

# 統一した一つの視覚特性モデルを用いた全輝度領域に対する包括的なトーンリプロダクション手法の試み

三嶋 道弘<sup>1,a)</sup> Bisser Raytchev<sup>†1,b)</sup> 玉木 徹<sup>†1,c)</sup> 金田 和文<sup>†1,d)</sup>

**概要:** 本発表では、ハイダイナミックレンジ画像を表示する際、統一した一つの視覚特性モデルを利用することで既存手法よりも広い視覚状態に対応できる、包括的なトーンリプロダクション手法について提案する。既存手法は周囲の明るさが限られた場合を想定している。そのため、動画のようにシーンの明るさが連続的に、かつ、高輝度の状態から低輝度の状態のように広範囲に変化する場合、対応できない問題がある。この問題を解決するために、本研究では、全輝度領域に対して対応可能な視覚特性モデルを開発する。提案するモデルには全視覚状態にわたる特性である波長弁別閾（明るさに対する色の感度）を取り入れる。提案手法では明所視、薄明視、暗所視での波長弁別閾を考慮し、各状態での色変化を実現することを試みる。

## 1. はじめに

本発表では、統一した一つの視覚特性モデルを利用し、既存手法よりも広い視覚状態に対応できる包括的なトーンリプロダクション手法について報告する。既存手法では、明所視、薄明視、そして暗所視の各視覚状態に、それぞれ対応した手法が存在した。しかし、これは各トーンリプロダクション手法は限られた視覚状態にしか適用できないことを意味する。すなわち、動画のようにシーンの明るさが連続的に、かつ、高輝度の状態から低輝度の状態のように広範囲に変化する場合、対応できない場合がある。この問題を解決するため広範囲にわたる輝度変化に対応可能なトーンリプロダクション手法が必要となる。

我々が日常体験する輝度幅はとても大きく、例えば夜の暗闇から昼の太陽光までの輝度幅は約  $10^{14}$  に渡る [1]。また、日陰と日向でも  $10^4$  以上の輝度幅がある [2]。さらに、コンピュータグラフィクスで写実的なシーンを物理則に基づいてレンダリングした場合、これは実世界の光の振舞いに基づいているため、結果画像の輝度幅は大きくなる。

このような実世界の輝度、コンピュータグラフィクスに

より計算された輝度は、ハイダイナミックレンジ画像を用いることで高精度に保存できる [3]。ハイダイナミックレンジ画像は従来の画像ファイルフォーマットと比べ、輝度値の表現に 8 ビット以上用いる。これにより、255 段階で保存の際発生していた情報の損失（黒潰れ、白とび）を防ぎ、詳細に記録することができる [4]。

一方で、一般的に用いられるディスプレイの輝度幅は実世界の輝度幅よりも小さい。現在、表示できるダイナミックレンジを大きくしたディスプレイも開発されてきているが、まだ一般には普及していない [5]。そのため、ハイダイナミックレンジ画像に保存された輝度を一般的なディスプレイに表示させるためには、表示可能な範囲まで縮小させる操作が必要がある。

しかし、単に縮小するだけでは自然な印象は得られない。これは、実世界では周囲の環境に応じて視覚状態が変化するからである。例えば、暗所視では視細胞の桿体の機能が活性化し、一方で、錐体の機能が衰退することで長波長の光を感じにくくなる。このような錐体から桿体へ役割の移行が起こる。よって表示の際には、表示対象とするシーンの環境により変化する視覚状態まで想定した色の再構築手法、すなわち、トーンリプロダクション手法が必要である [5]。

既存のトーンリプロダクション手法は、明所視、薄明視、そして暗所視の各視覚状態での見え方を再現することを目的としている。各状態でのシーンの見え方を表現するため、その状態での視覚特性をモデル化し、取り入れている。しかし、これではその状態にしか対処することができない。

<sup>1</sup> 広島大学大学院工学研究科情報工学専攻  
Department of Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hiroshima University

