

# 広範囲の輝度変化に伴う色知覚を考慮した トーンリプロダクション手法

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：本稿では、ハイダイナミックレンジ分光画像を表示する際、既存手法よりも広範囲の輝度変化に対応できるトーンリプロダクション手法について提案する。既存手法は対応できる輝度範囲に限られており、タイムラプス動画のように、低輝度から高輝度までのシーンが含まれる場合、取り扱いが困難であった。提案するモデルは視覚分野で用いられている二段階モデルと、波長弁別閾と呼ばれる、周囲の明るさに対する色知覚の計測データを取り入れた。これらにより、広範囲の輝度変化に対応し、それに伴う色知覚を表現することができる。さらに、出力画像の制御をより行いやすくするために、二段階モデルに桿体の影響を導入した。

## 1. はじめに

我々が日常的に感じる輝度のダイナミックレンジは広範囲に及ぶ。例えば、月夜と日中のダイナミックレンジは $10^{14}$ 以上にわたる。さらに、日陰と日向のダイナミックレンジは $10^4$ 以上である [1]。図 1 に、実世界の輝度範囲とそれに対応する網膜照度 [Td]・視覚状態を示す。

このような広範囲にわたる輝度を保存するために、ハイダイナミックレンジ (High Dynamic Range: HDR) 画像が開発されてきた [2] [3]。ハイダイナミックレンジ画像は実世界の輝度やコンピュータグラフィクスで計算した輝度を詳細に記録することができる。しかし、ディスプレイに表示できる輝度ダイナミックレンジは実世界の輝度よりも小さい。そのため、HDR 画像をディスプレイに表示するためには、HDR 画像に記録された輝度を変換し、ディスプレイで表示できる輝度ダイナミックレンジに調整する必要がある。

この問題に対して、従来、輝度ダイナミックレンジを調整することを目的にして研究が行われてきた。しかし、最近では、輝度ダイナミックレンジの調整だけでなく、色の見えの調整も必要であると認識されてきた [4]。トーンリプロダクション問題と呼ばれる [3]。実際に、シーンに応じた



図 1 実世界の輝度幅と視覚状態の対応

色の見えを調整するために開発された、色の見えモデルの数々は、輝度ダイナミックレンジの調整も含んでいる [5]。それにもかかわらず、周囲が明るい状況から暗い状況までの色の見えを表現することは、取り扱う輝度が広範囲にわたるため、未だに困難である。

近年、デジタルカメラが消費者レベルで普及し、写真を撮ることが以前よりも身近になってきた。それに伴って、様々な写真加工技術が開発されている。例えば、写真を絵画風に見せる画像処理やノスタルジックに見せるための画像処理などがある。これらは、主にユーザーが撮影した画像に対して、後から行う処理である。

また、画像の後処理だけでなく、画像の新たな撮影手法や表示手法も開発されている。その中の一つに、タイムラプス撮影がある。これは、一定間隔ごとに写真を撮影し、それらを連続的に再生する方法である。これにより、例えば、花が蕾から開花する一連の様子、夜空の星の動き、撮影シーン中の人の動きや交通量の時間帯による変化などを顕著に見せることができる。

しかし、ここでも、先に述べた輝度ダイナミックレンジ

<sup>1</sup> 広島大学大学院工学研究院情報部門  
Department of Information Engineering, Hiroshima University 1-4-1 Kagamiyama, Higashihiroshima, Hiroshima, Japan, 739-8527

a) mikamo@hiroshima-u.ac.jp

b) bisser@hiroshima-u.ac.jp

c) tamaki@hiroshima-u.ac.jp

d) kin@hiroshima-u.ac.jp

の問題が生じる。特に、夜中から日中、または、日中から夜中にかけてタイムラプス撮影を行う場合である。具体的には、夜中の少ない光を取得するためのカメラ設定のままでは、光が多い日中に、輝度飽和を起こしてしまい、シーンの情報を失ってしまう。これを防ぐために、撮影の際、カメラの設定を変えることも可能であるが、それでは、センサーが受ける光量を突然変えることになる。その結果、連続的に再生にしたとき、ちらつきが生じてしまう。

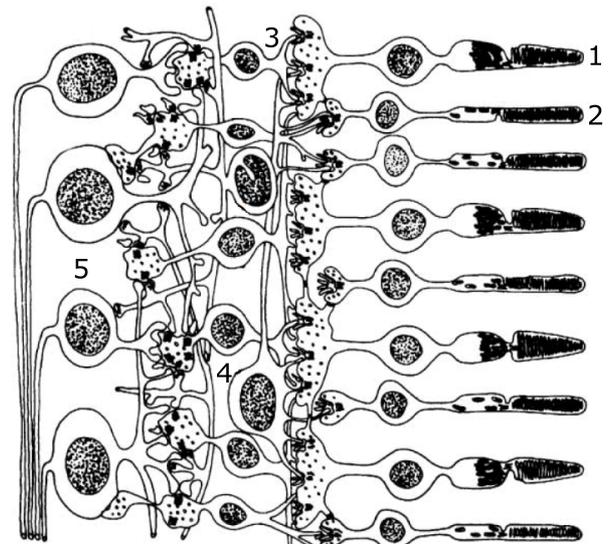
HDR 画像を使うことで、このような広範囲の輝度を損失なく記録することが可能である。提案手法はこのような広範囲の輝度変化に対処できる手法である。その際、トーンリプロダクション問題を解決するために、人の視覚特性を考慮することで、周囲の輝度変化に伴う色の見え方の変化も表現できる。

