

自然環境の分光測定結果による 照明光推定オプティマルカラーモデルの検証

福田 一帆[†] 内川 恵二[‡]

[†]工学院大学情報学部 〒163-8677 東京都新宿区西新宿 1-24-2

[‡]神奈川大学マルチモーダル研究所 〒221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1

E-mail: [†] fukuda@cc.kogakuin.ac.jp, [‡] uchikawa@ip.titech.ac.jp

あらまし 物体の色情報を安定して獲得するためには、照明光の影響を取り除く必要がある。照明光推定手法として著者らが提案するオプティマルカラーモデルの有効性を検討するため、自然環境で観察される色情報に対して提案モデルが適用可能であるか検証した。日なたと日陰の自然光の分光放射輝度および様々な自然物体の分光反射率を測定および解析して、それぞれの光源下の色度輝度分布に提案モデルを適用した。その結果、オプティマルカラーモデルでは、シーンの構成色に色相の偏りが大きい場合に対しても比較的安定した推定が可能であることが示された。

キーワード 照明光, 物体色, 色恒常性

Validation of the optimal color model for illuminant estimation using spectral data in natural environment

Kazuho FUKUDA[†] and Keiji UCHIKAWA[‡]

[†] Faculty of Informatics, Kogakuin University 1-24-2 Nishi Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo, 163-8677 Japan

[‡] Research Institute for Multimodal Sensory Science, Kanagawa University

3-27-1 Rokkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 221-8686 Japan

E-mail: [†] fukuda@cc.kogakuin.ac.jp, [‡] uchikawa@ip.titech.ac.jp

Abstract The illuminant color needs to be estimated for obtaining the color of an object stably against to illuminant changes. In order to investigate the efficiency of the optimal color model, which the authors have proposed, the model was tested whether it was sufficiently applicable to the real colors observed in natural environment. Measuring and analyzing the spectral radiations of daylight in the sun and the shade and spectral reflectance of many natural objects, we applied the optimal color models to the chromaticity and luminance distribution of those object under each illuminant. The results showed that the model estimated the illuminant colors quite well even when the object colors in the scene were largely biased in the hue.

Keyword Illuminant color, Object color, Color constancy

1. はじめに

物体には様々な色があるが、物体色の情報源となる物体の反射光は、照明光に依存する。したがって、物体の“色”を知るためには照明光の影響を取り除く必要がある。人の視覚系が持つ、照明光の影響によらず安定した物体色を知覚する性質は色恒常性とよばれる。

色恒常性における照明光推定に関しては、グレイワールド仮説、レティネックス理論を始めとして様々な研究があり、シーンの色情報の平均や最高輝度の情報を利用した色恒常性モデルが多く提案されている¹⁻³。これらのモデルは、画像処理技術にも応用されているが、例えばシーンを構成する色の分布において色相の偏りが大きい場合は照明光推定の誤差が大きくなる。

一方、この問題点を解決する方法として、Golz & MacLeodによりシーンの色度と輝度の相関を利用した照明光推定法が提案されている⁴。この手法では、例えば平均の色度が同じであっても、赤い照明下に緑の物体が多数存在するシーンと、緑の照明下に赤い物体が多数存在するシーンとでは、色度と輝度の相関係数が異なることを利用して照明光を推定する。

著者らは、Golzらのモデルと同様に色度と輝度の分布を利用して照明光を推定する色恒常性モデルとして、オプティマルカラーモデルを提案して、その妥当性を検討してきた⁵⁻⁷。オプティマルカラーとは、ある照明光が与えられたとき、その照明下において色度ごとに物体色が取り得る最高輝度をもつ色を意味し、最明色、

MacAdam's limit とも呼ばれている⁸。そして、オプティマルカラーモデルでは、視覚系がシーンの色度輝度分布に最も適合するオプティマルカラーの分布を選択し、その分布を与える光源を照明光推定結果とする。

本研究では、自然界において観察される色情報からオプティマルカラーモデルによりどの程度、照明光を正しく推定可能であるかを検証することを目的とした。その方法として、自然光の分光スペクトル、および、自然物体の分光反射率を実際に測定して、これらのデータから自然界で視覚系が受ける色情報の色度と輝度の分布をシミュレートし、そのときの照明条件と、オプティマルカラーモデルにより推定した照明光を比較することで提案モデルの有効性を検証した。