<sup>†1</sup> 現在、広島大学大学院工学研究院情報部門  
Presently with Department of Information Engineering, Graduate School of Engineering, Hiroshima University

a) mikamo@eml.hiroshima-u.ac.jp

b) bisser@hiroshima-u.ac.jp

c) tamaki@hiroshima-u.ac.jp

d) kin@hiroshima-u.ac.jp

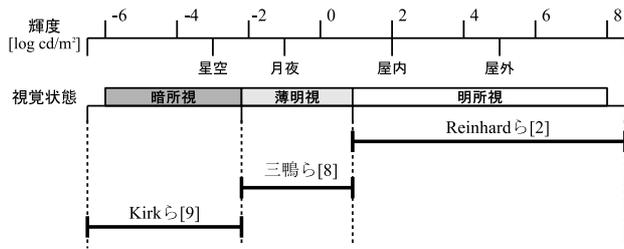


図 1 既存手法が対応する輝度領域

このため、例えば、動画での表示を想定した場合、暗所視から明所視へのスムーズな移行が行えず、不自然な印象を与える可能性がある。さらに、経験に基づいたパラメータが多く存在し、パラメータの調節によってスムーズな変化を実現することも難しい。

提案手法は、全視覚状態にわたる特性である波長弁別閾をモデルに取り入れることで、上記の問題を解決することを試みる。

## 2. 関連研究

今までに様々なトーンリプロダクション手法が開発されてきた [5]。図 1 に実世界の輝度範囲とその視覚状態 [1]、さらに代表的なトーンリプロダクション手法が対応する視覚状態を示した。これら手法の出力結果はそれぞれ図 5, 図 6, 図 7 に示した。

明所視の見え方を表現するトーンリプロダクション手法として、例えば、以下のものがある。各錐体ごとの応答を利用した手法 [6]、アナログ写真の現像方法を基にした手法 [2]、撮影されたシーンの明るさだけでなく、さらに、シーンを表示結果を見る場合の照明条件・デバイスの状態を考慮に入れた表示 [7] などである。

薄明視の見え方を表現する手法は、赤・青の色票の見え方の変化を記録した実験結果をモデルに取り入れた手法 [8] がある。

暗所視の見え方を表現する手法には、暗所視で活性化される視細胞である桿体の応答をモデルに取り入れた手法 [9] がある。また、暗所視での視力の低下を表現する手法 [10] などがある。

既存手法ではそれぞれ対象とする視覚状態に適用範囲が限られるため、シーンごとにこれらの手法を使い分ける必要がある。これがうまく行われない場合、次のような問題が発生する。例えば、明所視に対応した手法 [2] を、本来ならば暗所視である明るさのシーンに適用した場合、暗いシーンを撮影したにも関わらず、結果が明るく表示されてしまったり、暗所視の色の見え方を考慮していないため、暗い印象を表現しきれない結果になる。この使い分けは、動画のように連続的に明るさが変化するシーンになるとその切り替えが困難になる。すなわち、どの時点で切り替えるのか、また、切り替えたときの画像の明るさ、色調、さ