図 2 に網膜の断面図を示す [6]。瞳孔を通った光は図 2 の左側から入射し、右側に移動し、受光体細胞に到達する。受光体細胞には、錐体細胞と桿体細胞がある。これらの細胞の役割は異なり、錐体細胞は光の波長成分に対する感度が良く、桿体細胞は明るさに対する感度が良い。これらの細胞に到達した光は、電気信号に変換され、数々の神経細胞の応答によって、図 2 中の右から左に伝達され、最終的に脳で知覚される。このとき、錐体細胞と桿体細胞のそれぞれから出た信号は、脳で知覚されるまでに、同じ神経を共有する。このため、各細胞がどれだけ応答するかによって、感じる色合いに変化が生じる。

受光体細胞の働きは、常に同じではなく、周囲の明るさに応じて変化する。これは、視覚状態の特徴と関係している。視覚状態は、周囲の明るさに応じて、明所視、薄明視、そして、暗所視に分類される。

周囲が明るいとき、錐体細胞が主に働いており、視覚状態は明所視の状態にある。明所視では錐体細胞が働いているため、色の違いをはっきり識別することができる。周囲が暗いとき、桿体細胞が主に働いており、視覚状態は暗所視の状態にある。暗所視では錐体細胞はほとんど働いておらず、色をはっきり見ることは難しいが、桿体細胞が働いているためわずかな光も感じることができる。また、桿体細胞は感度のピークが短波長側にあることから、景色が青みがかって見える。これらの視覚状態の中間に薄明視の状態がある。薄明視は、明所視から暗所視への移行状態であり、周囲が薄暗いときの視覚状態である。明所視のようにはっきりと色を区別することはできないが、暗所視のように青みがかっているわけではない。このように、周囲の明るさによって視覚状態が変化する現象は、発見者の名前から、プルキニエ現象 [6] と呼ばれている。

本稿では、ハイダイナミックレンジ分光画像を表示するとき、既存手法よりも広範囲の輝度変化に対応できるトーンリプロダクション手法を提案する。提案手法は、輝度ダイナミックレンジの調整だけではなく、周囲の明るさに応



1. 錐体細胞 2. 桿体細胞 3. 双極細胞 4. 水平細胞  
5. 網膜神経節細胞

図 2 網膜の断面 [出展: [6]]

じた色の見え方の変化も再現することができる手法である。提案するモデルは、波長弁別閾に基づき、波長弁別閾の変化によって表示する色に変化を与える。

提案手法では、モデルを適用するとき、周囲の明るさに完全に順応した状態を仮定している。また、その他の視覚特性、例えば、視力の変化や、時間経過を考慮した順応などはモデルに取り入れていない。しかし、これらの効果も将来的に取り入れることが可能である。

本論文は、以下のように構成される。まず、次章で関連研究を述べ、既存手法、そして、提案手法で重要となる波長弁別閾と二段階モデルについて説明する。第 3 章で、波長弁別閾を二段階モデルに取り入れることで、広範囲の輝度変化に伴う色知覚を表現できるトーンリプロダクション手法を提案する。第 4 章で、提案手法を適用した結果とそれに対する考察を行う。第 5 章で、まとめとする。

## 2. 関連研究

今までに、プルキニエ現象を表現するため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。Jensen ら [7] は画家が描く夜景から平均的な色を計測し、それをレンダリング結果の色と線形補間することによって、薄明視の色を表現した。Krawczyk ら [8] は、暗所視で感じる青色を計測したデータと元画像の色から、桿体の応答を用いて線形補間することによって、薄明視の色を表現した。Krawczyk らの手法の主な目的は HDR 撮影した動画像に、グレアや暗闇での視力の低下など、様々な視覚効果を加えることである。これら線形補間を用いる手法では、出力画像は不自然な印象を与えるものになる。これは、人の特性は線形で表されないためである。一方、Kim ら [9] は測定した実験結果を利用し、高輝度領域の色の見え方を再現した。これ

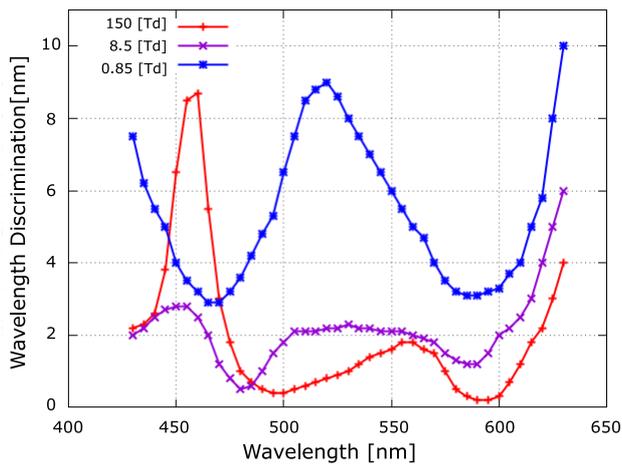


図 3 波長弁別閾

らの手法は明所視と暗所視をそれぞれ別々に扱っている。そのため、作成できる映像は静止画像や一つの視覚状態に限られてしまう場合が多い。

提案手法の特徴として、モデルで用いる波長弁別閾は色の知覚に直接関係しているということである。既存手法の多くは細胞の応答に基づいている。Kirk と O'Brein [10], Wnanat と Mantiuk [11] は錐体細胞と桿体細胞の応答 [12] を利用して色の変化を表現した。このため、視神経系の情報伝達については説明できるが、それらが色の知覚にどれほど影響しているのか説明は難しい。これに対して、波長弁別閾は色を実際に見たときに得られたデータである。提案手法は波長弁別閾に基づくことで、明所視、薄明視、そして、暗所視で知覚される色を表現する。

