薄明視における視覚特性を考慮したトーンリプロダクション手法

A Tone Reproduction Method Accounting for Mesopic Vision

三 嶋 道 弘[†], Marcos Slomp[†], 正会員 玉 木 徹[†], 金 田 和 文[†]

Michihiro Mikamo[†], Marcos Slomp[†], Toru Tamaki[†] and Kazufumi Kaneda[†]

Abstract Most tone reproduction operators focus on luminance compression, ignoring chromatic assets. The human visual system, however, alters color perception according to the overall level of luminosity. This paper proposes an extension for existing operators to simulate chromatic changes under mesopic vision. In such conditions, red responses tend to fade faster than the remaining stimuli, producing a blue-shift phenomenon known as the Purkinje Effect. Starting with a high dynamic range image, the proposed method proceeds by separating luminance and chrominance components. Luminance compression is performed by means of any already existing operator, though in this paper, for convenience, the photographic operator was employed. Chromatic changes are handled in a decoupled fashion according to overall average luminance and by following the observations of previous psychophysical experiments. Finally, compressed luminance and adjusted chrominance are combined together, providing a displayable, low-dynamic range image. The technique has a low fingerprint thus being suitable for interactive rendering.

キーワード：ハイダイナミックレンジ画像，トーンリプロダクション，薄明視，視覚特性，プルキニエ現象。

1. ま え が き

ハイダイナミックレンジ (HDR: High Dynamic Range) 画像¹⁾は保存できる輝度幅の大きさから、様々な用途に用いられる。例えば、コンピュータグラフィックスでは計算された輝度を HDR 画像で保存することで、保存の際に起こるデータ損失を減らし、リアルな映像を再現することができる。これは、従来のローダイナミックレンジ (LDR: Low Dynamic Range) 画像では保存できる輝度値が 8 ビットであるのに対し、HDR 画像はそれ以上のビット数で保存できることに起因する。また、保存された輝度はライトプローブや環境マップとして、実世界の輝度を表現するのに用いられる。

しかし、HDR 画像が普及してくる一方で、一般的なディスプレイやプロジェクタで表示できる輝度幅は狭いため、HDR 画像を直接表示できないということが大きな課題となっている。そこで HDR 画像に保存された大きな輝度幅を圧縮してディスプレイに表示するトーンマッピング手法

が開発されてきている。

これまでに開発されたトーンマッピング手法の多くは人が見たときの印象ができるだけ同じになるように輝度幅を単に小さくする手法である。しかし、輝度のみを変えて表示するだけでは不十分である。なぜなら、人が様々な明るさの下で物を見るときに視覚特性は色相の変化にまで及ぶからである。よって、リアルな画像の表示には、単なるトーンマッピングのみだけでなく、そのときの色相の変化まで考慮した色の再構築、すなわち、トーンリプロダクションを行う必要がある。

これまでの色相の変化を考慮したトーンリプロダクション手法では暗いときに見える色相と明るいときに見える色相を線形補間することにより、その中間での薄明視での色相を取り扱っていた。しかし、そのような手法では人の知覚にマッチした色相の変化を表現することはできない。真にリアルな表示のためには、人の視覚特性を考慮することにより、ディスプレイから受ける印象を実世界から受ける印象に近づけることが重要となる。

本論文では、薄明視における視覚特性を考慮したトーンリプロダクション手法を提案する。薄明視での色相は明るいときに見える色相と異なる。人の視覚特性は暗くなるにつれて赤成分を感じにくくなる。提案手法では、薄明視における人の視覚特性として知られているプルキニエ現象に

2010 年 2 月 1 日受付, 2010 年 3 月 31 日再受付, 2010 年 4 月 19 日採録
[†] 広島大学 大学院 工学研究科

(〒 739-8527, 広島県東広島市鏡山 1-4-1, TEL 082-424-7663)

[†] Hiroshima University, Graduate School of Engineering
(1-4-1, Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan)

基づき、反対色表色系を用いてこれを実現する。提案手法の特徴として、次の2点がある。1点目は、提案手法では汎用性に富むことである。提案手法は、輝度と色相に分けて処理を行うために、従来のトーンマッピング手法に簡単に組込むことができるという特徴がある。2点目は計算コストが低いことである。リアルタイム性が求められるアプリケーション・動画などにも利用することができる。