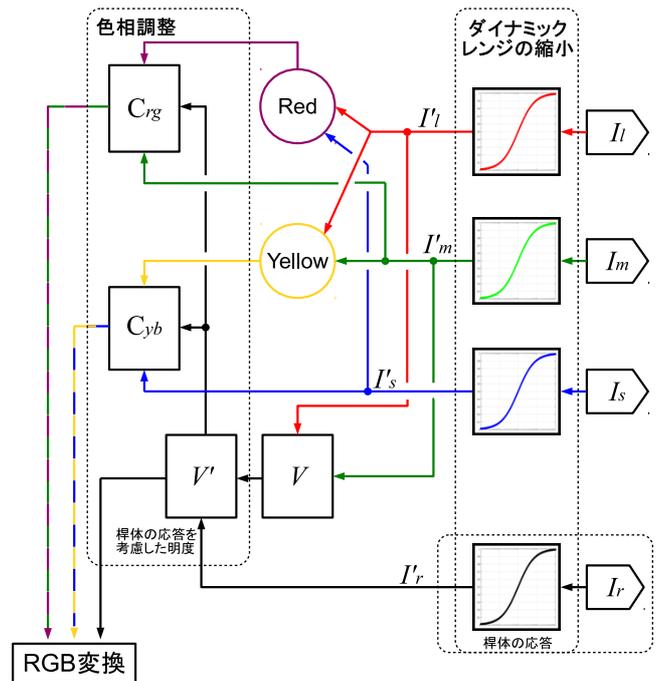


図 2 提案する視覚特性モデル

らにはそれらの変化率が連続的につながらなくなる。これらが満たされなければ、不自然な印象を与える表示になる。

## 3. 提案手法

### 3.1 統一した一つの視覚特性モデル

提案するモデルを図 2 に示す。提案手法では、Ingling らによる二段階モデル [13] をトーンリプロダクションを適用するために、輝度幅の縮小、桿体の応答、色調整を追加し拡張した。図 2 中の破線で囲った三か所が拡張を行った部分である。ダイナミックレンジの縮小では LMS 各錐体と R 桿体からの応答のダイナミックレンジを縮小する。これは、最終的に画像を RGB に変換するとき、値をディスプレイに表示できる範囲にするためである。桿体の応答は明るさに応じた色の見え方の変化を表現するために用いる。これは、錐体細胞と桿体細胞からの応答いずれも同じ視神経を共有しているという知見 [11] [12] を基にしている。色相調整は提案するモデルによる色相変化を実現する部分である。

提案するモデルは分光画像を入力とし、LMS 錐体、R 桿体それぞれの分光感度から得られた LMS 成分、R 成分を反対色表色系に変換する。この変換には波長弁別閾を基に決定したパラメータを用い、各視覚状態での色の見え方の変化を再現する。

$C_{rg}$ ,  $C_{yb}$  は錐体からの応答から変換された反対色表色系での赤緑反対色成分、黄青反対色成分を表す。特に、LM 錐体による成分から計算される明度  $V$  と桿体の成分から新たに明度  $V'$  を導入した。L, M, S 成分と明度成分  $V'$  により、 $C_{rg}$  成分、 $C_{yb}$  成分を変化させる。変化させる量

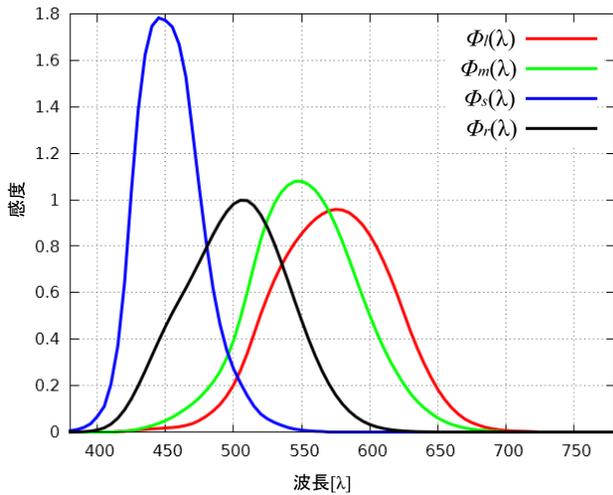


図 3 LMS 錐体の分光感度  $\Phi_l(\lambda)$ ,  $\Phi_m(\lambda)$ ,  $\Phi_s(\lambda)$  と桿体の分光感度  $\Phi_r(\lambda)$

は計測された波長弁別関 [14] [15] を基に決定する。すなわち、明所視、薄明視、暗所視の各視覚状態に対応した波長弁別関を用いることで、シーンの環境に応じた色の変化を実現する。

