチャデータと照度データを用いたフォトリアルな画像生成における明度補正法を提案し, 実際に生成した画像を用いて評価を行った。その結果, 従来の手法と比較して外界の照度変化とテクスチャデータの表示輝度変化を広い範囲で一致し, 色味のずれを生じないことを確認した。

今後の課題として, 本稿では順応機能を2つの仮定を用いて簡単にモデル化したが, 実際の眼の順応機能は外界の照度の分布の様子や注視点の違いなどの条件によって変化するため, それに応じたモデルを設定し本手法に適用することがある。

また, 白色以外の光源モデルや完全拡散面以外

の物体表面モデル, 光の波長特性を考慮した反射モデルなどを用いた種々の画像生成において, 物体表面の照度に応じてテクスチャの明度を操作することなどが挙げられる。

## 参考文献

- [1]西田 他, "影および拡散照度を考慮した三次元物体の陰影表示", 情報グラフィックスとCAD, 14-2, 1984.
- [2]Cohen, M.F. 他, "The Hemi-cube, a Radiosity Solution for Complex Environments", Computer Graphics 19, 3, pp. 31-40, 1985.
- [3]西村 他, "光の相互反射を考慮した高速画像生成のための一手法", 情報第37回全国大会, 3T-7, 1988.
- [4]Blinn, J.F. 他, "Texture and Reflection in Computer Generated Images", Comm. ACM, 19, 10, pp. 542-547, 1976.
- [5]画質評価用語委員会, "画質評価用語", (社)日本オプトメカトロニクス協会, 1988.