2. 自然環境の色情報の測定

オプティマルカラーモデルの評価のために、自然画像の昼光の分光スペクトルと、自然物体の分光反射率を実際に測定して、その結果から、自然界において人の視覚系に入力される色の色度輝度分布を表した。

2.1. 自然光の測定

解析に用いた光源データは、東京工業大学すずかけ台キャンパス(北緯 35.51 度, 東経 139.48 度)のビルの屋上に標準白色板を置いて、その北側から分光放射輝度計により仰角 45° で測定したデータである。本研究では、快晴の 2013 年 11 月 20 日正午において、周囲に太陽の直射光を遮る物体の無い日なた条件と、遮蔽板により太陽からの直射光のみを遮った日陰条件のデータを用いた。各条件で測定した分光放射輝度を日なた条件の最大値で正規化した結果を図 1 に示す。なお、日陰条件のデータは正規化後に 5 倍した数値である。

これらの条件における自然光の相関色温度を近似的に求めたところ、太陽光の直射と青空からの照射を共に含む日なた条件では 5650K、太陽光の直射を遮り主に青空からの照射のみとなる日陰条件は 22650K であった。今回用いた測定条件以外にも、異なる季節、時間、天候において測定をおこなったが、一日の時間帯の違いおよび日なたと日陰の違いによる昼光の色変化は、おおむね黒体放射の軌跡と一致した。

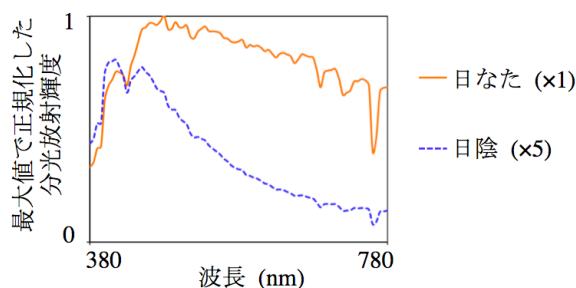


図 1. 快晴正午の昼光分光放射輝度の測定結果

2.2. 自然物分光反射率の測定

物体の分光反射率データは、花、葉、樹皮、石、果物、野菜などの自然物 400 種類の実測データを用いた。測定サンプルをそれぞれ研究室内の標準光源ブースの床面に低反射率の黒紙を敷いた上に水平に置き、仰角 45° から分光放射輝度計を用いて測定した。測定結果から分光反射率を求める際には、同条件における標準白色板の測定結果を用いた。図 2 は測定した自然物 400 種類の分光反射率を示したものである。

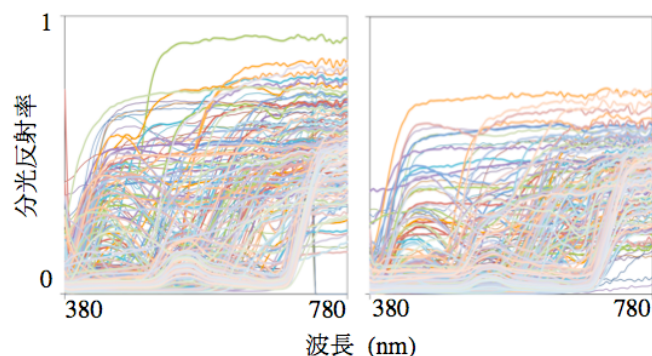


図 2. 自然物 400 種類の分光反射率測定結果

2.3. 自然界における視覚系への入力光

測定した自然光の分光放射輝度と、自然物の分光反射率を波長ごとに掛け合わせ、Stockman & Sharpe の錐体応答関数⁹を用いて L, M, S 錐体の応答を求めた。さらに、MacLeod & Boynton により定義される生理学的色空間¹⁰に、自然界において視覚系に入力される光情報の分布を表した。このとき、S 錐体応答関数の係数は等エネルギー白色光が blueness = 1.00 となるように定めた。