本論文では、2節において既存手法について述べた後、3節で薄明視における視覚特性と反対色表色系について概説する。4節で提案手法について述べ、5節で出力結果を示す。そして6節で本論文をまとめる。

2. 従 来 手 法

トーンマッピング手法は幅広い輝度の画像をディスプレイに表示できる輝度レンジ範囲に狭める方法である。今までに様々なトーンマッピング手法が提案されている²⁾³⁾。その中でも代表的なものとしてReinhardら⁴⁾はアナログ写真作成の考えを用いた手法を開発している。明るい部分の輝度は下げ、暗い部分の輝度は上げる。これはちょうど、アナログ写真作成過程の被い焼き、焼き込みと呼ばれる操作を基にしている。Ferwerdaら⁵⁾は視覚特性のひとつである順応に着目した。この手法は、明るさによって物体境界の識別が困難になる効果を取り入れている。

一方Khanら⁶⁾は明るい状況で働く視細胞（錐体）と暗い状況で働く視細胞（桿体）の影響を考慮することにより周囲の明るさに応じた見え方を表現する手法を開発した。色相変化は、錐体・桿体の応答データをモデル化したものを用いている。出力結果は青成分が強く現れる画像になり、月あかりの状況下のような暗所視に近い印象を与える画像となっている。また、Barskyら⁷⁾は反対色表色系と暗所視での色相⁸⁾を用いることで、色相変化を与える方法を提案した。この手法ではどの程度色相を変化させるかの調節はユーザ設定のパラメータに依存する。

画像の輝度に基づいて色相を変化させる方法には次のような手法がある。Krawczykら⁹⁾はHuntらの実験結果¹⁰⁾に基づいて暗所視での色相を決定した。また、Jensenら¹¹⁾は暗所視の色相を色度図のもっとも青い点として決定した。これらの手法は、薄明視の色相を暗所視での色相と明所視の色相から輝度値に依存するパラメータを用いて線形補間することで表現する。しかし、薄明視における視覚特性を考慮していないため、人の知覚にマッチした色相の変化を表現することはできない。

3. 視 覚 特 性

3.1 明るさにより見える色相の変化

人は明るさによって見える色相が異なる。この理由は明るさに応じて働く視細胞が異なるからである。視細胞には錐体と桿体があり、錐体は周囲が明るいときに働き、長波

長（赤色）成分に応答しやすい。一方、桿体は周囲が暗いときに働き、短波長（青色）成分に応答しやすい。よって、暗くなるにつれて赤成分を感じなくなり、青成分を感じやすくなる。これは発見者の名前からブルキニエ現象と呼ばれる¹²⁾。

そして、明るさに応じて明所視、薄明視、暗所視に分類される¹²⁾。明所視とは周りが明るいとき、錐体が働いている状態を言う。明所視では色相ははっきり見え、また、これらの区別も容易である。日中がこの状態にある。

一方、暗所視とは周りが暗いとき、桿体が働いている状態を言う。暗所視では色相はほとんど感じず、辺りは青白く感じられる。夜の暗闇や、月夜などがこの状態にある。

薄明視とはこの中間の状態である。日没後や、蠟燭明かりの下など、周りが薄暗いときに表れる。薄明視では色を識別することはできるが、明所視の状態と薄明視の状態で色の見え方に違いがある。薄明視では明所視のようにはっきりと色相を区別することはできないが、暗所視のように見える景色が全て青白くなるわけではない。これは、錐体と桿体が両方働いている状態だからである。

暗所視、薄明視、明所視での照度の領域を図1に示す。薄明視の領域は上限が10[lx]であり¹⁴⁾、その範囲が10²[lx]程度であることから、本研究では下限を0.1[lx]に設定した。図1では横軸が室内の照度、縦軸が色標の等価明度を表している。

3.2 反対色表色系

反対色表色系はHeringによって導入され、Hurvichら¹⁵⁾により実験的に検証された。この表色系では、反対色の関係にある色は同時に見えないという人の知覚特性に基づいている。反対色表色系では反対色の関係にある色相により構成された直交する二軸により色相を表す。そして、それら二軸を含む平面に直交するように、明るさを表す軸をとる。色相の二軸は赤と緑の反対色軸、青と黄色の反対色軸である。明るさを表す軸は黒と白の反対色である。