### 3.2 視細胞の応答を計算

入力を分光分布とし、LMS 錐体、R 桿体の分光感度を用いてそれぞれの応答を次式で計算する。

$$I_c = \int_{\Omega} S(\lambda)\Phi_c(\lambda)d\lambda \quad (c = l, m, s, r) \quad (1)$$

ここで、 $\Omega$  は可視光の波長範囲 ( $\Omega = [380\text{nm}, 780\text{nm}]$ ) である。  $I_c$  は分光感度により計算された応答である ( $c = l, m, s, r$ )。  $I_l$ ,  $I_m$ ,  $I_s$ ,  $I_r$  は L 錐体、M 錐体、S 錐体、そして桿体の分光感度  $\Phi_l(\lambda)$ ,  $\Phi_m(\lambda)$ ,  $\Phi_s(\lambda)$ ,  $\Phi_r(\lambda)$ (図 3) から計算された応答である。  $S(\lambda)$  は分光分布である。  $\Phi_l(\lambda)$ ,  $\Phi_m(\lambda)$ ,  $\Phi_s(\lambda)$  は CIE(1931)XYZ 等色関数から文献 [5] の von Kries による変換行列式によって得た。

### 3.3 ダイナミックレンジの縮小

ダイナミックレンジは文献 [6] の手法を基に縮小するが、文献 [6] との違いは、式 (1) から計算した LMS 錐体の各応答と桿体の応答に対し、ダイナミックレンジの縮小を行う点である。これは、LMS 錐体の各応答、桿体の応答がそれぞれの分光感度を用いて得ることができるからである。文献 [6] では RGB 各成分についてダイナミックレンジの縮小を行う。これは、文献 [6] は LMS 錐体の応答が、RGB 値の各成分に対応するという仮定による。縮小には次式を用いる。

$$I'_c(I_c, I_{c,avg}) = \frac{I_c}{I_c + (I_{c,avg})^m} \quad (2)$$

$$m = 0.3 + 0.7k^{1.4} \quad (3)$$

$$k = \frac{I_{c,max} - I_{c,avg}}{I_{max} - I_{c,min}} \quad (4)$$

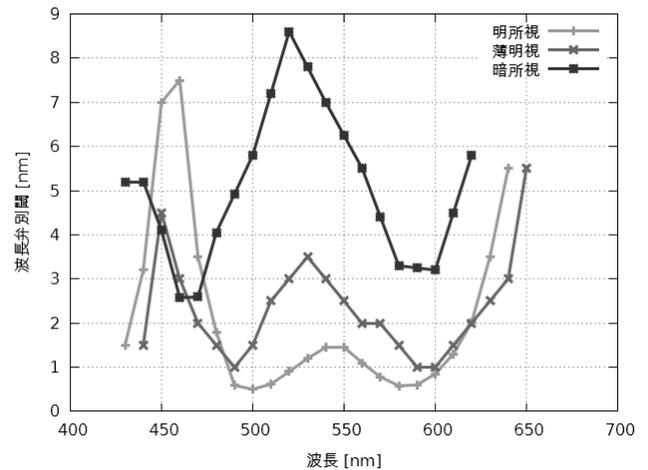


図 4 各視覚状態における波長弁別関

ここで、 $I'_c$  は縮小後の応答であり、 $I_c$  は式 (1) を用いて計算された応答である。提案手法では、桿体の応答に対しても同様に処理する。これは桿体も視細胞の受光体であるため、錐体と同様な応答をしているという仮定による。 $(I_{c,avg})^m$  は順応状態での発生電位が 0.5 になるように調整する役割を持つ。  $m$  は  $k$  から求まる値であり、画像中の最大応答  $I_{c,max}$ 、最小応答  $I_{c,min}$ 、平均応答  $I_{c,avg}$  から算出される。詳細は文献 [6] に書かれている。