本稿では、文献 [13] の手法をさらに桿体の影響を考慮したモデルを提案する。文献 [13] の手法は夜中から日中までのタイムラプス動画のように、全ての視覚状態を含んだシーンを表現することを目的としている。具体的には、心理物理学的な実験データの一つである、波長弁別閾に基づいてプルキニエ現象を表現する。

文献 [13] の手法ではこの波長弁別閾を満たす分光分布を求めるために、9 個のパラメータを調整する必要があった。それに対し、提案手法では桿体の影響を考慮することで、9 個のパラメータのうち、6 個のパラメータを 1 個のパラメータで表現し、これによりユーザーが出力画像を制御しやすくなるように拡張した。

## 2.1 波長弁別閾

波長弁別閾とは、色の違いを識別できる最少の波長差である [14] [15]。図 3 に異なる 3 種類の明るさ (網膜照度) での波長弁別閾を示す。赤線が 150 [Td]、紫線が 8.5 [Td]、そして青線が 0.85 [Td] である [14]。横軸が可視光の波長 [nm]、縦軸が波長弁別閾 [nm] である。図 3 より、例えば、網膜照度 150 [Td] の光を見ている場合、可視光波長 520 [nm] のと

き波長弁別閾は 1 [nm] である。これは、波長 520 [nm] の光に対して、他の波長の光を識別するには、最低で 1 [nm] の差があればいいことを示している。すなわち、波長 520 [nm] の光に対して、521 [nm] の波長の光を識別することが可能であることを表している。

波長弁別閾の逆数は可視光の波長に対する感度を表している。すなわち、波長弁別閾が小さいほど、可視光の波長に対する感度が大きいことを示す。図 3 からプルキニエ現象の次の二つの特徴を見ることができる。まず、可視光の波長に対する感度は、網膜照度が小さくなるにつれて短波長側に移動する。例えば、150 [Td] の曲線で波長弁別閾が小さくなっている波長 495 [nm] の波長弁別閾 (約 0.5 [nm]) に着目すると、0.85 [Td] では、短波長側の波長約 465 [nm] に移動している。また、可視光全体にわたり、網膜照度が小さくなるにつれて、波長弁別閾は大きくなる。これは、色の違いを感じにくくなっていることを意味する。

論文 [15] 中で、Ingling と Tsou は波長弁別閾を次式 (1) で定義している。

$$\Delta W(\lambda) \sqrt{(o_{rg}(\lambda))^2 + (o_{yb}(\lambda))^2} \quad (1)$$

$o_{rg}(\lambda)$ ,  $o_{yb}(\lambda)$  は赤と緑、黄と青の反対色表色系における分光感度である。文献中で、反対色表色系で表される分光感度は、視細胞の L, M, そして、S 錐体の分光感度を線形変換することで得られる。

$$v(\lambda) = k_{v,l}C_l(\lambda) + k_{v,m}C_m(\lambda) + k_{v,s}C_s(\lambda) \quad (2)$$

$$o_{rg}(\lambda) = k_{rg,l}C_l(\lambda) + k_{rg,m}C_m(\lambda) + k_{rg,s}C_s(\lambda) \quad (3)$$

$$o_{yb}(\lambda) = k_{yb,l}C_l(\lambda) + k_{yb,m}C_m(\lambda) + k_{yb,s}C_s(\lambda) \quad (4)$$

ここで、 $v(\lambda)$  は反対色表色系で表される明度の分光感度である。 $C_l(\lambda)$ ,  $C_m(\lambda)$ ,  $C_s(\lambda)$  は、それぞれ、L, M, そして、S 錐体の分光感度である。 $k_{v,l}$ ,  $k_{v,m}$ ,  $k_{v,s}$  は、それぞれ、明度の分光感度を得るために、各錐体の分光感度にかかる重み、 $k_{rg,l}$ ,  $k_{rg,m}$ ,  $k_{rg,s}$  は、それぞれ、赤と緑の反対色分光感度を得るために、各錐体の分光感度にかかる重み、そして、 $k_{yb,l}$ ,  $k_{yb,m}$ ,  $k_{yb,s}$  は赤と緑の反対色分光感度を得るために、各錐体の分光感度にかかる重みである。

## 2.2 二段階モデル

また、心理物理学分野において Ingling と Tsou は提案した二段階モデル [15] を提案している。これによると、瞳孔から眼球に入った光は、脳で知覚されるまでに次の二段階の処理が行われる。まず、第一段階目では、網膜の受光体細胞に到達した光は LMS 表色系で処理される。ここで、各錐体の働きにより光は電気信号に変換される。二段階目は反対色表色系で処理される。ここで、電気信号はさらに、赤と緑、黄と青、そして、黒と白の応答に変換される。

提案手法はこの二段階モデルを利用する。これは、次の二つの理由からである。すなわち、二段階モデルが人の視

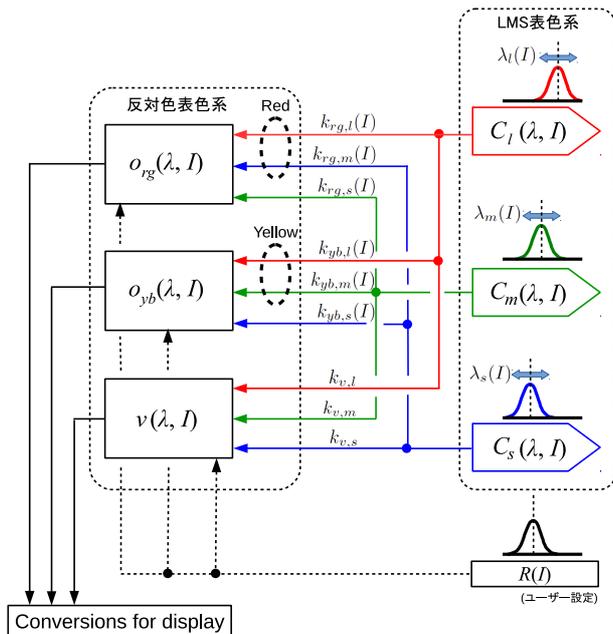


図 4 提案するモデル

覚に基づいているということ、そして、後で述べるように、提案手法で用いるパラメータ関数を取り入れることができるモデルだからである。

### 3. 提案手法

提案手法は色知覚の二段階モデルに基づく [15]。しかし、文献 [15] 中の二段階モデルは明所視での処理を表現するためのモデルであり、桿体の影響を考慮していない。そこで、提案するモデルでは、桿体の影響を考慮する (図 4)。具体的には、錐体からの信号を反対色系に変換するとき、桿体からの影響を考慮する。