図 3 は本研究で使用した 400 種類の分光反射率データに対して、日なた条件と日陰条件における分光放射輝度を乗じて求めた、自然界において視覚系に入力される色情報の色度と輝度の分布である。図中の×印は参考として完全拡散板を仮定したときの反射光の色度と輝度を表し、多数の小点は自然物 400 種類それぞれの色度と輝度を表す。

3. オプティマルカラーモデルの適用

上記の方法で求めた自然界にて観察される色度輝度分布のシミュレート結果に対して、著者らが提案する色恒常性オプティマルカラーモデルを用いて照明光の推定をおこない、シミュレート時に仮定した照明光条件と比較した。

オプティマルカラーモデルでは、入力刺激の色度輝度分布に対して、それと誤差が最小となる最適なオプティマルカラー近似面を生成する照明条件を探索する。適合度の比較には、観察シーンの輝度 L とそれと同

じ色度におけるオプティマルカラーの輝度 L_o の差の二乗値に輝度比 L/L_o を乗じたもの全てのデータの総和を取った値を誤差とした．この誤差が最小となる照明条件を求めて，そのシーンから推定される照明光とした．なお，本研究におけるオプティマルカラーモデルでは，照明光の推定範囲を 1000K～50000K の黒体放射に限定した．

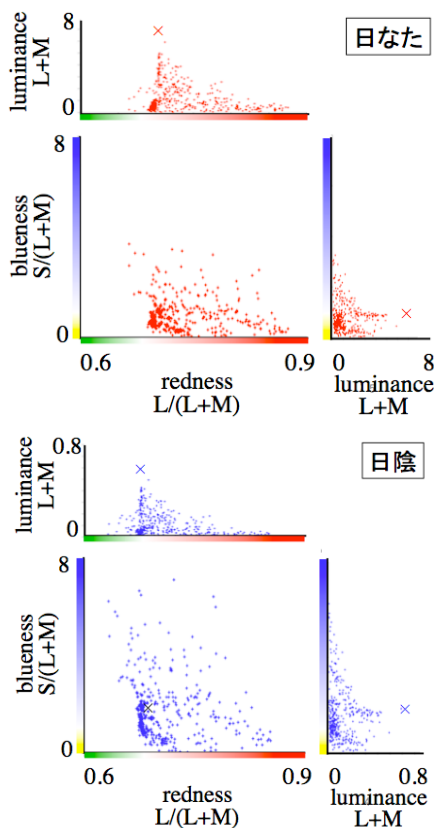


図 3．自然光と自然物体の分光測定結果から算出した色度と輝度の分布．小点は自然物の測定結果から求めた色度を表す．×は完全拡散板の反射光色度を表す．

自然光の照明光条件としては，日なたと日陰の測定データを用いた．また，自然物の分光反射率データは，全 400 データを用いた条件 (All 400 data) の他に，シーンの構成色に色相の偏りが大きい 4 条件，MacLeod & Boynton 色度図の $redness = L/(L+M)$ の値が大きい方から 200 データ (Reddish scene)，小さい方から 200 データ (Greenish scene)， $blueness = S/(L+M)$ の値が大きい方から 200 データ (Bluish scene)，小さい方から 200 データ (Yellowish scene) を用いた．つまり，照明条件 2 種類，シーン構成色の色相の偏り 5 種類に対して解析をおこなった．

4. 結果

図 4 は照明条件 2 種類，シーン構成色の色相の偏り

条件 5 種類の組み合わせ計 10 条件の色度輝度分布に対して，3 種類の色恒常性モデルによる照明光推定結果を示している．(a)は色度の平均値，(b)は LMS 錐体応答の平均値を表す．(c)はオプティマルカラーモデルによる照明光推定結果を示す．

図中のシンボル+と×は，それぞれ日なたと日陰それぞれの実際の光源の色度を示す．直線で結ばれた 5 つの□と○のシンボルは，日なたと日陰それぞれ各モデルの照明光推定値であり，(a)，(b)の図ではその 5 つの中央に位置する□および○は全 400 データに対する結果，そこから上下左右方向に位置する□と○はそれぞれシーンの構成色が青，黄，緑，赤に偏った 200 データの条件に対する結果を表す．(c)では多数の□または○が重なっているところに全データの条件および青，緑に偏った条件に対する結果が位置し，少し右下に赤に偏った条件に対する結果，さらに右下方向に単独で位置するのが黄に偏った条件に対する結果である．