### 3.4 波長弁別関

波長弁別関とは、ある単波長光に対し、それと異なるわずかに大きな波長を持つ単波長光を見たとき、それらの間で差を識別できる最小の波長をいう [16]。図 4 に各視覚状態での波長弁別関を示す [14] [15]。横軸が可視光の波長、縦軸が波長弁別関である。これによると、明所視の場合、波長 520[nm] の単色光に対して、約 521[nm] 以上 (波長弁別関約 1[nm]) の光であればその違いを識別できる。

図 4 中の各視覚状態における波長弁別関の曲線から、次のことがわかる。まず、明所視から暗所視にかけて、色の識別が困難になる。これは、この間、色の違いを認識するために必要な波長が大きくなることで、波長弁別関が上方に移動していることからわかる。さらに、明所視から暗所視にかけて、短波長に対し感度が上がり、長波長側に対しては感度が下がる。これは、この間、波長弁別関が短波長側に移動していることからわかる。

LMS 錐体の分光感度から図 4 中の各視覚状態を満たすように最適なパラメータを決定する。そして、求めたパラメータを提案モデルに適用し、各視覚状態での色の見え方の変化を実現する。

### 3.5 視覚特性モデルのパラメータ調整

提案手法は Ingling らによる視覚処理の二段階モデルを拡張することで、各視覚状態における色変化を実現する。

Ingling らによると波長弁別関は次式で得られる。

$$\Gamma(\lambda) \equiv \sqrt{(o_{rg}(\lambda))^2 + (o_{yb}(\lambda))^2} \quad (5)$$

$$\Delta W(\lambda) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \quad (6)$$

ここで、 $O_{rg}(\lambda)$ ,  $O_{yb}(\lambda)$  はそれぞれ、赤緑、黄青反対色の分光感度を示しており、LMS 錐体の分光感度から導き出される。 $\Gamma(\lambda)$  は色感度として定義されており、 $\Delta W(\lambda)$  は波長に対する色感度の逆数、すなわち波長弁別関である。

提案手法は、図 4 の各視覚状態における波長弁別関を基にし、それぞれの状態での色変化を実現する。式 (5) 中の赤緑、黄青反対色の分光感度はそれぞれ次式で与えられる。

$$o_{rg}(\lambda) = k_1(V')\Phi_l(\lambda) + k_2(V')\Phi_m(\lambda) + k_3(V')\Phi_s(\lambda)$$

$$o_{yb}(\lambda) = k_4(V')\Phi_l(\lambda) + k_5(V')\Phi_m(\lambda) + k_6(V')\Phi_s(\lambda)$$

ここで、 $o_{rg}(\lambda)$  は赤緑反対色の分光感度、 $o_{yb}(\lambda)$  は黄青の分光感度である。 $k_1(V') \sim k_6(V')$  は LMS 錐体の分光感度にかかる重みである。これら反対色の分光感度を用いて式 (5)、式 (6) より、図 4 の波長弁別関を表現する最適な  $k_1(V') \sim k_6(V')$  を求める。 $V'$  は  $I'_l$ ,  $I'_m$  から得られた明度  $V$  と  $I'_r$  を、輝度  $L$  に依存する重み  $w(L)$  を掛けて足し合わせたものであり、次式により求める。

$$V' = V + w(L)I'_r \quad (7)$$

ここで、 $V = 0.6I'_l + 0.4I'_m$  であり、これら係数は文献 [13] から用いた。

### 3.6 パラメータの設定

前節で求めたパラメータを、提案モデルの色調整部分に設定することで、シーンの環境による視覚状態に応じた色変化を実現する。 $V'$ ,  $C_{rg}$ ,  $C_{yb}$  を求めるには次式を用いる。

$$\begin{bmatrix} V' \\ C_{rg} \\ C_{yb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 & 0.0 \\ k_1(V') & k_2(V') & k_3(V') \\ k_4(V') & k_5(V') & k_6(V') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_l \\ I'_m \\ I'_s \end{bmatrix} + w(L) \begin{bmatrix} I'_r \\ 0.0 \\ 0.0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式 (8) をまとめて以下のように記す。

$$C = M \begin{bmatrix} I'_l \\ I'_m \\ I'_s \end{bmatrix} + w(L) \begin{bmatrix} I'_r \\ 0.0 \\ 0.0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