提案手法が想定する入力画像は分光分布を記録した画像であり、実世界と同じ輝度値を記録しているものとする。提案手法を適用する場合、シーンを撮影した者、ディスプレイを見る者は周囲の明るさに順応している場合である仮定する。波長弁別閾はプルキニエ現象における色の見え方の変化のデータを含んでいる。提案手法は、この波長弁別閾をモデルに取り込むことでプルキニエ現象を再現する。

提案手法では、波長弁別閾を満たす最適な分光感度を使用して、表示する色を決定する。この分光感度は波長弁別閾の計測データと L, M, そして, S 錐体の分光感度曲線を用いて、最適化問題を解くことで求める。具体的には、各錐体の既に得られている分光感度の曲線を波長方向に対して平行に移動、さらに大きさを変化させ、波長弁別閾を満たすようなパラメータを求める。この平行移動と、大きさを変化させることは、波長弁別閾が順応状態の明るさによって、その位置、大きさが変化することに由来する。さらに、得られた波長弁別閾を満たすパラメータから、さらに、補間手法を用いて、任意の順応状態を考慮するための、

パラメータ関数を導入する。パラメータ関数から得られるパラメータによって、新たに、任意の順応状態での波長弁別閾を満たす分光感度を得る。この分光感度を使用して、順応状態の三刺激値を決定する。

得られた三刺激値をディスプレイに表示する RGB 値に変換するには、さらに次の二つを考慮する。すなわち、視覚状態の差と輝度ダイナミックレンジの調整である。視覚状態の差とは、シーンを撮影した状況での視覚状態と、画像が表示されたディスプレイを見る際の視覚状態との差のことである。この差を考慮した表示を行うことで、実際のシーンと同じ印象を与える画像に近づける。また、画像に記録されている輝度ダイナミックレンジとディスプレイに表示できる輝度ダイナミックレンジが異なるため、輝度ダイナミックレンジの調整が必要である。

#### 3.1 パラメータ関数の導入

ここでは、順応輝度状態での各係数を与える、パラメータ関数の計算方法を説明する。まず、順応状態における波長弁別閾を表現するために、式 (2)~式 (4) を基に、次式で表す。

$$\begin{bmatrix} v(\lambda, I) \\ o_{rg}(\lambda, I) \\ o_{yb}(\lambda, I) \end{bmatrix} = M(I) \begin{bmatrix} C_l(\lambda - \lambda_l(I)) \\ C_m(\lambda - \lambda_m(I)) \\ C_s(\lambda - \lambda_s(I)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、

$$M(I) = \begin{bmatrix} k_{v,l} & k_{v,m} & k_{v,s} \\ k_{rg,l}(I) & k_{rg,m}(I) & k_{rg,s}(I) \\ k_{yb,l}(I) & k_{yb,m}(I) & k_{yb,s}(I) \end{bmatrix} \quad (6)$$

ただし、 $I$  は順応状態での網膜照度であり、入力画像の平均輝度  $\bar{L}$  と瞳孔径  $A(L)$  の積  $LA(L)$  によって得る。式 (5) において、 $v(\lambda, I)$ ,  $o_{rg}(\lambda, I)$ ,  $o_{yb}(\lambda, I)$  はそれぞれ、順応状態での明度、赤と緑の反対色、黄と青の反対色の分光感度である。パラメータ関数  $\lambda_l(I)$ ,  $\lambda_m(I)$ ,  $\lambda_s(I)$  は LMS 分光感度を水平方向に移動させるパラメータを返す関数である。これらは、順応状態の網膜照度が小さくなるにつれ、波長弁別閾が短波長側に移動することに由来する。

式 (6) において、提案手法では、 $k_{v,l} = 0.6$ ,  $k_{v,m} = 0.4$ , そして、 $k_{v,s} = 0.0$  としている。これは、文献 [15] に基づいており、我々の調査によると、現在、薄明視と暗所視の明度知覚は厳密に定義されていないからである。パラメータ関数  $k_{rg,l}(I)$ ,  $k_{rg,m}(I)$ ,  $k_{rg,s}(I)$  は赤と緑の反対色分光感度を得るとき、L, M, そして、S 錐体の分光感度の大きさを調整するパラメータを返す関数である。また、パラメータ関数  $k_{yb,l}(I)$ ,  $k_{yb,m}(I)$ ,  $k_{yb,s}(I)$  は黄と青の反対色分光感度を得るとき、各錐体の分光感度の大きさを調整するパラメータを返す関数である。

これらのパラメータ関数  $\lambda_l(I)$ ,  $\lambda_m(I)$ , そして、 $\lambda_s(I)$ ,

また,  $k_{rg,l}(I)$ ,  $k_{rg,m}(I)$ ,  $k_{rg,s}(I)$ ,  $k_{yb,l}(I)$ ,  $k_{yb,m}(I)$ , そして,  $k_{yb,s}(I)$  は最適化手法と補間手法によって求める. これにより, 順応状態の網膜照度に対し, 連続的なパラメータ関数を得ることで, 任意の順応状態の網膜照度での各パラメータを得られるようにする. 以下にその手順の詳細を説明する.