(a)，(b)ではシーンの構成色に色相の偏りが大きい条件では全 400 データに対して照明光推定結果が大きく変化していることがわかる．一方，(c)ではシーンの構成色に色相の偏りが大きい条件と，全 400 データ用いた条件の間の照明光推定結果の差は小さい．ただし(c)においても，色相が黄色方向に偏った 200 データを用いた条件 (Yellowish scene) の結果のみ，全 400 データに対する照明光推定結果の差が大きいという結果が表れた．

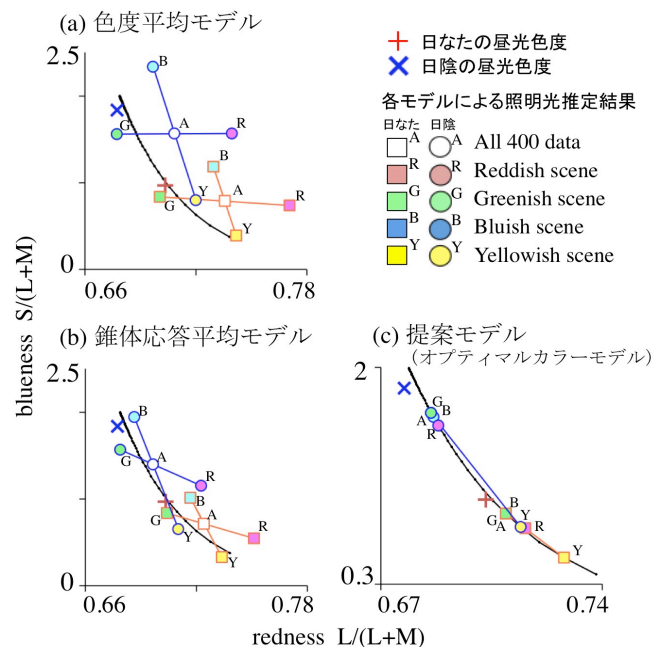


図 4．各種色恒常性モデルによる照明光推定結果．MacLeod - Boynton 色度図における色度を表す．+と×はそれぞれ日なた日陰条件の光源の色度，□と○はそれぞれ日なた日陰の照明光推定結果の色度を表す．

次に、オプティマルカラーモデルにおいて照明光の推定対象を黒体放射のみと限定していることが、他のモデルよりも推定誤差が小さい要因となっている可能性を検討するため、図4の色度をそれぞれ黒体放射の色温度に置き換えた結果を図5に示す。色度から色温度への変換には、対数で表した色度座標における黒体軌跡の線形近似式 $\log b = -19.565 \times \log r + 2.9888$ が傾き-1になるよう軸を正規化した後に、各色度点から最短距離となる黒体軌跡上の色度点を求めて、色温度と色度座標 *blueness* の関係を表す多項式近似曲線を用いて色温度を算出した。結果は、いずれのモデルも全ての条件において照明光推定結果が実際の光源よりも低い色温度を示した。シーンの構成色の色相の偏りに対しては、オプティマルカラーモデルの照明光推定結果は色相が黄色に偏る条件 (*Yellowish scene*) を除いて条件間の差が小さく安定している。一方、他のモデルでは条件間の照明光推定結果に大きな差が表れている。