上式 (8) により求めた  $V'$ ,  $C_{rg}$ ,  $C_{yb}$  を、RGB カラーディスプレイに表示するために RGB 値に変換する。変換には明所視での行列  $M_{photopic}$  の逆行列  $M_{photopic}^{-1}$  を用いる。これは、ディスプレイを見ている状態は明所視であると仮定しているためである。

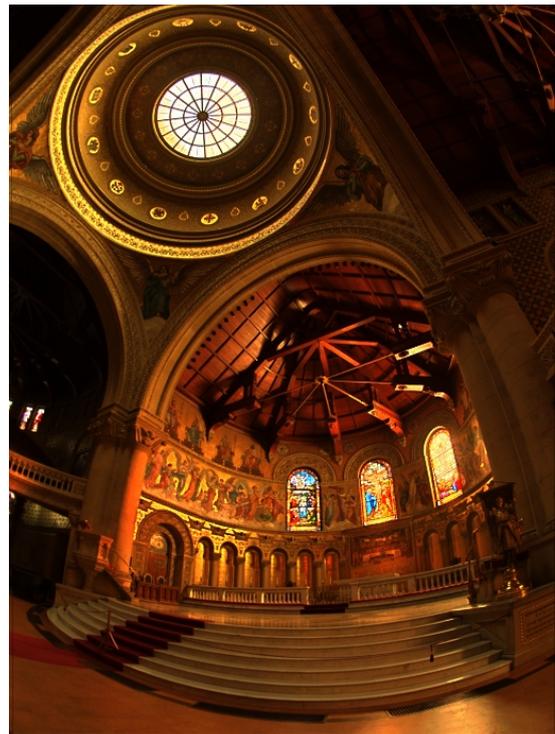


図 5 明所視の範囲に有効な手法 [2]

## 4. 現在の状況・まとめと今後の課題

現在は適切なパラメータを調査中である。具体的には式 (8) 中の  $k_1(V') \sim k_6(V')$ , そして  $w(L)$  である。 $k_1(V') \sim k_6(V')$  を暗所視、薄明視、明所視の波長弁別関のデータを基に、メタヒューリスティック手法を用いて調査している。

本発表では、既存手法では実現できなかった明所視、薄明視、暗所視の全ての視覚状態を再現できるトーンリプロダクション手法を提案した。それぞれの状態における波長弁別関を基にしてパラメータ設定することで、視覚特性を考慮した色変化を伴う表示が可能となる。

### 参考文献

- [1] Ferwerda, J. A., Pattanaik, S. N., Shirley, P. and Greenberg, D. P.: A model of visual adaptation for realistic image synthesis, *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '96*, New York, NY, USA, ACM, pp. 249–258 (1996).
- [2] Reinhard, E., Stark, M., Shirley, P. and Ferwerda, J.: Photographic tone reproduction for digital images, *Pro-*

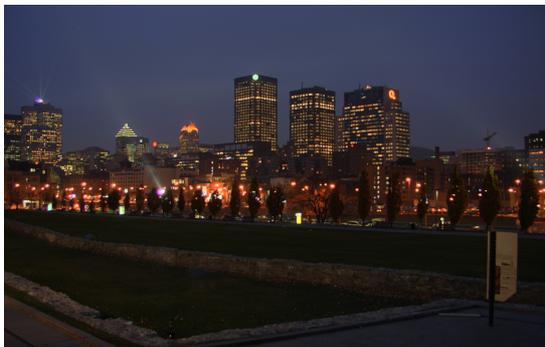


図 6 薄明視の範囲に有効な手法 [8]