まず, 図3の各順応状態での波長弁別閾を満たす最適なパラメータを最適化手法によって求める. 具体的には, 波長弁別閾のデータ (図3), 式(1), 式(5), そして, 式(6)を用い, 各順応状態で, データとの二乗誤差を最小にするパラメータを求める. これは, 次式で表される.

$$\begin{aligned} \min & \|\Delta W(\lambda)_{I_m} - \Delta W(\lambda, I_m)\|^2 \\ \text{s. t. } & k_{rg,lI_m} > 0, k_{rg,mI_m} < 0, k_{rg,sI_m} > 0, \\ & k_{yb,lI_m} > 0, k_{yb,mI_m} > 0, k_{yb,sI_m} < 0 \\ & (I_m = 0.85, 8.5, 150) \end{aligned} \quad (7)$$

添え字の  $I_m$  は, 順応状態が 0.85, 8.5, そして, 150[Td] の場合であることを意味する. このとき, 制約条件は, 反対色の関係を保ちながら最適化することを意味する. すなわち, 赤と緑の反対色では, LとS錐体の分光感度とM錐体の分光感度は加え合わされるとき, 赤が正の応答を, 緑が負の応答をする. 同様に, 黄と青の反対色では, LとM錐体の分光感度とS錐体の分光感度が加え合わされるとき, 黄が正の応答を, 青が負の応答をする. これらの条件を満たすための制約条件である. この最適化問題は非線形最適化問題であり, 遺伝的アルゴリズムを用いて求めた. これを解くことで, 以下の最適解を得る.

$$\begin{aligned} & \{\lambda_{lI_m}, \lambda_{mI_m}, \lambda_{sI_m}, \\ & k_{rg,lI_m}, k_{rg,mI_m}, k_{rg,sI_m}, k_{yb,lI_m}, k_{yb,mI_m}, k_{yb,sI_m}\} \\ & (I_m = 0.85, 8.5, 150) \end{aligned}$$

ここで求めた最適解は, 順応状態の網膜照度が 0.85, 8.5, 150 [Td] の3種類の場合のパラメータである.

次に, 補間手法を用いて波長弁別閾のデータが得られていない状態, すなわち, 任意の順応状態でパラメータを返すパラメータ関数を求める. この補間にはシグモイド関数を用いた. これは, 人の感度特性は非線形であり, シグモイド関数を用いて近似される場合が多いからである. 近似により得られたパラメータ関数を以下に示す.

$$\begin{aligned} \lambda_l(I) &= -\frac{18.3}{1+7.2I^{-0.7}} - 0.9 \\ \lambda_m(I) &= -\frac{44.6}{1+35.4I^{-1.2}} + 22.0 \\ \lambda_s(I) &= -\frac{43.0}{1+9.0I^{-1.50}} + 28.0 \\ k_{rg,l}(I) &= \frac{6.69}{1+2500I^{-2.65}} + 0.80 \\ k_{rg,m}(I) &= -\frac{6.24}{1+2500I^{-2.50}} - 0.77 \\ k_{rg,s}(I) &= \frac{0.36}{1+50.02I^{-1.50}} + 0.04 \\ k_{yb,l}(I) &= \frac{0.24}{1+50.04I^{-1.70}} + 0.03 \\ k_{yb,m}(I) &= \frac{0.42}{1+1.76I^{-0.02}} + 0.14 \\ k_{yb,s}(I) &= \frac{0.15}{1+2.80I^{-0.46}} - 0.27 \end{aligned}$$

さらに, 出力画像の制御を行いやすくするために, 桿体の影響を考慮する. これにより, ユーザーは桿体の影響だけを変化させることで, 出力画像の色合いを制御することが可能である. 桿体の影響を  $R(I)$  とし, 分光感度に掛かるパラメータ関数  $k_{rg,l}(I)$ ,  $k_{rg,m}(I)$ ,  $k_{rg,s}(I)$ ,  $k_{yb,l}(I)$ ,  $k_{yb,m}(I)$ , そして,  $k_{yb,s}(I)$  は以下のように近似できる. これにより, パラメータ関数は  $R(I)$  に対して線形になる.

桿体の影響を考慮した, 新たなパラメータ関数をそれぞれ'を付けて表す.

$$\begin{aligned} k'_{rg,l}(I) &= 6.69R(I) + 0.80 \\ k'_{rg,m}(I) &= -6.24R(I) - 0.77 \\ k'_{rg,s}(I) &= 0.36R(I) + 0.04 \\ k'_{yb,l}(I) &= 0.24R(I) + 0.03 \\ k'_{yb,m}(I) &= 0.04R(I) + 0.28 \\ k'_{yb,s}(I) &= 0.15R(I) - 0.27 \end{aligned}$$

ここで,

$$R(I) = \frac{1}{1 + 100I^{-1.6}} \quad (8)$$

であり,  $R(I)$  の係数 100 と  $-1.6$  は実験的に設定した. これらのパラメータ関数から得られるパラメータにより, 任意の順応状態で波長弁別閾を満たす反対色系での分光感度を得る.

### 3.2 パラメータ関数の適用と表示のための変換

反対色表色系における分光感度を用いることで, プルキニエ現象を考慮した三刺激値  $V$ ,  $O_{rg}$ ,  $O_{yb}$  を得る. このときの分光感度は先に述べたパラメータ関数によって得られたものである.

$$Z = \int_{\Omega} S(\lambda)z(\lambda)d\lambda, \quad (9)$$

ここで,  $\Omega$  は可視光域の波長であり,  $Z \in \{V, O_{rg}, O_{yb}\}$ ,  $z(\lambda) \in \{v(\lambda), o_{rg}(\lambda), o_{yb}(\lambda)\}$ , そして,  $S(\lambda)$  はそれぞれの画素での分光分布である.