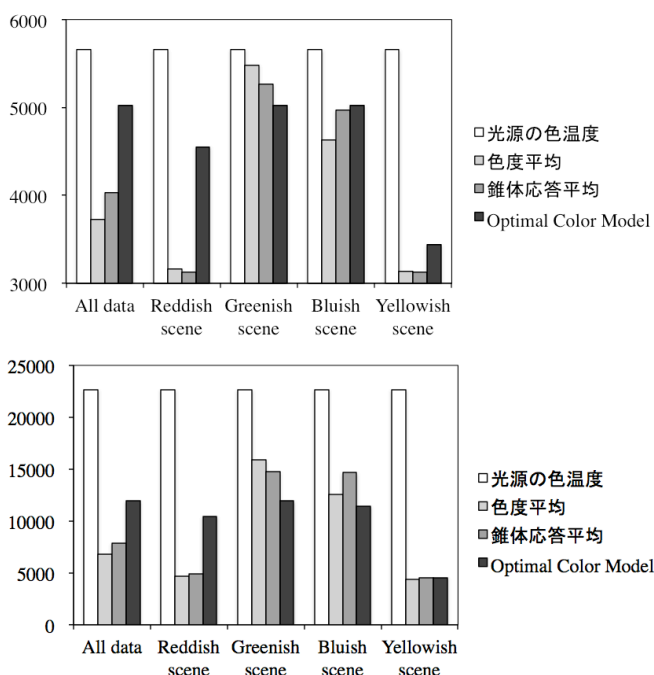


図5. 日なた条件(上)と日陰条件(下)における、各モデルの照明光推定結果。縦軸は色温度(K)を表す。

5. 考察

本研究では、自然環境における視覚系への入力光の色度輝度分布を昼光と自然物体の実測結果からシミュレートした。さらに、その色度輝度分布に対して、光源の種類や、シーンの構成色の色相の偏りを変化させた条件において、オプティマルカラーモデルによる照明光推定をおこなった。モデルによる照明光推定結果の評価には、推定値と実際の光源の差、および、同一の照明光を仮定したシーンに対して構成色の色相を偏

らせた条件による照明光推定結果のバラツキの大きさを指標とした。これらの結果を、従来モデルである色度平均や錐体応答平均による照明光推定結果と比較したところ、オプティマルカラーモデルでは、色相の偏りの影響を受けず従来モデルよりも非常に安定した照明光推定結果を示した。

オプティマルカラーモデルにおいても、色相が黄色に偏る条件では他のモデルと同様に誤差が大きくなった。この要因のひとつは、色相による輝度の違いと考えられる。オプティマルカラーモデルでは、白色点を頂点として彩度上昇により輝度が減衰するオプティマルカラーの輝度分布形状との一致度により照明光を推定する。図3から、この彩度上昇と輝度減衰の関係が白色点から黄色方向への変化、つまり *blueness* が白色点から小さくなる方向では明確に表れていない。そのため、誤差が大きくなったと考えられる。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP26780413, JP25245065 の助成を受けたものです。

文 献

- [1] D. H. Foster, "Color constancy," *Vis. Res.* 51, 674–700 (2011).
- [2] G. Buchsbaum, "A spatial processor model for object color perception," *J. Franklin Institute* 310, 1–26 (1980).
- [3] A. Gilchrist, C. Kossyfidis, F. Bonato, T. Agostini, J. Cataliotti, X. Li, B. Spehar, V. Annan, and E. Economou, "An anchoring theory of lightness perception," *Psychol. Rev.* 106, 795–834 (1999).
- [4] J. Golz and D. I. A. MacLeod, "Influence of scene statistics on colour constancy," *Nature* 415, 637–640 (2002).
- [5] K. Uchikawa, K. Fukuda, Y. Kitazawa, and D. I. A. MacLeod, "Estimating illuminant color based on luminance balance of surfaces," *J. Opt. Soc. Am. A* 29, A133–A143 (2012).
- [6] K. Fukuda and K. Uchikawa, "Color constancy in a scene with bright colors that do not have a fully natural surface appearance," *J. Opt. Soc. Am. A* 31, A239–A246 (2014).
- [7] T. Morimoto, K. Fukuda, and K. Uchikawa, "Effects of surrounding stimulus properties on color constancy based on luminance balance," *J. Opt. Soc. Am. A* 33, A214–A227 (2016).
- [8] D. Macadam, "The theory of the maximum visual efficiency of colored materials," *J. Opt. Soc. Am. A* 25, 249–252 (1935).
- [9] A. Stockman and L. T. Sharpe, "Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype," *Vis. Res.* 40, 1711–1737 (2000).
- [10] D. I. A. MacLeod and R. M. Boynton, "Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance," *J. Opt. Soc. Am. A* 69, 1183–1186 (1979).