CIE L*a*b*表色系¹²⁾はこの反対色表色系に基づく表色系である。a*が赤と緑の反対色成分、b*が青と黄色の反対色成分、そして、L*が相対的な明るさを表している。さらに、この表色系で表される色相は色相間の色距離が人の感覚に合致しているという特徴がある。これらの特徴を考慮し、提案手法ではCIE L*a*b*表色系を用いる。

3.3 等価明度

等価明度とは、照度に対して、色相がどれくらいの明度で表されるか示したものである。これはIkedaら¹³⁾の実験によって得られた。実験は暗室内で次の手順で行われた。まず、赤と青の色標を用意する。そして、暗室の明るさ（照度）を徐々に小さくしていく。それぞれの照度のときに、赤、青の色標と等価明度を表すグレースケールの複数のサンプルを比較し、色標の明るさと等しいサンプルを選択する。このときのサンプルの明度が等価明度である。このようにして得られた等価明度をプロットしたものが図1である。前

図 1 等価明度と照度の関係¹³⁾
Relationship between illuminance and equivalent lightness¹³⁾.

述のように、横軸が室内の照度、縦軸が色標の等価明度を表している。青の色標では照度が変化してもほとんど等価明度は変化しない。一方、赤の色標では照度が小さくなるにつれ、等価明度も小さくなっている。この実験から、暗いときには赤成分よりも青成分が目立って見えることがわかる。

4. 提案手法

提案手法では Ikeda らの実験結果¹³⁾を基に薄明視での色相を表現する。処理の流れを図 2 に示す。提案手法では輝度と色相を分離して処理する。これにより、既存の輝度幅のみを小さくするトーンマッピング手法に容易に組込むことができる。

入力された RGB 表色系の HDR 画像を XYZ 表色系での輝度 Y と正規化された xy 成分に変換する。輝度成分は通常のトーンマッピングを行い、輝度幅を狭める ($Y \rightarrow Y'$)。提案手法では、Reinhard らのフォトグラフィックトーンマッピング手法⁴⁾を利用した。これは幅広い輝度に対処することができるからである。そして、変換後の輝度 (Y') と xy 成分から $L^*a^*b^*$ 表色系に変換し、色相成分を分離する。

一方、色相成分の変換では画像の平均輝度 (Y_{avg}) を求め、色相変化係数 k_r を算出する。平均輝度はトーンマッピング前の輝度 Y を用いて計算する。これは、トーンマッピング前の輝度 Y は実世界の輝度に対応するからである。提案手法ではトーンマッピング前の輝度の平均輝度を周囲環境の輝度とすることで、目が見ているシーンの輝度に順応しているという仮定のもとで処理を行う。また本論文では、照度と輝度は比例関係にあるものとして処理を行う。すなわち、反射率を一定と仮定する。この仮定の妥当性は適用例によって確認することができる。さらに、画像のピクセル値は輝度に比例した値が格納されており、実在する物質すべてについての平均反射率が一定値を取ることが経験的に知られている⁴⁾。このことから説明できる。

この平均輝度を用いた k_r の計算方法については 4.2 節で

詳述する。この係数 k_r を用いて図 1 の実験結果の視覚特性に基づき色相成分 a^* を変化させる ($a' = k_r a$)。そして、変換後の a^* と L^* , b^* 成分から RGB 表色系に変換し、出力画像を得る。

以下では色相を変化させる係数の計算と色相の調整について詳述する。

4.1 等価明度曲線の関数近似

色相の変化量は Ikeda らの実験結果¹³⁾ (図 1 参照) に基づいて決定する。すなわち、図 1 の赤成分のデータから近似曲線を求め、その曲線に基づいて赤成分を変化させる。具体的には色相が変化しない点と変化する点での等価明度の比を求める。そして、この比を赤成分に掛け合わせることで赤成分の大きさを変化させる。青成分の等価明度はほぼ一定であるので変化させない。赤成分が相対的に小さくなることにより、青成分が目立って見える効果が生じる。