この三刺激値を計算した後, 画像をディスプレイに表示するためには次の二つを考慮する必要がある. すなわち, 視覚状態の違いと輝度ダイナミックレンジの調整である. 視覚状態の違いとは, シーンが撮影されたときの視覚状態と, その画像が表示されるとき視覚状態の違いである. 例えば, 明るいシーンが撮影され, それを蛍光灯下のように明るい屋内で見る場合では, いずれの状況でも, ともに明所視の状態にあり, 視覚状態の違いはない. しかし, 月夜のような暗いシーンを撮影し, それを蛍光灯下の明るい屋内で見る場合では, 前者は暗所視, 後者は明所視の状態にあり, 視覚状態に差が生じる. この違いを考慮して表示しなければ, 自然な印象を得ることは難しい.

輝度ダイナミックレンジの調整は, シーンの輝度ダイナミックレンジとディスプレイに表示できる輝度ダイナミッ

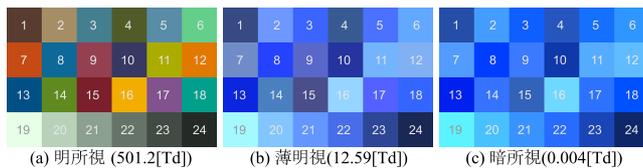


図 5 提案手法にカラーチェッカーの分光分布を適用した結果

クレンジが異なることに由来する。ディスプレイに表示できる輝度ダイナミックレンジは、実世界のそれよりも小さい。そのため、実世界に匹敵する輝度ダイナミックレンジを保存している画像をディスプレイに表示するためには、輝度ダイナミックレンジの調整を行う必要がある。

視覚状態の違いを考慮するために、具体的には以下の操作を行う。すなわち、画像を表示する処理の過程で、反対色表色系から再び LMS 表色系に変換するとき、式 (6) で定義した行列  $M(I)$  の逆行列  $M^{-1}(I)$  を用いる。具体的には、ディスプレイを見るときに順応状態での網膜照度は  $150[\text{Td}]$  と仮定し、 $M^{-1}(150)$  を用いる。この逆行列を用いて、LMS 表色系に変換する。LMS 表色系に変換した後に、輝度ダイナミックレンジの調整を行うために、輝度成分と色相成分を分離して扱うことが可能な  $Y_{xy}$  表色系に変換する。

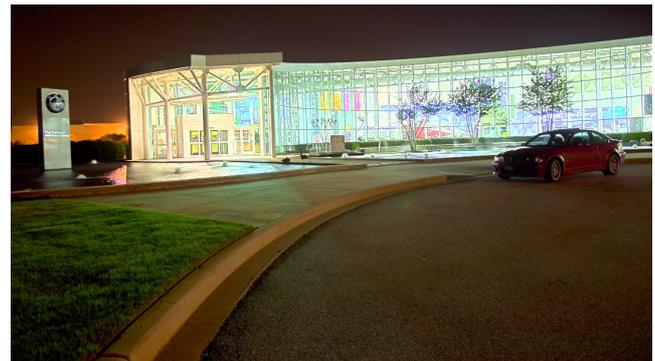
輝度ダイナミックレンジの調整は、既存のトーンマッピング手法を用いる [16]。このトーンマッピング手法を用い、輝度ダイナミックレンジを調整し、再び、輝度成分と色相成分を合成する。トーンマッピング手法の中で、画像全体の明るさを決定するパラメータ  $key$  の設定するには、文献 [8] で提案されている手法を用いた。

#### 4. 結果と考察

まず、提案手法を実際の分光分布に適用した。このとき、カラーチェッカーの分光分布を用いて、光源は D65 と設定した [17]。図 5 にその結果を示す。左から画像平均網膜照度を (a)  $501.2 [\text{Td}]$ , (b)  $12.59 [\text{Td}]$ , (c)  $0.004 [\text{Td}]$  とした場合の出力結果である。それぞれ、視覚状態が明所視、薄明視、そして、暗所視を想定している (図 1)。ここでは、色の変化を見やすくするために、画像全体の明るさを決定するパラメータ  $key$  を一定にしている。それぞれのパッチには、説明のために番号を割り当てている。図 5 の (a), (b), そして、(c) を比較すると、順応状態の網膜照度が小さくなると、画像全体が青みがかってくるのがわかる。さらに、(b) と (c) を比較すると、(c) のほうがより青みがかっている。特に、7, 9, 12, 15, そして、17 のように、赤系の色の変化が大きい。このような色では、赤み成分が抑えられ、青みが強くなっている。また、3, 8, 10, そして、13 のような青系の色は鮮やかになっている、または、ほとんど変化しない。さらに、11 と 14 のような緑系の色では、エメラルドグリーンを経て青に近づいている。これらは、



(a) 提案手法



(b) Reinhardらの手法

図 7 提案手法と既存手法 [16] の比較

周囲の明るさに応じて色の見え方が変化するプルキニエ現象の特徴を表している。

図 6 に、提案手法をその他の分光分布に適用した結果を示す。(a), (b), そして、(c) の画像平均輝度、 $470.2 [\text{cd}/\text{m}^2]$ ,  $0.94 [\text{cd}/\text{m}^2]$ , そして、 $0.005 [\text{cd}/\text{m}^2]$  は、それぞれ、明所視、薄明視、そして、暗所視での視覚状態に対応する。シーンは晴れた日の森を撮影したものである [18]。提案手法の入力画像は分光分布画像である必要があるため、文献 [19] で提案されている手法を用いて、記録されている RGB 画像から分光分布画像を得た。この分光画像を係数倍することで、それぞれの画像平均輝度を設定した。