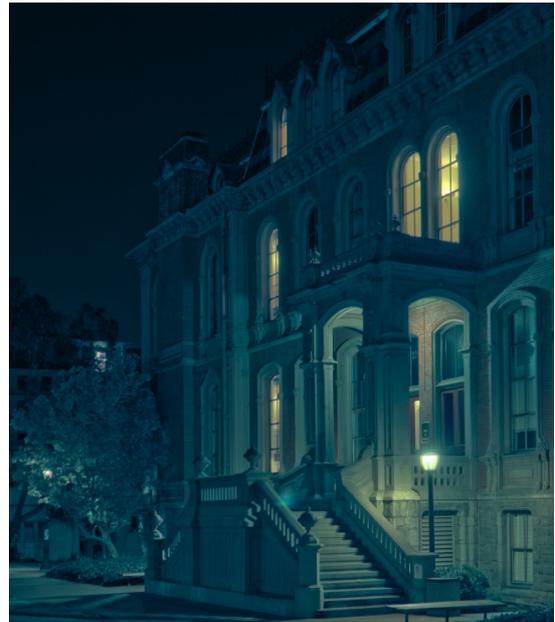


図 7 暗所視の範囲に有効な手法 [9]

ceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '02, New York, NY, USA, ACM, pp. 267–276 (2002).

- [3] Debevec, P. E. and Malik, J.: Recovering high dynamic range radiance maps from photographs, *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '97, New York, NY, USA, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 369–378, (1997).
- [4] Fairchild, M. D.: *The HDR Photographic Survey*, MDF Publications (2008).
- [5] Reinhard, E., Ward, G., Debevec, P., Pattanaik, S., Heidrich, W. and Myszkowski, K.: *High Dynamic Range Imaging, Second Edition: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting*, Morgan Kaufmann (2010).
- [6] Reinhard, E., Society, I. C. and Devlin, K.: Dynamic range reduction inspired by photoreceptor physiology, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 11, pp. 13–24 (2005).
- [7] Reinhard, E., Pouli, T., Kunkel, T., Long, B., Ballestad, A. and Damberg, G.: Calibrated image appearance reproduction, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 31, No. 6, pp. 201:1–201:11 (2012).
- [8] 三嶋 道弘, Marcos Slomp, 玉木徹, 金田和文: 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, *映像情報メディア学会誌*, Vol. 64, No. 9, pp. 1372–1378 (2010).
- [9] Kirk, A. G. and O'Brien, J. F.: Perceptually based tone

mapping for low-light conditions, *ACM SIGGRAPH 2011 papers*, SIGGRAPH '11, New York, NY, USA, ACM, pp. 42:1–42:10, (2011).

- [10] Thompson, W. B., Shirley, P. and Ferwerda, J. A.: A spatial post-processing algorithm for images of night scenes, *J. Graph. Tools*, Vol. 7, No. 1, pp.1–12, (2002).
- [11] Soucy, E., Nirenberg, S., Nathans, J. and Meister, M.: A Nobel Signaling Pathway from Rod Photoreceptors to Ganglion Cells in Mammalian Retina, *Proc. of Neuron*, Vol. 21, pp. 481–493 (1998)
- [12] Cao, D., Pokorny, J., Smith, V. C. and Zele, A. J.: Rod Contributions to Color Perception: Linear with Rod Contrast. *Vision Research*, Vol. 48, No. 26, pp.2586–2592 (2008)
- [13] Ingling Jr., C. R. and Tsou, B. H.-P.: Orthogonal combination of the three visual channels, *Vision Research*, Vol. 17 (1977).
- [14] Walraven, P. and Bouman, M.: Fluctuation theory of colour discrimination of normal trichromats, *Vision Research*, Vol. 6, pp. 567–586 (1966).
- [15] Pokorny, J. and Smith, V. C.: Wavelength Discrimination in the Presence of Added Chromatic Fields, *Journal of the optical society of america*, Vol. 60, No. 4, pp. 562–569 (1969).
- [16] Reinhard, E., Khan, E. A., Akyüz, A. O. and Johnson, G. M.: *Color Imaging: Fundamentals and Applications*, AK Peters (2008).