赤成分の等価明度曲線 $E(I)$ を照度 I を用いて次式 (1) に示すシグモイド関数により近似する。これは、視細胞の反応はシグモイド関数で近似されることが多いからである¹⁶⁾。

$$E(I) = \frac{a}{1 + \left(\frac{10}{I}\right)^b} + c \quad (1)$$

ここで a, b, c は定数であり、図 1 の赤成分の曲線から次のようにして決定した。 a は I が大きくなったときに漸近する値、 c は I が小さくなったときに漸近する値である。そして、 b は最小 2 乗法により決定した (付録参照)。最終的に近似曲線は次式となる。

$$E(I) = \frac{70}{1 + \left(\frac{10}{I}\right)^{0.383}} + 22 \quad (2)$$

近似曲線については図 1 のグラフのプロット点の値を用いて色相を変化させた場合と、近似曲線による値を用いて色相を変化させた場合とで差分値を求めて検討した。その結果、式 (2) の近似曲線の妥当性を確認した。詳細については 5 節で述べる。

4.2 色相の調整

色相を調整する係数 k_r は次のように決定する。画像全体の平均輝度 Y_{avg} を求め、式 (2) により、そのときの等価明度 $E(Y_{avg})$ を求める。そして、その等価明度 $E(Y_{avg})$ と薄明視が始まる 10 [lx] での等価明度 $E(10)$ との比を取ることで k_r を得る。

$$k_r = \frac{E(Y_{avg})}{E(10)} \quad (3)$$

そして、この係数 k_r を赤成分 a^* に掛け合わせ、新たな色相 a'^* を得る。

$$a'^* = k_r a^* \quad (4)$$

本研究では図 1 に示す赤の等価明度曲線の赤の等価明度と色相 a^* が線形の関係にあると仮定している。この妥当性は適用画像から視覚的に判断した。

ここでは簡略化のためCIE L*a*b*表色系をLabで表している。

図 2 提案手法の流れ
Overview of the proposed method.

5. 結 果

式 (2) に示す近似曲線の精度を検証するために、図 1 のグラフのプロット点での値を用いて変換した画像と式 (2) の近似曲線による値を用いて変換した画像 (図 3 の提案手法の画像) の差分を求めた。ピクセル値の範囲 0~255 レベルにおいて差分値は最大でも 1 レベルであり、1 ピクセル当たりの平均誤差が R, G, B 成分それぞれ 0.005, 0.049, 0.093 であった。このことより式 (2) の近似曲線は十分な精度で等価明度曲線を近似できていることがわかる。

提案手法の有用性を示すため、図 3 で薄明視における出力結果を、Jensen ら¹¹⁾ による手法、Krawczyk ら⁹⁾ による手法と比較する。

色相についての比較は次のような条件で行った。まず、すべての手法は画像全体の平均輝度に基づいて色相を変化させる。また、色相の変化に着目して評価を行うため、Krawczyk ら、Jensen らの手法での物体が見えにくくなる効果は実装していない。比較した画像平均輝度は 10, 1.0, 0.1 の 3 種類である。それぞれ明所視との境界、薄明視、暗所視との境界の状態を選んだ。4 節で述べたように、照度とピクセル値が比例関係にあるという仮定に基づいて、入力画像のピクセル値を係数倍して画像平均輝度を変化させた。

まず、明所視との境界での状態 (右側の画像: 10 の列) では、それぞれの手法にわずかに出力結果の違いが見られるが、すべての手法ではっきりと色相が出ている。

次に、薄明視の状態 (中央の画像: 1.0 の列) では、画像中央のオレンジと黄色の花に注目すると、Jensen らや Krawczyk らの手法に比べ、提案手法ではその色相の差が小さくなっている。すなわち、オレンジと黄色の色の違い

がわかりにくくなっており、提案手法はプルキニエ現象による色相変化がリアルに表現できているといえる。

暗所視との境界の状態 (左側の画像: 0.1 の列) を比較すると Jensen らの手法は青成分が強く出ておりオレンジと黄色の花の領域は色が似通ってきている。Krawczyk らの手法は画像全体が薄暗くなった印象は受けるが、どの色相も同じように変化している。提案手法ではシーン全体が暗くなった印象を与え、かつ、オレンジと黄色の花は、ほとんど同じ色相になっている。また、画像下部の赤と紫の花に注目すると、紫の花は赤成分が小さくなり、青成分が目立つようになった。一方、赤い花の鮮やかさはなくなり、くすんでいる様子がよりよく表現できている。提案手法によるこれらの結果は、プルキニエ現象による色相変化を実験した Ikeda ら¹³⁾ の結果をよく反映している。