図 6 より、次のことがわかる。明所視の場合、色がはっきりと見え、また、その識別も容易である。平均輝度が下がるにつれ、提案手法によって表現されるプルキニエ現象による効果を見ることができ。すなわち、画像中の赤成分は抑えられ、一方で、青成分が目立つようになる。

また、図 7(a) に提案手法をその他の画像に適用した結果を示す。(b) には比較のため、明所視の場合を適用対象とした Reinhard らの手法 [16] を適用した結果を示す。元画像は薄暗いシーンを撮影したものである [18]。提案手法は、Reinhard らの手法に比べ、画像全体に青みがかった効果を加え、暗い印象を与えることができる。

図 8 にタイムラプス撮影した画像に提案手法を適用した結果を示す。タイムラプス撮影は、カメラを固定して行い、シーンには、月夜から、夜が明け、日中に至るまでが含ま

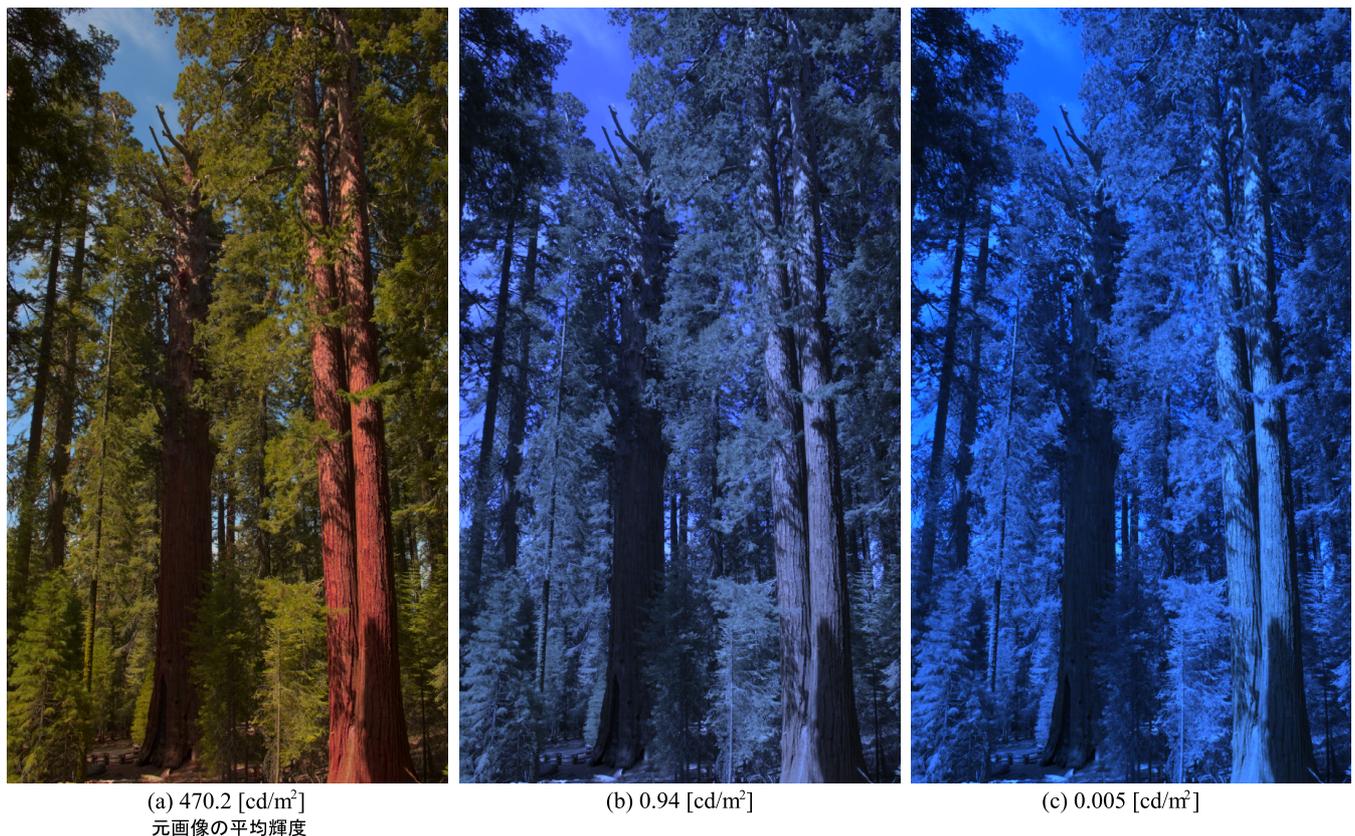


図 6 それぞれの順応状態での網膜照度における出力結果

れている。(a), (b), そして, (c) はそれぞれ, 暗所視, 薄明視, そして, 明所視の状態を想定した結果である。左上が提案手法であり, 比較のために既存手法を適用した結果も示している。既存手法は, それぞれ, 暗所視の場合を適用対象とした Kirk と O'Brien の手法 [10](右上), 薄明視の場合を適用対象とした Mikamo らの手法 [20](左下), そして, Reinhard らの手法 [16](右下) である。