提案手法を用いたその他の適用結果を図 4, 5, 6 に示す。それぞれ、左側の画像が色相の調整を行っていない出力結果 (従来手法)、右側の画像が提案手法により色相の調整を行った出力結果 (提案手法) である。また、色相の変化が顕著に見られる部分 2 箇所の拡大図をそれぞれの画像の下に示す。

図 4 は屋内の風景であり、静止物体が含まれている画像についての適用結果である。提案手法では手前側にあるビンや炎、照らされたパンの表面の色相に変化がみられ、薄明視の状態をよりリアルに表現できている。

図 5 は屋外の夜景についての適用結果である。提案手法では空の色が赤紫からより青みがかった色に変化している。また、ビルの明かりは赤から黄色に変化し、より現実の見えに近い印象を与える。

図 6 はコンピュータグラフィックスによって作成された薄膜による干渉現象をシミュレーションした画像である。提案手法ではティーポットの側面に色相の変化が顕著にみられる。また、円柱や球にも色相の変化がみられ、全体的に赤みが抜けた色相になっている。

図 3~6 の各画像に対する提案手法の計算時間と、色相を調整しないときの計算時間を表 1 に示す。計算には GPU を使用し、Slomp ら¹⁷⁾ によるリアルタイムに処理できるよう拡張されたフォトグラフィックトーンマッピング手法を行っている。使用した GPU は NVIDIA GeForce 9800GT である。提案手法を加えた場合、すべての画像において数ミリ秒で処理を行うことができ、かつ、従来の色相調整のないトーンマッピング手法のみ場合とほぼ同じ時間で表示ができている。

6. む す び

薄明視の印象を与える画像の表示を目的としたトーンリプロダクション手法を提案した。薄明視では明所視や暗所視と色相が異なる。これを実現するために薄明視における赤成分の等価明度と反対色表色系である CIE L*a*b*表色系を用いた。また、表示結果を従来手法と比較し、薄明視

図 3 提案手法と従来手法との比較
Comparison of the proposed method with traditional methods.

カラー画像は映像情報メディア学会 web あるいは脚注の URL を参照願います*。

表 1 提案手法を使用した場合と色相の調整を行わない場合の
計算時間

The calculating time of the proposed method and no color
adjusting.

適用画像	図 3	図 4	図 5	図 6
画像サイズ [pixel]	816×1232	1240×846	1204×768	720×411
提案手法 [ms]	4.81	5.02	3.96	2.59
色相調整なし [ms]	4.65	4.85	3.79	2.62

において起こる視覚特性，すなわち，赤成分が見えにくくなり，色相の識別が難しくなる特性をよりよく表現することを示した。

今後の課題として，提案手法は薄明視を中心として扱っているが，明所視や暗所視の状態まで取り扱える範囲を拡大することなどがあげられる。

*<http://www.eml.hiroshima-u.ac.jp/include/publication/mesopic.html>

〔文 献〕

- 1) P. E. Debevec and J. Malik : "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs", Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp. 369-378 (1997)
- 2) K. Devlin, A. Chalmers, A. Wilkie and W. Purgathofer : "Tone Reproduction and Physically Based Spectral Rendering", State of the Art Reports, Eurographics2002, pp. 101-123 (2002)
- 3) E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, and P. Debevec : "High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting", Morgan Kaufmann, pp. 187-365 (2005)
- 4) E. Reinhard, M. Stark, P. Shirley and J. Ferwerda : "Photographic tone reproduction for digital images", ACM Trans. Graph., **21**, pp. 267-276 (2002)
- 5) J. Ferwerda, S. N. Pattanaik, P. Shirley and D. P. Greenberg : "A model of Visual Adaptation for Realistic Image Synthesis", Proceedings of SIGGRAPH'1996, pp. 249-258 (1996)
- 6) S. M. Khan and S. N. Pattanaik : "Modeling Blue shift in Moonlit Scenes by Rod Cone Interaction", Journal of Vision, **4**, 316a (2004)
- 7) B. A. Barsky, T. J. Kosloff and S. D. Upstill : "An opponent

process approach to modeling the blue shift of the human color vision system", APGV '04: Proceedings of the 1st Symposium on Applied perception in graphics and visualization, **73**, pp. 163–163 (2004)

- 8) R. W. G. Hunt : "Light and Dark Adaptation and the Perception of Color", Journal of the Optical Society of America, **42**, pp. 190–199 (1952)
- 9) G. Krawczyk, K. Myszkowski and H.-P. Seidel : "Perceptual effects in real-time tone mapping", Proceedings of the 21st spring conference on Computer graphics, pp. 195–202 (2005)
- 10) R. W. G. Hunt : "The Reproduction of Colour Photography", Printing and Television: 5th Edition. Fountain Press (1995)
- 11) H. W. Jensen, F. Durand, J. Dorsey, M. M. Stark, P. Shirley and S. Premoze : "Physically-based night sky model", Proceedings of SIGGRAPH'2001, pp. 399–408 (2001)
- 12) 日本色彩学会編 : "新編 色彩科学ハンドブック [第2版]", 東京大学出版会 (1998)
- 13) M. Ikeda and S. Ashizawa : "Equivalent lightness of colored objects of equal munsell chroma and equal munsell value at various illuminances", Color Research and Application, **16**, pp. 72–80 (1991)
- 14) 池田光男, 永田吉明, 矢口博久, 芦澤昌子 : "昼光照明下における薄明視の出現時刻と照度レベル", 照明学誌, **67**, pp. 491–496 (1983)
- 15) L. M. Hurvich, and D. Jameson : "Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. ii. brightness saturation and hue in normal and dichromatic vision", Journal of the Optical Society of America, **45**, pp. 602–616 (1955)
- 16) D. C. Hood and M. A. Finkelstein : "Comparison of Changes in Sensitivity and Sensation: Implications for the Response-intensity Function of the Human Photopic System", Journal of Experimental Psychology: Human Perceptual Performance, **5**, pp. 391–405 (1979)
- 17) M. Slomp and M. M. Oliveira : "Real-Time Photographic Local Tone Reproduction Using Summed-Area Tables", Computer Graphics International 2008, pp. 82–91 (2008)

〈付 録〉

式 (1) に a , c を代入し, 両辺の対数をとると式 (付・1) となる. ただし, 最小 2 乗法を用いるために右辺に定数項 D を付加する.

$$\log_{10} \left(\frac{70}{E(I) - 22} - 1 \right) = b \log_{10} \left(\frac{10}{I} \right) + D(\text{付} \cdot 1)$$

図 1 より, グラフのプロット点での照度 I と等価明度 $E(I)$ を用いて最小 2 乗法により $b = 0.383$, $D = 0.030$ を得る. ここで 10^D は式 (1) の分母の項 $(\frac{10}{I})^b$ に掛かる係数となる. 最小 2 乗法により得られた $D = 0.030$ より $10^D \simeq 1.071 \simeq 1.0$ と近似すると, 近似曲線は式 (2) で表される.

みかみ みちひろ
三鴨 道弘 2009 年, 広島大学工学部第二類 (電気電子工学課程) 卒業. 2009 年, 同大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期入学. 現在, コンピュータグラフィックスの研究に従事.

Marcos Slomp is a Ph.D. student at Hiroshima University. His past professional and research experiences include game and metrologic software development, remote sensing, programming language design, network protocols and even robot soccer. For the last four years he has been focused on practical real-time rendering and image-processing.

たまき とおる
玉木 徹 1996 年, 名古屋大学工学部情報工学科卒業. 1998 年, 大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期修了. 2001 年, 同専攻博士課程後期修了. 現在, 広島大学大学院工学研究科准教授. 画像認識, コンピュータビジョンの研究に従事. 正会員.

かねだ かずふみ
金田 和文 1982 年, 広島大学工学部第二類 (電気系) 卒業. 1984 年, 同大学院博士課程前期了. 1986 年, 同大学工学部助手. 1991 年, 米国ブリガムヤング大学客員研究員. 2004 年, 広島大学大学院工学研究科教授. コンピュータグラフィックス, ビジュアルライゼーションなどの研究に従事. 工学博士.

図 4 屋内の風景への適用
Applying to indoor scene.

図 5 屋外の夜景への適用
Applying to night scene.

図 6 コンピュータグラフィックスにより作成された画像への適用
Applying to computer-generated image.

カラー画像は映像情報メディア学会 web あるいは脚注の URL を参照願います*.