暗所視(図 8(a))においては, 提案手法は Kirk と O'Brien の手法と同様な効果を得ることができる。また, Mikamo らの手法 [20] はこのようにシーン全体が青みがかって見える効果を表現することができない。さらに, *key* の設定により, Reinhard らの手法は, 夜のシーンを表現したいにも関わらず, とても明るい印象を与える結果になっている。薄明視(図 8(b))においては, 提案手法は, まだ青みがかって見える効果が残っている。しかし, (a) の提案手法による結果と比較すると, 青みは弱くなっている。さらに, 明所視(図 8(c))においては, 提案手法は Reinhard らの手法と同じような出力結果を得る。

## 5. まとめと今後の課題

本稿では, 広範囲の輝度変化に伴う色知覚を考慮した トーンリプロダクション手法を提案した。提案手法は, 順応輝度によって変化する視覚状態である明所視, 薄明視, そして, 暗所視での色の見え方を表現できる。提案するモ

デルは, 視覚分野で用いられている, 色知覚処理における二段階モデルと, 色知覚の変化を記録した波長弁別関数を利用した。これによって, 広範囲の輝度変化が起こる場合のプルキニエ現象を再現することができる。

さらに, 論文の中では, 実際の分光分布に対して得られる結果として, カラーチェッカーの分光分布を提案手法に適用した結果を示した。また, より複雑な分光分布を含む画像も適用した。カラーチェッカーを用いた場合の結果では, 青系の色はほとんど変化せず, 赤系の色は赤みを失って表示できる。また, タイムラプス撮影した映像にも提案手法を適用した。提案手法は, 広範囲の輝度変化に対応できるため, 既存手法のように, 途中でパラメータを変えることによって生じるちらつきを抑えることができる。また, 各視覚状態においては, 見た目において既存手法と同じくらいの結果を得ることができる。

今後の課題として, 以下のようなことが挙げられる。まず, 現在, 提案手法はプルキニエ現象を対象として扱っている。今後は, 明るさによって変化する視力などの, その他の視覚特性を取り入れることが挙げられる。また, 現在, 画像全体の平均輝度を用いて順応状態での網膜照度を計算しているが, 人の視覚は局所的な輝度にも順応している。よって, そのような局所的な順応を考慮したモデルに拡張することなどが挙げられる。



図 8 提案手法と既存手法 [10], [16], [20] の比較

### 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, *SIGGRAPH'96*, pp. 249–258 (1996).  
 [2] Debevec, P. E. and Malik, J.: Recovering high dynamic range radiance maps from photographs, *SIGGRAPH '97*, pp. 369–378 (1997).  
 [3] Reinhard, E., Ward, G., Debevec, P., Pattanaik, S., Heidrich, W. and Myszkowski, K.: *High Dynamic Range Imaging 2nd edition*, Morgan Kaufmann Publishers (2010).  
 [4] Reinhard, E.: Tone Reproduction and Color Appearance Modeling: Two Sides of the Same Coin?, *19th Color and*

*Imaging Conference*, pp. 171–176 (2011).  
 [5] Fairchild, M. D. and Johnson, G. M.: Meet iCAM: A next-generation color appearance model, *IS&TSID 10th Color Imaging Conference*, pp. 33–38 (2002).  
 [6] Ferwerda, J. A.: Elements of Early Vision for Computer Graphics, *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol. 21, No. 5, pp. 22–33 (2001).  
 [7] Jensen, H. W., Durand, F., Dorsey, J., Stark, M. M., Shirley, P. and Premoze, S.: A physically-based night sky model, *SIGGRAPH '01*, pp. 399–408 (2001).  
 [8] Krawczyk, G., Myszkowski, K. and Seidel, H.-P.: Perceptual effects in real-time tone mapping, *the 21st spring conference on Computer graphics*, pp. 195–202 (2005).  
 [9] Kim, M. H., Weyrich, T. and Kautz, J.: Modeling Human Color Perception Under Extended Luminance Levels, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, pp. 27:1–27:9 (2009).  
 [10] Kirk, A. G. and O'Brien, J. F.: Perceptually based tone mapping for low-light conditions, *SIGGRAPH '11*, pp. 42:1–42:10 (2011).  
 [11] Wanat, R. and Mantiuk, R. K.: Simulating and Compensating Changes in Appearance Between Day and Night Vision, *SIGGRAPH '14*, Vol. 33, No. 4, ACM, pp. 147:1–147:12 (online), available from <http://doi.acm.org/10.1145/2601097.2601150> (2014).  
 [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] Mikamo, M., Raytchev, B., Tamaki, T. and Kaneda, K.: A Tone Reproduction Operator for All Luminance Ranges Considering Human Color Perception, *Eurographics 2014 - Short Papers*, The Eurographics Association (2014).  
 [14] McCree, K. J.: Small-field Tritanopia and the Effects of Voluntary Fixation, *Optica Acta*, Vol. 7, pp. 317–323 (1960).  
 [15] Ingling, C. R. and Tsou, B. H.-P.: Orthogonal combination of the three visual channels, *Vision Research*, Vol. 17, pp. 1075–1082 (1978).  
 [16] Reinhard, E., Stark, M., Shirley, P. and Ferwerda, J.: Photographic tone reproduction for digital images, *SIGGRAPH '02*, pp. 267–276 (2002).  
 [17] color science laboratory, M.: *USEFUL COLOR DATA*, <http://www.cis.rit.edu/mcsl/online/cie.php>.  
 [18] Fairchild, M. D.: *The HDR Photographic Survey*, MDF Publications (2008).  
 [19] Smits, B.: An RGB-to-spectrum Conversion for Reflectances, *J. Graph. Tools*, Vol. 4, No. 4, pp. 11–22 (1999).  
 [20] Mikamo, M., Slomp, M., Tamaki, T. and Kaneda, K.: A Tone Reproduction Operator Accounting for Mesopic Vision, *ACM SIGGRAPH ASIA 2009 posters*, pp. 41:1–41:1 (2009).